

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence :/MM/2021

المرجع :/م/م / 2021

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

Réalisé par :

GHEZALI Oussama

Et

NAIB Aghiles

Thème

Etude de le ferrorésonance dans le réseau électrique

Soutenu le :/...../2023

Devant le Jury composé de :

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



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة)..... **نايب اغيلاسي**الصفة: طالب، استاذ، باحث **طالب**

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: **409 995 448**والصادرة بتاريخ: **2022/09/20**

المسجل(ة) بكلية / معهد **العلوم التطبيقية** قسم **الهندسة الكهربائية**

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: **Etude de la foudre dans les réseaux électriques**

تحت إشراف الأستاذ(ة): **محمد الغني**

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: **2023/07/06**

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

% **12**

النسبة:

الامضاء:



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة)..... **نيزالي أسامة**الصفة: طالب، استاذ، باحث..... **ك.ب**
الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: **٤٥٩ 840 099**.....والصادرة بتاريخ: **2022/09/05**
المسجل(ة) بكلية / معهد..... **العلوم التطبيقية** قسم..... **الهندسة الكهربائية**
والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).
عنوانها:..... **Etude de la ferorésonance dans les réseaux Electriques**.....

تحت إشراف الأستاذ(ة):..... **ب.حوي عبد الغني**.....

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ:..... **2023/07/06**.....

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:



%

11

النسبة:

الامضاء:



Dédicace

Je dédie ce projet :

À ma chère mère,

À mon cher père,

Pour leur patience, leur amour, leur soutien Et leurs encouragements.

À mon frère Adel

À mes chères sœurs Bessma et Nessrine.

À ma chère tante et mes chères cousines Sarah et Sofya

À mes chers amis Lamine, saïd, youssef, abdou, safouane et ahmed

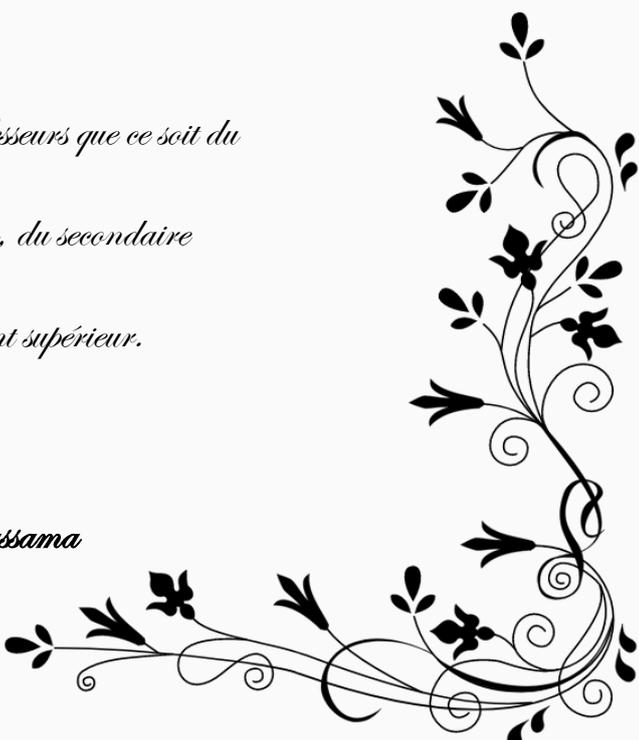
À mon cher binôme Ghiles.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du

Primaire, du moyen, du secondaire

Ou l'enseignement supérieur.

Ghezali Oussama





Dédicace

Je dédie ce projet :

À ma chère mère,

À mon cher père,

Pour leur patience, leur amour, leur soutien

Et leurs encouragements.

À mes chères sœurs

À mes chers amis Saber, Lamine, Saïd, Abdou et Nabil

À mon chère binôme Oussama.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire

Ou l'enseignement supérieur.

Naïb Aghiles



Remerciement

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au Dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné la santé, le courage, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien nos études et pour nous avoir guidés tout au long de ce travail.

Nous aimerions également remercier chaleureusement Monsieur Yahiou Abdelghani, Professeur à l'université Akli Mchand Oulhadj de Bouira, pour sa confiance en nous proposant ce thème de recherche. Nous lui sommes extrêmement reconnaissants de nous avoir encadrés et encouragés tout au long de ce travail.

Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont soutenus et aidés tout au long de ce projet.

Enfin, nous adressons nos remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et qui ont ainsi contribué à sa réalisation.

Résumé :

L'objectif de notre travail consiste à mener une étude expérimentale sur le phénomène de la ferrorésonance à l'aide du logiciel ATPDraw. Grâce à ce programme, nous pourrions analyser les effets de la ferrorésonance sur le réseau électrique et étudier les situations réelles qui peuvent entraîner ce phénomène.

En utilisant ATPDraw, nous pourrions simuler et visualiser les différents scénarios de ferrorésonance, examiner les paramètres et les conditions qui influent sur son apparition, et évaluer ses conséquences sur le fonctionnement du réseau électrique.

Cette approche expérimentale nous permettra d'acquérir une compréhension approfondie de la ferrorésonance, de ses mécanismes et de ses impacts, ce qui contribuera à améliorer la planification et la conception des systèmes électriques pour éviter les situations préjudiciables liées à la ferrorésonance.

ملخص :

يتيح لنا هذا البرنامج فهم تأثير الفيوروزنانس ATPDraw بهدفنا البحثي هو دراسة تجريبية لظاهرة الفيوروزنانس باستخدام برنامج على الشبكة الكهربائية ودراسة الحالات الواقعية التي يمكن أن تؤدي إلى حدوث الفيوروزنانس.

، سنتمكن من محاكاة وتصوير سيناريوهات مختلفة للفيوروزنانس، ودراسة المعلمات والظروف ATPDraw من خلال استخدام التي تؤثر في حدوثها، وتقييم آثارها على عمل الشبكة الكهربائية.

ستمكننا هذه الدراسة التجريبية من اكتساب فهم عميق للفيوروزنانس وآلياتها وتأثيراتها، مما سيساهم في تحسين تخطيط وتصميم الأنظمة الكهربائية لتجنب الحالات المؤذية المرتبطة بالفيوروزنانس.

Abstract :

Our research objective is to conduct an experimental study on the phenomenon of ferroresonance using the ATPDraw software. This program allows us to understand the effects of ferroresonance on the electrical network and study the real-life situations that can lead to ferroresonance.

By using ATPDraw, we will be able to simulate and visualize different scenarios of ferroresonance, examine the parameters and conditions that influence its occurrence, and evaluate its consequences on the operation of the electrical network.

This experimental approach will enable us to gain an in-depth understanding of ferroresonance, its mechanisms, and its impacts, which will contribute to improving the planning and design of electrical systems to avoid detrimental situations related to ferroresonance.

Table des matières

Résumé :	IV
Table des matières	V
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XII
Introduction générale :	1
Chapitre I. Généralités sur le réseau électrique	I
I.1.Introduction.	3
I.2.Généralités sur le Réseaux Electriques	4
I.3.Définition de réseau électrique.	5
I.4.Les niveaux de tensions des réseaux.	5
I.5. Les éléments constitutifs d'un réseau électrique.	6
I.5.1. Les générateurs	6
I.5.2. Les lignes électriques	6
I.5.3. Les postes de transformation	6
I.5.4. Les postes d'interconnexion, d'alimentation et de distribution	7
I.6. Fonctionnement du réseau électrique	8
I.7. Structure de réseau électrique	8
I.7.1. Réseau de transport	8
I.7.2. Réseau de répartition.....	9
I.7.3. Réseau de distribution.....	9
I.7.4. Réseau d'interconnexion.....	9
I.8. Les types de réseaux électriques	10
I.8.1. Réseaux radiaux	10
I.8.2. Réseaux maillés	10
I.8.3. Réseaux bouclés.....	11
I.9. Composants des lignes aériennes.	11

I.9.1. Les pylônes	12
I.9.2. Les câbles conducteurs	12
I.9.3. Câble de garde.....	13
I.9.4. Les isolateurs	14
I.9.5. Les Parafoudres.....	15
I.9.6. Eclateurs à cornes	16
I.9.7. Mise à la terre des pylônes.....	17
I.10. Transformateur	19
I.10.1. Constitution.....	19
I.10.1.1. Circuit magnétique.....	19
I.10.1.2. Circuit électrique.....	20
I.10.2. Principe de fonctionnement d'un transformateur	21
I.10.3. Type de transformateur	22
I.10.3.1. Transformateur de puissance	22
I.10.3.2. Transformateur monophasé	23
I.10.3.2.1. Schéma électrique équivalent :	23
I.10.3.3. Transformateur triphasé	23
I.10.3.4. Transformateurs à colonnes	24
I.10.3.5. Transformateur cuirassée	24
I.10.3.6. Transformateur de tension	25
I.10.3.7. Transformateur de courant.....	25
I.11. Modélisation des transformateurs	25
I.11.1. Transformateur monophasé linéaire sans saturation	25
I.11.2. Transformateur monophasé avec saturation	26
I.12. Modélisation du cycle d'hystérésis.....	28
I.12.1. Tests expérimentaux	28
II.13. Modélisation des lignes électriques.....	30
I.13.1. Modèle de lignes courtes	30

I.13.2. Modèle de lignes moyenne	31
I.13.2.1 Le modèle nominal en π	31
I.13.2.2. Le modèle nominal en T	32
I.14. Les Surtension :	33
I.14.1. Définition :	33
I.14.2. Origine des surtensions :.....	34
I.14.2.1. Origine interne :	34
I.14.2.2. Origine externe :	35
I.14.3. Classification des surtensions :	35
I.14.4. Effets de surtensions :	35
I.15. Conclusion	36
Chapitre II. La ferrorésonance.....	I
II.1. Introduction.....	38
II.2. Résonance et ferrorésonance	38
II.2.1. Résonance	38
II.2.1.1. Résonance série	38
II.2.1.2. Résonance parallèle	40
II.2. Ferrorésonance.....	41
II.2.2.1. Ferrorésonance série	41
II.2.2.2. Ferrorésonance parallèle	43
II.2.3. Différence entre résonance et ferrorésonance	44
II.3.5 Régime chaotique	47
II.4. Différentes approches pour l'étude de la ferrorésonance dans les réseaux électriques :	48
.....	
II.4.1. Méthode analytique	48
II.4.2. Simulation par analogie	48
II.4.3) Essais réels sur le terrain	49
II.4.4) Mesures en laboratoire	49
II.4.5) Logiciels de calcul numérique (simulateurs)	49

II.5. Situations réelles pouvant donner lieu à la ferrorésonance	50
II.5.1. Transformateur de tension alimenté par la capacité d'un ou de plusieurs disjoncteurs ouverts.....	51
II.5.2 Transformateur condensateur de tension (TCT).....	52
II.5.3 Reprise de service ou renvoi de tension sur une longue ligne.....	53
II.5.4. Transformateurs de tension (TT) raccordés à un réseau à neutre isolé	55
II.6. CONCLUSION :	56
Chapitre III. Application et discussion des résultats	I
III.1. Introduction	60
III.2. Description du modèle à étudier	60
III.3. Description du logiciel ATPDraw :	60
III.3.1. Transformateur saturable monophasé (utilisé dans la simulation).....	61
III.4. Identification des paramètres du transformateur	61
III.4.1. Model de transformateur utilisé	61
III.4.2. Analyse des paramètres du circuit équivalent à partir de l'essai à vide.....	62
III.4.3. Analyse des paramètres du circuit équivalent à partir de l'essai court-circuit	64
III.4.4. Paramètres de transformateur.....	66
III.4.5. Saturation des branches magnétisantes	66
III.5. Caractéristiques de la ligne :	68
III.6. Simulation et interprétation des résultats :.....	68
III.6.1. Premiers cas (Transformateur à vide).	69
III.6.2. Deuxième cas (Transformateur en charge)	77
III.6.2.1. Charge purement résistive.....	77
III.6.2.1.1. Interprétation des résultats :	78
III.6.2.2. Une charge RL :	79
III.6.2.2.1. Interprétation des résultats :	80
III.7. Conclusion :.....	80
Conclusion générale	82

Liste des figures

Figure I. 1 Caractéristiques calculées en valeurs	4
Figure I. 2 Les lignes électriques	6
Figure I. 3 Les postes de transformation.....	6
Figure I. 4 Structure de réseau électrique	7
Figure I. 5 Réseau radial	9
Figure I. 6 Réseau maillé	10
Figure I. 7 Réseau bouclé.....	10
Figure I. 8 Photo d'une ligne haute tension	11
Figure I. 9 Photo d'un isolateur	14
Figure I. 10 Photo d'un parafoudre.....	15
Figure I. 11 Eclateur MT avec tige anti-oiseaux.....	16
Figure I. 12 Mise à la terre des pylônes	17
Figure I. 13 Circuit magnétique à colonne.....	18
Figure I. 14 Circuit magnétique de forme cuirassée	19
Figure I. 15 Circuit électromagnétique simple	20
Figure I. 16 Schéma électrique équivalent d'un transformateur.....	22
Figure I. 17 Transformateurs triphasés	22
Figure I. 18 Transformateur à colonnes	23
Figure I. 19 Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence sans saturation.....	24
Figure I. 20 Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence avec pertes fer, sans saturation.....	25
Figure I. 21 Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence avec saturation	26
Figure I. 22 Schéma utilisé pour la mesure du cycle d'hystérise.....	27
Figure I. 23 Cycle d'hystérésis expérimental du transformateur d'essai Shell.....	28
Figure I. 24 Lignes courtes	29
Figure I. 25 La ligne de transmission représentée par un quadripôle	29
Figure I. 26 Modèle en π de ligne moyenne	30
Figure I. 27 Modèle en de ligne moyenne T	31
Figure I. 28 Exemple de surtension	32

Figure II. 1 Circuit linéaire résonant.....	36
Figure II. 2 Représentation de Fresnel d'un circuit RLC série alimente par une tension ES.....	37
Figure II. 3 Caractéristique de VC, VL, I et Es en résonance	38
Figure II. 4 Exemple de la forme de la surtension de résonance (pas de distorsion)	38
Figure III. 5 Circuit R, L, C parallèle alimenté par une source de courant J.....	39
Figure II. 6 Circuit ferrorésonant série	40
Figure II. 7 Caractéristique E-I (ou V-I) du circuit de ferrorésonance	40
Figure II. 8 Ferrorésonance série - résolution graphique.....	41
Figure II. 9 Circuit ferrorésonant parallèle	42
Figure II. 10 Ferrorésonance parallèle - résolution graphique	43
Figure II. 11 a : sous-harmonique de période 2T/ b : Interprétation géométrique de la section de Poincaré.....	45
Figure II. 12 a, d, g : Spectre du signal / b, e, h : Diagramme du plan de phase/ c, f, k : Section de Poincaré des trois régimes.....	47
Figure II. 13 Schéma d'un circuit ferrorésonant dans un transformateur de tension	51
Figure II. 14 Schéma électrique d'un transformateur condensateur de tension [32].....	53
Figure II. 15 Schéma équivalent sans pertes d'un circuit ferrorésonant parallèle [31]	54
Figure II. 16 Représentation d'un renvoi de tension brusque.....	54
Figure II. 17 Représentation d'un renvoi progressif de tension	54
Figure II. 18 Surtension enregistrée lors d'un renvoi de tension [31]	55
Figure II. 19 Transformateurs de tension (TT) raccordés à un réseau à neutre isolé,[35].....	56
Figure III. 1 Représentation du modelé étudiant ATPDraw	57
Figure III. 2 Symbole du transformateur TRAFOS dans ATPDraw.....	58
Figure III. 3 (a) plaque signalétique de transformateur. (b) transformateur réel.....	58
Figure III. 4 Montage de l'essai à vide du transformateur monophasé	59
Figure III. 5 Montage de l'essai en court-circuit d'un transformateur monophasé.....	61
Figure III. 6 Courbe de la résistance non linéaire $v = f(ir)$	64
Figure III. 7 Courbe de saturation $\lambda = f(il)$	65
Figure III. 8 Schéma électrique du réseau à vide	66
Figure III. 9 Schéma électrique du réseau en Régime Transitoire	66
Figure III. 10 Schéma électrique du réseau En Charge	66
Figure III. 11 Schéma équivalent en régime permanent à vide	67
Figure III. 12 La courbe de tension Va avec C2=20 μ F.....	67
Figure III. 13 La courbe de tension Vb avec C2=20 μ F.....	68

Figure III. 14 La courbe de tension V_a avec $C_2=60 \mu\text{F}$	68
Figure III. 15 La courbe de tension V_b avec $C_2=60 \mu\text{F}$	69
Figure III. 16 La courbe de tension V_a avec $C_2=100 \mu\text{F}$	69
Figure III. 17 La courbe de tension V_b avec $C_2=100$	70
Figure III. 18 Schéma équivalent en Régime transitoire à vide	70
Figure III. 19 La courbe de tension en régime transitoire V_a avec $C_2=20 \mu\text{F}$	71
Figure III. 20 La courbe de tension en régime transitoire V_b avec $C_2=20 \mu\text{F}$	71
Figure III. 21 La courbe de tension en régime transitoire V_a avec $C_2=60 \mu\text{F}$	72
Figure III. 22 La courbe de tension en régime transitoire V_b avec $C_2=60 \mu\text{F}$	72
Figure III. 23 La courbe de tension en régime transitoire V_a avec $C_2=100 \mu\text{F}$	73
Figure III. 24 La courbe de tension en régime transitoire V_b avec $C_2=100 \mu\text{F}$	73
Figure III. 25 Schéma équivalent en régime transitoire avec une charge résistive	74
Figure III. 26 La courbe de tension V du circuit en charge avec $C_2=20 \mu\text{F}$	75
Figure III. 27 La courbe de tension V du circuit en charge avec $C_2=100 \mu\text{F}$	75
Figure III. 28 Schéma équivalent e régime transitoire avec une charge R_L	76
Figure III. 29 La courbe de tension V du circuit en charge R_L avec $C_2=20 \mu\text{F}$	77
Figure III. 30 La courbe de tension V du circuit en charge R_L avec $C_2=100 \mu\text{F}$	77

Liste des tableaux

Tableau I. 1 La norme NF C 15-100 (La norme française)	5
Tableau I. 2 La norme CEI (Commission Électrotechnique Internationale)	5
Tableau I. 3 Propriétés des matériaux conducteurs les plus utilisés.....	12
Tableau I. 4 Caractéristiques du transformateur d'essai Shell.....	28
Tableau III. 1 Résultats de l'essai à vide	60
Tableau III. 2 Résultats du l'essai court-circuit	61
Tableau III. 3 Caractéristiques calculées en valeurs	63

Introduction générale

Introduction générale :

La ferrorésonance est un phénomène complexe d'interaction oscillatoire entre les inductances de magnétisation non linéaires des noyaux ferromagnétiques et un système de condensateurs. Lorsque ces éléments sont présents dans un circuit électrique, des échanges d'énergie se produisent, entraînant des oscillations et des variations de tension et de courant. [1].

Les oscillations caractéristiques de la ferrorésonance peuvent entraîner des tensions et des courants élevés et distordus, ce qui peut entraîner une surchauffe, une dégradation de l'isolation des transformateurs et des perturbations importantes sur les réseaux électriques. La manifestation de ce phénomène est influencée par différents paramètres et situations présents dans le réseau électrique. Afin d'approfondir notre compréhension de la ferrorésonance, il est nécessaire de :

- Énumérer les éléments qui exercent une influence sur ce phénomène.
- Discerner les scénarios concrets susceptibles de déclencher la ferrorésonance.
- Réaliser une analyse de la ferrorésonance à l'aide de techniques existantes telles que les méthodes numériques et la méthode de la bifurcation.

En utilisant ces approches, il est possible d'évaluer et d'anticiper les risques de ferrorésonance, et de mettre en place des mesures préventives pour minimiser ses effets indésirables sur le réseau électrique. [2], [3].

Au cours des dernières décennies, de nombreuses études et travaux de recherche ont été réalisés sur la ferrorésonance. Ces études ont contribué à approfondir notre compréhension de ce phénomène complexe et à développer des méthodes d'analyse et de prévention plus avancées. Les chercheurs ont exploré différents aspects de la ferrorésonance, tels que ses mécanismes fondamentaux, ses facteurs de risque, ses effets sur les équipements électriques, et les techniques de modélisation et de simulation pour évaluer et prévenir ses conséquences néfastes. Ces travaux de recherche ont permis de progresser dans la gestion et l'atténuation des risques liés à la ferrorésonance dans les réseaux électriques., [4 - 6]. A titre d'exemple, on peut citer :

Horak John [4] qui présente une étude, regroupant 25 références publiées depuis 1950 à 2003, traite principalement de la confusion sur ce qui constitue un circuit ferrorésonant.

S. Hassan et Al [5] ont élaboré une étude regroupant 14 références, publiées depuis 1950 à 1993. Celle-ci traite de la ferrorésonance dans les réseaux de distribution de puissance et des diverses conditions qui donnent lieu à l'apparition de cette ferrorésonance dont la plus répandue résulte des

conditions de tension indésirable. Elle propose également la prévention de l'apparition de la ferrorésonance.

J.P. Bickford et Al [6] ont également traité le cas des surtensions transitoires sur les systèmes de puissance. Cette étude de 175 références publiées depuis 1955 à 1985 couvre une large plage sur la dynamique des tensions transitoires à partir desquelles se posent des problèmes de stabilité dans la distribution d'énergie en basse tension.

Depuis 2003 à ce jour, un grand nombre de publications sont parues et dont nous ne citons que quelques-unes par rapport au thème que nous étudions, [7, 8, 9]. Il s'agit principalement des oscillations qui présentent des modes sans fréquence de résonance définie. Ces modes sont de quatre types. Il s'agit du mode fondamental, du mode sous-harmonique, du mode quasi-périodique et du mode chaotique que nous expliquerons dans les chapitres suivants.

L'objet de notre travail concerne l'étude de la ferrorésonance dans les transformateurs monophasés, ainsi que son impact sur le réseau électrique.

Le présent mémoire est structuré comme suit :

- Le premier chapitre présente des généralités sur les réseaux électriques.
- Le deuxième chapitre traite le phénomène de ferrorésonance.
- Dans le troisième chapitre, on étudie une ligne de 220V, et on détail les différents résultats et la discussion des résultats obtenus des simulations de notre système

Ce travail se termine par une conclusion générale dans laquelle on résume les déduits essentiels du travail.

Chapitre I. Généralités sur le réseau électrique

I.1.Introduction.

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures dont le but est d'acheminer l'énergie électrique à partir de centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Le réseau électrique englobe un vaste réseau de lignes s'étendant sur des milliers de kilomètres, ainsi qu'un grand nombre de postes de transformation et d'équipements de commutation, soigneusement dimensionnés pour garantir un approvisionnement électrique fiable. Des systèmes de contrôle hiérarchisés sont en place pour maintenir la stabilité de la tension et de la fréquence.

Les pays industrialisés font face à une demande croissante en électricité, et il est essentiel que les producteurs d'électricité puissent répondre aux besoins de leurs clients à tout moment, en proposant des tarifs kilowattheure aussi bas que possible.

Le rôle du producteur d'électricité consiste à :

- Produire de l'énergie électrique à partir de différentes sources, telles que les centrales hydroélectriques et thermiques.
- Transporter cette énergie sur de longues distances en utilisant des lignes à haute tension.
- Distribuer cette énergie aux utilisateurs finaux, tels que les ménages, les entreprises et les industries.

Donc, exploiter un réseau électrique est plus difficile que gérer un réseau de distribution de gaz ou d'eau, car l'énergie électrique ne peut pas être stockée à grande échelle. Cependant, elle présente l'avantage d'être facilement transportée sur de longues distances via des fils conducteurs.

Le transport de l'énergie électrique à de grandes distances se fait généralement par des lignes aériennes, car les lignes souterraines ont des limitations en termes de puissance qu'elles peuvent transporter efficacement sur de longues distances. Les lignes aériennes offrent une capacité supérieure pour le transport de grandes quantités d'énergie sur de longues distances, ce qui les rend préférables dans de nombreux cas. [10].

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les réseaux électriques et la description des différents éléments qui constituent un réseau. Et ainsi nous étudierons le transformateur dans son ensemble, en examinant son rôle, sa théorie, les principes de base et son fonctionnement, ainsi que la modélisation de transformateurs et les lignes courtes et moyennes et en parlons sur les surtensions et ces effets sur le réseau électrique.

I.2.Généralités sur le Réseaux Electriques.

Dans de nombreux cas, il n'est pas possible de produire de l'énergie électrique à proximité immédiate des lieux de consommation. Par conséquent, l'énergie électrique est généralement produite par des groupes de production, souvent appelés "G", fonctionnant à des tensions moyennes telles que 15,5 kV, 12,5 kV, 11 kV ou 5,5 kV. Ces groupes de production sont situés à des distances variables des centres de consommation. Après la production, l'énergie électrique est ensuite transformée à des tensions élevées, telles que 90 kV, 150 kV ou 225 kV, à l'aide de transformateurs élévateurs, communément appelés "TE". Ces transformateurs sont installés à la sortie des générateurs pour augmenter la tension de l'électricité produite, permettant ainsi un transport plus efficace sur de longues distances. La totalité de l'énergie produite, ainsi que tout surplus disponible, est acheminée vers les centres de consommation par le biais d'un réseau de lignes électriques, communément désignées par "L", fonctionnant à haute tension. Ces lignes peuvent s'étendre sur plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres. À l'arrivée dans les centres de consommation, l'énergie électrique est à nouveau transformée à l'aide de transformateurs abaisseurs, également appelés "TA", pour être distribuée à une tension moyenne telle que 30 kV ou 10 kV.[11] Les postes sources et les transformateurs assurent la délimitation des frontières entre les différents niveaux de tension du réseau électrique. Ils permettent une transition contrôlée de l'électricité d'un niveau de tension à un autre, facilitant ainsi la distribution de l'énergie électrique de manière efficace [12].

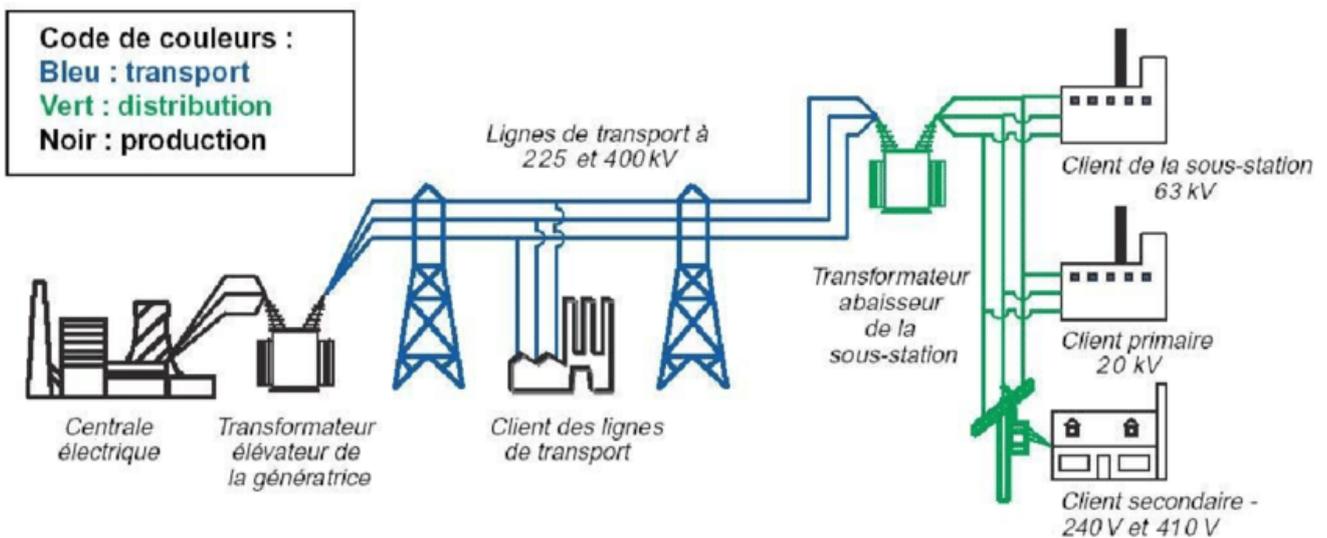


Figure I. 1 Caractéristiques calculées en valeurs

I.3.Définition de réseau électrique.

Un réseau électrique est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'un niveau tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique est dissocié en quatre grandes parties (production, transport, distribution et consommation).

I.4.Les niveaux de tensions des réseaux.

Dans la plupart des pays, les installations électriques sont soumises à des réglementations internationales. Il est crucial de prendre en compte ces contraintes locales avant de commencer la conception d'une installation électrique. Cela garantit que l'installation est conforme aux normes de sécurité, de performance et de compatibilité requises par la législation en vigueur.

Les niveaux de tension sont définis par :

Tableau I. 1 La norme NF C 15-100 (La norme française)

Domaine de tension		Tension Alternative	Valeurs usuelles
Tres basse tension	TBT	$U < 50V$	12-24-48V
Basse tension B	BTA	$50 < U < 500V$	230 – 400V
	BTB	$500 < U < 1000V$	690V
Haute tension A	HTA1	$1 < U < 40KV$	5.5 - 6.6- 10 – 15 – 20 -33KV
	HTA2	$40 < U < 50KV$	40.5KV
Haute tension B	HTB1	$50 < U < 130KV$	63-90KV
	HTB2	$130 < U < 350KV$	150-225KV
	HTB3	$350 < U < 500KV$	400KV

Tableau I. 2 La norme CEI (Commission Électrotechnique Internationale)

Domain de tension		Tension Alternative	Valeurs usuelles
Tres basse tension	BT	$100 < U < 1000V$	400 – 690 – 1000V
Basse tension B	MT	$1 < U < 35 kV$	3.3 – 6.6 – 11 – 22 -32kV
Haute tension B	HT	$35 < U < 230 kV$	45 – 66 –100 – 132 – 150 – 220Kv

I.5. Les éléments constitutifs d'un réseau électrique.

I.5.1. Les générateurs

Le générateur ou la source est un élément essentiel du réseau électrique. Son rôle consiste à transformer l'énergie provenant de sources non électriques telles que l'hydraulique ou la thermique en énergie électrique. Ils sont installés à différents endroits du réseau et sont conçus pour fournir une puissance prédéfinie à une tension déterminée à l'avance. [14]

I.5.2. Les lignes électriques

Une ligne électrique est composée de conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires qui ont pour but de transporter l'énergie électrique du producteur (centrale électrique) vers le consommateur (ville, quartier, maison, complexe industriel). Les conducteurs utilisés sont généralement en aluminium, cuivre ou bronze. Les isolants peuvent être constitués d'une partie solide telle que la porcelaine, le verre, le papier ou les matières plastiques, combinée avec un gaz tel que l'air, le SF6 ou un liquide comme l'huile.



Figure I. 2 Les lignes électriques

I.5.3. Les postes de transformation

Un poste de transformation est une installation qui comprend des transformateurs, des dispositifs de protection tels que des disjoncteurs, des sectionneurs, des parafoudres, ainsi que des dispositifs de mesure et de contrôle.

Les postes de transformation jouent un rôle crucial à la sortie des centrales électriques en convertissant la moyenne tension de production en haute tension ou très haute tension. Cette

conversion est nécessaire pour permettre le transport efficace de l'énergie électrique dans des conditions économiquement viables. Une fois la tension élevée établie pour le transport, elle doit ensuite être réduite à nouveau au niveau d'autres postes de transformation successifs afin d'alimenter les réseaux de distribution et les réseaux de distribution basse tension.



Figure I. 3 Les postes de transformation

I.5.4. Les postes d'interconnexion, d'alimentation et de distribution

Les interconnexions entre les réseaux de transport d'électricité sont utilisées pour le transfert bidirectionnel de l'énergie d'un territoire à un autre. Leur objectif principal est de garantir un approvisionnement bilatéral en énergie électrique entre des systèmes électriques qui peuvent avoir des degrés d'autonomie différents. En cas de défaillance soudaine dans l'un des systèmes, ces interconnexions permettent de compenser en fournissant de l'énergie depuis l'autre système.

L'interconnexion des réseaux électriques entre les pays voisins présente plusieurs avantages, tels que l'établissement d'une solidarité et la diversification des sources de production.

- Pour permettre le transport de l'énergie produite par les nouvelles sources renouvelables, il est nécessaire d'adapter les infrastructures existantes. Cela garantit que l'électricité produite à partir de sources telles que l'énergie solaire ou éolienne peut être distribuée de manière efficace et fiable.
- En favorisant l'augmentation des échanges entre les régions, les infrastructures énergétiques contribuent à stimuler la concurrence et à améliorer le fonctionnement du marché. Cela permet une meilleure utilisation des ressources énergétiques disponibles et favorise une allocation plus efficace de l'électricité entre les différentes régions.

I.6. Fonctionnement du réseau électrique

Les réseaux de transport à très haute tension (THT), utilisant des tensions de 225 kV et 400kV, ont pour responsabilité de transporter l'énergie des grands centres de production vers les régions où elle est consommée. Ces réseaux THT sont souvent interconnectés, ce qui permet de partager les moyens de production et de rendre l'électricité accessible à tous les consommateurs.

Parallèlement, les réseaux de répartition à haute tension (HT), utilisant des tensions de 63 kV et 90kV, assurent la distribution régionale de l'électricité vers les points de livraison. Ces réseaux HT acheminent l'électricité de manière plus ciblée vers les zones de consommation.

Enfin, les réseaux de distribution sont chargés de fournir l'électricité à l'ensemble des clients, à l'exception de certains gros clients industriels qui sont directement alimentés par des réseaux spécifiques.

Ces différents niveaux de tension dans les réseaux électriques permettent une organisation efficace du transport et de la distribution de l'énergie électrique, en assurant une adaptation aux besoins des différentes régions et types de consommateurs.

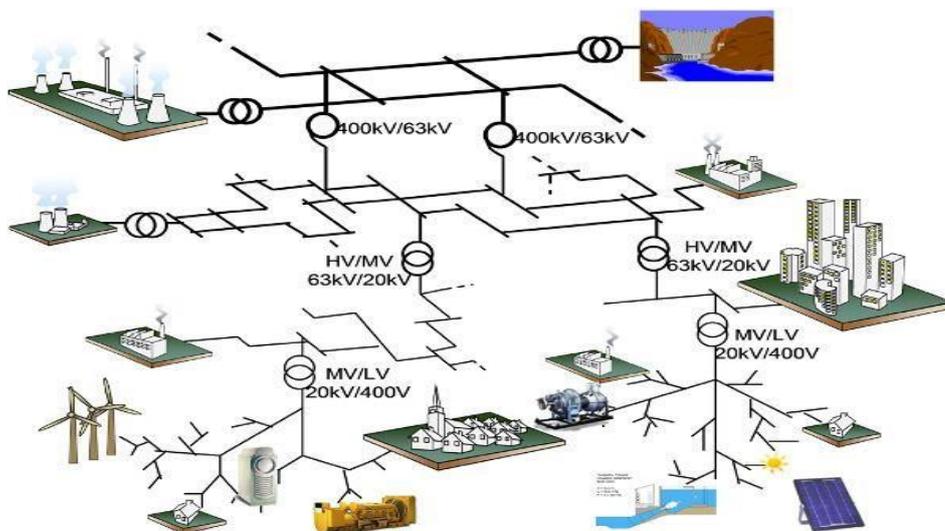


Figure I. 4 Structure de réseau électrique

I.7. Structure de réseau électrique

I.7.1. Réseau de transport

Le réseau de transport a pour responsabilité de transporter l'énergie et de maintenir en permanence l'équilibre entre la production et la consommation sur l'ensemble du territoire, en respectant des contraintes strictes liées à la stabilité de la tension. Il doit donc garantir un fonctionnement fiable non seulement dans des conditions normales, mais aussi en cas d'incidents tels

que la perte d'une ou plusieurs lignes à très haute tension ou l'arrêt imprévu d'une installation de production. [14]

I.7.2. Réseau de répartition

Le réseau de répartition, fonctionnant à des tensions de 63 kV et 90 kV, a pour rôle de transporter les réserves d'électricité qui sont constituées à la fois de l'énergie prélevée sur le réseau de transport et de productions à plus petite échelle, vers les zones de consommation. En d'autres termes, ces réseaux assurent la liaison entre le réseau de transport et les réseaux de distribution, permettant ainsi le transfert efficace de l'énergie vers les utilisateurs finaux.

Ces réseaux de répartition remplissent cette fonction en permanence, même en cas de défaillance de certaines lignes de transport qui sont conçues avec une topologie en boucle. Cela permet de garantir, sans nécessiter un maillage aussi dense que celui du réseau de transport, un acheminement sécurisé de l'énergie dans des conditions de sécurité raisonnablement assurées. [14]

I.7.3. Réseau de distribution

Les réseaux de distribution fonctionnent à des tensions de 1 à 60 kV, ont principalement une structure radiale, arborescente ou mixte. Leur mission est de transporter l'électricité depuis le réseau de distribution moyenne tension (MT) vers les points de faible consommation dans le domaine public, en permettant l'accès aux abonnés basse tension (BT). Les réseaux de distribution représentent le dernier niveau dans la structure du système électrique, assurant ainsi la livraison finale de l'électricité aux utilisateurs.

I.7.4. Réseau d'interconnexion

Le réseau d'interconnexion joue un rôle essentiel dans l'échange d'énergie entre les différentes centrales électriques en service. Il permet de transférer de l'électricité d'une source de production vers les zones de consommation, assurant ainsi un approvisionnement continu en énergie. De plus, en cas de défaillance d'une source de production ou d'un incident sur le réseau, le réseau d'interconnexion peut être utilisé pour dépanner les réseaux en redistribuant l'énergie à partir d'autres sources disponibles. Cela contribue à maintenir la stabilité et la fiabilité de l'alimentation électrique.

Le réseau d'interconnexion offre plusieurs avantages. Il permet d'optimiser les coûts d'exploitation en facilitant l'échange d'énergie entre les centrales. Ainsi, lorsque les pics de consommation ne se produisent pas simultanément dans les zones interconnectées, les centrales peuvent mieux s'ajuster pour répondre à la demande, réduisant ainsi les coûts globaux. De plus, le réseau d'interconnexion contribue à rendre les conditions de fonctionnement des différentes centrales plus régulières, favorisant ainsi une utilisation plus efficace des capacités de production. Le réseau d'interconnexion permet d'atténuer les variations de fréquence et de tension qui peuvent survenir en

raison des fluctuations de la consommation. En redistribuant l'énergie à travers le réseau, il aide à maintenir la stabilité du système électrique en équilibrant l'offre et la demande.

I.8. Les types de réseaux électriques

I.8.1. Réseaux radiaux

Effectivement, dans le cas d'un réseau de distribution radial, l'énergie est acheminée de la source vers le consommateur selon un seul chemin électrique possible. Ce type de réseau présente une structure arborescente, où l'approvisionnement en électricité se fait à partir des points d'alimentation situés dans les postes de distribution HTB/HTA ou HTA/HTA. Cette configuration de réseau est couramment utilisée pour la distribution de la moyenne tension (MT) en milieu rural.

Le réseau de distribution radial présente plusieurs avantages, notamment en permettant d'atteindre de manière économique des points de consommation situés dans des zones à faible densité de charge, qui sont souvent dispersés géographiquement. De plus, il est adapté aux réseaux industriels confrontés à des perturbations importantes. Cela signifie que chaque point de consommation est directement alimenté par une ligne électrique sans boucle de rétroaction, ce qui peut simplifier la conception et la gestion du réseau.

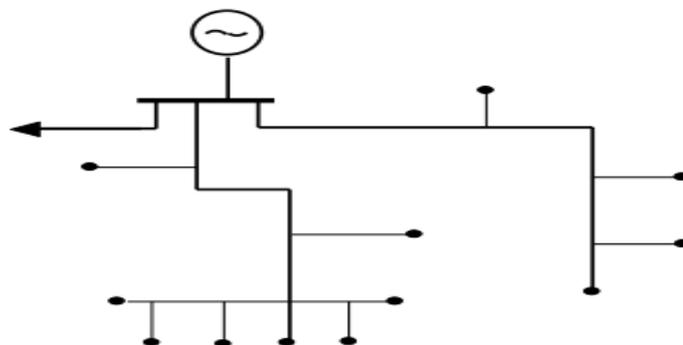


Figure I. 5 Réseau radial

I.8.2. Réseaux maillés

Le réseau est fortement ou complètement maillé. Tous les accès sont alimentés au moins de deux côtés. Tous les réseaux à HT sont exploités de cette façon pour des raisons techno économiques et de continuité de service. [15]

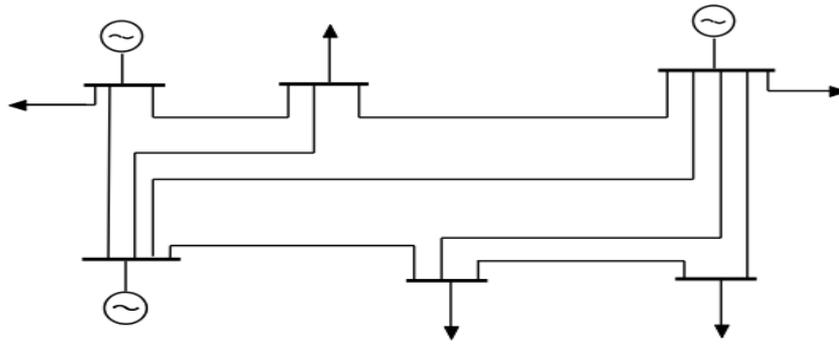


Figure I. 6 Réseau maillé

I.8.3. Réseaux bouclés

Lorsque la densité de charge augmente dans les réseaux de moyenne tension et de basse tension, il est courant de passer à un maillage partiel en formant des boucles. Dans ce type de configuration, tous les accès de la boucle sont alimentés par au moins deux lignes électriques différentes, ce qui améliore considérablement la fiabilité du service.

La formation de boucles dans le réseau électrique permet d'augmenter la sécurité d'alimentation en offrant des chemins de secours pour l'électricité en cas de panne ou de défaillance d'une ligne. Si une ligne est hors service, l'alimentation peut être réacheminée à travers les autres lignes de la boucle, évitant ainsi les interruptions d'électricité pour les consommateurs connectés à cette boucle. Cela garantit une continuité de service accrue et réduit les perturbations liées aux pannes.

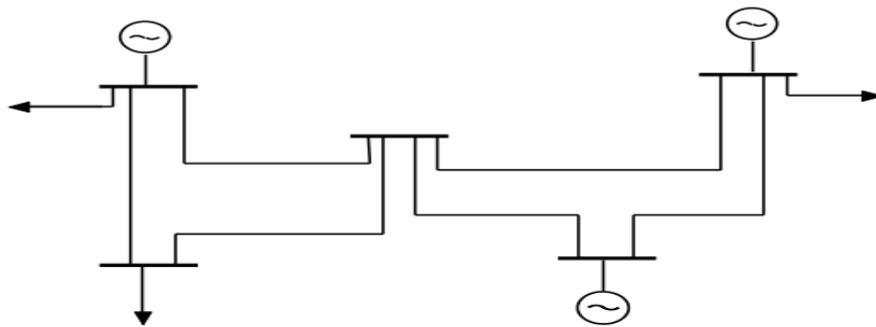


Figure I. 7 Réseau bouclé

I.9. Composants des lignes aériennes.

Une ligne aérienne est composée de pylônes, de câbles conducteurs, d'isolateurs, d'éclateurs et d'accessoires. Ces éléments travaillent ensemble pour assurer le transport efficace de l'électricité sur de longues distance [13].

I.9.1. Les pylônes

Les pylônes jouent un rôle essentiel en assurant le maintien des câbles à une distance de sécurité appropriée par rapport au sol et aux obstacles environnants. Ils garantissent la sécurité des personnes et des infrastructures situées à proximité des lignes électriques. Le choix des pylônes dépend de plusieurs facteurs tels que le type de ligne, l'environnement environnant et les contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la région.

Pour les lignes à très haute tension, des pylônes en treillis d'acier sont généralement utilisés. Ces pylônes ont une envergure plus grande et une hauteur plus élevée à mesure que la tension de la ligne augmente. La conception des pylônes varie en fonction des exigences spécifiques de chaque ligne et de la configuration des câbles conducteurs.

La conception des pylônes et leur installation doivent respecter les normes de sécurité et les réglementations en vigueur pour assurer un fonctionnement fiable et sécuritaire des lignes électriques.[13]



Figure I. 8 Photo d'une ligne haute tension

I.9.2. Les câbles conducteurs

Dans les lignes électriques, chaque phase peut être constituée d'un seul conducteur ou de plusieurs câbles conducteurs regroupés en faisceaux. Étant donné que le courant utilisé est triphasé, il y a trois câbles conducteurs (ou faisceaux de câbles) par circuit. Les lignes peuvent être simples, avec un seul circuit, ou doubles, avec deux circuits par rangée de pylônes.

Les câbles conducteurs utilisés sont généralement "nus", c'est-à-dire qu'ils ne sont pas isolés et que leur isolation électrique est assurée par l'air ambiant. La distance entre les conducteurs et entre les conducteurs et le sol est calculée de manière à assurer un bon niveau d'isolation. Cette distance augmente avec le niveau de tension.

Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés, tandis que les conducteurs en aluminium ou en alliage aluminium-acier sont préférés. Certains conducteurs sont composés d'une âme centrale en acier avec des brins d'aluminium tressés autour. Cette combinaison de matériaux permet d'obtenir les caractéristiques mécaniques et conductrices adaptées à la ligne électrique. [16]

Tableau I. 3 Propriétés des matériaux conducteurs les plus utilisés

Propriétés	Cuivre	Aluminium	Acier
Résistivité à 20°C ($10^{-8} \Omega.m$)	1.72	2.8	~15
Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	8890	2700	7800
Contrainte de Rupture à la traction (Mpa)	380 à 450	150 à 190	1410 à 1450

I.9.3. Câble de garde

Le câble de garde est un câble installé en haut de la ligne électrique et son rôle principal est de protéger contre les impacts de foudre, afin de prévenir d'éventuelles surtensions au niveau des conducteurs. Le choix du câble de garde dépend principalement de la nature et du choix des autres conducteurs de la ligne. Son installation contribue à assurer la sécurité et la fiabilité du système électrique en minimisant les risques associés aux décharges électriques atmosphériques.

Cependant, le dimensionnement du câble de garde est plus délicat que celui des autres conducteurs en raison des raisons suivantes :

Sur le plan mécanique : Le câble de garde doit résister aux mêmes contraintes mécaniques que les autres conducteurs, bien qu'il ait une section plus faible. Il doit être capable de supporter les forces du vent, de la glace et d'autres charges mécaniques qui peuvent s'exercer sur la ligne.

Sur le plan électrique : Le câble de garde doit permettre un écoulement rapide du courant de foudre du sommet du pylône vers la terre, en utilisant les pylônes ou les masses métalliques comme voie de décharge. Il doit également être capable de supporter des surcharges électriques qui peuvent se produire dans le système.

Il existe deux types principaux de câbles de garde :

- Les câbles alélec-acier normaux : Ils sont composés d'un mélange d'aluminium et d'acier et sont utilisés principalement pour leur résistance mécanique et électrique.
- Les câbles alélec-acier avec des circuits de télécommunication intégrés (OPGW) : Ces câbles sont équipés de fibres optiques à l'intérieur, ce qui permet de transmettre les

informations nécessaires pour la protection, la conduite et l'exploitation du réseau électrique.

Ils offrent également des solutions haut débit pour les collectivités territoriales.

Ainsi, le câble de garde joue un rôle essentiel dans la protection et le fonctionnement sûr du réseau électrique, en particulier en ce qui concerne la foudre et les surtensions. [17]

I.9.4. Les isolateurs

Un isolateur de ligne aérienne a pour rôle principal de fournir un lien mécanique entre les conducteurs sous tension et les structures de support, tout en assurant l'isolement électrique entre ces deux parties de la ligne. Il est conçu pour fonctionner de manière fiable pendant plusieurs années, généralement autour d'une dizaine d'années.

Un isolateur typique se compose de deux composants principaux :

1. **Partie isolante** : Il s'agit de la partie en verre trempé ou en céramique de l'isolateur. Cette partie est responsable de l'isolement électrique entre les conducteurs et les structures de support. Elle est conçue pour résister aux tensions électriques et pour éviter les fuites de courant le long de sa surface.
2. **Pièces métalliques** : Ces pièces sont fixées à la partie isolante et assurent sa connexion mécanique avec les structures de support. Elles sont généralement en acier galvanisé ou en alliage d'aluminium pour résister aux contraintes mécaniques et aux conditions environnementales.

Le choix des isolateurs se fait en prenant en compte plusieurs facteurs, tels que :

- **Tension de la ligne** : Les isolateurs doivent être dimensionnés en fonction de la tension électrique de la ligne sur laquelle ils seront installés.
- **Effets mécaniques** : Les isolateurs doivent pouvoir résister aux forces mécaniques exercées sur la ligne, telles que le vent, la glace, les vibrations, etc.
- **Pollution du site** : Dans les zones où la pollution atmosphérique est élevée, des isolateurs spéciaux, tels que des isolateurs à revêtement hydrophobe, peuvent être utilisés pour minimiser les dépôts de saleté et de poussière sur les isolateurs.
- **Catégorie de la ligne** : Les isolateurs peuvent varier en fonction de la classification de la ligne, qu'il s'agisse d'une ligne de transmission, de distribution ou d'une ligne à haute tension.

- Coût : Le prix de revient de la ligne et son importance peuvent également influencer le choix des isolateurs, en trouvant un équilibre entre les performances requises et le coût.

En résumé, les isolateurs de ligne aérienne sont des composants essentiels pour garantir l'isolement électrique et la stabilité mécanique des conducteurs sous tension. Leur sélection appropriée en fonction de la tension de la ligne, des contraintes mécaniques et des conditions environnementales est cruciale pour assurer un fonctionnement fiable du réseau électrique. [10]



Figure I. 9 Photo d'un isolateur

I.9.5. Les Parafoudres

Les parafoudres sont des dispositifs conçus pour limiter les surtensions électriques qui peuvent être induites par la foudre ou les opérations de commutation dans les réseaux électriques. Ils sont utilisés pour protéger les transformateurs, les instruments et les machines électriques contre les dommages causés par ces surtensions.

Un parafoudre typique se compose de deux parties principales :

- Partie supérieure : Cette partie, appelée parafoudre, est connectée à l'un des conducteurs de la ligne électrique à protéger. Son rôle est de détecter les surtensions et de rediriger l'énergie excédentaire vers la terre, évitant ainsi d'endommager les équipements ou les câbles conducteurs. Les parafoudres jouent un rôle crucial dans la protection contre les surtensions induites par la foudre ou d'autres perturbations électriques, assurant la sécurité et la fiabilité du système électrique.
- Partie inférieure : Cette partie est reliée au sol par une mise à la terre à faible résistance, généralement inférieure à un ohm. Cette mise à la terre permet de dissiper en toute sécurité et de manière contrôlée l'énergie excédentaire absorbée par le parafoudre vers le sol. Une mise à la terre adéquate est essentielle pour assurer l'efficacité de la protection contre les surtensions et pour prévenir les risques d'endommagement des équipements et les dangers liés aux décharges électriques.

Lorsqu'une surtension se produit sur la ligne électrique, le parafoudre réagit rapidement en fournissant un chemin de faible résistance vers la terre. Cela permet de dévier l'énergie de la surtension loin des équipements sensibles, les protégeant ainsi des dommages.

Les parafoudres sont essentiels pour assurer la protection contre les surtensions et garantir la fiabilité des équipements électriques. Ils sont utilisés dans de nombreux systèmes électriques, tels que les réseaux de distribution d'énergie, les installations industrielles et les bâtiments résidentiels. La mise à la terre appropriée du parafoudre est également cruciale pour assurer son bon fonctionnement et minimiser les risques de dommages. [13]



Figure I. 10 Photo d'un parafoudre.

I.9.6. Eclateurs à cornes

L'éclateur est un dispositif simple utilisé pour la protection contre les surtensions dans les réseaux électriques. Il est constitué de deux électrodes : une reliée au conducteur à protéger et l'autre reliée à la terre.

L'éclateur fonctionne en tant que point faible dans le réseau pour l'écoulement des surtensions. Lorsqu'une surtension survient, la tension électrique augmente au-delà de la tension d'amorçage prédéterminée de l'éclateur. À ce moment-là, l'éclateur se déclenche et permet à la surtension de s'écouler rapidement vers la terre, en court-circuitant le conducteur à protéger.

La tension d'amorçage de l'éclateur peut être ajustée en modifiant la distance entre ses électrodes. Cette modification permet d'obtenir une marge de sécurité entre la tension maximale que le matériel à protéger peut supporter et la tension d'amorçage de l'éclateur. En réglant la distance entre les électrodes, on peut donc adapter la performance de l'éclateur pour répondre aux besoins spécifiques de protection contre les surtensions dans un système électrique. Ainsi, l'éclateur se

déclenchera lorsque la surtension atteindra un niveau suffisamment élevé pour menacer l'intégrité du matériel, protégeant ainsi efficacement les équipements électriques sensibles.

L'éclateur est couramment utilisé dans les réseaux électriques pour la protection contre les surtensions, notamment dans les installations de distribution d'énergie et les équipements sensibles tels que les transformateurs et les appareils électroniques. Son fonctionnement simple en fait un dispositif fiable et économique pour la protection contre les surtensions dans de nombreux contextes électriques.[13]

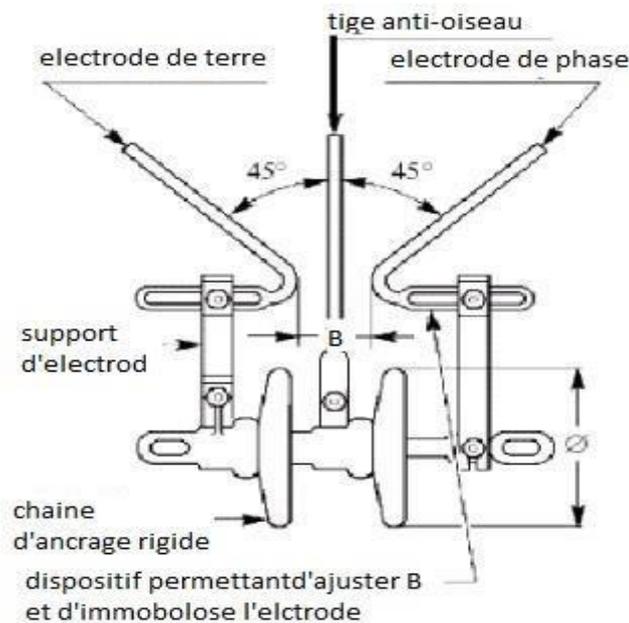


Figure I. 11 Eclateur MT avec tige anti-oiseaux

I.9.7. Mise à la terre des pylônes

Il est crucial de relier les pylônes des lignes de transport à des prises de terre à faible résistance. Cela permet de dissiper les courants indésirables et de garantir la sécurité du système et des personnes environnantes. Une bonne prise de terre contribue à la protection contre les décharges électriques et à la préservation des équipements. L'objectif principal de ces prises de terre est de fournir un chemin de retour sûr et efficace pour le courant de foudre en cas de frappe directe sur un pylône.

Lorsqu'un pylône est frappé par la foudre, un courant de foudre important est généré. Si ce courant n'est pas correctement dissipé, il peut provoquer une chute de tension significative dans le pylône lui-même, risquant ainsi de dépasser la tension de contournement des isolateurs. Cette situation pourrait entraîner des dommages aux isolateurs et aux autres composants du système électrique.

Pour éviter cela, les prises de terre sont soigneusement réalisées afin de minimiser leur résistance électrique. Une faible résistance de mise à la terre permet d'établir un chemin de retour de courant de foudre de moindre résistance, limitant ainsi la chute de tension dans le pylône. Cela garantit que la tension de contournement des isolateurs n'est pas dépassée et préserve l'intégrité du système électrique.

La conception et l'installation des prises de terre pour les pylônes de lignes de transport sont effectuées avec une grande attention pour assurer une faible résistance et une efficacité optimale. Différentes techniques et matériaux peuvent être utilisés pour améliorer la conductivité du sol et réduire la résistance de mise à la terre, tels que l'utilisation de conducteurs enfouis, de tiges de mise à la terre et de réseaux de mise à la terre enterrés.[13]

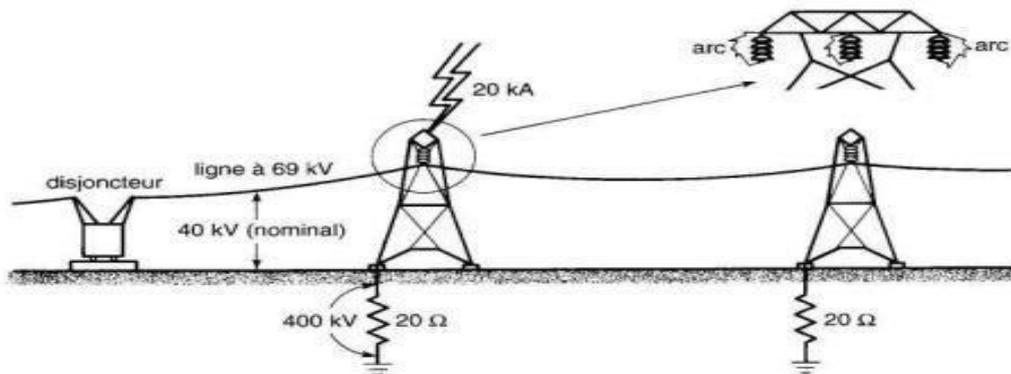


Figure I. 12 Mise à la terre des pylonnes

I.10. Transformateur

Le transformateur est un appareil électrique essentiel qui permet de modifier les niveaux de tension de l'électricité. Il facilite le transport et la distribution efficace de l'énergie électrique dans le réseau. Il joue un rôle essentiel dans la modification des tensions et des courants dans un circuit électrique. Grâce à cette capacité de transformation, l'énergie électrique peut être transportée sur de longues distances de manière économique et distribuée de manière efficace aux usines, aux bâtiments résidentiels et commerciaux. En permettant ces modifications de tension, le transformateur facilite la transmission et l'utilisation de l'électricité dans notre vie quotidienne. [18]

I.10.1. Constitution

I.10.1.1. Circuit magnétique

Le circuit magnétique joue un rôle crucial en canalisant le flux magnétique Φ [Wb] et en minimisant les pertes dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault. Pour augmenter la perméabilité magnétique et réduire la f.é.m. et le courant nécessaires pour maintenir le flux souhaité, on utilise un acier spécial appelé acier au silicium, qui présente une orientation de grains. Pour réduire les pertes par courants de Foucault, on utilise des tôles isolées les unes des autres en utilisant des méthodes telles que la phosphatation ou l'application d'un vernis synthétique, ce qui crée un circuit magnétique feuilleté.

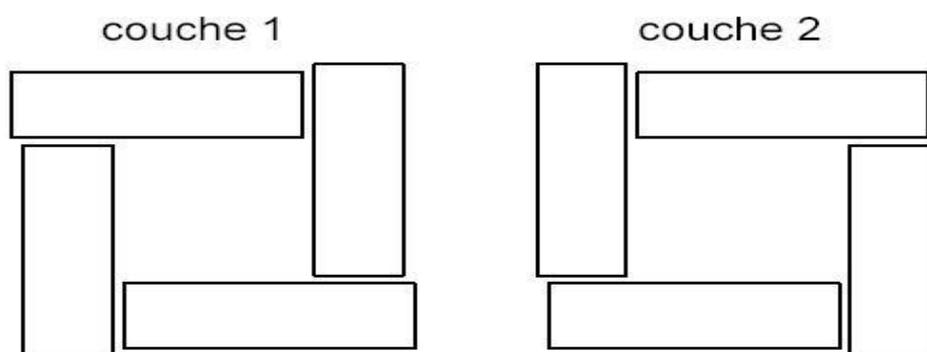


Figure I. 13 Circuit magnétique à colonne

Soit de forme cuirassée, c'est-à-dire que les enroulements sont placés sur une colonne centrale et le flux magnétique Φ [Wb] se referme par chacun des côtés qui forment la cuirasse

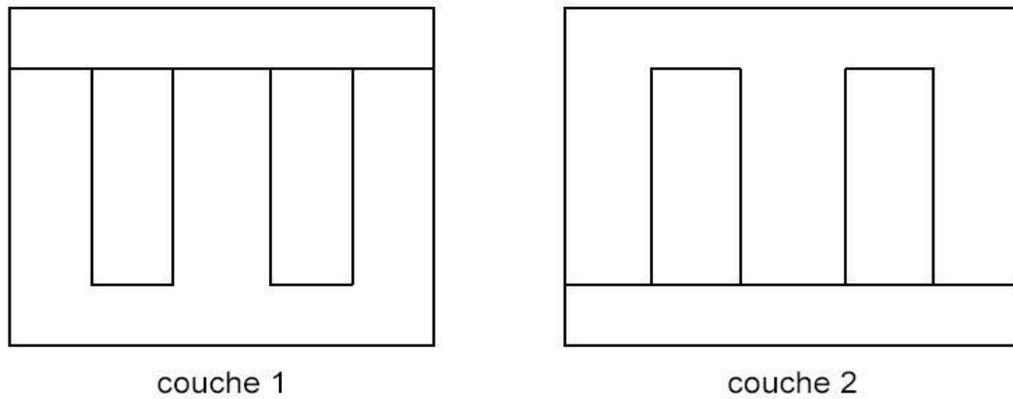


Figure I. 14 Circuit magnétique de forme cuirassée

Le circuit magnétique est constitué de trois colonnes alignées et de deux culasses qui assurent la fermeture du circuit. Les colonnes, également appelées noyaux, sont formées par un empilage de tôles magnétiques isolées les unes des autres pour réduire les pertes par courants de Foucault. Les culasses, quant à elles, relient les extrémités des colonnes pour compléter le chemin du flux magnétique et maintenir la structure du transformateur. Cette configuration permet d'obtenir un circuit magnétique efficace et de minimiser les pertes énergétiques.[19]

I.10.1.2. Circuit électrique

Les enroulements primaire et secondaire des transformateurs de basse tension et faible puissance sont généralement réalisés avec des bobines en fil de cuivre émaillé. Chaque couche de fil est isolée de la suivante par du papier isolant. Ce choix de matériau et d'isolation permet d'assurer une conductivité électrique optimale tout en évitant les courts-circuits entre les spires de l'enroulement. Le fil de cuivre émaillé offre une bonne conductivité électrique et une résistance élevée à la chaleur, tandis que le papier isolant garantit une isolation électrique adéquate entre les différentes couches de fil. Cette méthode permet de créer des enroulements compacts et efficaces pour les transformateurs de petite taille.

Pour les transformateurs à haute tension et grande puissance, les bobines peuvent être plus complexes. Elles peuvent être fractionnées en galettes, ce qui signifie que chaque bobine est divisée en plusieurs parties pour faciliter la fabrication et le refroidissement. Le fil utilisé peut être rond ou méplat, et il est isolé avec du carton imprégné ou d'autres matériaux isolants tels que la fibre ou le mica. Ces isolants garantissent une isolation électrique efficace entre les spires de l'enroulement et contribuent à la performance et à la fiabilité du transformateur.

Le choix des matériaux isolants et des techniques d'isolation dépend des exigences spécifiques du transformateur en termes de tension, de puissance et de conditions de fonctionnement.

Il existe trois dispositions principales des bobines sur les noyaux des transformateurs :

- Bobinage concentrique simple : Le bobinage basse tension est enroulé directement sur le noyau du transformateur. Après avoir été isolé, il est recouvert par le bobinage haut tension.
- Bobinage concentrique double : Dans cette configuration, la moitié du bobinage basse tension est enroulée sur le noyau, isolée, puis le bobinage haut tension est enroulé et isolé. Enfin, la deuxième moitié du bobinage basse tension est ajoutée. Le bobinage haut tension se trouve ainsi "sandwiché" entre les deux moitiés du bobinage basse tension.
- Bobinage à galette : Les bobinages haut tension et basse tension sont fractionnés et constitués de couronnes ou de galettes. Ces galettes sont enfilées alternativement sur le noyau du transformateur.

Dans certains cas, notamment pour les transformateurs à forte intensité, les bobinages peuvent être calés à l'aide de ressorts pour permettre de légers déplacements lors de fortes actions électrodynamiques. Cela aide à maintenir la stabilité du transformateur dans de telles situations.

I.10.2. Principe de fonctionnement d'un transformateur

Le fonctionnement d'un transformateur est basé sur la loi de Faraday de l'induction électromagnétique. Lorsqu'un flux d'induction magnétique variable Φ circule dans le circuit magnétique, il induit une force électromotrice (tension) dans chacun des enroulements proportionnels au taux de variation de ce flux ($d\Phi/dt$) et au nombre de spires de l'enroulement, conformément à la loi de Faraday. [20]

Lorsque le primaire du transformateur est alimenté par une source alternative U_1 , un flux magnétique alternatif est induit dans le circuit magnétique. Ce flux magnétique, dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée, induit à son tour une tension proportionnelle dans l'enroulement secondaire du transformateur, U_2 , grâce au principe de l'induction électromagnétique. Lorsque le circuit secondaire est fermé sur une charge, cela permet la circulation du courant secondaire I_2 .

Le noyau magnétique du transformateur joue un rôle crucial en fournissant un chemin de canalisation pour le flux magnétique. Il guide le flux de manière efficace entre le primaire et le secondaire, permettant ainsi le transfert d'énergie électrique de la source vers la charge connectée au transformateur. Cette transformation de tension et de courant est l'un des principaux principes de fonctionnement du transformateur. [20]

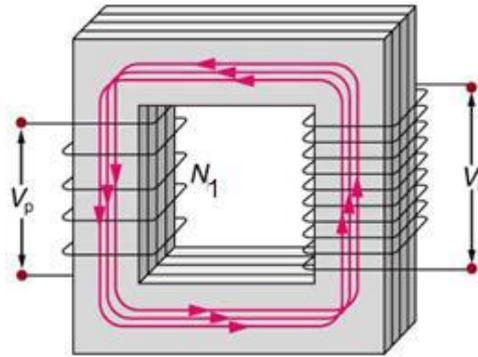


Figure I. 15 Circuit électromagnétique simple

La figure (II.3) montre un transformateur simple à deux enroulements avec N_1 nombre de spires dans l'enroulement primaire et N_2 nombre de spires dans l'enroulement secondaire [20]

I.10.3. Type de transformateur

Les transformateurs peuvent être différenciés selon différents critères, tels que leur fonctionnement, leur construction et leur utilisation. Voici les types de transformateurs :

I.10.3.1. Transformateur de puissance

Un transformateur de puissance est un composant essentiel dans les réseaux électriques. Selon la définition de la Commission électrotechnique internationale (CEI), un transformateur de puissance est un appareil statique qui possède au moins deux enroulements. Par induction électromagnétique, il transforme un système de tension et de courant alternatif en un autre système de tension et de courant, généralement de valeurs différentes, mais à la même fréquence. Son rôle principal est de transmettre la puissance électrique de manière efficace. L'une des principales utilisations des transformateurs de puissance est de réduire les pertes dans les réseaux électriques lors du transport de l'énergie électrique sur de longues distances. En augmentant la tension pour la transmission, les pertes par effet Joule dans les lignes de transmission sont réduites, car la puissance est proportionnelle au carré de la tension. Ensuite, le transformateur abaisse la tension à des niveaux appropriés pour la distribution aux utilisateurs finaux.

Les transformateurs de puissance peuvent être de type monophasé ou triphasé, en fonction des besoins du système électrique. Ils peuvent également être configurés selon différents couplages, tels

que le couplage étoile, le couplage triangle et le couplage zigzag, en fonction des exigences de tension et de courant du système électrique.

I.10.3.2. Transformateur monophasé

Le transformateur monophasé est composé des éléments suivants :

Circuit magnétique fermé : Il s'agit d'un noyau en matériau magnétique, généralement en tôles d'acier au silicium, qui forme un chemin pour le flux magnétique. Le circuit magnétique est généralement de forme rectangulaire.

Enroulements : Il y a deux enroulements distincts, appelés enroulement primaire et enroulement secondaire, qui sont enroulés autour du circuit magnétique. Les enroulements sont constitués de conducteurs électriques, généralement du fil de cuivre émaillé, qui sont isolés les uns des autres.

Dans la plupart des transformateurs monophasés, les enroulements primaire et secondaire sont imbriqués l'un dans l'autre pour réduire les pertes et améliorer l'efficacité du transformateur. Cela permet un couplage plus étroit entre les enroulements et facilite le transfert d'énergie.

I.10.3.2.1. Schéma électrique équivalent :

Un transformateur réel, monophasé, peut être électriquement modélisé par la figure (I.4)

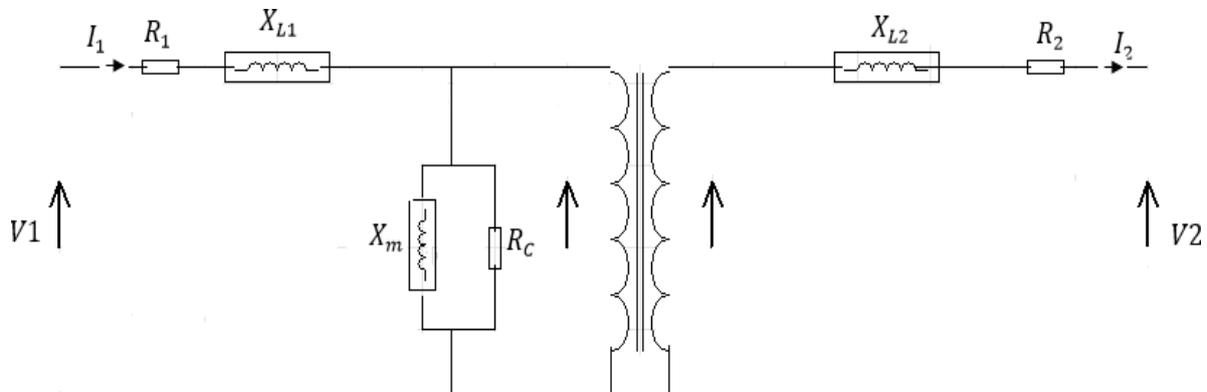


Figure I. 16 Schéma électrique équivalent d'un transformateur

I.10.3.3. Transformateur triphasé

Les transformateurs triphasés sont utilisés dans la production et le transport de l'énergie électrique en courant alternatif triphasé. Leur structure comprend trois colonnes avec des enroulements primaires et secondaires, qui peuvent être connectés en étoile, en triangle ou en zig-zag pour faciliter la transmission de l'énergie électrique.

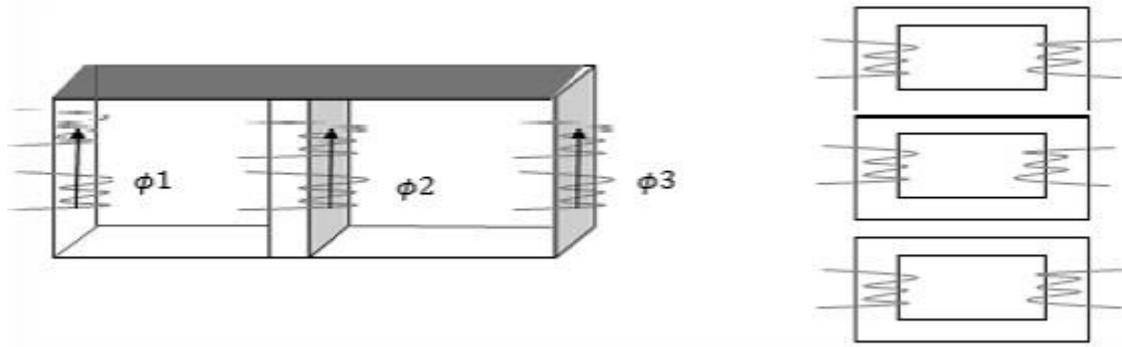


Figure I. 17 Transformateurs triphasés

I.10.3.4. Transformateurs à colonnes

Le transformateur à colonnes est une configuration spécifique utilisée dans les transformateurs de haute tension et de grandes puissances. Il comprend des enroulements concentriques disposés autour d'un circuit magnétique à colonnes, ce qui optimise le couplage magnétique, réduit les pertes et améliore l'efficacité du transformateur.



Figure I. 18 Transformateur à colonnes

I.10.3.5. Transformateur cuirassée

Le transformateur cuirassé est une configuration de transformateur où le circuit magnétique est entouré d'une enveloppe métallique ou d'une cuirasse. Cette conception offre une excellente rigidité mécanique et une grande compacité. Les transformateurs cuirassés sont principalement utilisés dans les réseaux de transport et de distribution, où les surtensions transitoires sont fréquentes.

La cuirasse protège le circuit magnétique contre les perturbations externes et réduit les pertes magnétiques. Des écrans peuvent également être utilisés pour réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages. Ces transformateurs offrent une meilleure durabilité, une résistance accrue et une meilleure fiabilité dans des environnements difficiles.

I.10.36. Transformateur de tension

Les transformateurs de tension sont utilisés dans les lignes à haute tension pour fournir des tensions réduites et isolées aux appareils de mesure et de protection. Ils permettent d'alimenter ces appareils à des tensions appropriées, tout en les isolant de la haute tension présente sur la ligne. Ils sont conçus pour respecter des normes de précision et de performance spécifiques afin de garantir des mesures fiables et précises.

I.10.37. Transformateur de courant

Le transformateur de courant, également appelé TC, est un appareil utilisé pour mesurer des courants électriques élevés de manière sûre et précise. Il fonctionne sur le principe de l'induction électromagnétique et est composé d'un enroulement primaire et d'un enroulement secondaire. Le courant élevé circule dans le primaire, tandis que l'ampèremètre est connecté au secondaire, où le courant est adapté à un niveau mesurable. Le rapport de transformation du transformateur de courant détermine la relation entre le courant primaire et le courant secondaire. Les transformateurs de courant sont utilisés dans diverses applications, telles que les systèmes de distribution d'énergie et les installations industrielles, pour mesurer avec précision les courants élevés tout en maintenant la sécurité des opérations électriques.

I.11. Modélisation des transformateurs

I.11.1. Transformateur monophasé linéaire sans saturation

Le transformateur peut être modélisé à l'aide d'un schéma équivalent qui représente les impédances linéaires du transformateur, son rapport de transformation et les pertes associées. Ce schéma inclut des composants tels que des inductances et des résistances pour tenir compte des caractéristiques électriques du transformateur. Le rapport de transformation indique la relation entre les tensions primaires et secondaires du transformateur. Cette modélisation simplifiée permet

d'analyser le comportement du transformateur dans un circuit plus vaste en prenant en compte ses principales caractéristiques électriques et en simplifiant les calculs.

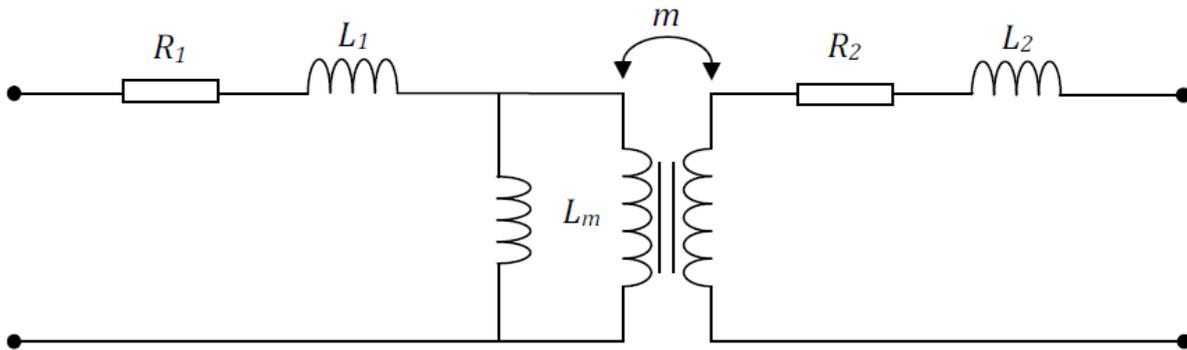


Figure I. 19 Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence sans saturation

Il existe éventuellement des pertes à vide, nous pouvons les représenter au moyen d'une résistance R_m en parallèle [23] :

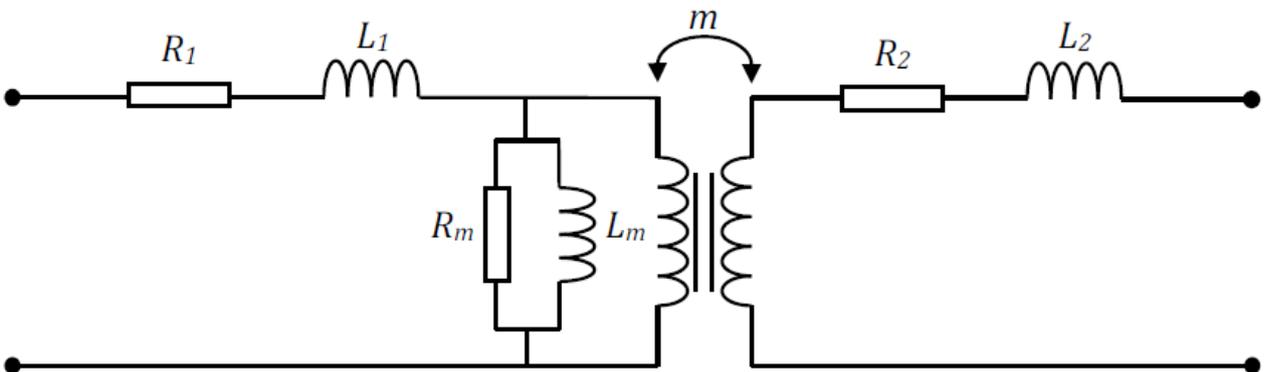


Figure I. 20 Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence avec pertes fer, sans saturation

I.11.2. Transformateur monophasé avec saturation

Lorsque le transformateur est soumis à des conditions d'enclenchement et de réenclenchement, ainsi qu'à la présence de flux rémanent, cela peut entraîner son fonctionnement dans une zone non linéaire. Cela signifie que les caractéristiques électriques du transformateur ne suivent pas une relation linéaire.

La courbe de saturation du transformateur représente la relation entre le flux magnétique dans le noyau et le courant magnétisant. Cette courbe montre comment le flux magnétique augmente avec le courant magnétisant jusqu'à atteindre une saturation, au-delà de laquelle une augmentation supplémentaire du courant n'entraîne pas une augmentation proportionnelle du flux magnétique.[23]

L'inductance non linéaire, qui représente cette caractéristique de saturation, peut être placée du côté primaire ou du côté secondaire du transformateur, à condition que le rapport de transformation soit respecté. Cela signifie que la non-linéarité peut être modélisée de manière équivalente en utilisant une inductance non linéaire dans l'un des enroulements du transformateur. Il est important de prendre en compte cette non-linéarité lors de l'analyse du transformateur dans un circuit électrique, car elle peut influencer les caractéristiques de tension, de courant et de puissance du transformateur, en particulier lorsqu'il fonctionne à des niveaux de courant élevés ou dans des conditions transitoires.

Ce modèle de circuit de base est adapté à de nombreux phénomènes qui peuvent se produire dans différentes conditions d'étude.

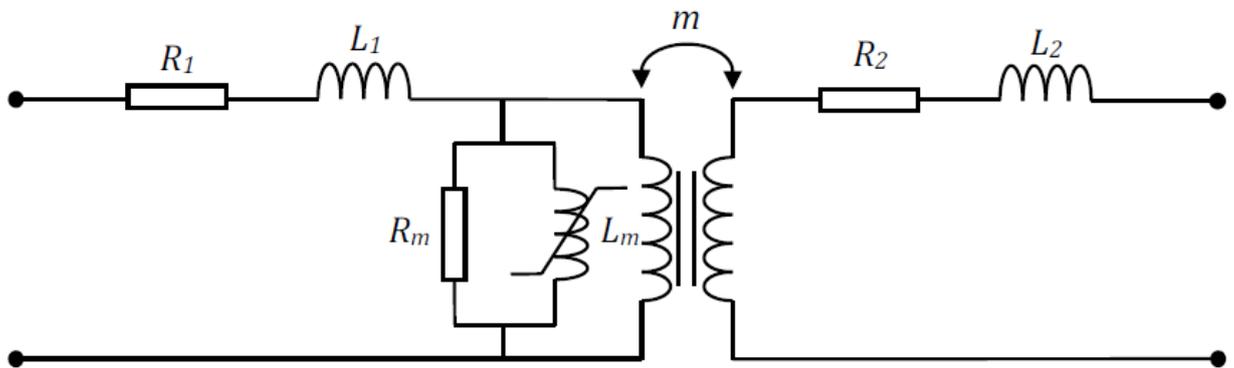


Figure I. 21 Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence avec saturation

En utilisant le modèle de transformateur et les équations de base, il est possible de déduire la forme du courant d'appel par un calcul analytique. En supposant que le transformateur est alimenté du côté primaire et que le côté secondaire est à vide, les équations peuvent être exprimées comme suit :

$V_p = V_m (\sin \omega t + \theta_0)$, où V_p est la tension au primaire, V_m est la tension de source nominale en valeur crête, ω est la pulsation angulaire et θ_0 est la phase initiale. En manipulant ces équations, il est possible de déterminer la forme du courant d'appel qui résulte de cette condition d'alimentation spécifique, l'équation décrivant le comportement du noyau saturable est [23] :

$$V_p = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\phi(t)}{dt} \tag{I.1}$$

$$V_p = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\phi(t)}{dt} \frac{di(t)}{dt} \tag{I.2}$$

Lorsque la résistance de magnétisation du transformateur est très élevée, le courant dans le noyau du transformateur peut être approximé par le courant au primaire, noté i . La dérivée temporelle du flux magnétique, $d\Phi(t)/dt$, peut alors être représentée par une inductance équivalente, qui est égale

à la pente de la fonction $\varphi(i)$. L'équation (I.20) peut être réécrite comme :

$$V_p = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + L_{noyau}(\varphi) \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{II.3})$$

I.12. Modélisation du cycle d'hystérésis

Le comportement non linéaire du circuit magnétique dans un transformateur peut être modélisé à l'aide de différentes fonctions non linéaires, telles que des polynômes, des fonctions arc tangentes ou exponentielles, pour approximer la caractéristique B-H (induction-magnétisation). Cette approximation est généralement suffisante pour l'analyse en régime permanent. Cependant, pour étudier le comportement transitoire et dynamique, comme dans le cas de la ferrorésonance, des modèles d'hystérésis plus précis sont nécessaires. Parmi ces modèles, les modèles de Jiles-Atherton et de Preisach sont les plus connus et permettent de capturer les phénomènes d'hystérésis magnétique de manière plus précise. Ces modèles prennent en compte les non-linéarités et les pertes magnétiques qui peuvent survenir dans le circuit magnétique du transformateur. Cependant, ces modèles nécessitent la réalisation de tests assez complexes pour leur mise en œuvre.

I.12.1. Tests expérimentaux

Pour déterminer le cycle d'hystérésis expérimentalement, un test à vide est réalisé sur un transformateur de type Shell de puissance 220 VA, comme illustré dans la Figure II.10. La bobine du primaire est alimentée par une tension de 220 V, ce qui génère un champ magnétique $H(t)$. Le courant $I(t)$ traversant la résistance R_1 est proportionnel au champ magnétique $H(t)$ selon la relation $H(t) \cdot L = N_1 \cdot I(t)$, où L est l'inductance et N_1 est le nombre de spires du primaire. Le champ magnétique H peut être déterminé à partir de la tension aux bornes de la résistance R_1 :

$$H(t) = N_1 \cdot \frac{V_{R_1}(t)}{R_1 \cdot L} \quad (\text{I.4})$$

L'induction magnétique dans le circuit magnétique du transformateur, notée $B(t)$, peut être calculée à partir de la force électromotrice (f.e.m.) induite dans la bobine secondaire, $e(t)$. La relation entre ces deux grandeurs est donnée par :

$$e(t) = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \cdot S \cdot \frac{dB}{dt} \quad (\text{I.5})$$

Avec : S la section du circuit magnétique et L : la longueur moyenne du circuit magnétique, L'intégrale de $e(t)$ donne l'induction $B(t)$.

$$B(t) = \frac{1}{N_2 \cdot S} \int e(t) dt \quad (\text{I.6})$$

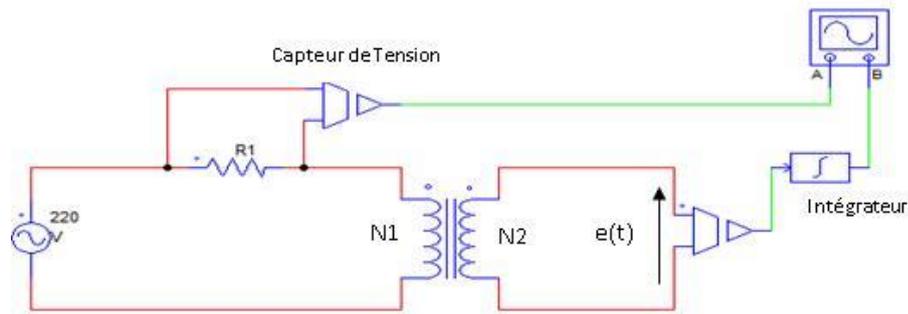


Figure I. 22 Schéma utilisé pour la mesure du cycle d’hystérise

Nous avons réalisé des tests sur un transformateur monophasé avec les caractéristiques indiquées dans le tableau 1. Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés dans la figure I.11.

Tableau I. 4 Caractéristiques du transformateur d’essai Shel

S_n	220 VA
U_n	220 V
N_1, N_2	630,43
r_1, r_2	$7.5\Omega, 0.7\Omega$
S	1420 mm^2
L_{moy}	0.13 m
P_{fer}	3.60 W

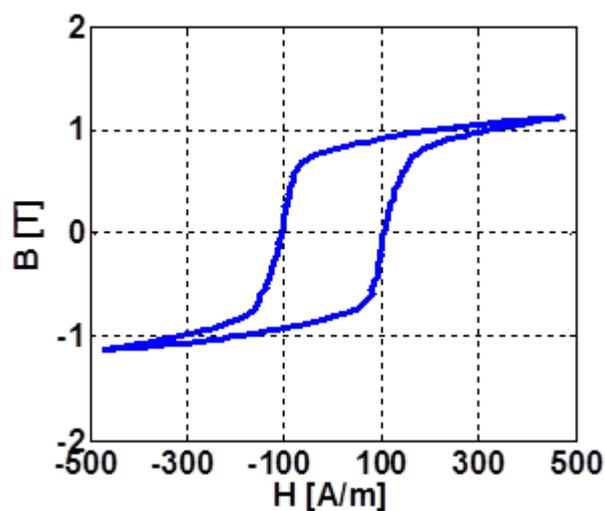


Figure I. 23 Cycle d’hystérise expérimental du transformateur d’essai Shell

II.13. Modélisation des lignes électriques

I.13.1. Modèle de lignes courtes

Dans la figure II.12, le schéma équivalent d'une ligne courte est représenté. Une ligne courte est définie comme une ligne dont la longueur est inférieure à 80 km.

Dans le modèle de ligne courte l'impédance shunt est négligée donc :

$$Z = (r + jL\omega) I = R + jX \tag{I.7}$$

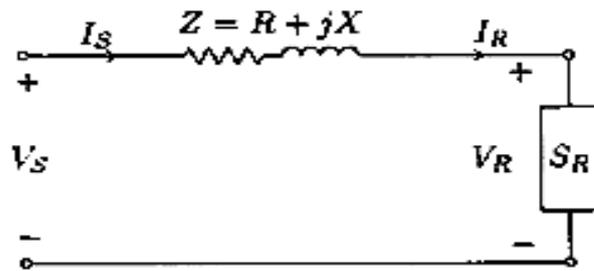


Figure I. 24 Lignes courtes

Dans la figure IV.12 on a :

$$I_S = I_R \tag{I.8}$$

Dans la figure II.13, la ligne de transmission est représentée par un quadripôle. Un quadripôle est un modèle mathématique qui permet de caractériser le comportement électrique d'un système à deux bornes. Dans le cas de la ligne de transmission, le quadripôle est utilisé pour décrire les propriétés de transmission de la ligne.

Les paramètres chaînes de quadripôle (ABCD) sont des coefficients qui décrivent les relations entre les variables électriques à l'entrée et à la sortie de la ligne de transmission

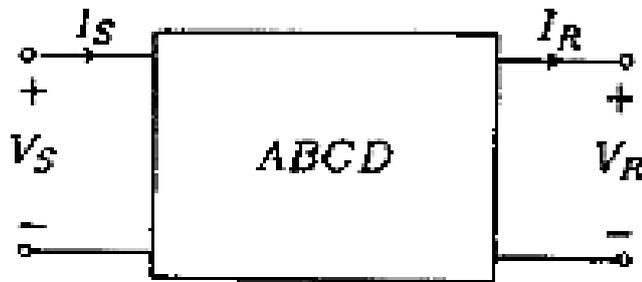


Figure I. 25 La ligne de transmission représentée par un quadripôle

$$\begin{cases} VS = AV_R + BI_R \\ IS = CV_R + DI_R \end{cases} \quad (I.9)$$

On peut écrire sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (I.10)$$

Par comparaison, on a :

$$\begin{cases} A = 1 & B = Z \\ C = 0 & D = 1 \end{cases} \quad (I.11)$$

I.13.2. Modèle de lignes moyenne

Dans le cas des lignes moyennes, qui ont une longueur comprise entre 80 et 250 km, l'impédance série totale de la ligne peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$Z = (r + jL\omega)I = R + jX \quad (I.12)$$

Et Y est l'admittance totale de la ligne donnée par :

$$Y = (jC\omega)I \quad (I.13)$$

I.13.2.1 Le modèle nominal en π

Le schéma modèle nominal π est obtenu comme suit :

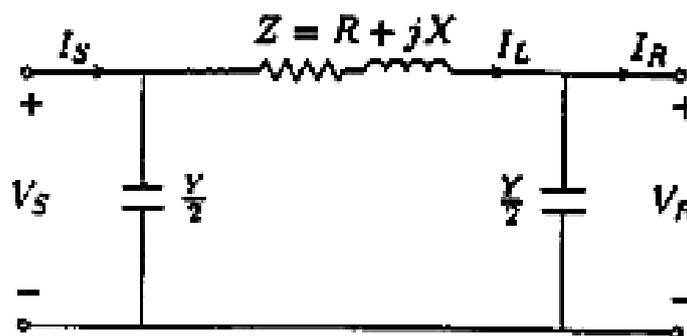


Figure I. 26 Modèle en π de ligne moyenne

Le courant dans l'impédance série est

$$I_L = I_R + \frac{Y}{2}V_R \quad (I.14)$$

Et la tension

$$V_S = V_R + ZI_L \quad (I.15)$$

On remplace I_L on obtient :

$$V_S = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_R + Z I_R \tag{I.16}$$

Par la loi de Kirchhoff

$$I_S = I_L + \frac{Y}{2} V_S \tag{I.17}$$

$$I_S = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) I_R \tag{I.18}$$

Donc

$$\begin{cases} A = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) & B = Z \\ C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) & D = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \end{cases} \tag{I.19}$$

I.13.2.2. Le modèle nominal en T

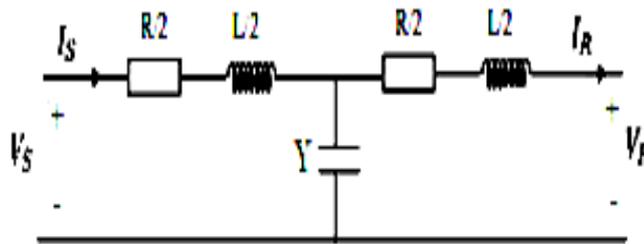


Figure I. 27 Modèle en de ligne moyenne T

$$\begin{cases} V_S = \frac{Z}{2} I_S + \frac{I_S - I_R}{Y} \\ V_R = -\frac{Z}{2} I_R + \frac{I_S - I_R}{Y} \end{cases} \tag{I.20}$$

On peut récrire l'équation comme :

$$\begin{cases} V_S = \left(\frac{Z}{2} + \frac{1}{Y}\right) I_S - \frac{I_R}{Y} \dots (1) \\ = -\left(\frac{Z}{2} + \frac{1}{Y}\right) I_R + \frac{I_S}{Y} \dots (2) \end{cases} \tag{I.21}$$

Déterminer I_S dans l'équation (2)

$$I_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1\right) I_R + V_R \tag{I.22}$$

On remplace le courant I_S dans relation (1)

$$V_S = \left(\frac{Z}{2} + \frac{1}{Y}\right) \left(V_R Y + I_R \left(\frac{YZ}{2} + 1\right)\right) - I_R \frac{1}{Y} \tag{I.23}$$

$$\Rightarrow V_S = \left(\frac{YZ}{2} + 1\right) V_R + I_R Z \left(\frac{YZ}{4} + 1\right) \quad (\text{I.24})$$

Donc

$$\begin{cases} A = \frac{ZY}{2} + 1 & B = Z \left(\frac{ZY}{4} + 1\right) \\ C = Y & D = \frac{ZY}{2} + 1 \end{cases} \quad (\text{I.25})$$

I.14. Les Surtension :

Les surtensions sont des phénomènes perturbateurs dans les installations électriques qui peuvent causer des dommages importants. Des dispositifs de protection sont utilisés pour prévenir ces surtensions et assurer le bon fonctionnement des équipements électriques. Voici quelques points à considérer :

- Tous les niveaux de puissance et de tension sont susceptibles d'être affectés par les surtensions. Cela concerne à la fois les petites installations domestiques et les grands réseaux électriques.
- Les surtensions peuvent entraîner des perturbations momentanées dans la continuité de service, ce qui se traduit par une dégradation de la qualité de l'alimentation électrique.
- Les surtensions peuvent causer des destructions de matériel électrique. Les composants sensibles tels que les appareils électroniques, les moteurs, les transformateurs, etc., peuvent être endommagés en raison de surtensions excessives.
- Les surtensions représentent également un danger pour les personnes. Elles peuvent engendrer des risques tels que la tension de pas (différence de potentiel sur le sol), l'élévation de potentiel des masses (mise à la terre insuffisante) et le risque d'électrocution. Il est donc essentiel de prendre des mesures de sécurité adéquates pour protéger les individus contre ces dangers.

Différents types de surtensions peuvent se produire dans les réseaux électriques, et il est important de trouver des solutions et des dispositifs pour atténuer leur amplitude. Il est également essentiel de choisir un niveau d'isolement adéquat pour les équipements afin de minimiser les risques de défauts à un niveau acceptable. Cela garantit un fonctionnement sûr et fiable du système électrique. [24]

I.14.1. Définition :

Une surtension se produit lorsque la tension entre un conducteur de phase et la terre, ou entre conducteurs de phase, dépasse la valeur maximale spécifiée par la norme CEI 71-1 pour le matériel. Une surtension est caractérisée par une valeur de crête qui dépasse cette limite de tension maximale

autorisée. Il est essentiel de protéger les équipements contre de telles surtensions afin d'éviter d'éventuels dommages ou dysfonctionnements.

Les surtensions peuvent se produire de deux manières différentes : entre les phases (entre conducteurs de phase différents) ou entre les conducteurs actifs et la masse/terre. Les surtensions entre phases sont appelées surtensions de mode différentiel et leur amplitude est égale à la tension nominale du système multipliée par la racine carrée de 2 ($U_m\sqrt{2}$). Les surtensions entre les conducteurs actifs et la masse/terre sont appelées surtensions de mode commun et leur amplitude est égale à la tension nominale du système multipliée par la racine carrée de 2 divisée par la racine carrée de 3 ($U_m\sqrt{2}/\sqrt{3}$). Il est important de prendre en compte ces différentes formes de surtension lors de la conception et de la protection des installations électriques. [25]

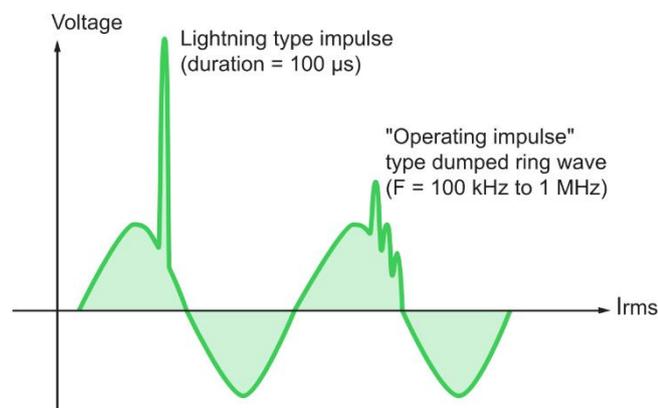


Figure I. 28 Exemple de surtension

I.14.2. Origine des surtensions :

Les surtensions peuvent être d'origine interne ou externe :

I.14.2.1. Origine interne :

Les surtensions peuvent avoir différentes origines internes au réseau. Voici quelques exemples :

- Surtension due à la coupure du courant magnétisant d'un transformateur : Lorsqu'un transformateur est déconnecté brusquement du réseau, le courant magnétisant, qui maintient le flux magnétique dans le circuit magnétique du transformateur, est interrompu. Cela peut entraîner une surtension transitoire à la coupure, en raison de l'auto-induction du transformateur.
- Surtension provoquée par un défaut à la terre : Lorsqu'un défaut se produit entre une phase et la terre dans le réseau électrique, cela peut entraîner une surtension sur les phases non touchées. Cette surtension est due à la redistribution soudaine du courant entre les phases.

- Résonance et ferrorésonance : la résonance et la ferrorésonance peuvent provoquer des surtensions. La résonance se produit lorsque les caractéristiques inductives et capacitives du réseau se combinent pour créer une résonance à une certaine fréquence, amplifiant ainsi les tensions. La ferrorésonance se produit lorsque le comportement non linéaire d'un transformateur et les éléments capacitifs du réseau interagissent pour provoquer des surtensions.
- Rupture du conducteur neutre : Si le conducteur neutre d'un système triphasé est endommagé ou rompu, cela peut entraîner une surtension sur les phases, car le neutre ne peut plus équilibrer les tensions.
- Surtensions de manœuvre : Lors de la mise en service ou de la déconnexion d'équipements électriques importants tels que les transformateurs, les disjoncteurs, etc., des surtensions transitoires peuvent se produire en raison des phénomènes de commutation des circuits électriques.

I.14.2.2. Origine externe :

L'une des principales sources de surtensions externes au réseau est la foudre. Les surtensions dues à la foudre peuvent avoir des effets importants sur les systèmes électriques. Lorsqu'une décharge de foudre se produit à proximité d'une ligne électrique, elle crée un champ électromagnétique intense qui peut induire des surtensions sur les conducteurs de la ligne. Ces surtensions se propagent le long du réseau électrique et peuvent endommager les équipements électriques connectés.

I.14.3. Classification des surtensions :

La norme CEI 71-1 donne la classification des surtensions. On distingue les surtensions temporaires et les surtensions transitoires :

- Surtension temporaire : Il s'agit d'une surtension de fréquence industrielle qui dure relativement longtemps, généralement de quelques dizaines de millisecondes à quelques secondes.
- Surtension transitoire : Il s'agit d'une surtension de courte durée, ne dépassant pas quelques millisecondes. Elle peut être oscillatoire ou non et est généralement fortement atténuée.[26]

I.14.4. Effets de surtensions :

Les surtensions dans les réseaux électriques peuvent avoir les conséquences suivantes :

- Claquage du diélectrique : Les surtensions peuvent dépasser la capacité d'isolation des équipements, provoquant un court-circuit et endommageant le matériel.

- Dégradation du matériel : Des surtensions répétées peuvent entraîner un vieillissement prématuré des équipements électriques, diminuant leur fiabilité et entraînant des défaillances.
- Perte de l'alimentation : Les surtensions peuvent causer la destruction d'éléments du réseau, provoquant des coupures prolongées de l'alimentation électrique, impactant les utilisateurs finaux.
- Perturbations des circuits de contrôle et de communication : Les surtensions peuvent perturber les systèmes de contrôle-commande et les réseaux de communication, entraînant des erreurs de fonctionnement et des interruptions.
- Contraintes électrodynamiques et thermiques : Les surtensions, notamment celles causées par la foudre, peuvent provoquer des contraintes sur les équipements électriques, pouvant les endommager, les déformer ou provoquer des surchauffes.
- Danger pour la sécurité des personnes : Les surtensions peuvent créer des élévations de potentiel dangereuses, mettant en danger la sécurité des personnes et des animaux proches des équipements électriques.

Il est important de prendre des mesures de prévention pour protéger les systèmes électriques contre les surtensions et minimiser leurs conséquences néfastes. [20]

I.15. Conclusion

Dans ce chapitre, on a mentionner des généralités sur les réseau électriques, ainsi nous avons défini le transformateur et son principe de fonctionnement et on à présenter ces types. Et aussi on a modélisé un transformateur monophasé sans et avec saturation, ainsi que les lignes courtes et moyennes et à la fin on a défini les surtensions et leurs effets sur le réseau électrique.

Chapitre II. La ferrorésonance

II.1. Introduction.

Pour pouvoir évaluer de manière éclairée les risques liés à la ferrorésonance et prendre les mesures correctives appropriées, il est essentiel de comprendre globalement ce phénomène. Une distinction entre résonance et ferrorésonance met en évidence les caractéristiques particulières de ce dernier.

Dans le domaine de l'électrotechnique, il est courant de considérer que les caractéristiques électriques des composants sont linéaires, ce qui conduit à un régime permanent unique et indépendant des conditions initiales. Les méthodes de calcul utilisées par les électriciens, basées sur cette approximation linéaire, sont adaptées pour prédire et évaluer les possibilités de résonance dans un réseau, en prenant en compte toutes les valeurs possibles des paramètres du réseau dans des conditions normales ou dégradées d'exploitation.

II.2. Résonance et ferrorésonance

II.2.1. Résonance

Lorsqu'il y a des éléments inductifs (L), capacitifs (C) et résistifs (R) dans un circuit, qu'ils soient connectés en série ou en parallèle, des répartitions de courants et de tensions peuvent se produire. Ces répartitions peuvent atteindre des valeurs dangereuses pour le matériel.

II.2.1.1. Résonance série

La figure (II.1) représente un circuit RLC série et on applique une tension E_S .

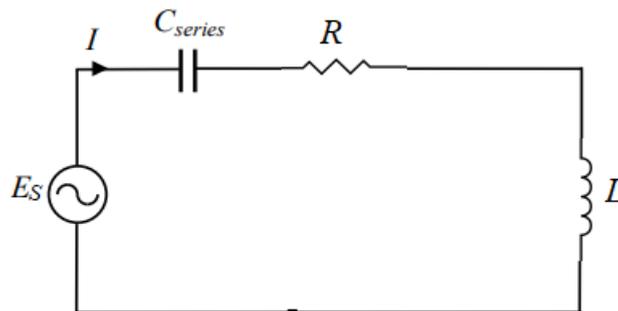


Figure II. 1 Circuit linéaire résonant.

Dans le diagramme vectoriel représenté dans la figure (III.2), il est possible d'observer que, pour certaines valeurs des éléments inductifs (L) et capacitifs (C), les tensions aux bornes de ces éléments peuvent dépasser la tension E_S du réseau. La tension E_S est la somme vectorielle des tensions aux bornes de chaque élément du circuit :

$$E_S = U_R + U_L + U_C = RI + jL\omega I + \frac{1}{jC\omega}I \quad (\text{II.1})$$

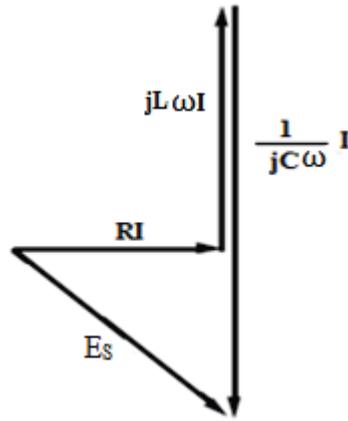


Figure II. 2 Représentation de Fresnel d'un circuit RLC série alimenté par une tension ES

A la résonance :

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

On a alors

$$E_S = RI \quad (\text{II.3})$$

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

Pour L et C données, la pulsation ω_r est appelée pulsation de résonance telle que :

$$LC\omega_r^2 = 1 \quad (\text{II.4})$$

La fréquence de résonance est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{II.5})$$

Dans certaines situations, il est possible que les tensions aux bornes de l'inducteur et du condensateur dépassent plusieurs fois la tension de la source. Le schéma présenté dans la figure (II.3) illustre les caractéristiques de ces tensions ainsi que du courant de charge pour différentes fréquences, allant de 20 Hertz à 600 Hertz. Au point de résonance, le graphique met en évidence que les tensions aux bornes de l'inducteur et du condensateur atteignent leurs valeurs maximales lorsque la fréquence du circuit est d'environ 400 Hertz. Ce phénomène suggère également que les tensions VL et VC dépassent la tension fournie par la source. Parallèlement, le courant dans le circuit atteint son niveau maximum, car l'impédance du circuit est minimale et purement résistive. [27]

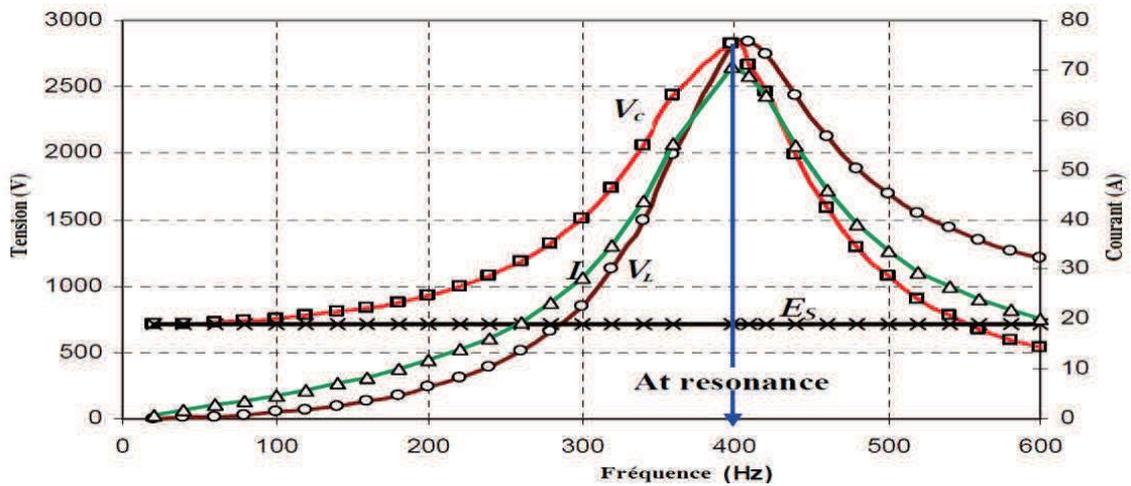


Figure II. 3 Caractéristique de \$V_c\$, \$V_L\$, \$I\$ et \$E_s\$ en résonance.[28]

On définit alors un facteur de surtension \$f\$ qui est le rapport de la tension \$U_L\$ (ou \$U_C\$) à la tension d'alimentation \$E_s\$: [28]

$$f = \frac{U_L}{E_s} = \frac{L\omega_r I}{RI} = \frac{L\omega_r}{R} = \frac{1}{RC\omega_r} \tag{III.6}$$

Quand le circuit linéaire représenté dans la figure (II.1) est soumis aux conditions de résonance, il produit une réponse prédéterminée qui présente une forme identique à celle de la tension de la source. À chaque point du circuit, des tensions sinusoïdales se manifestent sans aucune distorsion, comme illustré dans la figure (II.4).

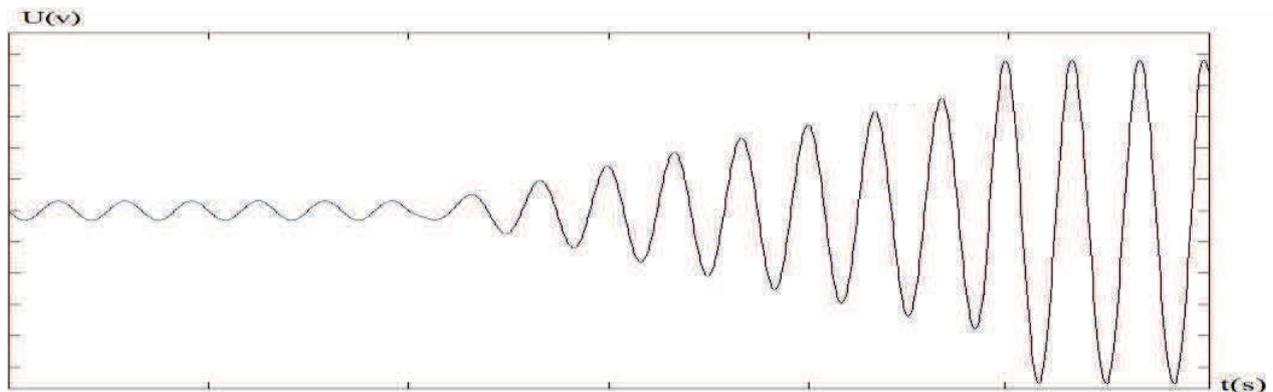


Figure II. 4 Exemple de la forme de la surtension de résonance (pas de distorsion)

II.2.1.2. Résonance parallèle

La figure (II.5) représente un circuit \$R, L, C\$ parallèle aux bornes duquel on applique une source de courant \$J\$.

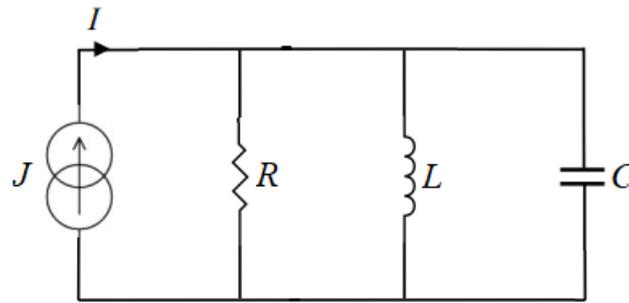


Figure II. 5 Circuit R, L, C parallèle alimenté par une source de courant J

La tension U est commune aux trois éléments du circuit. On observe la relation suivante :

$$J = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{jL\omega} + jC\omega \right) U \quad (\text{II.7})$$

Le phénomène de résonance apparaît lorsque $I_L = -I_C$:

$$\frac{U}{jL\omega} = -jC\omega U, \quad (LC\omega^2 = 1) \quad (\text{II.8})$$

On a alors $U = R J$; l'inductance et la capacité montés en parallèle se comportent comme un circuit ouvert, appelé circuit bouchon.

Pour des valeurs données de L et C , la pulsation ω_r qui satisfait l'équation $LC\omega_r^2 = 1$ est appelée la pulsation de résonance. À la résonance, on définit le facteur de surtension comme le rapport entre la tension aux bornes du circuit R, L, C en parallèle et la tension qui serait présente à la résonance si seulement l'inductance (ou la capacité) était présente dans le circuit.

$$f = \frac{RJ}{L\omega_r J} = \frac{R}{L\omega_r} = RC\omega_r \quad (\text{II.9})$$

II.2. Ferrorésonance

II.2.2.1. Ferrorésonance série

Dans un circuit série non linéaire, la situation diffère de celle rencontrée dans un circuit série linéaire lorsqu'il s'agit de la résonance.

Dans le schéma représenté dans la figure (II.1), l'inductance linéaire est remplacée par une inductance non linéaire qui est souvent équipée d'un noyau de fer saturable. Le circuit en série est composé d'une source alternative V , d'une résistance R , d'un condensateur C et d'une inductance non linéaire L_m , tel qu'illustré dans le schéma. (II.6). [27]

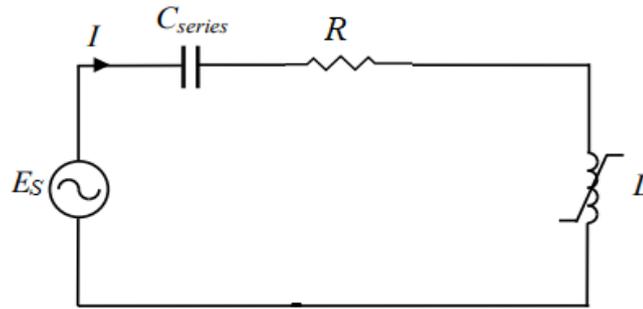


Figure II. 6 Circuit ferrononant série

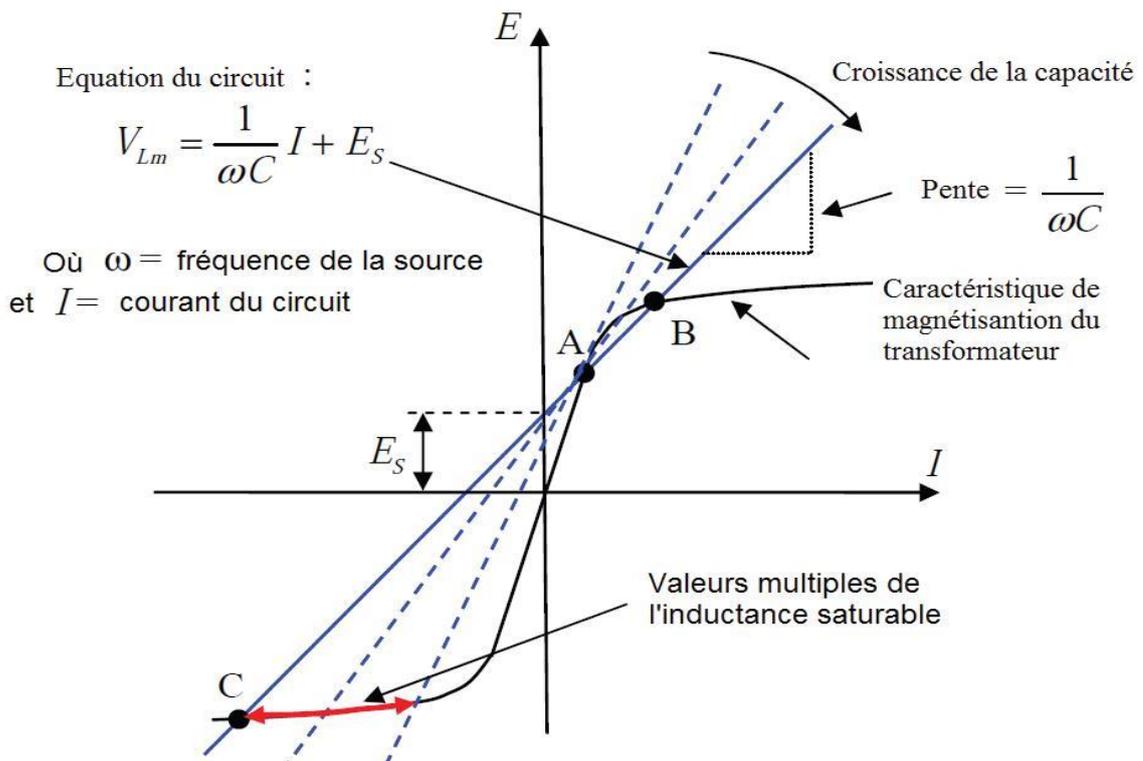


Figure II. 7 Caractéristique E-I (ou V-I) du circuit de ferrononance

Dans un circuit linéaire, la résonance se produit uniquement à une fréquence spécifique correspondant à des valeurs données de L et C. Cependant, dans un circuit non linéaire, en raison de la saturation du noyau de fer, l'inductance peut varier, ce qui signifie qu'il peut y avoir plusieurs valeurs de capacité qui peuvent conduire à une ferrononance à une fréquence donnée. Cela est dû au fait que la saturation du noyau de fer modifie les propriétés inductives de l'inductance non linéaire, ce qui peut entraîner plusieurs combinaisons de valeurs de L et C permettant d'atteindre la résonance ferromagnétique à une fréquence spécifique. [27]

Pour le circuit parallèle, l'équation peut être résolue graphiquement en fonction de la variable i (courant) en traçant les courbes, comme illustré dans la figure II.8.

$$v = \sqrt{V^2 - R^2 I^2} \tag{II.10}$$

$$v = V_L - \frac{i}{c\omega} \tag{II.11}$$

Courbe $V_L(I)$ présente une pente très faible lorsque I augmente en raison de la saturation du noyau de fer de la bobine : $V_L(I) = L(I) \times \omega \times V$.

A la saturation, l'inductance $L(I)$ devient très faible, ce qui signifie que la tension augmente très peu lorsque le courant I croît. Le point de fonctionnement du réseau est situé à l'intersection de la courbe (b), dont l'équation est :

$$v = V_L - \frac{i}{c\omega} \tag{II.12}$$

Et l'ellipse (a) d'équation :

$$v = \sqrt{V^2 - R^2 I^2} \tag{III.13}$$

II.2.2.2. Ferrorésonance parallèle

Le circuit donné est composé d'un condensateur, d'une bobine d'induction à noyau de fer saturable et d'une résistance en parallèle. Les notations utilisées sont les suivantes :

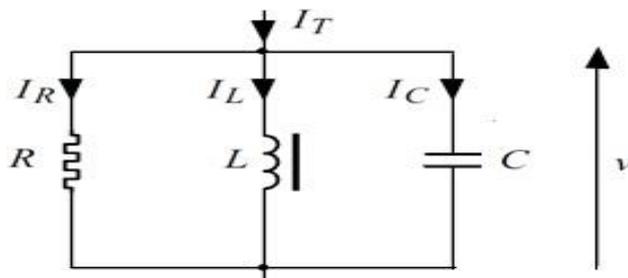


Figure II. 9 Circuit ferrorésonant parallèle

Le courant total I_T traversant le circuit est alors donné par la relation :

$$I_T = \frac{V}{R} + j(C\omega V - I_L) \tag{II.14}$$

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

Les valeurs efficaces sont données par la relation :

$$I_T^2 = \frac{V^2}{R^2} + j(C\omega V - I_L)^2 \tag{II.15}$$

On peut alors écrire la relation :

$$\sqrt{I_T^2 - \frac{V^2}{R^2}} = |C\omega V - I_L| \quad (\text{II.16})$$

Le phénomène de la ferrorésonance se distingue par sa propriété fondamentale et caractéristique d'avoir au moins deux régimes stables pour une même excitation. Lorsque des inductances avec des caractéristiques non linéaires sont présentes, cela peut entraîner des comportements radicalement différents.

Dans un circuit donné, il est possible d'observer plusieurs régimes permanents différents. Cependant, ces régimes sont souvent anormaux et peuvent même être dangereux pour le matériel électrique, car ils peuvent entraîner des surtensions ou des surintensités. Il est donc important de prendre des mesures appropriées pour éviter ces situations indésirables et préserver l'intégrité du matériel électrique. [28]

II.2.3. Différence entre résonance et ferrorésonance

Les circuits ferrorésonants se distinguent des circuits résonants linéaires par plusieurs différences majeures :

- Ils permettent de raisonner dans une large plage de valeurs de la capacité C.
- Les fréquences des oscillations de tension et de courant dans un circuit ferrorésonant peuvent différer de la fréquence de la source d'alimentation sinusoïdale.
- Ils peuvent présenter plusieurs régimes permanents stables pour des valeurs spécifiques de paramètres, ce qui signifie qu'ils peuvent avoir plusieurs états d'équilibre distincts.

Le régime atteint dans un circuit ferrorésonant dépend des conditions initiales, telles que les charges électriques des condensateurs, le flux rémanent du matériau utilisé dans le circuit magnétique des transformateurs, ainsi que le moment de l'enclenchement. Ces paramètres initiaux influencent les comportements et les régimes permanents stables qui peuvent être observés dans le circuit ferrorésonant. [29]

II.2.4. Conditions et interprétation physique de la ferrorésonance

Selon cette définition de la ferrorésonance, il y a quatre conditions nécessaires pour que ce phénomène se manifeste dans un circuit :

- Le circuit doit être alimenté par une ou plusieurs sources de tension, généralement sous forme de signaux sinusoïdaux.

- Il doit y avoir des éléments non linéaires dans le circuit fabriqués à partir d'un matériau ferromagnétique saturable, tels que des inductances ou des transformateurs. Ces éléments non linéaires jouent un rôle clé dans l'établissement de la ferrorésonance.
- Des condensateurs doivent être présents dans le circuit, permettant l'échange d'énergie avec les éléments non linéaires. Les condensateurs sont responsables de la modulation de l'énergie dans le circuit.
- Les pertes dans le circuit doivent être faibles. Des pertes élevées peuvent affecter la manifestation de la ferrorésonance et entraîner des comportements indésirables.

Ces quatre conditions sont essentielles pour que le phénomène de ferrorésonance puisse se produire dans un circuit donné.[30]

II.3. Classification des régimes ferrorésonants

La classification des régimes de résonance ferromagnétique se fait en se basant sur les formes d'ondes des tensions et des courants. Cette classification s'applique au régime permanent, c'est-à-dire après l'extinction du régime transitoire. On peut déterminer le type de résonance ferromagnétique en analysant le contenu spectral des signaux de courant et de tension, en utilisant le diagramme du plan de phase ou encore en utilisant la section de Poincaré. Ces outils permettent de caractériser les différents régimes de résonance et d'obtenir des informations précieuses sur le comportement du système ferromagnétique en régime permanent.

Il est préférable de se baser sur le signal de tension qui présente une forme sinusoïdale avant l'apparition de la ferrorésonance. En effet, son spectre ne contient généralement que la fréquence fondamentale. En revanche, le signal du courant d'excitation, lorsqu'il y a ferrorésonance, peut contenir des fréquences impaires multiples de la fréquence fondamentale ($3f$, $5f$, etc.). Cette différence dans le contenu spectral des signaux de tension et de courant permet de distinguer et de caractériser les régimes de résonance ferromagnétique.

II.3.1 Diagramme du plan de phase

L'espace de phase est un concept mathématique abstrait qui permet de représenter le comportement temporel d'un système en utilisant les variables d'état du système. Dans cet espace, le mouvement d'un point représente l'évolution des variables d'état du système au fil du temps. L'étude du comportement d'un système se base sur l'analyse de la trajectoire de ce point dans l'espace de phase.

Si la trajectoire du point se ferme sur elle-même après chaque période T , cela indique que l'oscillation du système est périodique, avec une période T . En d'autres termes, le système présente un

comportement régulier et prévisible. Par contre, si la trajectoire ne revient au point de départ qu'après deux ou trois périodes ($2T$, $3T$), cela suggère un mode quasi-périodique, où le système oscille de manière irrégulière, mais avec une certaine régularité. Dans ce cas, la trajectoire du point dans l'espace de phase ne se referme pas exactement sur elle-même après chaque période, mais suit une trajectoire complexe et répétitive. Le même principe s'applique à la solution sous-harmonique, Fig.II.11.a.

II.3.2 Section de Poincaré

La section de Poincaré est une représentation du diagramme du plan de phase qui est enregistrée sous forme d'une séquence de points après chaque période T du système étudié, comme illustré dans la figure II.11.b. Cette représentation permet d'obtenir des informations sur la relation entre la fréquence de la source d'excitation et la fréquence du système.

Dans le cas d'une solution périodique avec une période T , la section de Poincaré se présente sous la forme d'un point unique. Ce point représente l'état du système à la fin de chaque période. En revanche, lorsque le système présente un comportement chaotique, la section de Poincaré est constituée d'une surface de points dispersés de manière aléatoire. Cette dispersion aléatoire des points reflète la nature imprévisible et complexe du système.

Ainsi, l'analyse de la section de Poincaré permet de mettre en évidence les différentes caractéristiques du système étudié, telles que la régularité ou l'irrégularité des oscillations, la présence de comportements périodiques ou chaotiques, et la relation entre la fréquence d'excitation et la fréquence du système.

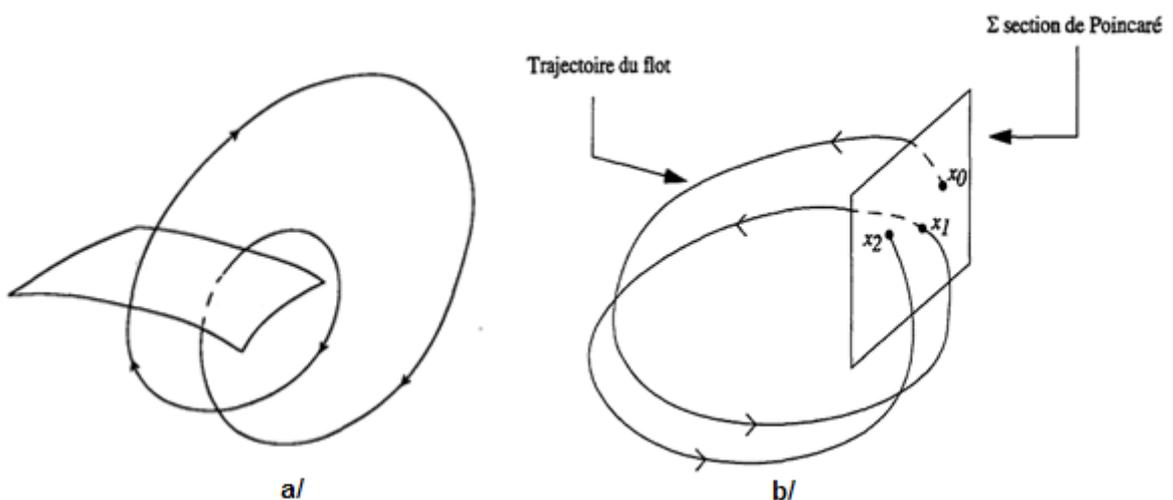


Figure II. 11 a : sous-harmonique de période $2T$ / **b** : Interprétation géométrique de la section de Poincaré

On distingue d'autres types de régimes ferrorésonants, qui se manifestent de différentes manières dans le comportement du système :

- La ferrorésonance périodique.
- La ferrorésonance quasi-périodique.
- La ferrorésonance chaotique.

II.3.3. Régime périodique

La ferrorésonance périodique peut être de deux types : fondamentale ou sous-harmonique. Dans le cas de la ferrorésonance fondamentale, les signaux présents ont une fréquence égale à celle de la source d'alimentation, généralement de 50 Hz. Cependant, il est possible d'observer la présence de plusieurs harmoniques qui sont des multiples entiers impairs de la fréquence fondamentale. Ces harmoniques se manifestent sous la forme de fréquences supplémentaires, telles que 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz, etc. Elles sont générées en raison des non-linéarités du système ferromagnétique et peuvent avoir des effets significatifs sur le comportement global du système soumis à la ferrorésonance fondamentale.

Pour la ferrorésonance sous-harmonique, les oscillations se produisent avec une période multiple de la période de la source. Cela signifie que la fréquence des oscillations est inférieure à la fréquence fondamentale de la source. Sur le spectre du signal, on observe l'apparition de fréquences sous-multiples impaires de la fréquence fondamentale (par exemple, à des fréquences telles que 50 Hz/3, 50 Hz/5, 50 Hz/7, etc.).

II.3.4. Régime quasi-périodique

Ce régime n'est pas périodique et se distingue par des oscillations comportant au moins deux fréquences de base, à savoir une fréquence fondamentale et une autre fréquence distincte. Le spectre de fréquence se compose de plusieurs raies distinctes, dont les fréquences peuvent être exprimées sous la forme " $nf_1 + mf_2$ " (où n et m sont des nombres entiers). Ces raies de fréquence multiples résultent des interactions non linéaires dans le système ferromagnétique et contribuent à la complexité du comportement observé dans le régime de ferrorésonance quasi-périodique.

II.3.5 Régime chaotique

Les régimes chaotiques se caractérisent par un comportement qui semble aléatoire. Leur spectre de fréquence est continu, ce qui signifie qu'il ne présente aucune fréquence spécifique et ne s'annule pour aucune fréquence en particulier. En ce qui concerne la section de Poincaré, elle se présente sous la forme d'une surface de points plutôt que d'un simple point ou d'une trajectoire fermée, ce qui illustre le caractère complexe et imprévisible du système chaotique. [29]

II.4. Différentes approches pour l'étude de la ferrorésonance dans les réseaux électriques :

Ce paragraphe présente un aperçu des cinq approches utilisées pour l'étude de la ferrorésonance dans les réseaux électriques, classées selon leur apparition dans l'historique de la littérature traitant de ce phénomène. Ces approches fournissent différentes perspectives et méthodologies pour analyser et comprendre la ferrorésonance.

II.4.1. Méthode analytique

Les approches analytiques employées dans la littérature offrent plusieurs avantages lors de l'exploration de la ferrorésonance. Elles offrent la possibilité d'examiner en détail les variables qui impactent l'émergence des divers modes de ferrorésonance. De plus, ces méthodes permettent d'établir des frontières claires entre les zones de fonctionnement sécurisé et celles associées à la ferrorésonance, ce qui est d'une importance capitale pour la conception du système.

Ces méthodes ont aussi leurs inconvénients. Le modèle de circuit utilisé est souvent très simplifié, ce qui peut limiter la précision des résultats. De plus, les équations mathématiques obtenues peuvent être complexes et nécessiter des calculs longs et coûteux en termes de temps de calcul. En outre, ces méthodes ne prennent pas en compte les opérations de commutation et les régimes transitoires associés, ce qui peut limiter leur capacité à modéliser certains aspects réels des systèmes électriques.

[27]

II.4.2. Simulation par analogie

La méthode qui repose sur une représentation fidèle en modèle réduit des composants du réseau présente plusieurs avantages. Elle permet d'obtenir des résultats en temps réel, ce qui peut être utile pour les tests et les expériences. De plus, cette approche offre un environnement sûr pour le personnel, car elle utilise des tensions et des courants de faible intensité.

Cette approche présente également des inconvénients. L'équipement analogique utilisé nécessite un entretien coûteux, notamment en termes de calibrage et de remplacement des composants défectueux ou vieillissants. De plus, il peut être difficile de représenter avec précision un cas réel, car la modélisation des éléments du réseau peut comporter des simplifications et des approximations. Enfin, cette approche nécessite souvent de grandes surfaces de laboratoire pour l'installation et l'adaptation des équipements. [27]

II.4.3) Essais réels sur le terrain

Les tests de ferrorésonance effectués sur des configurations de réseaux électriques existants offrent l'avantage d'inclure les éléments réels et complexes présents dans ces réseaux., sans simplification du circuit. Cela permet d'obtenir des résultats plus précis et représentatifs de la réalité.

Cette approche présente également des inconvénients importants. Les composants du réseau sont exposés à des risques plus élevés, notamment des surtensions qui peuvent entraîner un vieillissement prématuré et des défaillances potentiellement catastrophiques. En outre, la génération de signaux riches en harmoniques lors de ces essais peut entraîner des problèmes pour les circuits environnants, perturbant ainsi leur fonctionnement normal. Il est donc nécessaire de prendre des précautions particulières lors de ces essais pour minimiser les risques pour les composants du réseau et les autres systèmes électriques environnants. [27]

II.4.4) Mesures en laboratoire

Les tests en laboratoire à échelle réduite des circuits ferrorésonants présentent l'avantage d'étudier de manière réaliste les caractéristiques de ferrorésonance des équipements de basse tension. [27]

II.4.5) Logiciels de calcul numérique (simulateurs)

La résolution du système d'équations mathématiques qui décrivent le comportement du réseau permet d'obtenir des solutions précises et quantitatives pour analyser les phénomènes de ferrorésonance.

lors de la ferrorésonance nécessite l'utilisation d'outils informatiques tels que des logiciels de simulation. Étant donné que les régimes transitoires associés à la ferrorésonance sont souvent de longue durée, les temps de simulation peuvent être importants.

Cela signifie que les simulations pour étudier la ferrorésonance peuvent nécessiter des ressources informatiques considérables, tant en termes de puissance de calcul que de temps de traitement. Les études impliquant des simulations de ferrorésonance peuvent donc être coûteuses à réaliser.

Le phénomène de ferrorésonance est très sensible aux valeurs des paramètres et aux conditions initiales, qui sont souvent mal connues dans la pratique. Il serait donc peu réaliste de réaliser une étude pour chaque combinaison possible.

Pour pallier ces inconvénients et permettre une vision globale du comportement d'un réseau, les mathématiciens ont développé les méthodes suivantes :

Méthodes de calcul direct du régime permanent

Pour calculer le régime permanent sans avoir à passer par le calcul du régime transitoire, plusieurs méthodes numériques ont été développées. Parmi celles-ci, on distingue les méthodes fréquentielles et les méthodes temporelles.

Les méthodes fréquentielles, telles que la méthode de Galerkin, permettent d'étudier la ferrorésonance périodique, y compris la composante fondamentale et les sous-harmoniques. Cette méthode repose sur la décomposition du signal en série de Fourier et l'approximation du problème en résolvant les équations modulées correspondantes.

D'autre part, les méthodes temporelles, telles que la méthode du point fixe de l'application de Poincaré et la méthode des perturbations, sont utilisées pour analyser le régime permanent en se concentrant sur l'évolution du système dans le temps. La méthode du point fixe de l'application de Poincaré consiste à itérer l'application de Poincaré pour trouver un point fixe qui correspond au régime permanent. La méthode des perturbations, quant à elle, permet de prendre en compte les effets des perturbations sur le système et d'analyser les variations du régime permanent.

Méthode de continuation

- La théorie des bifurcations, intégrée à la méthode de continuation, constitue un cadre mathématique adapté à l'étude globale du comportement des systèmes dynamiques. Cette approche permet de déterminer les zones à risques en conjonction avec les méthodes de calcul direct du régime permanent.
- Il convient de noter que la simulation numérique temporelle conserve un intérêt certain. En utilisant une configuration spécifique et des valeurs numériques des paramètres, elle permet de préciser les formes d'ondes ainsi que les niveaux de surtensions et de surintensités correspondants.

II.5. Situations réelles pouvant donner lieu à la ferrorésonance

Dans un circuit monophasé ou triphasé, on peut distinguer deux configurations principales pour la ferrorésonance : les configurations "séries" et les configurations "parallèles".

Dans les configurations "séries", la capacité est connectée en série entre l'élément non linéaire et la source de tension. Les cas de ferrorésonance qui peuvent se présenter sur un réseau électrique dans ces configurations sont les suivants :

- Transformateur de tension alimenté par la capacité d'un ou de plusieurs disjoncteurs ouverts.
- Transformateur condensateur de tension (TCT).

- Reprise de service ou renvoi de la tension sur une ligne longue.
- Transformateur de tension raccordé à un réseau à neutre isolé.[31]

II.5.1. Transformateur de tension alimenté par la capacité d'un ou de plusieurs disjoncteurs ouverts

Dans le cas où la ferrorésonance se produit à travers un disjoncteur ouvert, il existe des capacités de répartition de la tension présentes dans les différentes chambres du disjoncteur qui sont responsables de ce phénomène. Dans le schéma de base représenté à la Figure II.13.a, la capacité C_t représente l'ensemble des capacités shunt mises à la terre, telles que la capacité du transformateur et la capacité entre la ligne et la terre, entre autres.

Le circuit équivalent de Thévenin de ce schéma est présenté à la Figure II.13.c. Ce circuit équivalent permet de modéliser le comportement électrique global du système et de comprendre les interactions entre les différents éléments qui contribuent à la ferrorésonance dans le cas d'un disjoncteur ouvert.

Avec :

$$V_{th} = V_n \frac{C_d}{C_d + C_t} \tag{II.20}$$

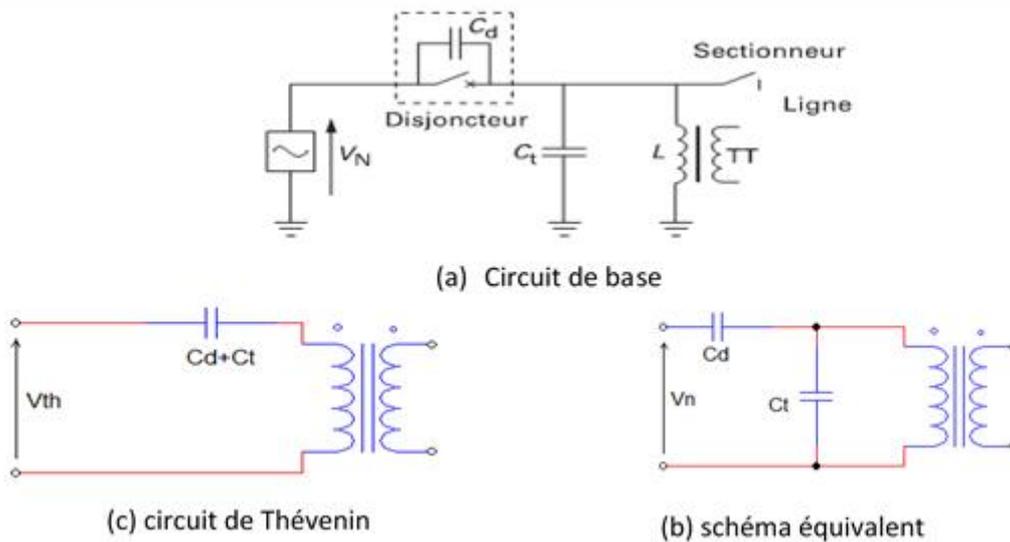


Figure. II. 13 Schéma d'un circuit ferrorésonant dans un transformateur de tension

Dans le schéma de Thévenin, le circuit de base est en série avec la capacité $(C_d + C_t)$ et alimenté par une tension réduite V_{th} . Il s'agit donc d'une configuration de ferrorésonance série. Dans ce schéma, la décharge de la capacité entraîne la saturation du transformateur, et différents régimes de ferrorésonance peuvent se produire, généralement de type fondamental ou sous-harmonique.

Pendant le régime fondamental, les surtensions sont importantes et peuvent entraîner une dégradation rapide du transformateur. Dans le cas du régime sous-harmonique, la fréquence et la tension sont généralement plus faibles, et le flux atteint le niveau de saturation, ce qui entraîne une augmentation de la température du transformateur. Pour certaines valeurs spécifiques de capacité, un régime quasi-périodique peut apparaître à des fréquences supérieures à celles du fondamental, et les surtensions sont également plus élevées.

II.5.2 Transformateur condensateur de tension (TCT)

Le transformateur condensateur de tension (TCT) est un dispositif économique qui abaisse la tension haute vers la basse en utilisant un diviseur de tension capacitif et un transformateur magnétique.

Le schéma du TCT est illustré dans la Figure II.14. Il est composé d'un quadripôle abaisseur de tension constitué des condensateurs C1, C2 et d'une inductance L, ainsi que d'un transformateur magnétique de tension.

Le principe de fonctionnement du TCT est le suivant : les condensateurs C1 et C2 forment un diviseur de tension capacitif qui abaisse la tension de haute tension à une valeur intermédiaire. Ensuite, cette tension intermédiaire est appliquée au transformateur magnétique de tension, qui réalise la dernière étape d'abaissement de tension vers la basse tension souhaitée. L'inductance L est choisie de façon à respecter la relation :

$$L(C_1 + C_2)(2\pi f)^2 = 1 \quad (\text{II.21})$$

Avec : la fréquence du réseau :

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (\text{II.22})$$

Le transformateur condensateur de tension (TCT) est composé de deux condensateurs et d'éléments non linéaires. Cette configuration crée les conditions propices à l'apparition de la ferrorésonance. Il s'agit d'une configuration de ferrorésonance série monophasée.

Les phénomènes de ferrorésonance se manifestent généralement lors des essais de tenue de court-circuit au niveau du secondaire. Pendant le court-circuit, une quantité significative d'énergie s'accumule dans le condensateur C2 et dans l'inductance L, qui atteint la saturation. Cela conduit à un circuit résonant qui provoque une élévation considérable de la tension aux bornes de C2 et du courant dans L. Le transformateur lui-même n'est pas saturé.

Lors de l'ouverture du court-circuit, la force magnétomotrice (FMM) de l'enroulement primaire n'est pas compensée par celle du secondaire. Cela entraîne la saturation du circuit magnétique et une induction magnétique très élevée, tandis que le circuit entre en ferrorésonance [32].

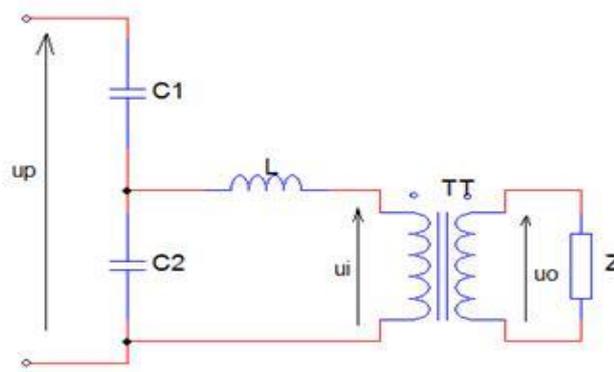


Figure II. 14 Schéma électrique d'un transformateur condensateur de tension [32]

II.5.3 Reprise de service ou renvoi de tension sur une longue ligne

Dans le cas d'une ligne triphasée longue, une situation pratique peut être représentée par le schéma équivalent monophasé donné dans la Figure II.15. La source de tension est un alternateur et à l'extrémité de la ligne se trouve une inductance saturable d'un transformateur.

Pour étudier analytiquement la ferrorésonance de ce circuit, des méthodes de stabilité des systèmes ont été utilisées pour déterminer les valeurs critiques de C (capacité) et L (inductance) conduisant à la ferrorésonance. Ces valeurs critiques indiquent les conditions dans lesquelles la ferrorésonance peut se produire dans le circuit.

Cette analyse permet de mieux comprendre les phénomènes de ferrorésonance et d'identifier les valeurs de C et L qui peuvent conduire à des situations indésirables. Ces informations sont essentielles pour concevoir et exploiter les réseaux électriques de manière sûre et stable. [33], [34]

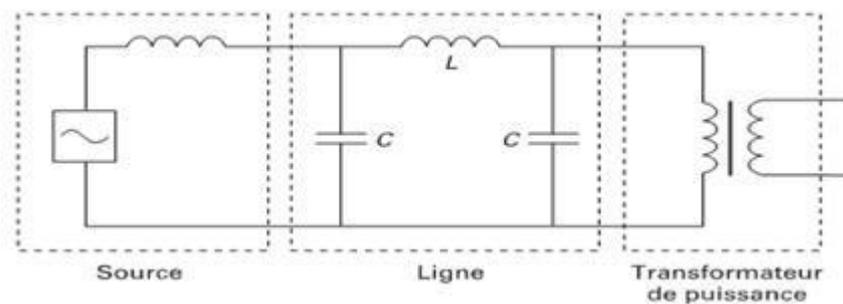


Figure II. 15 Schéma équivalent sans pertes d'un circuit ferrorésonant parallèle [31]

Les phénomènes de ferrorésonance se produisent lors des procédures de renvoi de tension sur une longue ligne ou lors de la reprise de service sur un réseau très capacitif.

Il existe deux types de renvoi de tension : le renvoi brusque et le renvoi progressif.

Dans le cas d'un renvoi brusque de tension, la fermeture du disjoncteur du côté du transformateur cible se fait à 90% de la tension nominale du groupe source. Cette mesure est prise pour limiter les surtensions transitoires telles que les surtensions de manœuvre, la ferrorésonance et les surtensions harmoniques, ainsi que les surtensions permanentes.

Le renvoi brusque de tension est une procédure préventive visant à réduire les risques de surtensions néfastes qui pourraient endommager les équipements électriques et perturber le fonctionnement du réseau



Figure II. 16 Représentation d'un renvoi de tension brusque

Pour le renvoi progressif de tension, le groupe source doit être équipé de la fonctionnalité renvoi de tension progressif, par action sur son excitation. Le disjoncteur côté source est fermé à tension nulle puis la tension est augmentée progressivement jusqu'à 90 % de la tension nominale (Fig.II.17). Avec ce type de renvoi de tension, les risques de surtensions sont très limités mais existent tout de même

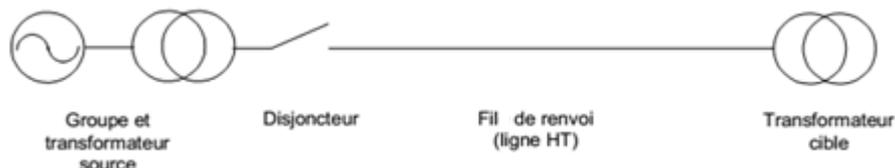


Figure II. 17 Représentation d'un renvoi progressif de tension

Les régimes de ferrorésonance rencontrés dans cette situation sont généralement du type fondamental ou quasi-périodique.

Les régimes de ferrorésonance permanents surviennent lorsque les valeurs des éléments de la ligne atteignent des valeurs critiques spécifiques. Ces régimes persistent dans le temps et peuvent causer des surtensions permanentes dans le réseau électrique.

Les régimes de ferrorésonance transitoires sont généralement issus de manœuvres violentes, telles que des enclenchements brusques de transformateur. Ces régimes sont de nature transitoire.

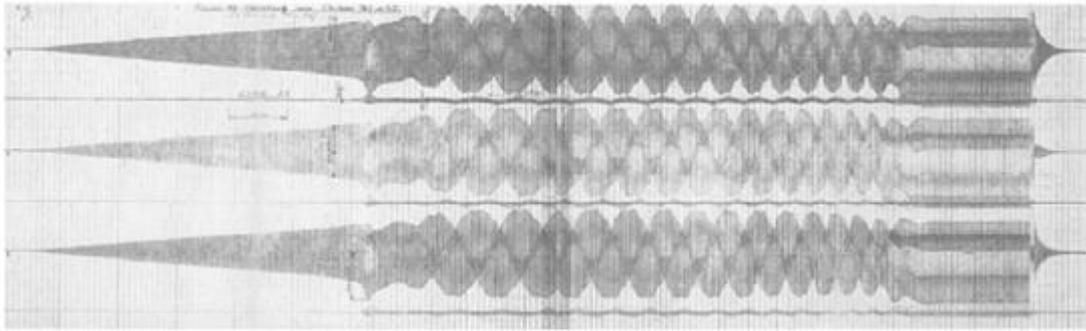


Figure II. 18 Surtension enregistrée lors d'un renvoi de tension [31]

II.5.4. Transformateurs de tension (TT) raccordés à un réseau à neutre isolé

Dans cette situation, le phénomène de ferrorésonance se produit en raison du couplage d'une source de secours à neutre isolé ou d'une défaillance du système de mise à la terre. La configuration correspondante est une ferrorésonance parallèle, où le schéma équivalent comprend des transformateurs de tension représentant l'inductance saturable et une capacité en parallèle avec l'inductance non linéaire.

Les manœuvres effectuées dans le réseau, telles que les pertes de charge ou l'élimination de défauts, peuvent déclencher le phénomène de ferrorésonance, en fonction des valeurs spécifiques de la capacité.

Les surtensions se produisent entre la phase et la terre, ainsi qu'entre la phase et le point neutre. Ces surtensions peuvent être problématiques et nécessitent une attention particulière pour éviter tout dommage aux équipements et assurer la sécurité du réseau électrique.

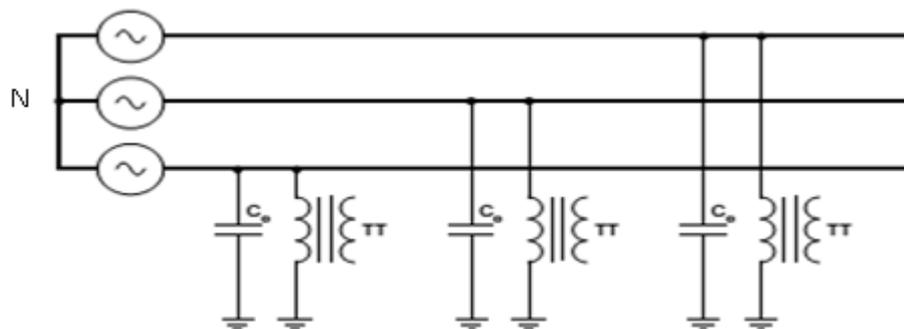


Figure II. 19 Transformateurs de tension (TT) raccordés à un réseau à neutre isolé,[35]

II.6. CONCLUSION :

Dans l'ensemble, nous avons abordé la ferrorésonance en examinant les différents régimes en fonction des formes des signaux, ainsi que les méthodes d'analyse couramment utilisées et les configurations du réseau qui peuvent y conduire.

Il est crucial de prendre en compte ces risques lors de la conception d'une installation électrique. Il est nécessaire de comprendre les situations réelles qui peuvent entraîner la ferrorésonance dans les réseaux électriques et de mener une analyse approfondie de la configuration afin d'éviter les valeurs critiques de certaines grandeurs telles que la tension, les capacités, etc., qui pourraient déclencher différents modes de ferrorésonance.

En prenant des mesures préventives appropriées et en mettant en œuvre des solutions adaptées, il est possible de minimiser les effets néfastes de la ferrorésonance et de garantir un fonctionnement sûr et stable du réseau électrique.

Chapitre III. Application et discussion des résultats

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'effet de la ferrorésonance sur un réseau qui est constitué d'une source de tension sinusoïdale, une ligne et un transformateur. Et ensuite analyser l'impact du mode de fonctionnement (à vide, en charge et en régime transitoire) en variant les valeurs des condensateurs. Pour les simulations nous avons choisis le logiciel ATPDraw.

III.2. Description du modèle à étudier

Notre étude consiste de réalisations des simulations numériques sur une ligne qui est alimenté avec une tension de 220V, comprenant une résistance, une inductance et un condensateur, en présence d'un transformateur de puissance de 2 KVA.

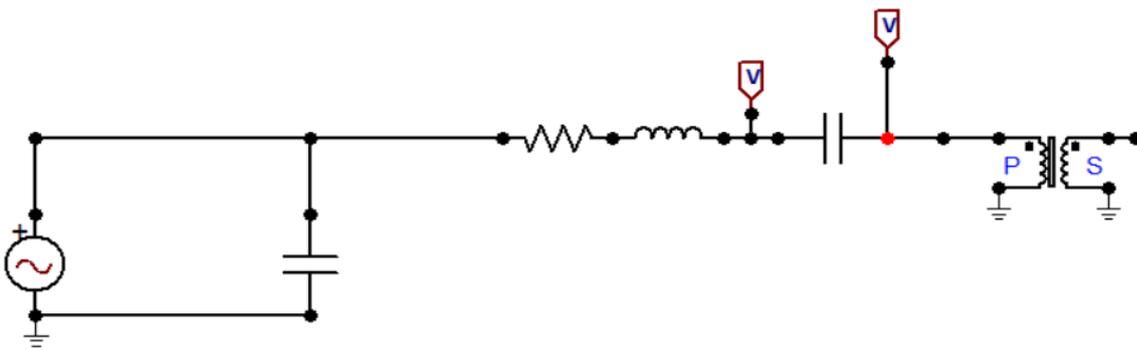


Figure III. 1 Représentation du modèle étudié ATPDraw

III.3. Description du logiciel ATPDraw :

ATPDraw est un logiciel de simulation et de conception de systèmes électriques largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie électrique. Il offre une interface graphique conviviale permettant aux utilisateurs de créer et de modifier des schémas électriques, en ajoutant des composants tels que des générateurs, des transformateurs et des lignes de transmission. Le logiciel permet la modélisation complète de réseaux électriques, y compris les réseaux de distribution et de transport, ainsi que les systèmes de production d'énergie. Sa spécialité est la simulation de transitoires électromagnétiques, ce qui permet d'analyser les variations rapides des grandeurs électriques et de comprendre les phénomènes tels que les surtensions, les surintensités et les courts-circuits.

ATPDraw offre également des outils d'analyse de stabilité pour évaluer la réponse transitoire d'un système à des perturbations externes, ainsi que des fonctionnalités d'analyse harmonique pour étudier les effets des harmoniques sur les systèmes électriques. Les résultats de la simulation peuvent être exportés vers d'autres outils d'analyse ou de visualisation, et des rapports détaillés peuvent être générés. ATPDraw est utilisé dans l'industrie de l'énergie, la recherche et l'enseignement pour la conception, l'analyse et l'optimisation des systèmes électriques. [36]

III.3.1. Transformateur saturable monophasé (utilisé dans la simulation)

Un transformateur saturable monophasé est un modèle de transformateur qui prend en compte la saturation magnétique du noyau. Contrairement au transformateur idéal, il tient compte des effets non linéaires causés par des niveaux élevés de flux magnétique. Ce modèle permet de représenter de manière plus précise le comportement du transformateur lorsqu'il atteint des niveaux de saturation. Il est utilisé pour étudier les transitoires électromagnétiques et électromécaniques, et évaluer l'impact de la saturation sur les pertes, la réponse en fréquence et la réaction aux surtensions. En utilisant ce modèle dans un logiciel de simulation, on peut analyser le comportement du transformateur dans des situations réelles, ce qui est important pour la conception et l'optimisation des systèmes d'alimentation.

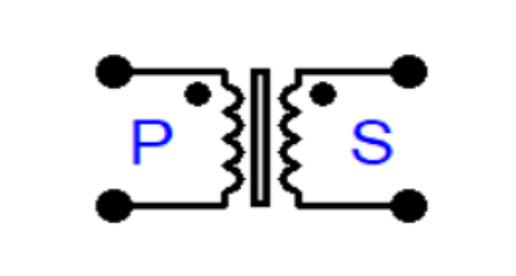


Figure III. 2 Symbole du transformateur TRAFOS dans ATPDraw

III.4. Identification des paramètres du transformateur

III.4.1. Model de transformateur utilisé

Nous allons étudier les caractéristiques du transformateur monophasé saturable dans le cadre de notre recherche.



(a)

(b)

Figure III. 3 (a) plaque signalétique de transformateur. (b) transformateur réel [37]

Caractéristique de transformateur :

- La tension primaire nominale : $V_{1n} = 220V$
- La tension secondaire nominale : $V_{2n} = 25 V$
- La puissance apparente : $S_n = 2000 VA$
- La fréquence : $f = 50 HZ$
- $I_{1n} = S_n / V_{1n} = 2000 / 220 = 9,1 A$
- $I_{2n} = S_n / V_{2n} = 2000 / 25 = 80 A$

Les éléments matériels utilisés sont les suivants :

- Un transformateur monophasé.
- Une source d'alimentation alternative telle qu'un autotransformateur.
- Des appareils de mesure tels qu'un voltmètre, un ampèremètre et un wattmètre.
- Des câbles de raccordement pour connecter les différents composants.

III.4.2. Analyse des paramètres du circuit équivalent à partir de l'essai à vide

En appliquant une tension nominale de 220 V sur le côté primaire et en laissant le côté secondaire ouvert, nous mesurons les valeurs de tension V_{10} , courant I_{10} et puissance active P_{10} (pertes fer) à l'aide des appareils de mesure

L'essai à vide nous permet de calculer le rapport de transformation m , ainsi que la résistance R_m et la réactance de magnétisation X_m .



Figure III. 4 Montage de l'essai à vide du transformateur monophasé

Le tableau suivant représente les résultats de mesure, pour l'essai à vide :

Tableau III. 1 Résultats de l'essai à vide

	V_1	V_2	P_{10}	$\cos\phi_{10}$	I_{10}
<i>Essai a vide</i>	220	25	17	0.2	0.369

La puissance absorbée P_{10} correspond aux pertes fer du circuit magnétique lorsqu'il est à vide.

$$P_{10} = I_{10} * V_{10} * \cos \varphi_{10} \quad (\text{III.1})$$

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{I_{10} * V_{10}} = \frac{17}{220 * 0.369} = 0.20 \quad (\text{III.2})$$

Le facteur de puissance à vide égale à 0.20

- **Calcule la résistance et la réactance de magnétisation**

Le courant à vide I_{10} se divise en deux composantes dans la branche magnétisante : la composante active I_{10a} et la composante réactive I_{10r} . Les relations entre ces composantes sont les suivantes :

$$I_{10a} = I_{10} * \cos \varphi_{10} \quad (\text{III.3})$$

$$I_{10r} = I_{10} * \sin \varphi_{10} \quad (\text{III.4})$$

Résistance shunt R_m

$$R_m = \frac{V_1}{I_{10a}} = \frac{V_1}{I_{10} * \cos \varphi_{10}} \quad (\text{III.5})$$

$$R_m: 2847,05 \Omega.$$

Réactance shunt X_m

$$X_m = \frac{V_1}{I_{10r}} = \frac{V_1}{I_{10} * \sin \varphi_{10}} \quad (\text{III.6})$$

$$X_m = 609,72 \Omega$$

III.4.3. Analyse des paramètres du circuit équivalent à partir de l'essai court-circuit

En utilisant un autotransformateur, on alimente le transformateur avec une tension très réduite V_{1cc} , ce qui nous permet d'obtenir le courant nominal du côté secondaire. Dans cet essai, les pertes dans le fer sont négligeables car elles dépendent de la tension et la puissance absorbée, qui représente essentiellement les pertes par effet Joule



Figure III. 5 Montage de l'essai en court-circuit d'un transformateur monophasé

Le tableau suivant représente les résultats de mesure, pour l'essai court-circuit

Tableau III. 2 Résultats du l'essai court-circuit

	$V_{1cc}(V)$	$I_{1cc}(A)$	$P_{1cc}(W)$	$I_{2cc}(A)$
<i>Essai en Court-circuit</i>	22	9.1	87	80

- **Calcul de résistances R1 et R2**

R_{eq1} la résistance équivalente du primaire.

$$\text{On a:} \quad P_{1cc} = R_{eq1} * (I_{1cc})^2 \quad (\text{III.7})$$

$$R_{eq1} = \frac{P_{1cc}}{(I_{1cc})^2} \quad (\text{III.8})$$

$$R_{eq1} = 3,48 \Omega$$

En pratique, il est courant d'assumer que la résistance et la réactance du primaire sont égales à celles du secondaire, ramenées au primaire, ou vice versa. Par conséquent, pour obtenir ces deux paramètres, on peut utiliser la méthode suivante :

$$R_1 = \frac{R_{eq1}}{2} = \frac{3,48}{2} = 1,74\Omega \quad (\text{III.9})$$

$$m = \frac{V_{20}}{V_1} = \frac{25}{220} = 0,11 \quad (\text{III.10})$$

Et :

$$\frac{R_2}{m^2} = \frac{R_{eq1}}{2} \quad (\text{III.11})$$

Alors :

$$R_2 = m^2 * R_1 \quad (\text{III.12})$$

$$R_2 = (0,11364)^2 * 1.74 = 0,02246\Omega$$

• **Calcul de réactances X1 et X2**

On a :

$$V_{1cc} = Z_{eq1} * I_{1cc} \quad (\text{III.13})$$

Donc :

$$Z_{eq1} = \frac{V_{1cc}}{I_{1cc}} \quad (\text{III.14})$$

$$Z_{eq1} = \frac{22}{9,1} = 2.41\Omega$$

La réactance équivalente au primaire :

$$X_{eq1} = \sqrt{(Z_{eq1})^2 - (R_{eq1})^2} \quad (\text{III.15})$$

$$X_{eq1} = 2,69248\Omega$$

En utilisant la même méthode appliquée pour obtenir les résistances, on peut également déterminer les réactances du primaire et du secondaire.

$$X_1 = \frac{X_{eq1}}{2} \quad (\text{III.16})$$

$$X_1 = \frac{2.69248}{2} = 1,34624 \Omega$$

$$\text{Et:} \quad \frac{X_2}{m^2} = \frac{X_{eq1}}{2} \quad (\text{III.17})$$

$$\text{Alors :} \quad X_2 = m^2 * X_1 \quad (\text{III.18})$$

$$X_2 = (0,11364)^2 * 1,34624 = 0,0178 \Omega$$

III.4.4. Paramètres de transformateur

- R_{mag} : Résistance de magnétisation ($R_{\text{mag}} = 2847,05$ ohms)
- R_p : Résistance de l'enroulement primaire ($R_p = 1,74$ ohms)
- L_p : Inductance de l'enroulement primaire ($L_p = 0,0085$ mH)
- V_{rp} : Tension nominale du primaire ($V_{\text{rp}} = 0,22$ kV (220 volts))
- R_s : Résistance de l'enroulement secondaire ($R_s = 0,022$ ohms)
- L_s : Inductance de l'enroulement secondaire ($L_s = 0,00010967$ mH)
- V_{rs} : Tension nominale du secondaire ($V_{\text{rs}} = 0,025$ kV (25 volts))
- RMS : Rapport de transformation (RMS) = 0

III.4.5. Saturation des branches magnétisantes

Les valeurs obtenues pour la caractéristique $v = f(ir)$ et la conversion en valeurs de flux-courant pour la caractéristique de saturation $\lambda = f(il)$, en utilisant la méthode proposée dans [19], sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III. 3 Caractéristiques calculées en valeurs

V_{max} (V)	$i_r(A)$	λ (V.s)	$i_l(A)$
0	0	0	0
14.001	0.0036	0.0446	0.0061
44.2649	0.0113	0.1409	0.0139
95.0352	0.0276	0.305	0.0237
152.596	0.0393	0.4857	0.045
274.4989	0.0965	0.8738	0.4319
311.127	0.124	0.9903	0.7668
392.7573	0.2451	1.1979	1.7384
404.7479	0.2717	1.2406	2.0274
476.0243	0.6496	1.4248	5.0491
		1.498	8.9502

La Figure IV.6 illustre la relation entre la tension maximale V_{max} et le courant actif i_r qui traverse la résistance de la branche magnétisante R_m . Cette courbe $V = f(i_r)$ représente la non-linéarité de la résistance du modèle de la branche magnétisante.

D'autre part, la Figure IV.7 illustre la relation entre le flux de liaison magnétique λ et le courant électrique i_l qui traverse la bobine. Cette courbe $\lambda = f(i_l)$ représente la non-linéarité de l'inductance du modèle de la branche magnétisante.

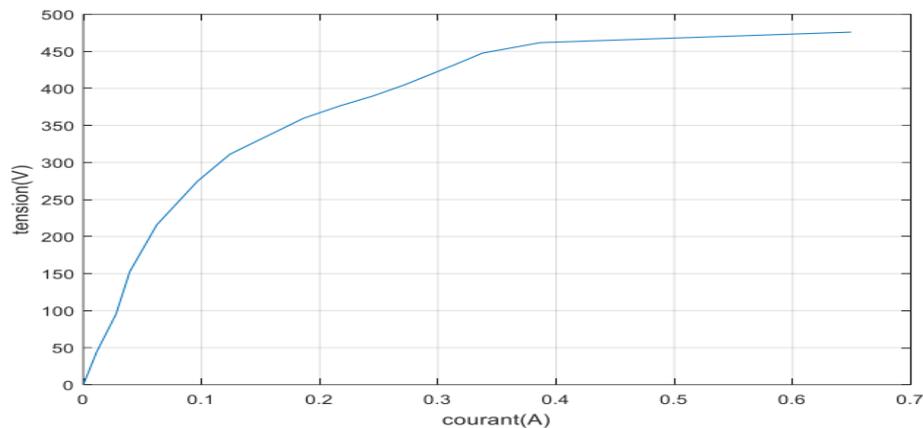


Figure III. 6 Courbe de la résistance non linéaire $v = f(ir)$.

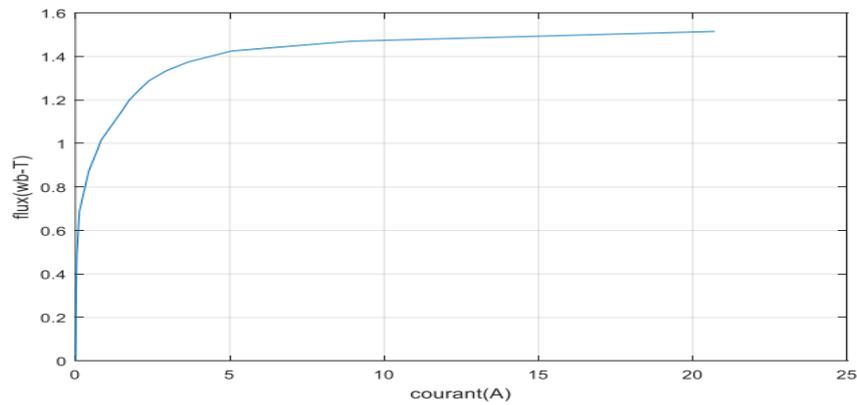


Figure III. 7 Courbe de saturation $\lambda = f(i)$

III.5. Caractéristiques de la ligne :

On prendra dans la suite :

- R : résistance kilométrique de la ligne (R=10 Ohms)
- L : l'inductance kilométrique de la ligne (L=0.0001 mH)
- C₁ : capacité kilométrique de la ligne (C=10)
- Nous allons procéder à la variation de valeur de C2

III.6. Simulation et interprétation des résultats :

Les schémas suivants représentent les trois modes à étudier (figure.III.8 à vide, figure.II.9 en régime transitoire et figure.IV.10 en charge). Et On analyse les résultats :

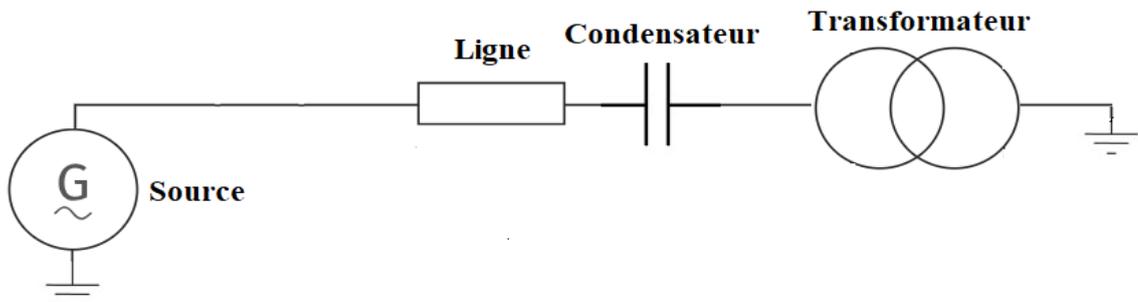


Figure III. 8 Schéma électrique du réseau à vide

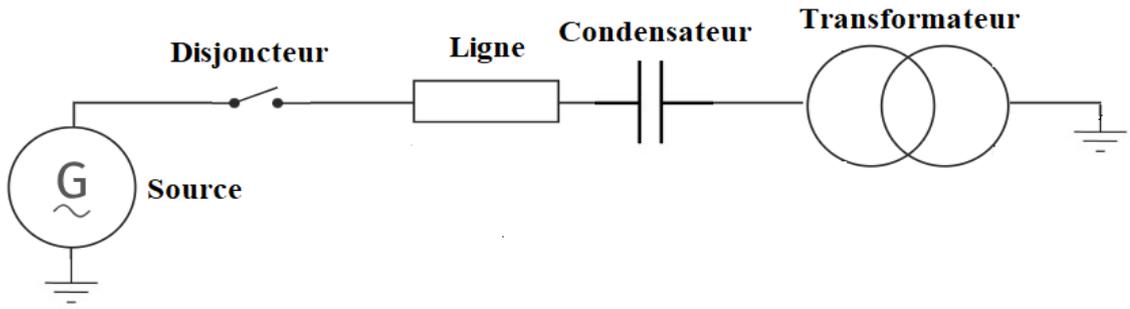


Figure III. 9 Schéma électrique du réseau en Régime Transitoire

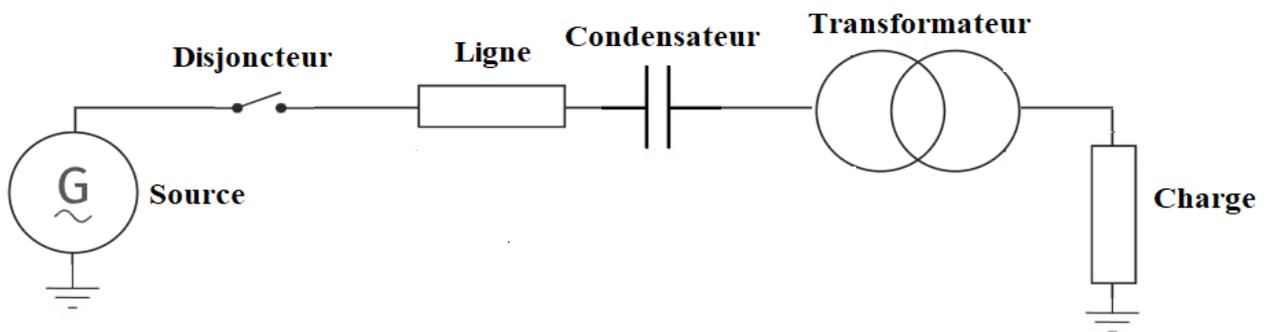


Figure III. 10 Schéma électrique du réseau En Charge

III.6.1. Premiers cas (Transformateur à vide).

- Régime permanent

Nous allons procéder à la simulation des courbes de tension V_a et V_b pour étudier l'effet de la Ferrorésonance

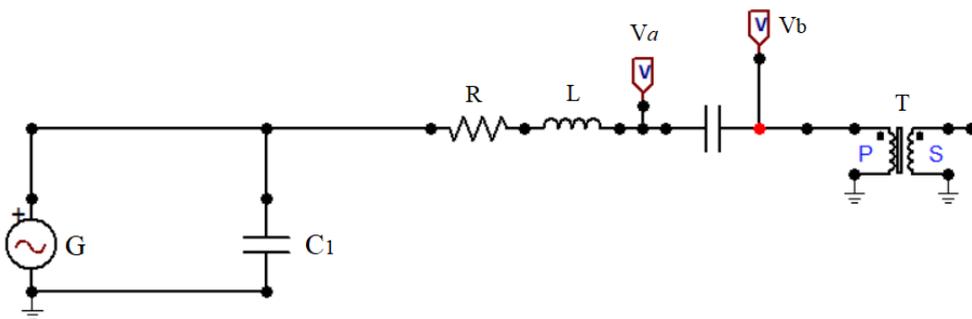


Figure III. 11 Schéma équivalent en régime permanent à vide

Nous allons effectuer une simulation du circuit à vide modifiant la valeur du condensateur C_2 . L'objectif de cette simulation est d'analyser les effets de la Ferrésonance et d'étudier comment ces effets se manifestent dans le comportement du circuit.

Voici les tracés des courbes de tension V_a et V_b obtenues lors de la simulation du circuit à vide avec une valeur de C_2 égale à $20 \mu\text{F}$.

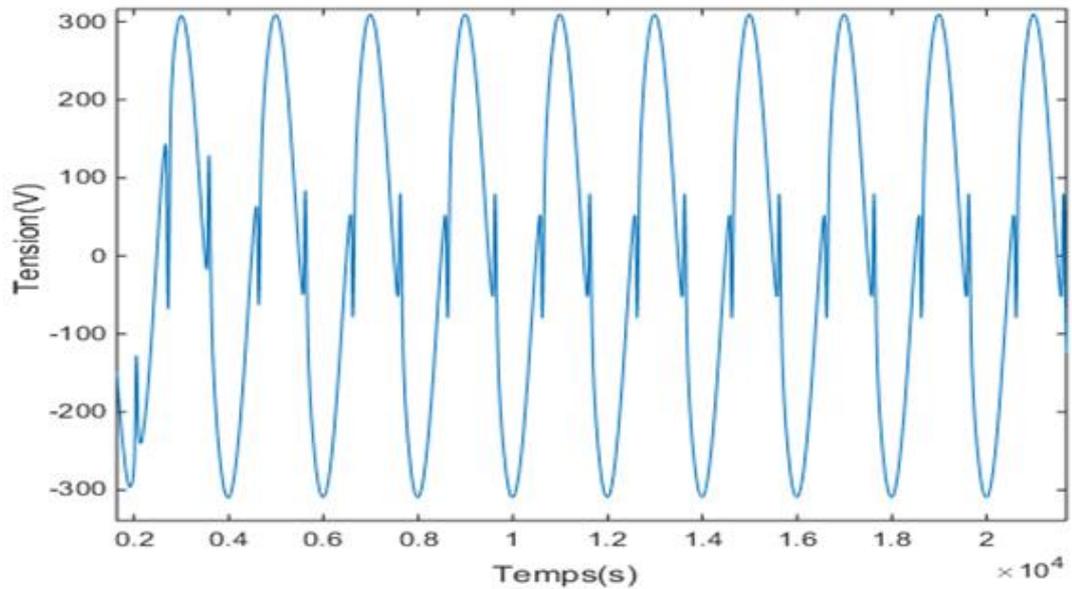


Figure III. 12 La courbe de tension V_a avec $C_2=20 \mu\text{F}$

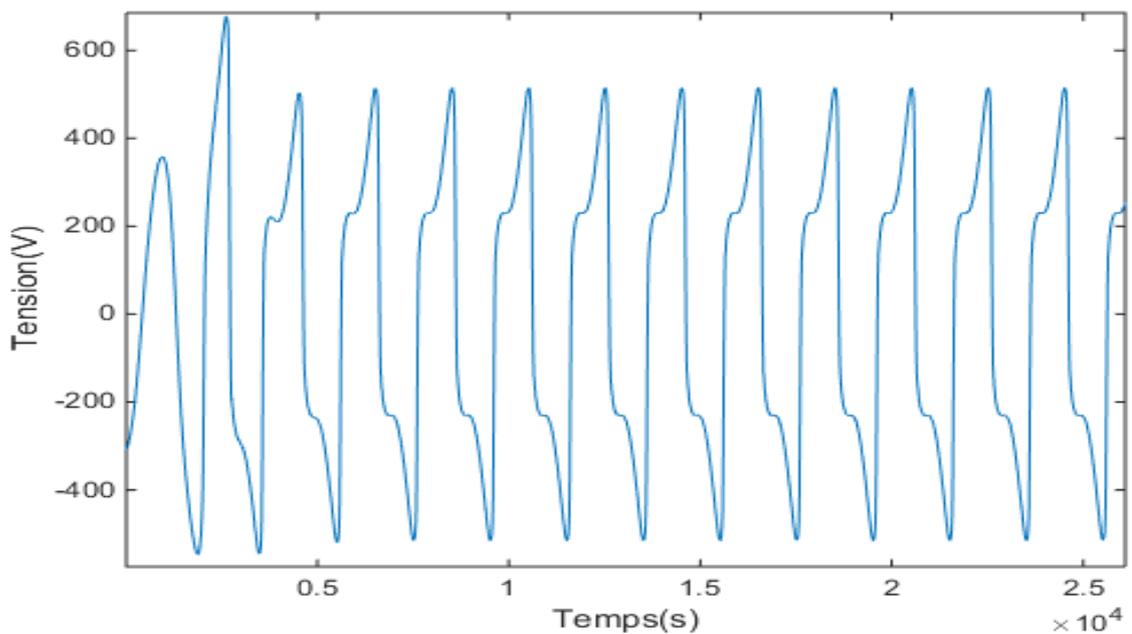


Figure III. 13 La courbe de tension V_b avec $C_2=20 \mu\text{F}$

Les courbes de tension V_a et V_b obtenues lors de la simulation du circuit à vide avec une valeur de C_2 égale à $60 \mu\text{F}$

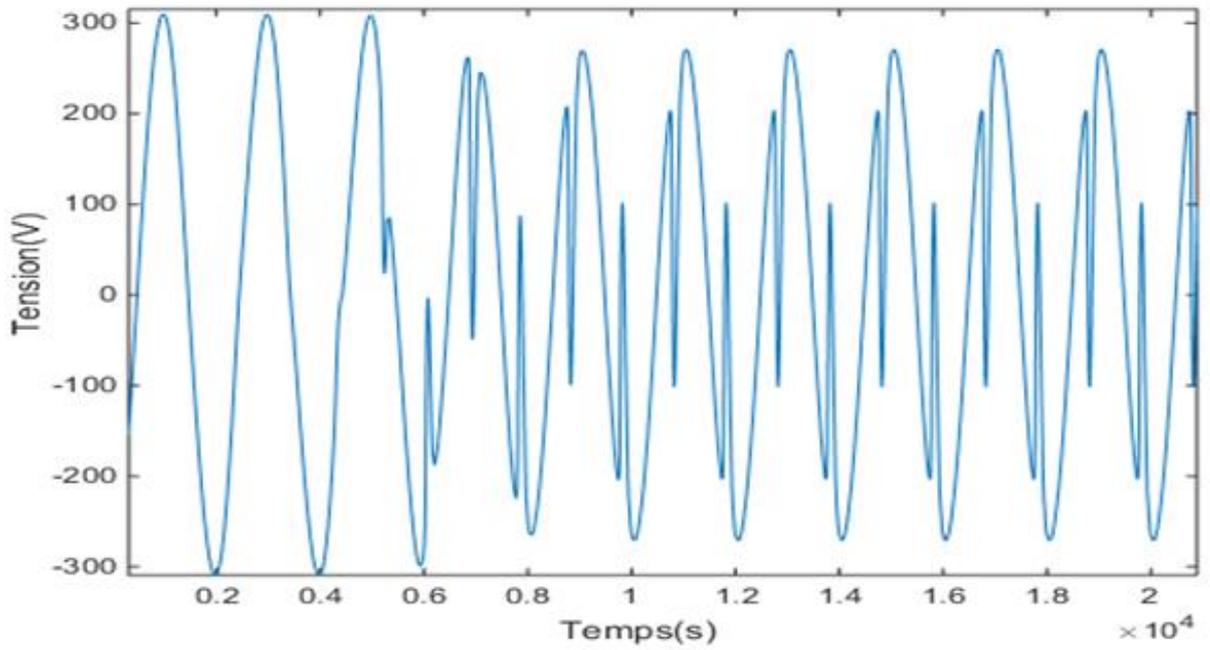


Figure III. 14 La courbe de tension V_a avec $C_2=60 \mu\text{F}$

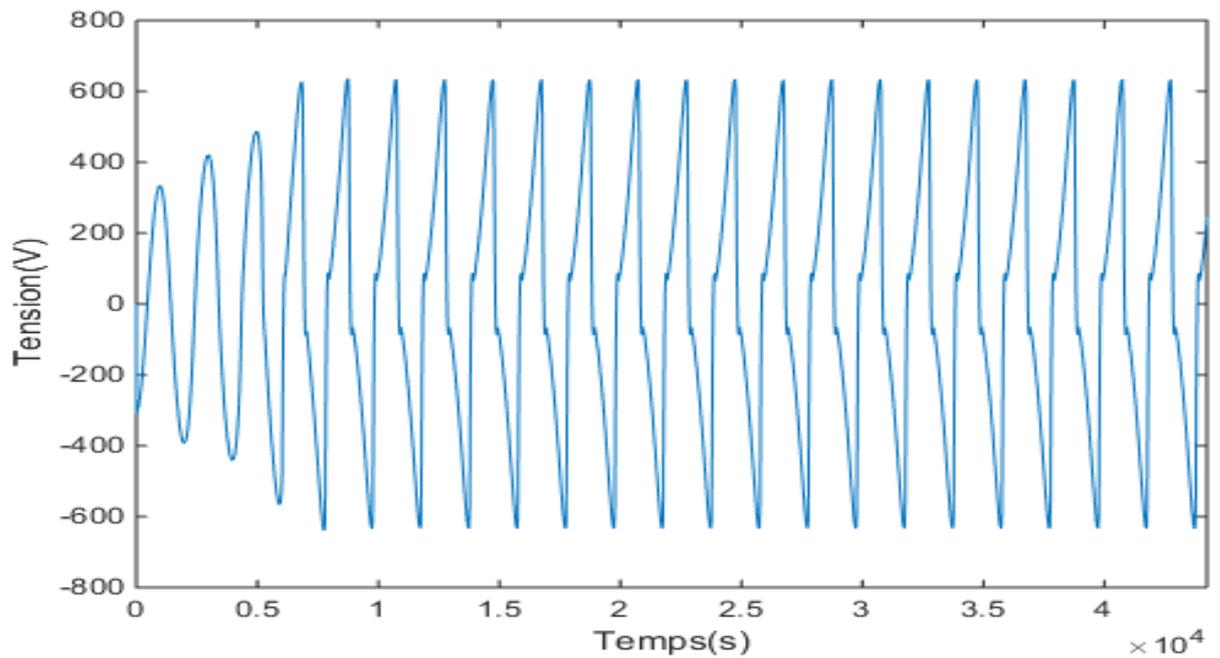


Figure III. 15 La courbe de tension V_b avec $C_2=60 \mu\text{F}$

Les courbes de tension V_a et V_b obtenues lors de la simulation du circuit à vide avec une valeur de C_2 égale à $100 \mu\text{F}$

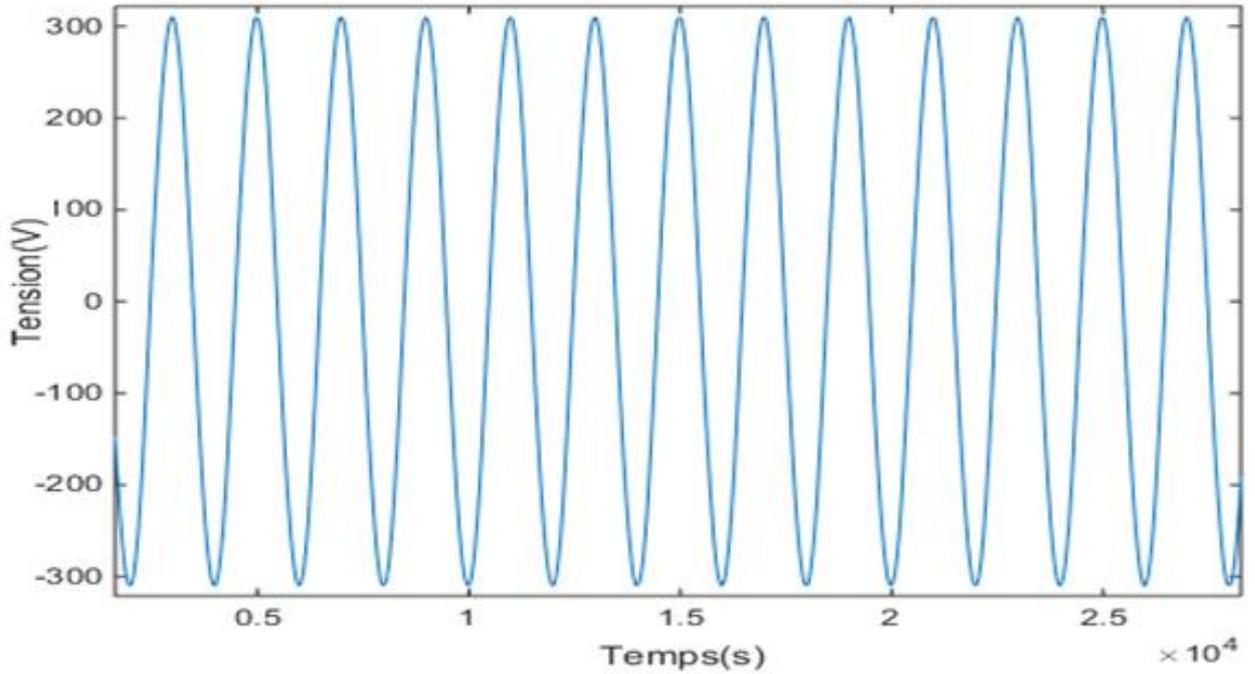


Figure III. 16 La courbe de tension V_a avec $C_2=100 \mu\text{F}$

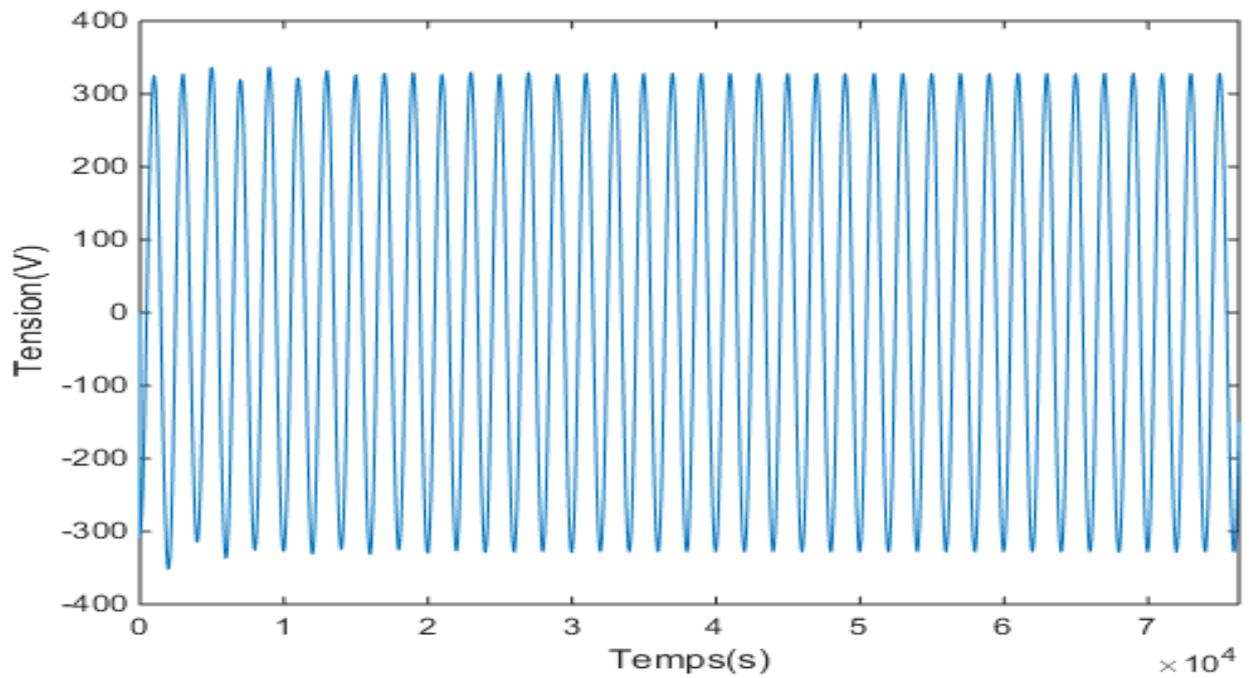


Figure III. 17 La courbe de tension V_b avec $C_2=100$

• Régime Transitoire

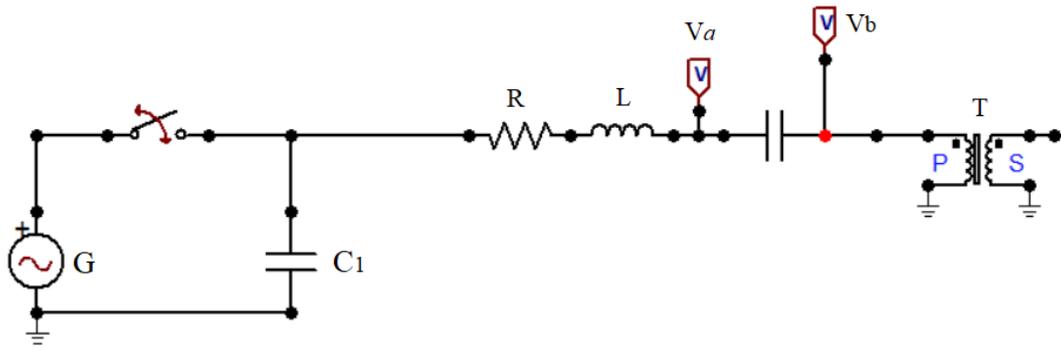


Figure III. 18 Schéma équivalent en Régime transitoire à vide

Voici les tracés des courbes de tension V_a et V_b obtenues lors de la simulation du circuit en régime transitoire à vide avec une valeur C_2 égale à $20 \mu\text{F}$.

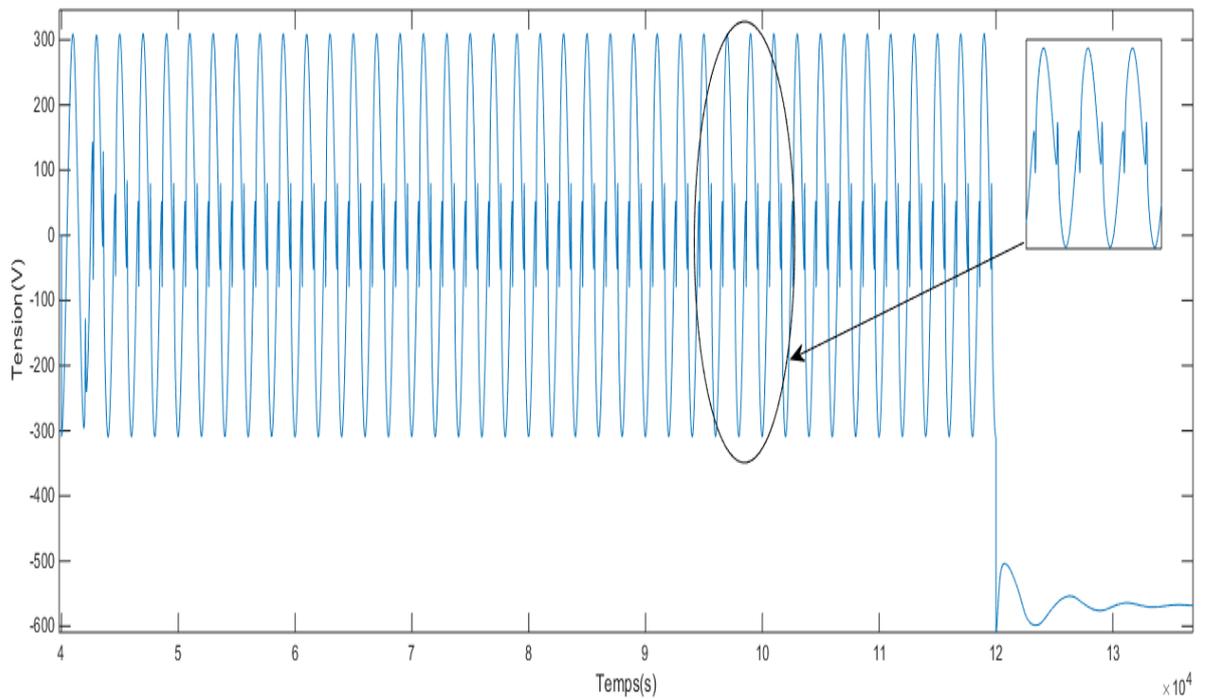


Figure III. 19 La courbe de tension en régime transitoire V_a avec $C_2=20 \mu\text{F}$

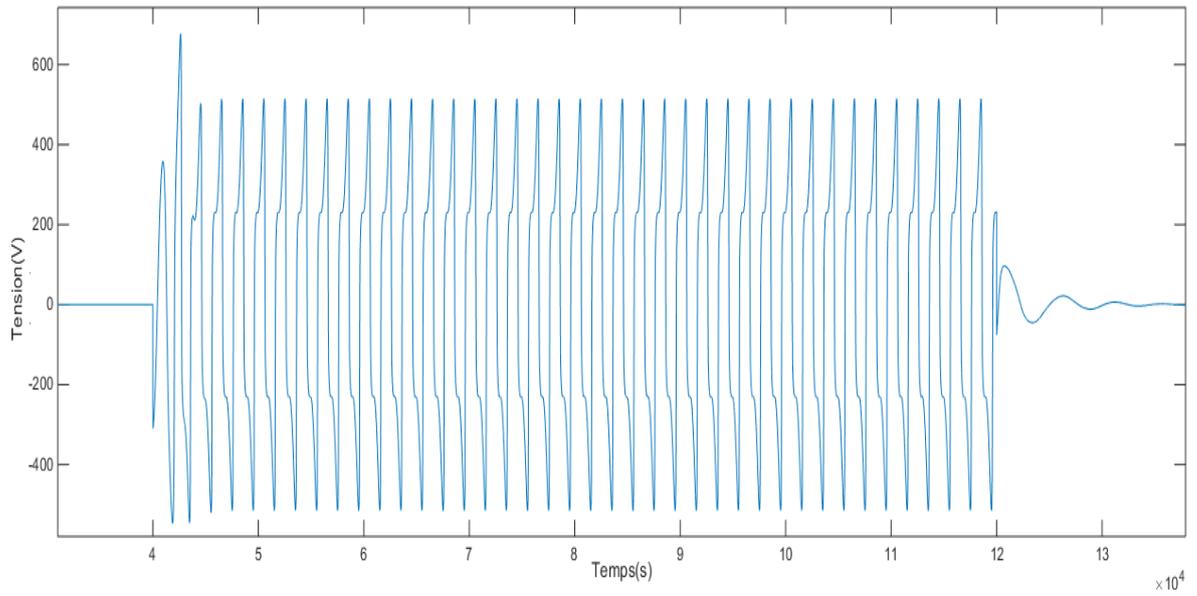


Figure III. 20 La courbe de tension en régime transitoire Vb avec C2=20 μF

Les courbes de tension Va et Vb obtenues lors de la simulation du circuit à vide avec une valeur de C2 égale à 60μF

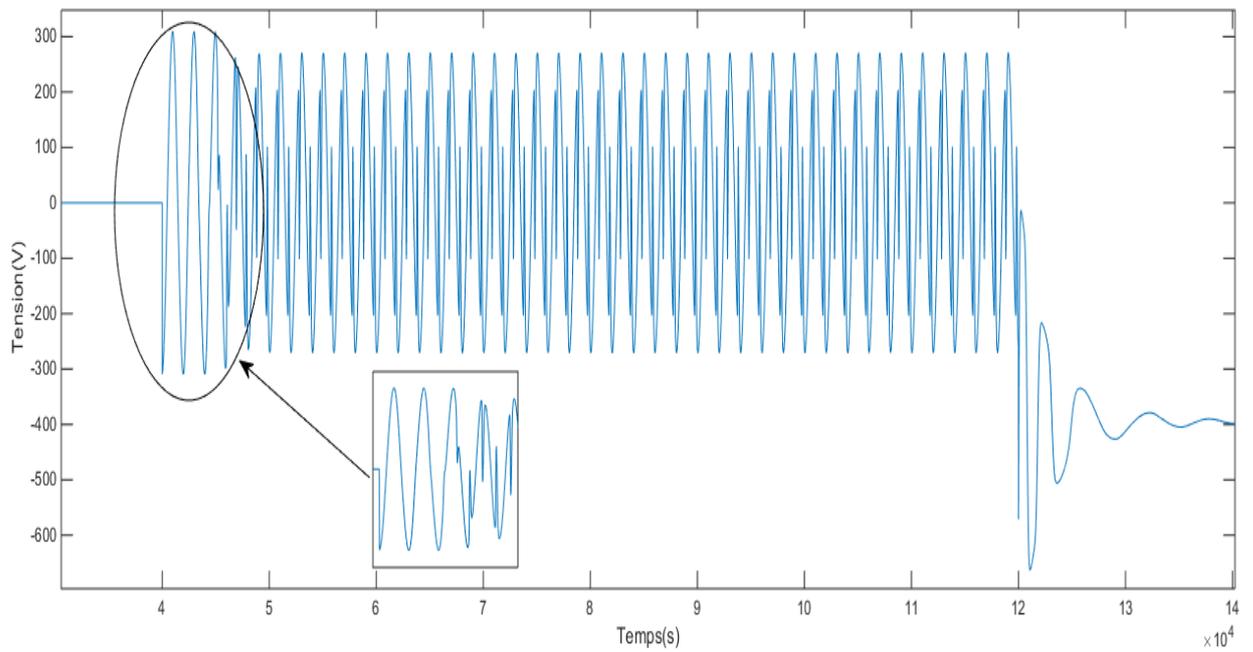


Figure III. 21 La courbe de tension en régime transitoire Va avec C2=60 μF

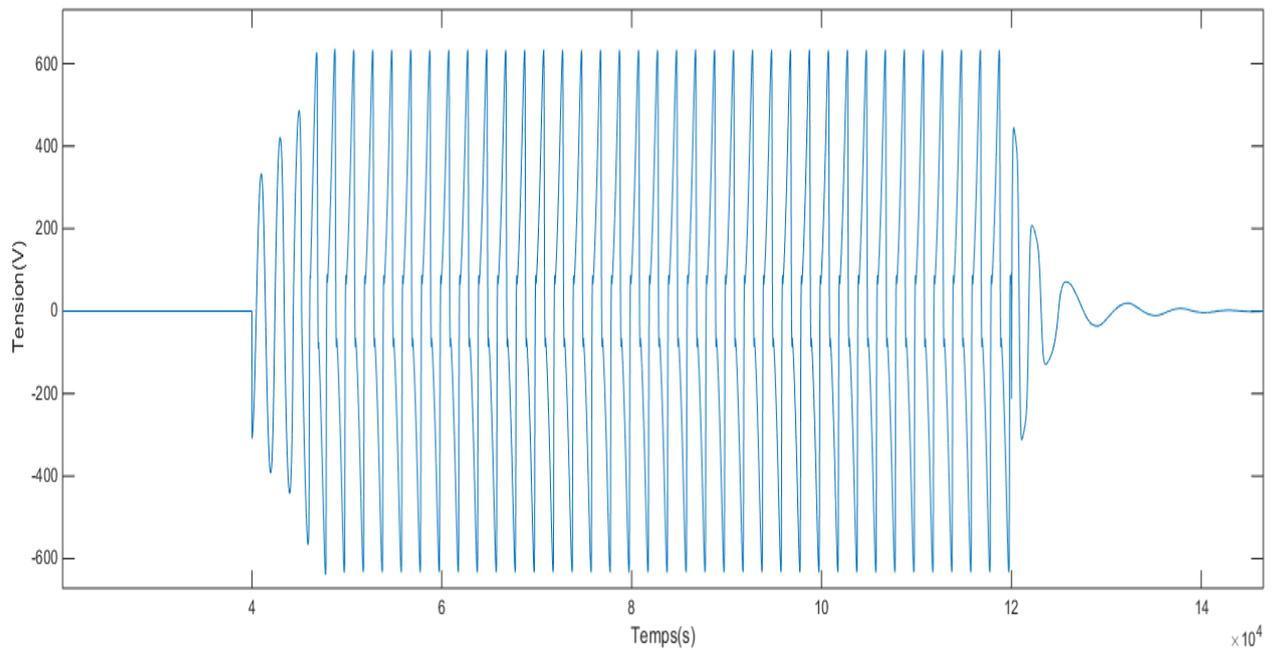


Figure III. 22 La courbe de tension en régime transitoire V_b avec $C_2=60 \mu F$

Les courbes de tension V_a et V_b obtenues lors de la simulation du circuit à vide avec une valeur de C_2 égale à $100 \mu F$

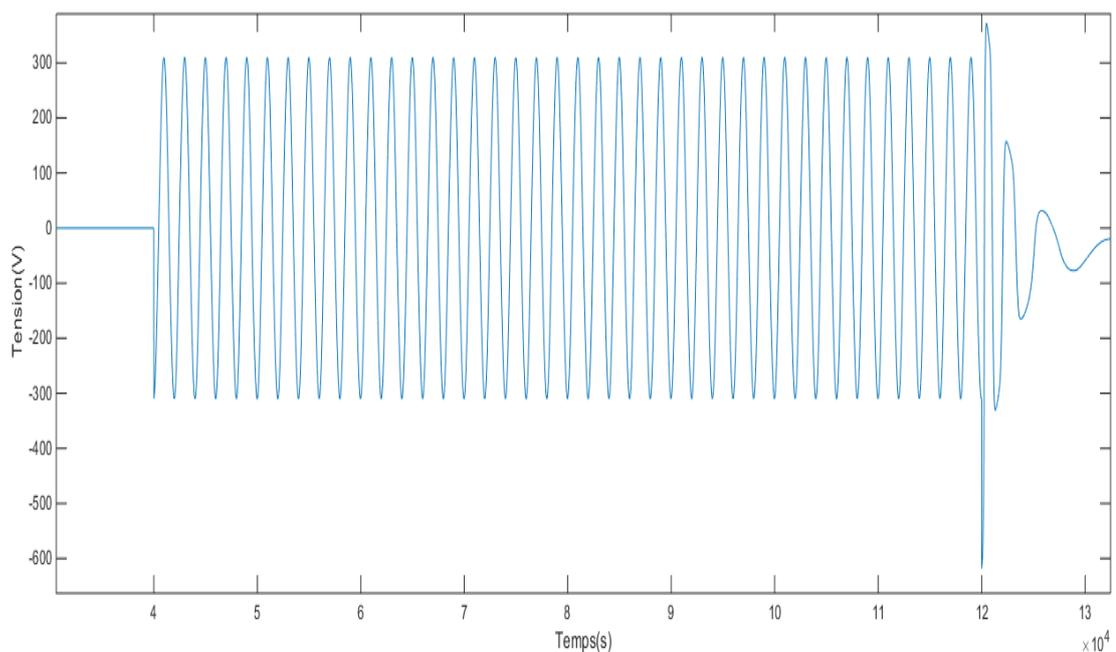


Figure III. 23 La courbe de tension en régime transitoire V_a avec $C_2=100 \mu F$

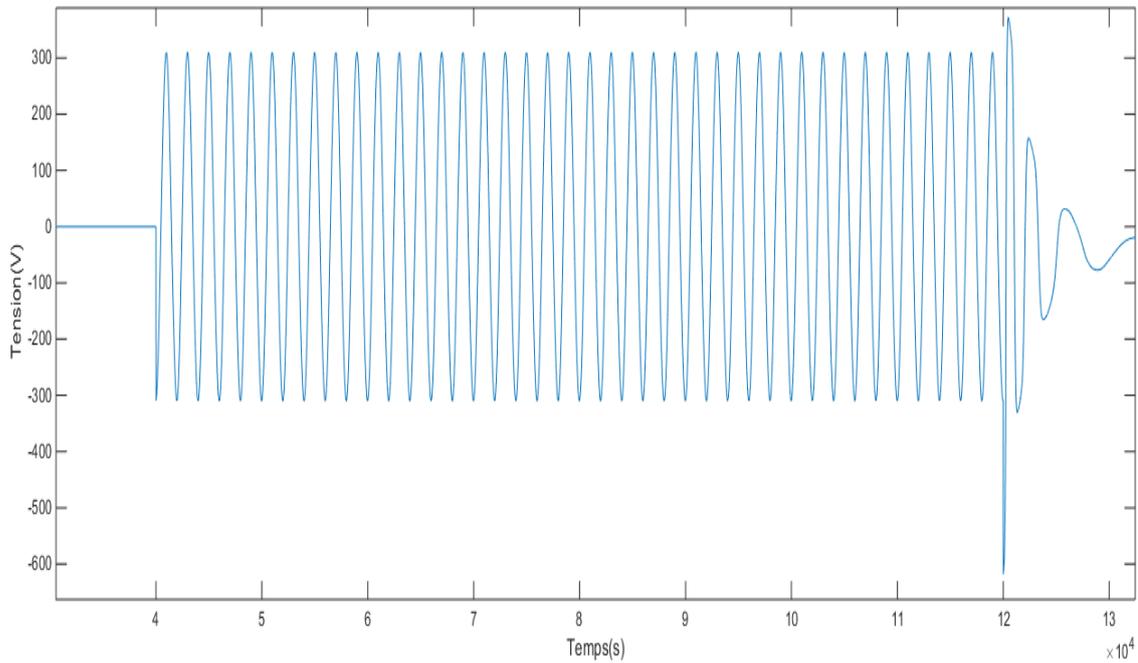


Figure III. 24 La courbe de tension en régime transitoire V_b avec $C_2=100 \mu\text{F}$

III.6.1.1. Interprétation des résultats :

Lorsque le transformateur fonctionne à vide en régime permanent et transitoire, des surtensions sont observées. Les simulations démontrent que les tensions pendant cette période ne suivent pas une forme sinusoïdale en raison de la présence d'harmoniques. Ces harmoniques sont engendrées par le comportement non linéaire du circuit magnétique du transformateur ainsi que par l'interaction avec le condensateur en série.

En observant les résultats, il est remarqué que chaque fois que la valeur du condensateur en série avec le transformateur est augmentée, la tension prend une forme sinusoïdale et les surtensions sont réduites. Cela suggère que l'on peut éliminer ces surtensions en variant la valeur du condensateur.

En ajustant la valeur du condensateur en série, il est possible de modifier la résonance du circuit et d'atténuer les harmoniques indésirables. Cela permet de stabiliser la tension et de réduire les surtensions observées.

Lorsque la valeur du condensateur en série atteint $100\mu\text{F}$, les courbes de tension V_a et V_b deviennent identiques. Cela indique qu'il y a une résonance entre le transformateur et le condensateur, ce qui conduit à une réponse similaire des tensions aux bornes des deux composants.

III.6.2. Deuxième cas (Transformateur en charge)

III.6.2.1. Charge purement résistive

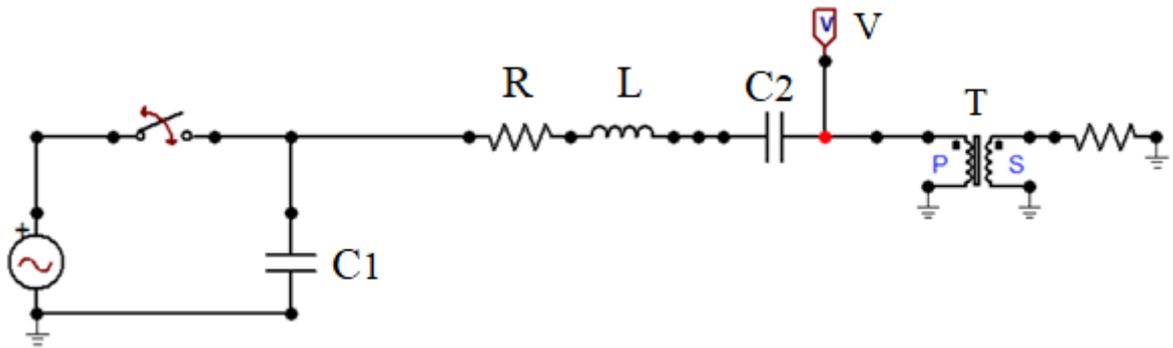


Figure III. 25 Schéma équivalent en régime transitoire avec une charge résistive

La résistance R dans le cas d'un circuit de charge résistif est de 10 ohms.

Voici les tracés des courbes de tension V obtenues lors de la simulation du circuit en régime transitoire en charge avec une valeur C2 égale à 20 μF

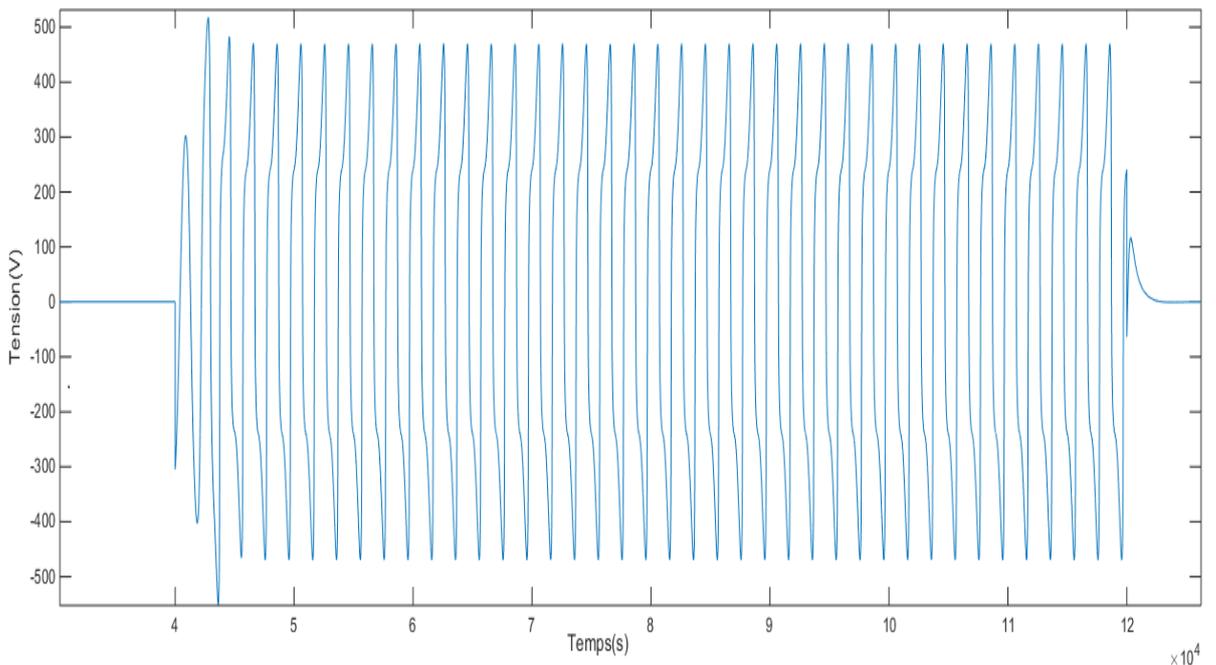


Figure III. 26 La courbe de tension V du circuit en charge avec C2=20 μF

La courbes de tension V obtenues lors de la simulation du circuit en régime transitoire en charge avec une valeur C2 égale à 100 μF

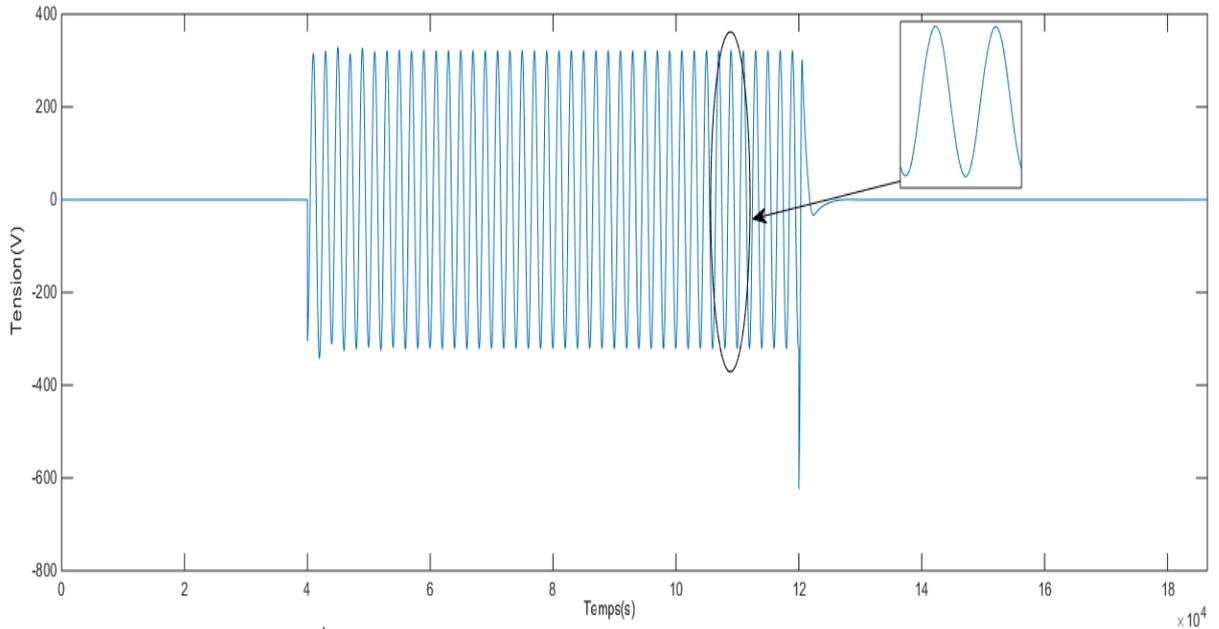


Figure III. 27 La courbe de tension V du circuit en charge avec $C2=100 \mu\text{F}$

III.6.2.1.1. Interprétation des résultats :

Effectivement, lorsqu'un transformateur est soumis à une charge purement résistive, il peut y avoir des surtensions et des perturbations observées pendant le régime transitoire. Ces phénomènes sont généralement dus au comportement non linéaire du circuit magnétique du transformateur.

Lorsqu'un transformateur est excité par une source d'alimentation alternative, le circuit magnétique peut présenter des non-linéarités en raison de la saturation magnétique, des pertes ferromagnétiques et d'autres effets magnétiques non idéaux. Ces non-linéarités introduisent des harmoniques dans les grandeurs électriques, y compris les tensions.

L'existence d'harmoniques dans les tensions peut provoquer des distorsions et des formes d'onde non sinusoïdales. Ces distorsions peuvent entraîner des surtensions et des perturbations dans le circuit, affectant ainsi la performance des équipements connectés.

Qu'en augmentant la valeur du condensateur en série avec le transformateur, les surtensions peuvent diminuer dans certains cas. Cela est dû à l'effet de l'augmentation de la capacité sur le comportement du circuit et la réduction des phénomènes de résonance.

III.6.2.2. Une charge RL :

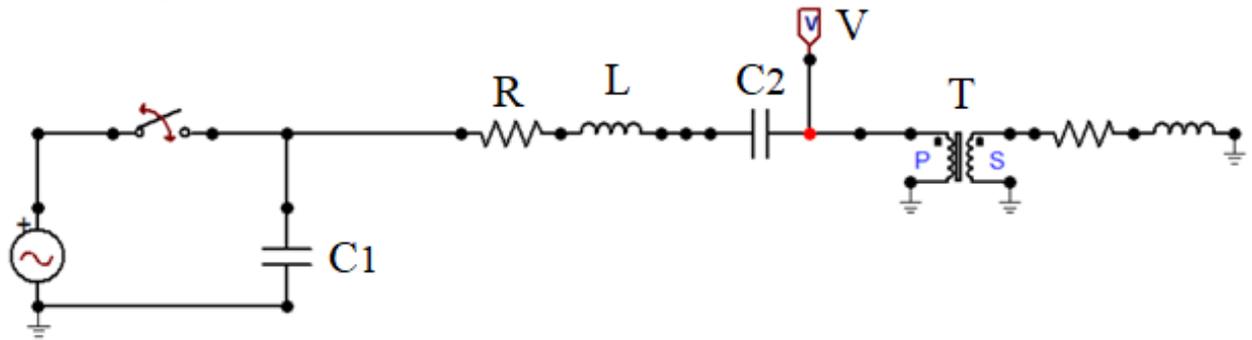


Figure III. 28 Schéma équivalent e régime transitoire avec une charge RL

Dans le cas d'une charge RL, la résistance R est de 10 ohms et l'inductance L est de 1 mH

Voici les tracés des courbes de tension V obtenues lors de la simulation du circuit en régime transitoire en charge RL avec une valeur C2 égale à 20 μF

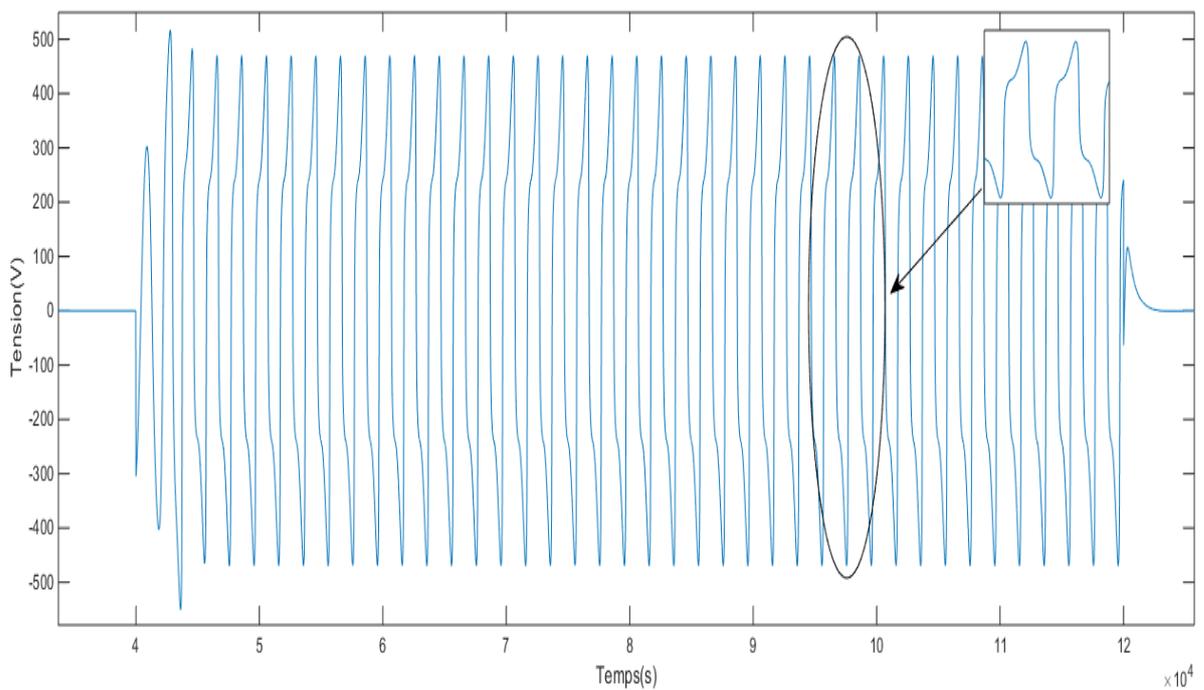


Figure III. 29 La courbe de tension V du circuit en charge RL avec C2=20 μF

La courbes de tension V obtenues lors de la simulation du circuit en régime transitoire en charge avec une valeur C2 égale à 100 μF

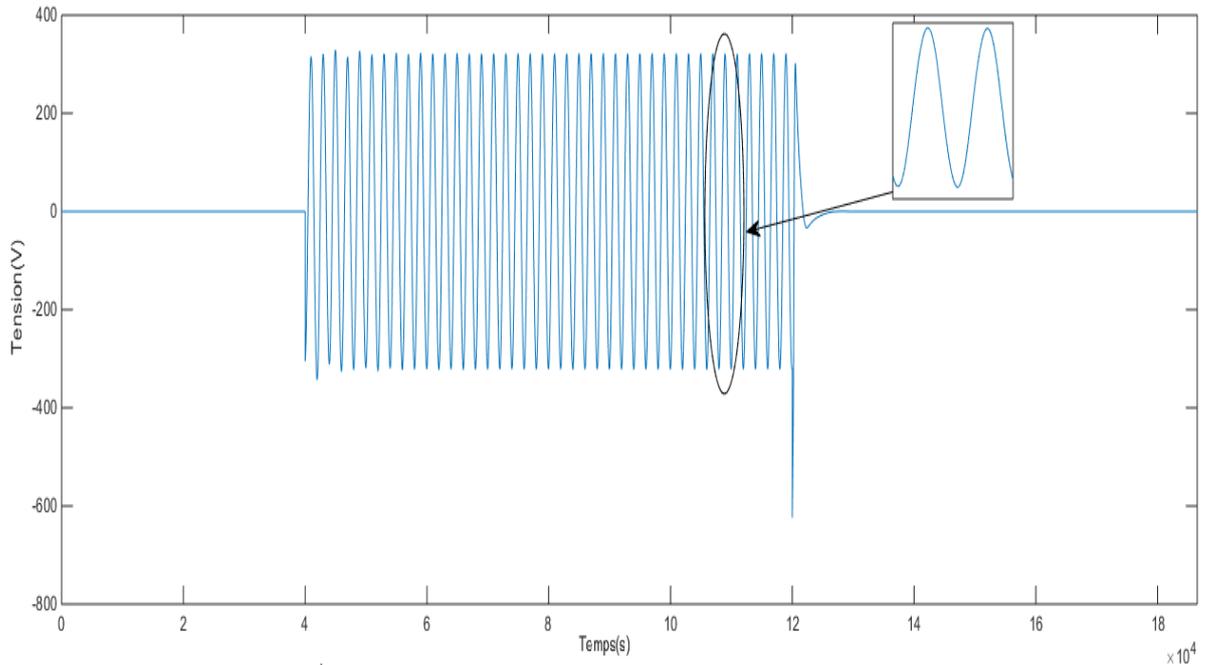


Figure III. 30 La courbe de tension V du circuit en charge RL avec $C2=100 \mu\text{F}$

III.6.2.2.1. Interprétation des résultats :

En effet, lorsqu'un transformateur est soumis à une charge combinant une résistance (R) et une inductance (L), des surtensions et des perturbations peuvent survenir pendant le régime transitoire. Ces phénomènes sont généralement causés par le comportement non linéaire du circuit magnétique du transformateur.

L'augmentation de la valeur du condensateur en série avec le transformateur peut permettre de réduire les surtensions dans certains cas. Cette augmentation de la capacité a un impact sur le comportement global du circuit, ce qui peut contribuer à atténuer les effets indésirables de la résonance.

III.7. Conclusion :

Le transformateur saturable monophasé peut être utilisé dans différentes conditions de fonctionnement, à vide ou en charge. Dans ces différents régimes, l'interaction du transformateur non linéaire avec un condensateur peut entraîner des surtensions et des perturbations de Ferro résonance.

Dans le but de mieux comprendre l'effet de la Ferrorésonance, une simulation a été réalisée sur un modèle de transformateur TRAFOS à l'aide du logiciel ATPdraw. Les résultats de ces simulations ont révélé que :

- Lorsque le transformateur est soumis à des charges résistives, des surtensions de Ferro résonance peuvent se produire pendant le régime transitoire.
- L'augmentation de la valeur du condensateur en série avec le transformateur peut réduire les surtensions de Ferro résonance dans certains cas.
- Les surtensions de Ferro résonance sont plus sévères lorsque la valeur du condensateur en série est petite.
- En revanche, l'augmentation de la valeur du condensateur permet de limiter les surtensions et de réduire leurs effets néfastes sur le réseau électrique et le matériel.

Ces simulations ont permis d'illustrer l'importance de prendre en compte l'effet de la Ferro résonance lors de la conception et de l'exploitation des transformateurs de puissance.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous nous consacrons à l'étude et à l'analyse des surtensions de ferrorésonance qui se produisent dans les lignes et les transformateurs monophasés. Nous nous intéressons également à déterminer comment le mode de fonctionnement à vide et en charge influence ces surtensions, tant dans les régimes permanents que transitoires.

Le comportement dynamique d'un transformateur peut être caractérisé de diverses manières. Lorsque l'on tient compte de la saturation du noyau, c'est-à-dire de sa non-linéarité, les fonctions à résoudre deviennent plus complexes par rapport aux modèles linéaires.

Dans le cadre de cette étude, nous avons initié nos travaux en développant un modèle comprenant une ligne d'alimentation de 220V et un transformateur de puissance saturable. Ce modèle a été utilisé pour générer des surtensions et des perturbations de ferrorésonance suite à une diminution de la valeur d'un condensateur connecté en série. Ensuite, nous avons procédé à des simulations en prenant en compte les différents modes de fonctionnement. Nous avons effectué des variations sur les valeurs du condensateur en série avec le transformateur, tandis que les valeurs de résistance et d'inductance sont restées constantes. L'objectif était d'évaluer avec précision l'effet de la ferrorésonance sur le réseau et de dimensionner de manière adéquate cet effet.

Effectivement, les résultats obtenus mettent en évidence que dans le cas de la ferrorésonance, le réseau engendre des surtensions de ferrorésonance à la fois sur la ligne et dans le transformateur. Cela entraîne une déformation complète de l'onde de tension sur la ligne, en raison de la création excessive d'harmoniques dangereux. Toutefois, nous constatons que l'augmentation du condensateur en série permet de réduire considérablement l'amplitude des surtensions, voire de les supprimer complètement. Cela confère à l'onde de tension une forme très acceptable en atténuant les oscillations.

Les surtensions de ferrorésonance, tout comme les autres types de surtensions, peuvent être atténuées en augmentant la valeur du condensateur en série. Cette augmentation permet de limiter l'amplitude des surtensions et d'améliorer la stabilité de l'onde de tension.

En ce qui concerne la production d'harmoniques, la ferrorésonance peut entraîner une génération excessive de ces harmoniques indésirables. Cela est dû aux interactions non linéaires entre les composants du système, tels que le transformateur saturable et la ligne. Ces interactions peuvent provoquer des oscillations et des distorsions dans l'onde de tension, engendrant ainsi des harmoniques supplémentaires.

Conclusion générale

En termes de perspectives, il serait intéressant de poursuivre l'étude des différentes configurations qui peuvent présenter des surtensions de ferrorésonance, et ce, pour divers niveaux de tension. Cela permettrait d'approfondir notre compréhension de ce phénomène et d'élargir notre domaine de connaissances .

Bibliographies:

[1] P. S. Moses, M. A. Masoum, and H. A. Toliyat, "Impacts of hysteresis and magnetic couplings on the stability domain of ferroresonance in asymmetric three-phase three-leg transformers," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 2, pp. 581–592, June 2011.

[2] F. B. Amar and R. Dhifaoui, "Bifurcation lines calculations of period-1 ferroresonance," *International Conference on Power Systems*, pp. 46–53, Lisbon, Portugal, Sept.22-24 2006.

[3] F. Wornle, D. K. Harisson, and C. Zhou, "Analysis of a ferroresonant circuit using bifurcation theory and continuation techniques," *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 191–196, 2005.

[4] H. John, "A review of ferroresonance," *IEEE, 57th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, pp. 1–25, April 2004.

[5] S. Hassan, M. Vaziri, and S. Vadhva, "Review of ferroresonance in power distribution grids," *Proceedings of the IEEE International Conference on Information Reuse and Integration, IRI 2011, Las Vegas, USA*, pp. 444–448, August 2011.

[6] J. Bickford and A. Heaton, "Transient overvoltages on power systems," *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, vol. 133.Pt.C, no. 4, pp.2001–2025, 1986.

[7] A. Tokic, V. Madzarevic, and I. Uglesic., "Hysteresis model in transient simulation algorithm based on bdf numerical method," *Power Tech. Conf., 2005 IEEE Russia*,72, pp. 1–7, Dec 2005.

[8] P. Ferracci, "ferroresonance," *Group Schneider: Cahier technique*, no. 190, pp.1–28, Mars 1998.

[9] R. G. Kavasseri, "Analysis of subharmonic oscillations in a ferroresonant circuit," *Electrical Power and Energy Systems (28)*, p. 207–214, Sept 2005.

[10] LEMDANI Soufiane "Importance Et Nécessité De L'étude De La Compensation Et De sa Contribution A La Gestion De L'exploitation Des Longues Lignes De Transport A Extra Haut Tension", *Mémoire De Magister, Université Des Sciences Et De La Technologie Mohamed Boudhief, Oran*, juin 2010

[11] M.F CHERIF, K.E CHERIF "Calcul Des Protections D'une Ligne De Transport Electrique HTB-220KV" *Mémoire Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla*. Juin 2014

[12] NOUIOUA Mabrouk, ADOUI Merwan "Protection Des Réseaux Electriques HTB en Utilisant De Relais De Distance", *Mémoire Master, Université Mohamed Boudhief, M'sila*, Juin2017

[13] LAMINE Miloud "Etude Et Modélisation Des Courants De Court-Circuit Dans Les Réseaux MT/BT", Mémoire MASTER, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, juin2016.

[14] P. M. ANDERSON, A. A. FOUAD, "Power System Control and Stability 2nd edition", IEEE Power Engineering Society, 2003

[15] MERZOUGUI Hadjer "Etude de la stabilité transitoire d'un réseau avec intégration des sources renouvelables" Mémoire Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, Juin 2018

[16] HAMADOU Zakaria "Optimisation Des Paramètres D'un FACTS Shunt Pour L'amélioration De La Stabilité Transitoire D'un Système Electrique", Mémoire Master, Université Ferhat Abbas, Sétif, Juin 2012

[17] Vanilli Sandra TEFEGUIM "Etude De La Construction D'une Ligne Electrique Haute Tension 90KV PA-WONA" Mémoire Master, 2iE - Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, BURKINA FASO, 2014

[18] T. WILDI, G. SYBILLE « Electrotechnique », Département de Boeck Université, 4e édition, 2005.

[19] <http://maphysiqueappliquee.free.fr>, chapitre03-Le transformateur, consulter le 05-08-2020.

[20] Beboukha abderrazak, ghilani moussa, " Modélisation et simulation de la protection différentielle dans le transformateur de puissance ", Mémoire de master, Université d'EL-Oued-Faculté des Sciences et de Technologie, 23-24 Juin 2014.

[21] V. COSTAN, " Convertisseurs Parallèles Entrelacés : Etude des Pertes Fer dans les Transformateurs Inter-cellules", Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, octobre 2007.

[22] Imad Eddine harzelli, "contribution à la modélisation par les méthodes des volumes finis d'un transformateur de courant", Magister en : Electrotechnique. Université Mohamed khaidr biskra.02 octobre 2014.

[23] Tian. LIU, "Manoeuvre contrôlée des transformateurs de puissance avec flux rémanent", Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes », 7 Juillet 2011

[24] Benoît de Metz-Noblat : La foudre et les installations électriques HT, Cahier technique Schneider.

[25] Michel Aguet et Jean- Jacques Morf : Traité d'électricité

- [26] Christophe Prévé et Robert Jeannot : Guide de conception des réseaux électriques industriels.
- [27] Swee Peng Ang: Ferrorésonance simulation studies of transmission systems, these doctorat.
- [28] Christophe Prévé et Robert Jeannot : Guide de conception des réseaux électriques industriels.
- [29] Philippe Ferracci : La ferrorésonance, Cahier technique Schneider.
- [30] Richard Gagnon : Étude de la ferrorésonance dans les réseaux compensés séries et shunt, thèse doctorat.
- [31] M. Rioual, J.-C. Kieny, and J. Mahserdjian, “Ferrorésonance dans les réseaux modélisation et application aux typologies de circuit,” Techniques de l’ingénieur, vol. d92, p. 1–15, 2009.
- [32] J.-P. Dubraz, “Transformateur de mesure généralistes. Théorie. Fonctionnement,” Techniques de l’ingénieur, vol. d4720, p. 1–23, 1990
- [33] G. W. Swift, “An analytical approach to ferroresonance,” IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. Pas-88, no. 1, pp. 42–46, January 1969.
- [34] S. Prusty and S. Sanyal, “New approach for study of ferroresonance,” Proc. IEE., Part. G, vol. 123, no. 9, pp. 916–918, September 1976.
- [35] P. Ferracci, “ferrorésonance,” Group Schneider: Cahier technique, no. 190, pp. 1–28, Mars 1998.
- [36] Bienvenido Rodriguez, Medina et Marianela Santiago-Luna, "ATP/EMTP Quick Guide", l'Université de Porto Rico-Mayagüez avec le Center for Power Electronics Systems(CPES), p34, June 18,2002.
- [37] A. YAHIOU, " Contribution to study and simulation of transients in power transformers", Thèse de doctorat, Université FERHAT ABBAS, Sétif, Algérie, 2021.