

الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

جامعة عمار ثلجي بالأغواط

Université Amar Thelidji- Laghouat

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE



MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

Djaïrene Abdelkader

Kouidri Aboubakeur Essidek

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Thème

Analyse des Harmoniques dans un Réseau Electrique en Utilisant le Logiciel ETAP

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mme. Chettih Saliha	Pr	Président
Mr. Hadjadj Abdechafik	Pr	Examineur
Mr. Arif Salem	Pr	Encadreur

Promotion : Sept – 2021

والهدف الأساسي لأي شركة إنتاج كهربائية هو تزويد طاقة كهربائية ذو جودة عالية، حيث تتأثر نوعية الطاقة بزيادة استعمال الأجهزة الإلكترونية (الحملات الغير خطية). والسبب الرئيسي الذي يؤدي الى رداءة في نوعية الطاقة هو وجود التوافقيات في النظام الكهربائي، وقد أصبحت هذه مشكلة رئيسية لجودة الطاقة، فتحليل التوافقيات ضروري للتخفيف منها أو إزالتها من التيار أو الجهد الكهربائي. وفي هذا المشروع، تم إجراء تحليل توافقي لنظام الطاقة باستخدام برمجيات ETAP ووصف العملية برمتها بالتفصيل. أولاً، تم وضع نموذج الحملات العام كمصدر للتوافقيات لحقن تيار توافقي عبر شبكة الطاقة. ثم، لتحليل تأثير التيار التوافقي، تم إجراء تحليل تدفق الطاقة التوافقية. وللقضاء على هذا التشوه التوافقي، تم استخدام أنواع مختلفة من التقنيات، أحدها هو المرشح الخامل. **الكلمات المفتاحية:** التحليل التوافقي، الحملات الغير خطية، برمجيات ETAP، تدفق الطاقة التوافقية، المرشح السلبي.

Résumé

L'objectif principal de toute société de distribution d'électricité est de fournir une énergie de meilleure qualité. L'utilisation croissante de dispositifs électroniques de puissance (charge non linéaire) a affecté la qualité de l'énergie. L'une des causes les plus importantes de la mauvaise qualité de l'énergie est l'harmonique du système électrique. C'est devenu un problème majeur pour la qualité de l'énergie et l'analyse des harmoniques est nécessaire pour étudier les composants de modélisation afin de minimiser ou de supprimer ces harmoniques de courant ou de tension.

Dans ce projet, l'analyse harmonique du système électrique a été réalisée à l'aide du logiciel ETAP et le processus complet a été décrit en détail. Tout d'abord, une charge générale a été modélisée comme une source d'harmoniques pour injecter un courant harmonique dans le réseau électrique. Ensuite, pour analyser l'effet du courant harmonique, une analyse du flux de charge harmonique a été réalisée et la distorsion harmonique a été identifiée.

Pour éliminer cette distorsion harmonique, différents types de techniques ont été utilisés dont un est le filtre passif.

Mots clés : Analyse harmonique, Charge on Linéaire, logiciel ETAP, Ecoulement de Puissance harmonique, Filtre Passif.

Abstrat

The main intention of any electrical utility company is to deliver power with better quality. By increasing the use of power electronic devices (Nonlinear load), the power quality has been affected. One of the most important causes for improper power quality is power system harmonics. This has become a major issue for power quality problem and harmonic analysis needed to investigate in modeling components to minimize or remove this harmonics current or voltage.

In this project, power system harmonic analysis has been performed using ETAP software and described the whole process in details. First of all, a general load was modeled as a harmonic source to inject harmonic current through the power network. Then, to analyze the effect of harmonic current, Harmonic Load Flow analysis was performed and harmonic distortion identified.

To eliminate this harmonic distortion, different kinds of techniques have been used, one of which is the passive filter.

Key words: Harmonic Analysis, Non-linear Load, ETAP Software, Harmonic Power Flow, Passive Filter.



Dédicaces

Je dédie ce travail,

*A nos très chers parents qui ont sacrifié leur vie pour
Notre réussite, et pour leurs encouragements.*

Que dieu les garde éternellement heureux.

*A toute la famille **Djâirene et Daoudi***

*A tout mes amis et mes collègues, et à tous ceux qui
m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.*

Abdelkader Djâirene



Dédicaces

J'ai l'immense honneur de dédier ce mémoire

*- A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; **maman** que j'adore.*

*- Mon très cher père « **Kouidri Ismail** », Mon épaule solide, mon héros, mon roi. Merci d'être tout simplement mes parents .C'est à vous que je dois cette réussite. Et je suis fière de vous l'offrir.*

*- À la meilleure et tendre femme qui ressemble à ma mère **Madani.N**.*

*- A mon cher **frère** et ma chère **sœur**.*

*- Au meilleur neveu du monde qui a ajouté du bonheur à notre famille **Ismail**, que DIEU me la garde.*

*- A ma meilleure famille, meilleur ami et sœur spéciale **Kh.Aouissi**.*

*- A toute la famille **Mihoubi** et **Kouidri**.*

Pour l'amour, l'attention, et le soutien qu'ils m'ont apporté.

*- A mon binôme **Abdelkader** et toute sa famille.*

- A mes chères amies et connaissances.

- A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

La vie n'est qu'un éclair, et un jour de réussite est un jour très cher.

Aboubakeur...





Remerciements

Nous remercions Allah, qui nous a donné la force, le courage et la bonne volonté de faire.

Au terme de ce travail, nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre encadreur **Mr Arif Salem** Professeur à l'université de **Amar Telidji-Laghout**, pour nous avoir permis de bénéficier de son grande savoir dans la matière et son aide précieux tout au long de ce travail.

On tient à remercier toute personne ayant participé, de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

Nous remercions particulièrement les membres de jury d'avoir l'amabilité de présider le jury et de nous avoir accordé l'honneur d'accepter l'évaluation de ce mémoire.

Pour finir, nous avons une pensée toute particulière pour nos parents et nos proches qui n'ont jamais cessé de nous fournir l'essentiel.

A jamais merci pour nous pousser à toujours dépasser nos limites.

Table des matières

Dédicace	i.
Résumé	ii.
Remerciements.....	iii.
Table de matière	iv.
Liste des figures	v.
Liste des tableaux	vi.
Glossaire	vii.
Liste des symboles	viii.
Introduction générale	1

Chapitre I : Perturbation des réseaux électriques, solutions de pollution

I. Introduction	5
I.1 Perturbations électriques et leurs origines	5
I.1.1 Perturbations dans les réseaux électriques	6
I.1.1.1 Variations de la fréquence à 50 Hz	6
I.1.1.2 Variations de l'amplitude	7
I.1.1.3 Modification de la forme d'onde de la tension	7
I.1.1.4 Déséquilibre du système triphasé	7
I.1.2 Définition des perturbations harmoniques	7
I.1.2.1 Harmonique de courant et de tension	8
I.1.2.2 Caractérisation des harmoniques	10
I.1.2.3 Effets des perturbations harmoniques	11
a) Effets instantanés ou à court terme	11
b) Effets à long terme	12
I.1.3 Théorie des harmoniques	13
I.1.3.1 Distorsion de tension et de courant	14
I.1.3.2 Norme d'harmoniques	15
I.2 Charges linéaires et non linéaires	16
I.3 Réduction de la pollution harmonique	18
I.3.1 Absorption sinusoïdale	18
I.3.2 Ajout d'une inductance de lissage du courant	19
I.3.3 Confinement des harmoniques	19
I.3.4 Filtrage harmonique passif	19
I.3.4.1 Filtre à réglage unique	21

I.3.4.2 Filtre passe-haut de premier ordre	23
I.3.4.3 Filtre passe-haut de deuxième ordre	24
I.3.4.4 Filtre passe-haut de troisième ordre	25
I.3.4.5 Filtre de type C	26
I.3.5 Filtrage actif	28
I.4 Conclusion	29

Chapitre II : Écoulement de puissance harmonique basé sur Newton-Raphson

II.1 Introduction.....	32
II.2 Résolution d'équations algébriques non linéaires par les méthodes Newton-Raphson	32
II.3 L'écoulement de Puissance basé sur Newton-Raphson	36
II.4 L'écoulement de Puissance harmonique basé sur Newton-Raphson	38
II.5 Modèles de réseau pour l'écoulement de Puissance harmonique	45
II.5.1 Lignes de transmission.....	45
II.5.2 Transformateurs	46
II.5.3 Générateurs	47
II.5.4 Moteurs à induction	49
II.5.5 Autres charges conventionnelles.....	52
II.6 Conclusion	54

Chapitre III : Applications et simulation par le logiciel ETAP

III.1 Introduction	57
III.2 Description du logiciel ETAP	57
III.2.1 Écoulement de Puissance harmonique	58
III.2.2 Balayage de fréquence harmonique	59
III.2.3 Barre d'outils	60
III.3 Application 1 : Réseau 4 nœuds	62
III.3.1 Modélisation du réseau	63
III.3.2 Analyse de l'écoulement de puissance	65
III.3.3 Analyse harmonique	66
III.3.3.1 Écoulement de Puissance harmonique	66
III.3.3.2 Balayage de fréquence harmonique	68
III.3.4 Élimination des harmoniques à l'aide d'un filtre	72
III.3.4.1 Analyse harmonique après injection d'un filtre de 11ème ordre	74

III.3.4.2 Analyse harmonique après injection les filtres (11 ^{ème} et 13 ^{ème} ordre).....	76
III.4 Application 2 : Réseau IEEE 14 nœuds	79
III.4.1 Analyse de l'écoulement de Puissance	80
III.4.2 Écoulement de Puissance harmonique	81
III.4.2.1 Source de courant harmonique	81
III.4.2.2 Source de tension harmonique	83
III.4.2.3 Comparaison des modèles de sources de courant et de tension	84
III.4.2.4 Élimination des harmoniques à l'aide d'un filtre	85
III.4.2.4.1 Élimination des harmoniques (cas de source de courant)	85
III.4.2.4.2 Élimination des harmoniques (cas de source de tension)	86
III.4.3 Balayage de fréquence harmonique	88
III.5 Conclusion	90
Conclusion générale	92
Bibliographie	94
Annexes.....	98

Liste des figures

Chapitre I : Perturbation des Réseaux Electrique, Solutions de pollution

Figure I.1 Variation de fréquence	7
Figure I.2 Représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmoniques le constituant	9
Figure I.3 Représentation spectrale des harmoniques	9
Figure I.4 Schéma de connexion du réseau avec une charge linéaire	10
Figure I.5 Charge linéaire	10
Figure I.6 Schéma global du réseau et d'une charge non linéaire	11
Figure I.7 Charge non-linéaire	11
Figure I.8 Formes d'onde de tension et de courant pour les charges linéaires	17
Figure I.9 Forme d'onde de tension et de courant pour une charge non linéaire ..	17
Figure I.10 Forme d'onde avec composantes harmoniques symétriques	18
Figure I.11 Raccordement d'un filtre passif	20
Figure I.12 Filtre à réglage unique et sa courbe d'impédance	21
Figure I.13 Courbe d'impédance du filtre et du système	23
Figure I.14 Filtre passe-haut de premier ordre et sa courbe d'impédance	24
Figure I.15 Filtre passe-haut du second ordre et sa courbe d'impédance	25
Figure I.16 Filtre passe-haut du troisième ordre et sa courbe d'impédance	26
Figure I.17 Filtre passe-haut de type C et sa courbe d'impédance	27

Chapitre II : Écoulement de puissance harmonique basé sur Newton-Raphson

Figure II.1 Interprétation géométrique de la méthode Newton-Raphson	35
Figure II.2 Diagramme unifilaire au nœud i d'un système électrique général à n -nœuds.	38
Figure II.3 : (a) Représentation générale d'un réseau électrique à la k^{th} fréquence harmonique, avec une charge produisant des harmoniques (HP) au nœud m	41
Figure II.4 (a). Représentation générale d'un réseau électrique à la k^{th} fréquence harmonique, avec une charge conventionnelle (C) au nœud i. (b). Représentation équivalente de (a), avec la charge conventionnelle modélisée comme une combinaison $R-L$ en série	43
Figure II.5 Modèle équivalent à Pi- d'une longue ligne de transmission	45
Figure II.6 Modèle de l'écoulement de puissance d'un transformateur.....	46

Figure II.7 Modèle de l'écoulement de puissance harmonique d'une machine synchrone pour la k^{th} fréquence harmonique	49
Figure II.8 Modèle équivalent de fréquence fondamentale par phase pour une machine à induction (phase a représentée).....	49
Figure II.9 Modèle de l'écoulement de puissance harmonique d'un moteur à induction pour la fréquence harmonique k^{th}	52
Figure II.10 Modèle l'écoulement de puissance suggéré d'une charge conventionnelle inconnue pour la $k^{\text{ème}}$ fréquence harmonique	53

Chapitre III : Applications et simulation par le logiciel ETAP

Figure III.1 Barre d'outils de l'étude harmonique dans ETAP	60
Figure III.2 Schéma unifilaire d'un réseau 4 nœuds	62
Figure III.3 Page de l'éditeur du transformateur	63
Figure III.4 Pages de l'éditeur du câble 1, 2	64
Figure III.5 Page de source de courant harmonique	64
Figure III.6 Résultat graphique de l'écoulement de puissance (réseau 4 nœuds)	65
Figure III.7 Résultat graphique de l'écoulement de puissance harmonique (réseau 4 nœuds)	66
Figure III.8 Forme d'onde de tension (réseau 4 nœuds)	67
Figure III.9 Forme d'onde de tension au nœud 4 (réseau 4 nœuds)	68
Figure III.10 Spectre de tension (réseau 4 nœuds)	68
Figure III.11 Résultat graphique du balayage de fréquence harmonique (réseau 4 nœuds)	69
Figure III.12 Angle d'impédance après le balayage de la fréquence harmonique (réseau 4 nœuds)	70
Figure III.13 Angle d'impédance au nœud 4 après le balayage de la fréquence harmonique (réseau 4 nœuds)	71
Figure III.14 Module d'impédance au nœud 4 après le balayage de la fréquence harmonique (réseau 4 nœuds)	71
Figure III.15 Page de paramètres de l'éditeur d'harmoniques	73
Figure III.16 Dimensionnement du filtre harmonique "Size Filter"	73
Figure III.17 Résultat graphique de l'écoulement de puissance harmonique pour le 11ème ordre du réseau 4 nœuds.....	74

Figure III.18 Résultat graphique de l'écoulement de puissance harmonique du réseau 4 nœuds après injection filtre de 11ème ordre	74
Figure III.19 Forme d'onde de tension sans filtre (nœud 4)	75
Figure III.19 Forme d'onde de tension après injection filtre de 11ème ordre (nœud 4)	75
Figure III.20 Résultat graphique de l'écoulement de puissance harmonique du réseau 4 nœuds après injection d'un filtre de 11ème ordre (nœud 4)	76
Figure III.21 Forme d'onde de tension après injection des filtres (11 ^{ème} et 13 ^{ème} ordre) nœud 4	77
Figure III.22 Résultat graphique de l'écoulement de puissance harmonique du réseau 4 nœuds après injection les filtres (11 ^{ème} et 13 ^{ème} ordre).....	77
Figure III.23 Angle d'impédance après et avant injection des filtres (nœud 4)	78
Figure III.24 Module d'impédance après et avant injection des filtres (nœud 4) ...	78
Figure III.25 Schéma unifilaire du système IEEE 14 nœuds dans ETAP	80
Figure III.26 Forme d'onde de tension au nœud 14 (cas de source harmonique de courant)	82
Figure III.27 Spectre de tension au nœud 14 (cas de source harmonique de courant).....	83
Figure III.28 Forme d'onde de tension au nœud 14 (cas de source harmonique de tension)	84
Figure III.29 Spectre de tension au nœud 14 (cas de source harmonique de tension)	84
Figure III.30 Forme d'onde de tension après l'injection des filtres au nœud 14 (cas de source harmonique de courant).....	86
Figure III.31 Spectre de tension après l'injection des filtres au nœud 14 (cas de source harmonique de courant)	86
Figure III.32 Forme d'onde de tension après l'injection du filtre au nœud 14 (cas de source harmonique de tension)	87
Figure III.33 Spectre de tension après l'injection du filtre au nœud 14 (cas de source harmonique de tension).....	88
Figure III.34 Fenêtre d'alerte (balayage des fréquences harmoniques)	89
Figure III.35 Angle d'impédance après le balayage de la fréquence harmonique au nœud 14	89
Figure III.36 Module d'impédance après le balayage de la fréquence harmonique au nœud 14	90

Liste des tableaux

Chapitre I : Perturbation des réseaux électrique, solutions de pollution

Table I.2 Norme harmonique pour la distorsion du courant	<i>16</i>
Table I.2 Norme harmonique pour la distorsion de la tension	<i>16</i>

Chapitre III : Applications et simulation par le logiciel ETAP

Table III.1 Résultat de l'écoulement de Puissance (réseau 4 nœuds)	<i>65</i>
Table III.2 Distorsion harmonique totale en tension (IHD et THD)	<i>67</i>
Table III.3 Fenêtre d'alarme de balayage de fréquence harmonique	<i>69</i>
Table III.4 Fenêtre d'alarme de balayage de fréquence harmonique	<i>79</i>
Table III.5 Résultat de l'écoulement de Puissance (réseau 14 nœuds)	<i>81</i>
Table III.6 Résultats de la distorsion harmonique (THD et IHD)	<i>82</i>
Table III.7 Résultats de la distorsion harmonique (THD et IHD)	<i>83</i>

Glossaire

IEEE: Institute of Electronic and Electronics Engineers

THD : Taux de distorsion harmonique

THDi: Taux de distorsion harmonique en courant

THDv: Taux de distorsion harmonique en tension

IHD: Distorsion harmonique individuelle

IHDn: Distorsion harmonique individuelle du nième

PCC: Point de Couplage Commun

MLI: Modulation de Largeur d'Impulsions

PWM: Pulse Width Modulation

VSD: Variable Speed Drive

STF: Single Tuned Frequency

HPF: High Pass Filter

HFS: Harmonic Filter Sizing

SF: Size Filter

APF: Active Power Filter

VSI: Voltage Source Inverter

CSI: Current Source Inverter

KCL: Kirchhoff's Current Law

ETAP: Electrical Transient Analyzer Program

Liste des symboles

Symbole	Définition
V_h	Tension harmonique de rang h
Z_h	Impédance harmonique de rang h
I_h	Courant harmonique de rang h
R_s	Résistance de la source
Δ	Un changement progressif
$\bar{g}_{Lm}^{(k)}$	Courant harmonique entrant
$\bar{V}_m^{(k)}$	Tension harmonique au nœud m
f_n	fréquence de la n ^{ième}
R_f, L_f	Résistance et inductance du filtre actif

Introduction Générale

La principale intention de toute entreprise de services publics d'électricité est de fournir une énergie de meilleure qualité. Il s'agit de fournir une forme d'onde de tension ou de courant sinusoïdale pure. Cet objectif est compliqué par le fait qu'il existe des charges sur le système qui produisent des courants harmoniques. Ces courants se traduisent par des tensions et des courants déformés qui peuvent avoir un impact négatif sur les performances du système de différentes manières. Les harmoniques sont les sous-produits de l'électronique moderne qui provoquent des harmoniques et déforment les tensions et les courants. Les charges non linéaires créent des harmoniques en consommant du courant par impulsions rapides et courtes, plutôt que de manière sinusoïdale et régulière. Ces courants ou tension harmoniques générés par des sources harmoniques entraînent une distorsion du courant ou de la tension sur l'ensemble du réseau électrique. Ce fait notable est devenu un problème majeur pour la qualité de l'énergie et l'analyse des harmoniques est nécessaire pour étudier comment minimiser ou supprimer ces harmoniques. Le problème de l'analyse harmonique devient un sujet important pour les opérateurs des systèmes électriques qui doivent utiliser des outils de calcul spécifiés pour exécuter l'écoulement de puissance harmonique en raison de la complexité des réseaux électriques de grande taille.

L'objectif principal de ce projet est d'effectuer une analyse harmonique en utilisant deux méthodes : « **l'écoulement de puissance harmonique et le balayage de la fréquence harmonique** » sur les réseaux 4 nœuds et 14 nœuds en utilisant le logiciel ETAP12.6.0. ETAP est un logiciel très convivial où les principaux outils nécessaires à une analyse harmonique efficace sont faciles à utiliser pour obtenir de meilleurs résultats. Il est également capable d'illustrer les conséquences de la mise en œuvre du réseau électrique requis dans la vie réelle.

Le projet sera analysé en adoptant la norme IEEE519, où les indices harmoniques seront définis en conséquence dans le logiciel.

Sur cette base, ce travail a été structuré dans trois chapitres encadrés par une introduction générale et une conclusion générale ainsi :

Dans le premier chapitre, nous étudierons les caractéristiques générales des perturbations électriques, ainsi que l'étude des caractéristiques des harmoniques et on citera les différentes origines des harmoniques dans le réseau électrique.

Dans le deuxième chapitre, on décrira l'extension de l'écoulement de puissance tel que résolu par la méthode de Newton-Raphson. Afin de pouvoir effectuer une analyse harmonique du système électrique, on doit passer par la modélisation des différents éléments d'un système électrique.

Le troisième chapitre sera consacré à l'analyse harmonique des réseaux électriques de 4 nœuds et IEEE 14 nœuds en utilisant le logiciel ETAP. Le module d'analyse des harmoniques dispose de deux méthodes analytiques, l'écoulement de puissance harmonique et le balayage de fréquence harmonique. Les résultats de simulations seront analysés et discutés.

Chapitre I

Perturbation des réseaux
électriques, solutions de
pollution

Sommaire

I. Introduction	5
I.1 Perturbations électriques et leurs origines	5
I.1.1 Perturbations dans les réseaux électriques	6
I.1.1.1 Variations de la fréquence à 50 Hz	6
I.1.1.2 Variations de l'amplitude	7
I.1.1.3 Modification de la forme d'onde de la tension	7
I.1.1.4 Déséquilibre du système triphasé	7
I.1.2 Définition des perturbations harmoniques	7
I.1.2.1 Harmonique de Courant et de tension	8
I.1.2.2 Caractérisation des harmoniques	10
I.1.2.3 Effets des perturbations harmoniques	11
a) Effets instantanés ou à court terme	11
b) Effets à long terme	12
I.1.3 Théorie des harmoniques	13
I.1.3.1 Distorsion de tension et de courant	14
I.1.3.2 Norme d'harmoniques	15
I.2 Charges linéaires et non linéaires	16
I.3 Réduction de la pollution harmonique	18
I.3.1 Absorption sinusoïdale	18
I.3.2 Ajout d'une inductance de lissage du courant	19
I.3.3 Confinement des harmoniques	19
I.3.4 Filtrage harmonique passif	19
I.3.4.1 Filtre à réglage unique	21
I.3.4.2 Filtre passe-haut de premier ordre	23
I.3.4.3 Filtre passe-haut de deuxième ordre	24
I.3.4.4 Filtre passe-haut de troisième ordre	25
I.3.4.5 Filtre de type C	26
I.3.5 Filtrage actif	28
I.4 Conclusion	29

I. Introduction

Les réseaux de distribution modernes doivent faire face aux nouveaux défis et aux nouvelles opportunités d'un système électrique en pleine évolution technologique, du point de vue technique, le principal changement pour le réseau concerne la nature des charges connectées, d'une part les charges passives classiques ont subi une évolution très importante et d'autre part de nouvelles charges actives ont été connectées au réseau. Plusieurs types de ces nouvelles charges engendrent des perturbations importantes dans le réseau électrique, ces perturbations peuvent être classées en deux catégories, qui sont :

- Des perturbations causées par les courants perturbateurs, tel que les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et les courants réactifs.
- Des perturbations causées par les tensions perturbatrices, telle que les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrées, les creux de tension et les surtensions.

Dans ce premier chapitre, nous étudierons les caractéristiques générales des perturbations électriques, ainsi que l'étude des caractéristiques des harmoniques et on citera les différentes origines des harmoniques dans le réseau électrique.

I.1 Perturbations électriques et leurs origines

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité. Idéalement, l'électricité serait distribuée sous une forme de tension sinusoïdale parfaite d'amplitude et de fréquence constante.

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement.

Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses. Outre les incidents relatifs à la nature physique et

matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers.

L'un des phénomènes les plus influents sur la qualité de l'énergie électrique distribuée au consommateur est le phénomène des harmoniques.

Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des harmoniques et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer.

I.1.1 Perturbations dans les réseaux électriques

I.1.1.1 Variations de la fréquence à 50 Hz

Bien qu'elles soient rares et qu'elles ne soient observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport, elles peuvent apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome.

La fréquence nominale de la tension alternative fournie par le réseau est de 50 ou 60 Hz. Cette valeur est déterminée par la vitesse des alternateurs des centrales.

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non inter connectas ou alimentes par une source thermique autonome (voir la figure **I.1**). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présentée que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains d'défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz $\pm 1\%$ [1].

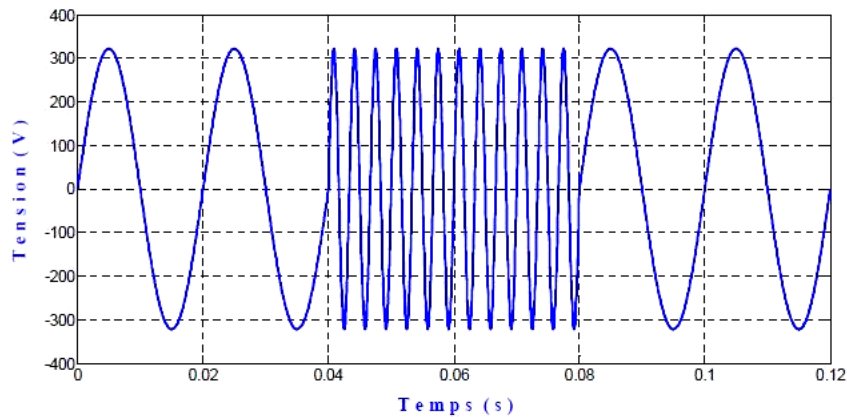


Figure I.1 : Variation de fréquence

I.1.1.2 Variations de l'amplitude

Il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à coup brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non;

I.1.1.3 Modification de la forme d'onde de la tension

Cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.

I.1.1.4 Déséquilibre du système triphasé

Dans ce cas, les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres.

I.1.2 Définition des perturbations harmoniques

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau.

Les signaux (tension et courant) relevés sur le réseau sont des signaux déformés et loin d'être des sinusoïdes parfaites.

Un signal déformé est la superposition d'un signal fondamental (à 50 Hz) et des signaux harmoniques de fréquences qui sont des multiples entiers de la fréquence du fondamental (100, 150, 200, 250, ...etc.). En pratique on s'intéresse qu'aux harmoniques significatifs (jusqu'au rang 40).

I.1.2.1 Harmonique de courant et de tension

Les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires. Quand elles sont connectées au réseau d'une certaine fréquence, elles absorbent un courant non sinusoïdal mais de même fréquence [2].

Ces charges se comportent comme des sources de courant harmonique, c'est-à-dire que le courant est fixé par la charge et non par la tension du réseau. Ces courants provoquent, dans le réseau, des chutes de tensions harmoniques selon la loi d'Ohm :

$$V_h = Z_h \cdot I_h \quad (I.1)$$

V_h : Tension harmonique de rang h ;

Z_h : Impédances harmoniques de rang h ;

I_h : Courant harmonique de rang h.

Soit par exemple la figure suivante représentant la forme de l'onde d'un courant pollué avec, en même temps, l'image des différents courants harmoniques le constituant qu'on peut exprimer grâce à une représentation en série de Fourier du courant global :

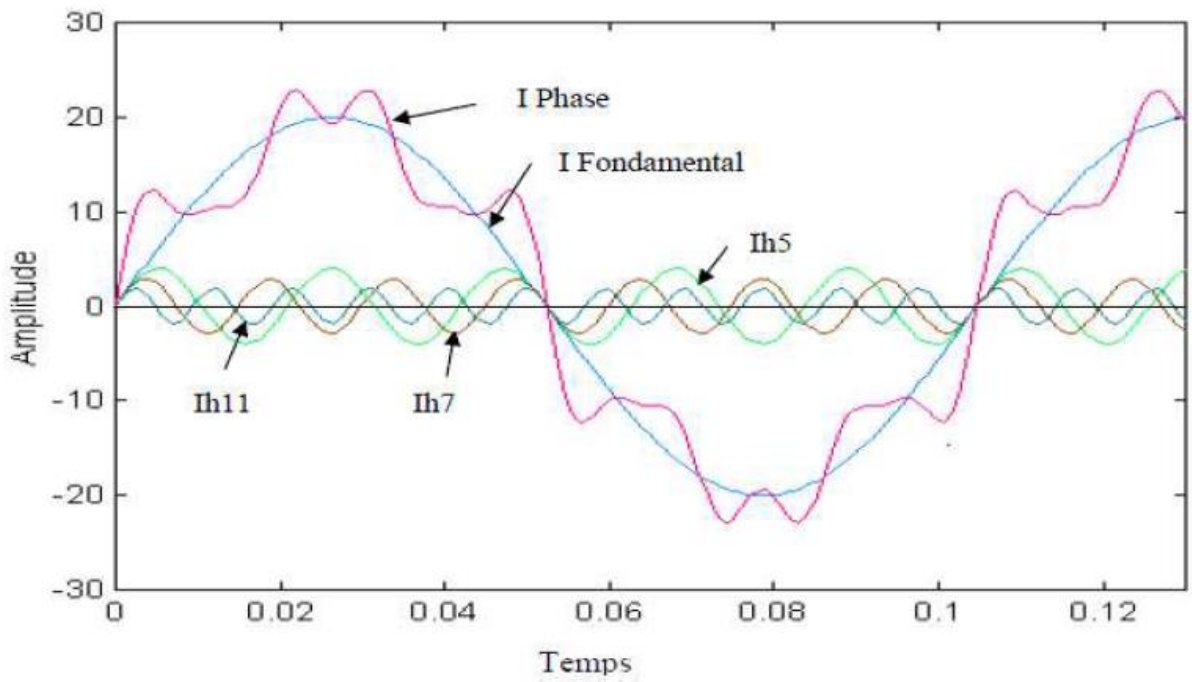


Figure I.2 : Représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmoniques le constituant.

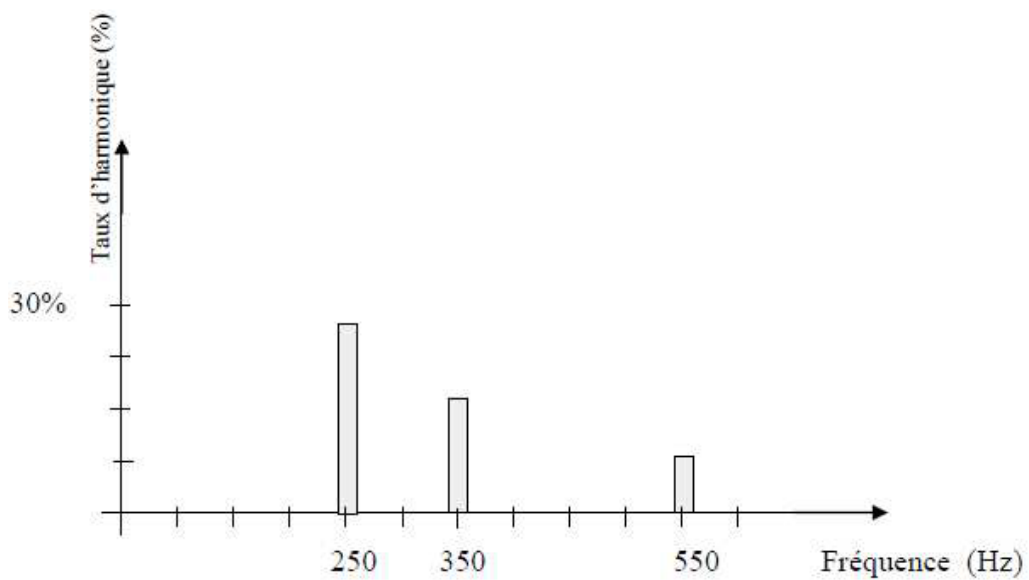


Figure I.3 : Représentation spectrale des harmoniques

I.1.2.2 Caractérisation des harmoniques

Les charges peuvent être classées

- Les charges linéaires
- Les charges non linéaires

➤ Charge linéaire

Si l'on alimente une charge linéaire par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

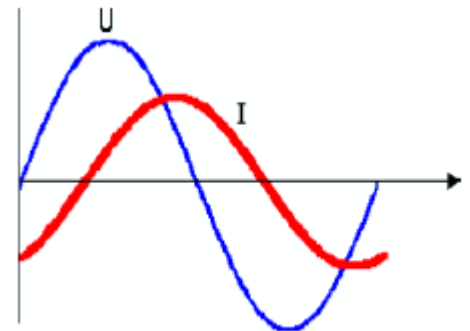
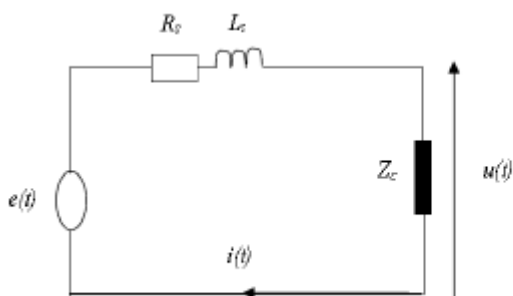


Figure I.5 : Charge linéaire

Figure I.4: Schéma de connexion du réseau avec une charge linéaire

R_s : résistance de la source ;

L_s : inductance de la source ;

Z_c : impédance de la charge.

➤ Charge non linéaire

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non sinusoïdal (Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques).

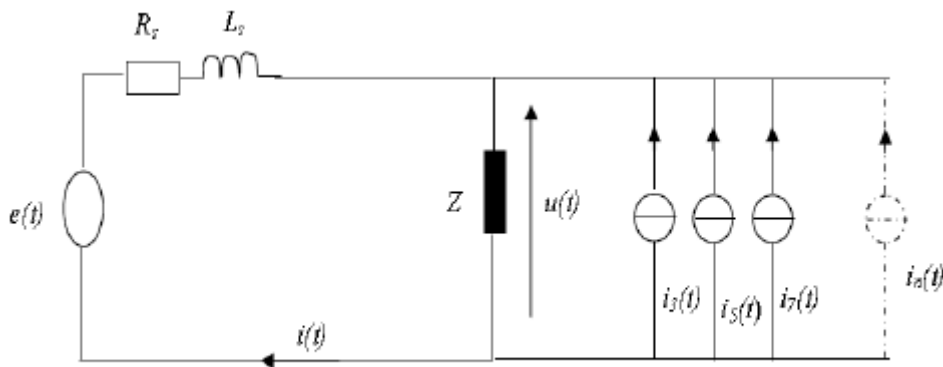


Figure I.6 : Schéma global du réseau et d'une charge non linéaire

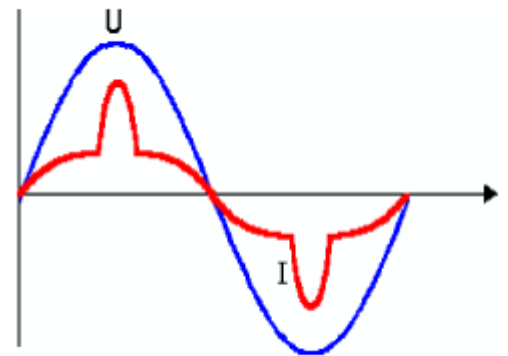


Figure I.7 : Charge non-linéaire

I.1.2.3 Effets des perturbations harmoniques

a) Effets instantanés ou à court terme

Ils concernent essentiellement deux types d'équipement [3] :

- ✚ Les composants à faible constante de temps thermique comme les étages d'alimentation des appareils électroniques.
- ✚ Les éléments susceptibles d'entrer en résonance ou situés sur le trajet d'un courant amplifié par une résonance, comme les condensateurs, les disjoncteurs ou les petits transformateurs.
- ✚ Dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation (détection du passage par zéro, ...).
- ✚ Pertes de précision dans les appareils de mesure (compteur d'énergie, instrumentation, ...).
- ✚ Vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques.
- ✚ Vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ou les inductances dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques.

- ✚ Perturbations induites dans les liaisons par courant faible sous forme de bruits par couplage électromagnétique (contrôle-commande, télécommunication, téléphonie, réseaux locaux, ...).
- ✚ Interférences avec les systèmes de télécommande à distance utilisés par les distributeurs d'énergie.
- ✚ Déclenchement intempestif des circuits de protection.
- ✚ Effets de papillotement (flicker) au niveau des éclairages et des affichages des appareils électroniques.

b) Effets à moyen et long terme

- ✚ Pour les effets à moyen et long terme, on trouve les câbles qui peuvent être le siège de sur échauffement du neutre, les organes de sectionnement, les équipements bobinés comme les transformateurs ou les moteurs. Pour les effets à moyen terme, il y a en général des niveaux de tension harmonique significatifs sur le réseau qui permettent un diagnostic relativement aisé.
- ✚ Les effets à long terme concernent tous les types d'équipements et sont liés à la présence de niveaux d'harmoniques moins importants. Ils se traduisent par un vieillissement prématuré des moteurs, des transformateurs, des câbles et des parasurtenseurs. Les effets à long terme ne sont pas faciles à relier de manière certaine à la présence d'harmoniques.
- ✚ Vieillissement prématuré des moteurs électriques alternatifs du fait des pertes cuivre et fer supplémentaires, dû à la différence importante de la vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.
- ✚ Échauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipements
- ✚ Entraînant des déclassements du matériel avec des surdimensionnements.
- ✚ Surchauffe du neutre. En effet dans un système triphasé équilibré, les tensions sont déphasées de 120° si bien que lorsque les charges sont

égales, le courant résultant dans le neutre est nul. Toutefois, si les courants de phases s'annulent, ce n'est pas le cas des courants harmoniques. Ces courants qui sont des multiples impairs de la fréquence du courant de phase s'ajoutent dans le conducteur neutre. Ainsi le courant résultant dans le neutre représente l'addition des courants harmoniques de rang trois et multiple de trois.

- ✚ Échauffements supplémentaires des condensateurs par conduction et par hystérésis dans le diélectrique qui peuvent conduire au claquage .
- ✚ pertes supplémentaires dans les transformateurs ou les inductances dues à l'effet de Peau dans le cuivre, à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le circuit magnétique.
- ✚ Fatigue mécanique des équipements à cause des vibrations et des couples Pulsatrices.
- ✚ Risque d'excitation de résonance : Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de condensateurs sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance. Les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles et coïncider avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques qui peuvent entraîner des destructions [3].

I.1.3 Théorie des harmoniques

L'harmonique se définit comme la distorsion des ondes de tension et de courant causée par une superposition entre la fréquence de base et ses multiples. Si la fréquence fondamentale utilisée est de 50 Hz, la deuxième fréquence harmonique est de 100 Hz, la cinquième fréquence harmonique est de 250 Hz, et ainsi de suite.

I.1.3.1 Distorsion de tension et de courant

Toutes les charges non linéaires génèrent une harmonique qui conduit à une distorsion de l'onde de courant pour injecter le courant harmonique dans le système électrique. La charge est considérée comme la cause du courant harmonique. Lorsqu'un courant harmonique traverse une impédance, il y a une distorsion de la tension. L'ampleur du courant harmonique injecté dans le système dépend de l'ampleur de la charge. L'ampleur de la distorsion de la tension dépend de l'ampleur de l'impédance et du courant qui la traverse. La même charge, placée à deux endroits différents, produira des tensions harmoniques différentes.

L'ordre des harmoniques est un nombre entier qui est le rapport entre la fréquence harmonique et sa fréquence fondamentale, correspondant à l'équation suivante [4].

$$n = \frac{f_n}{f} \quad (\text{I.2})$$

Où n représente l'ordre harmonique, f_n est la fréquence de la $n^{\text{ième}}$ harmonique en Hertz (Hz) et f est la fréquence fondamentale en Hertz (Hz). Il existe deux types d'ordre harmonique, l'ordre harmonique impair et l'ordre harmonique pair. L'ordre dominant et couramment calculé est l'ordre harmonique impair.

La Distorsion Harmonique Individuelle (IHD) est le rapport entre la valeur quadratique moyenne (rms) de la tension ou du courant à la fréquence harmonique et la valeur rms de la tension ou à sa fréquence fondamentale [4]. L'équation de l'IHD peut être déterminée dans l'équation suivante :

$$IHD_n = \sqrt{\frac{Y_n^2}{Y_1^2}} \times 100\% \quad (\text{I.3})$$

Avec IHD_n est la valeur IHD du $n^{\text{ième}}$ ordre harmonique ($n = 2, 3, 4, \dots$), Y_n est la valeur efficace de la tension ou du courant $n^{\text{ième}}$ harmonique, et Y_1 est la valeur efficace de la tension ou du courant à la fréquence fondamentale.

La distorsion harmonique totale est le rapport entre la valeur efficace de la composante harmonique totale et la valeur efficace de la composante de base. La valeur de la THD représente la quantité de distorsion provoquée par toutes les composantes harmoniques de sorte qu'il est possible d'identifier si la distorsion a lieu à un niveau tolérable ou à un niveau nuisible [6]. L'équation du THD peut être considérée dans l'équation ci-dessous [5] :

$$THD_n = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}{Y_1^2}} \times 100\% \quad (I.4)$$

Où n est l'ordre des harmoniques, Y_n est la valeur de la tension efficace ou du courant d'ordre n et Y_1 est la valeur de la tension efficace ou du courant à la fréquence fondamentale.

I.1.3.2 Norme d'harmoniques

La norme d'harmoniques est établie selon les recommandations et les exigences de l'IEEE pour le contrôle des harmoniques dans les systèmes d'alimentation électrique (norme IEEE 519-1992). Deux paramètres sont utilisés pour évaluer la distorsion harmonique, notamment la norme harmonique pour le courant (ITHD) et la norme harmonique pour la tension (VTHD). La norme harmonique de courant de court-circuit est déterminée par le rapport entre le courant de court-circuit et le courant de charge au point de couplage commun (PCC).

Les tableaux I et II ci-joints sont des normes harmoniques réglementées par la norme IEEE 519-1992 pour la distorsion du courant et de la tension.

La norme harmonique pour la distorsion du courant est résumé dans le tableau I.1 [7].

I_{sc}/I_L	Distorsion des Harmoniques de Courant Individuel (%)					Distorsion des Harmoniques de Courant Total % THD-i
	H<11	$1 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 < h$	
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 -1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Table I.1 : Norme harmonique pour la distorsion du courant

Tension sur PCC, V_n (kV)	Distorsion des harmoniques de tension individuelle (%)	Distorsion des harmoniques de tension totale % THD-v
$V_n \leq 69$	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161$	1.5	2.5
$V_n > 161$	1.0	1.5

Table I.2 : Norme harmonique pour la distorsion de la tension

I.2 Charges linéaires et non linéaires

Une charge linéaire dans un système d'alimentation est un composant dans lequel le courant est proportionnel à la tension. En d'autres termes, la forme d'onde actuelle aura la même forme d'onde que la tension. Quelques exemples de charges linéaires sont les moteurs, les appareils de chauffage et les lampes à incandescence. Les harmoniques des charges linéaires sont légèrement plus faibles et peuvent être facilement négligées. [8-10].

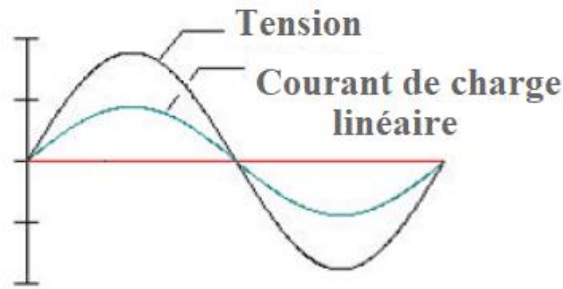


Figure I.8 : Formes d'onde de tension et de courant pour les charges linéaires

De l'autre côté, la forme d'onde de courant sur une charge non linéaire n'est pas la même que la forme d'onde de tension. Quelques exemples de charges non linéaires sont les redresseurs (alimentations, unités UPS, éclairage de décharge), les variateurs de vitesse, les dispositifs ferromagnétiques, les variateurs de vitesse à courant continu et les équipements d'arc. [8-11] .

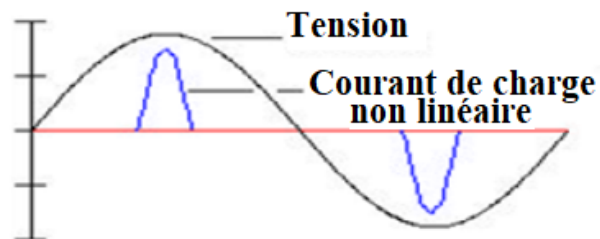


Figure I.9 : Forme d'onde de tension et de courant pour une charge non linéaire

La forme d'onde actuelle des charges non linéaires n'est pas sinusoïdale mais périodique. Les formes d'onde périodiques peuvent être trouvées mathématiquement sous la forme d'une série de formes d'onde sinusoïdales qui ont été ajoutées. Les composantes sinusoïdales sont les multiples entiers du primaire où le primaire au Royaume-Uni est de 50 Hz et les éléments supplémentaires sont devenus des harmoniques. [8-11].

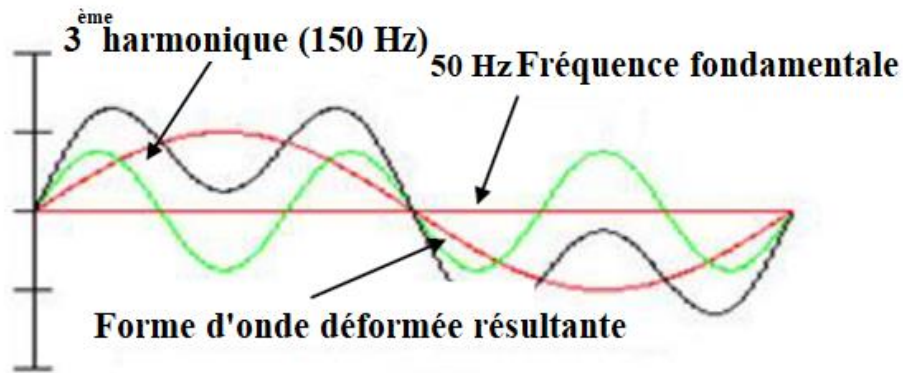


Figure I.10 : Forme d'onde avec composantes harmoniques symétriques

Ici, la troisième harmonique aura une fréquence de trois fois celle de 150 Hz. Les ondes symétriques ne contiennent que des harmoniques impaires et les ondes asymétriques contiennent les deux harmoniques paires et impaires.

Dans une onde symétrique, la partie positive est identique à la partie négative de l'onde. D'autre part, une onde asymétrique contient une composante continue ou la charge est telle que la partie positive de l'onde est différente de la partie négative. L'exemple d'une onde asymétrique est un redresseur demi-onde.

Dans le système d'alimentation, la plupart des éléments sont symétriques. Ils ne produisent que des harmoniques impaires et n'ont pas de décalage CC. Les fours à arc sont une source commune d'harmoniques paires, mais ils sont connus pour produire des harmoniques paires et impaires à différentes étapes du processus.

I.3 Réduction de la pollution harmonique

I.3.1 Absorption sinusoïdale

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant très proche d'une sinusoïde avec un facteur de puissance unitaire.

Dans ce cas, ces structures se positionnent dans une stratégie préventive et non curative.

Ces techniques de prélèvement sinusoïdal s'appliquent aux structures monophasées et triphasées. Ces convertisseurs propres utilisent la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) également appelée PWM (Pulse Width Modulation) comme principe de pilotage des interrupteurs commandés [1].

I.3.2 Ajout d'une inductance de lissage du courant

L'ajout d'inductances de lissage en amont des dispositifs polluants est une solution communément utilisée afin d'atténuer les harmoniques de rangs élevées puisque leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la distorsion de la tension au point de raccordement mais induisent un coût supplémentaire [1].

I.3.3 Confinement des harmoniques

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie de l'installation la plus limitée possible. Si le montage est un montage équilibré, les harmoniques de rang 3 sont en phase et en l'absence de conducteur neutre connecté, ces courants ne peuvent pas circuler. Pour éviter la circulation de ces courants de rang 3 sur l'ensemble du réseau, il est possible d'effectuer un découplage par transformateur. Par exemple l'utilisation d'un transformateur dont le primaire est couplé en étoile et le secondaire en zigzag (couplage Y_{zn}) permet d'éliminer au primaire les courants de pulsation 3 [1].

I.3.4 Filtrage harmonique passif

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, qui forment une impédance dont la valeur varie en fonction de la fréquence. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber

un harmonique de courant donné [1]. Si on veut par exemple éliminer le courant harmonique de rang 5, on dimensionne alors les éléments passifs de manière à ce que l'impédance équivalente du filtre soit la plus petite possible à la fréquence $5 \times$ fondamental, le courant circulera alors dans l'impédance la plus faible, c'est à dire dans le filtre passif et donc plus dans l'impédance de court-circuit du réseau comme l'illustre la figure I.11.

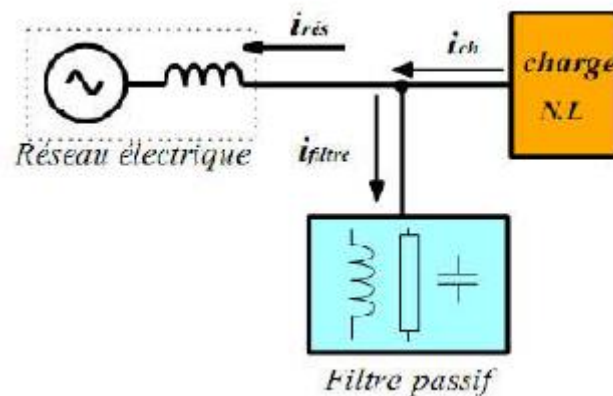


Figure I.11 : Raccordement d'un filtre passif.

Les filtres passifs peuvent être classés comme:

- ✚ Filtre série (haute impédance à la fréquence d'accord), par exemple réacteur en ligne dans un convertisseur électronique de puissance
- ✚ Filtre Shunt (faible impédance à la fréquence d'accord), par ex. filtre LC à réglage unique

Pour supprimer une harmonique particulière, les filtres en série sont réglés pour avoir une impédance élevée à la fréquence indésirable. S'il existe plusieurs harmoniques indésirables, les filtres en série peuvent être mis en cascade de sorte que chacun d'eux soit accordé selon un ordre harmonique spécifique. Les principaux inconvénients, et la raison pour laquelle les filtres en série sont rarement utilisés, sont qu'ils doivent résister à des valeurs nominales de courant et de tension complètes et qu'ils consomment de la puissance réactive.

Les filtres shunt, en revanche, sont réglés pour fournir un chemin de faible impédance vers la terre pour une gamme particulière d'harmoniques. Ils ne

doivent supporter qu'une fraction du courant de charge et peuvent fournir une puissance réactive. En raison de ces deux avantages, les topologies de filtres shunt sont principalement utilisées dans la pratique. Pour traiter les filtres shunt de manière plus approfondie, cinq topologies différentes sont brièvement discutées ci-dessous: filtre à réglage unique, filtre passe-haut du 1er au 3e ordre et filtre de type c. La conception d'un filtre harmonique passif pour VSD, décrite en détail dans la littérature [13-17].

I.3.4.1 Filtre à réglage unique

La topologie du filtre à réglage unique (ST) et sa courbe d'impédance en fonction de la fréquence (ordre harmonique) sont illustrées à la figure I.12 La courbe d'impédance est déterminée par

$$Z_f(s) = \frac{1 + LCs^2 + RCs}{Cs} \tag{I.1}$$

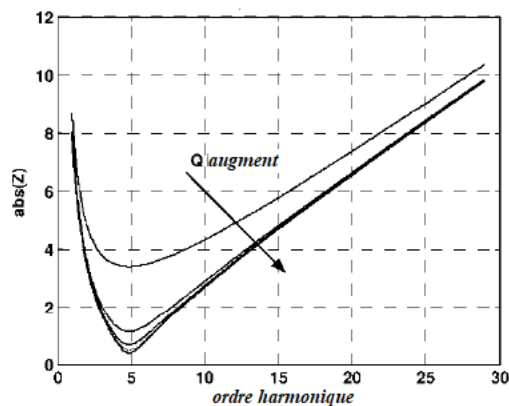
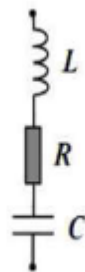


Figure I.12 : Filtre à réglage unique et sa courbe d'impédance

Le filtre représenté est réglé pour éliminer la 5ème harmonique où l'on peut observer une encoche dans la courbe d'impédance. De la forme de la courbe d'impédance, il devient clair que ce type de filtre est adapté pour éliminer une harmonique spécifique (encoche étroite). La fréquence d'encoche est déterminée par :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{I.2})$$

En outre, la figure indique que la netteté de l'accord est déterminée par le facteur de qualité, Q , qui est défini comme suit

$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \quad (\text{I.3})$$

La variation des valeurs d'inductance et de capacité est souvent de l'ordre de plusieurs pour cent en raison de la fabrication et du vieillissement des composants. La fréquence d'encoche du STF est sensible à la variation des paramètres, de sorte que de tels écarts dans les valeurs des composantes peuvent conférer un décalage considérable de la courbe d'impédance. Cela peut conduire à une amplification, au lieu d'une suppression, de l'harmonique ciblée. La figure (I.13) permet d'illustrer ce risque en représentant la courbe d'impédance du filtre et du système d'alimentation vue de la source harmonique. On peut voir qu'il existe un point de résonance parallèle et série. L'impédance est faible proche de la résonance série et par conséquent, la distorsion de tension harmonique à des fréquences similaires est également faible. Près du point de résonance parallèle, cependant, l'impédance est élevée et les courants harmoniques provoquent une distorsion de haute tension. Pour les systèmes inductifs avec un STF, le point de résonance parallèle est donné par

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + L)C}} \quad (\text{I.4})$$

Où L_s est l'inductance de la source série.

La comparaison des équations précédentes montre que la résonance parallèle se produit toujours à une fréquence inférieure au point de résonance série. Sachant cela, l'amplification harmonique est évitée en désaccordant le filtre à une fréquence inférieure à l'harmonique ciblée. De cette façon, il est garanti-au moins si l'écart de paramètre est dans la plage attendue - que

l'harmonique cible se trouve au point de résonance de série ou au-dessus. Par conséquent, une amplification harmonique dangereuse est évitée.

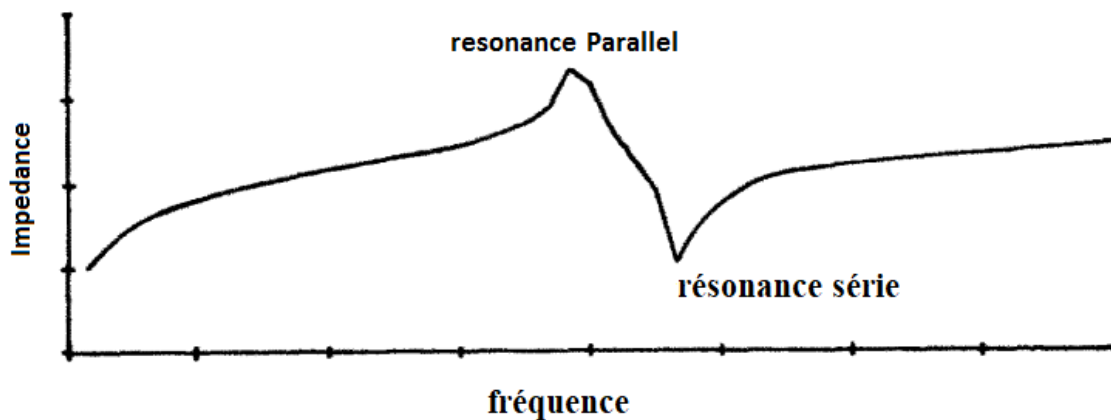


Figure I.13 : Courbe d'impédance du filtre et du système

I.3.4.2 Filtre passe-haut de premier ordre

La topologie du filtre passe-haut du premier ordre et sa courbe d'impédance en fonction de la fréquence sont représentées à la figure (I.14). La courbe d'impédance est déterminée par

$$Z_f(s) = \frac{RC_s + 1}{C_s} \quad (\text{I.5})$$

Une faible impédance aux hautes fréquences suggère que le filtre passe-haut du premier ordre convient à une topologie de filtre shunt où il peut fournir un chemin de faible impédance vers la masse pour les harmoniques au-dessus de la fréquence d'accord.

Un facteur de qualité n'existe pas car il n'y a qu'une capacité mais pas d'inductance dans le circuit de filtrage.

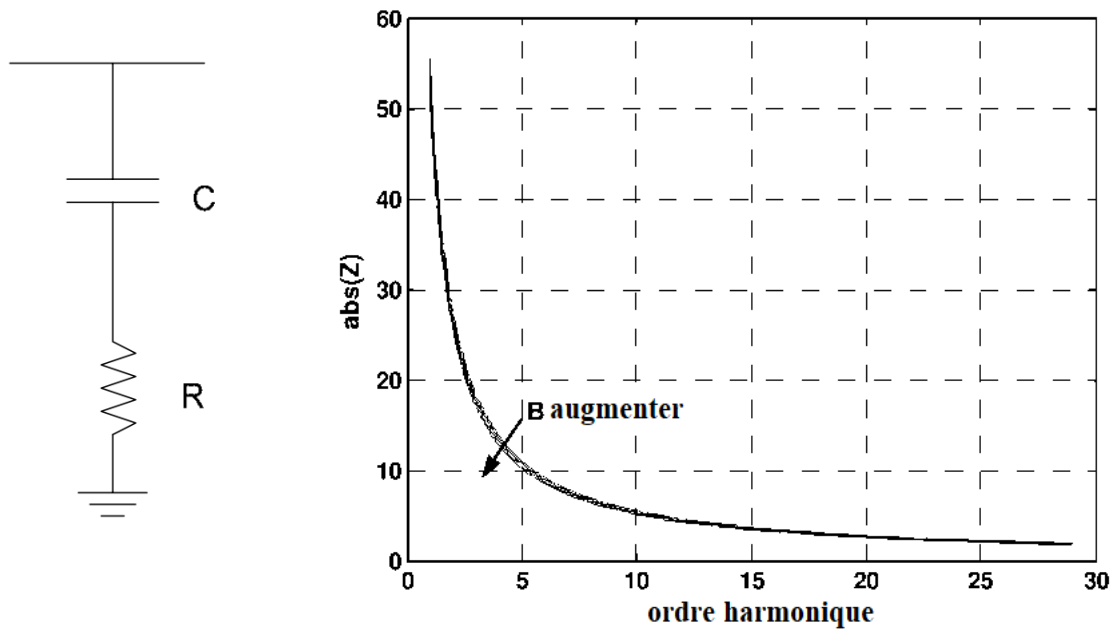


Figure I.14 : Filtre passe-haut de premier ordre et sa courbe d'impédance

Un inconvénient le plus important du filtre passe-haut du premier ordre est ses pertes élevées à la fréquence fondamentale dues à l'impédance résistive presque pure à cette fréquence. Un autre inconvénient est la cote de filtre MVar élevée nécessaire pour pouvoir atténuer la large bande d'harmoniques. Ces deux inconvénients sont les raisons pour lesquelles cette topologie de filtre est rarement utilisée

I.3.4.3 Filtre passe-haut de deuxième ordre

La topologie du filtre passe-haut du deuxième ordre (HPF 2e) et sa courbe d'impédance en fonction de la fréquence sont représentées sur la figure (I.14) La courbe d'impédance est déterminée par

$$Z_f(s) = \frac{RLCs^2 + L_s + R}{s(CLs + CR)} \tag{I.6}$$

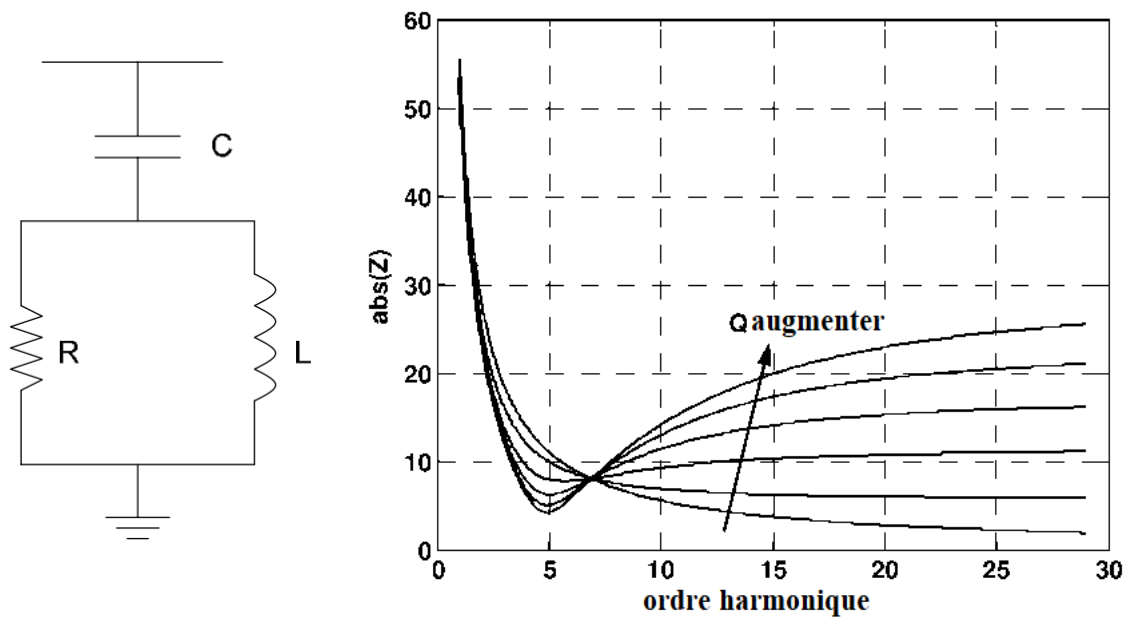


Figure I.15 : Filtre passe-haut du second ordre et sa courbe d'impédance

L'un des avantages de cette topologie est son encoche peu profonde par rapport au filtre à réglage unique (Courbe d'impédance comparée des figures (I.12 et I.14), permettant de l'utiliser pour filtrer plusieurs harmoniques d'ordre élevé. Il en résulte également une sensibilité de déviation des paramètres plus faible. Comparé au filtre passe-haut du premier ordre, il convainc par des pertes fondamentales plus faibles. En raison de ces caractéristiques supérieures, le HP 2nd est la topologie de filtre la plus populaire pour les applications industrielles telles que les VSD haute puissance [12].

I.3.4.4 Filtre passe-haut de troisième ordre

La topologie du filtre passe-haut du troisième ordre et sa courbe d'impédance en fonction de la fréquence sont représentées à la figure 5.6. La courbe d'impédance est déterminée par

$$Z_f(s) = \frac{RLC_1C_2s^3 + (C_1 + C_2)LS^2 + C_2R_s + 1}{sC_1(C_2LS^2 + C_2R_s + 1)} \tag{I.6}$$

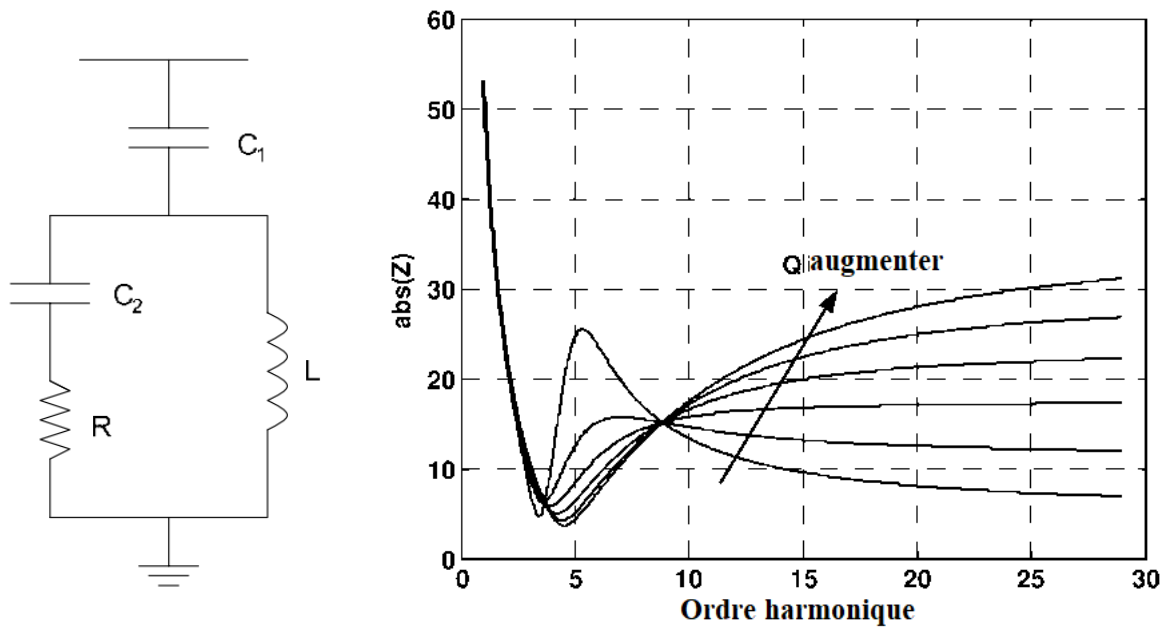


Figure I.16 : Filtre passe-haut du troisième ordre et sa courbe d'impédance

Par rapport au HPF2nd, le filtre passe-haut du troisième ordre donne encore moins pertes à la fréquence fondamentale due au condensateur ajouté C2 qui augmente l'impédance de la branche résistive aux basses fréquences. Il est cependant moins efficace pour filtrer les harmoniques d'ordre élevé que le type du second ordre. En raison de son coût et de sa complexité, il est rarement utilisé dans l'industrie [12].

I.3.4.5 Filtre de type C

La topologie du filtre de type c et sa courbe d'impédance en fonction de la fréquence sont représentées sur la figure I.16 La courbe d'impédance est déterminée par

$$Z_f(s) = \frac{RLC_1C_2s^3 + LC_2s^2(C_1 + C_2)R_s + 1}{sC_1(LC_2s^2 + RC_2s + 1)} \quad (I.6)$$

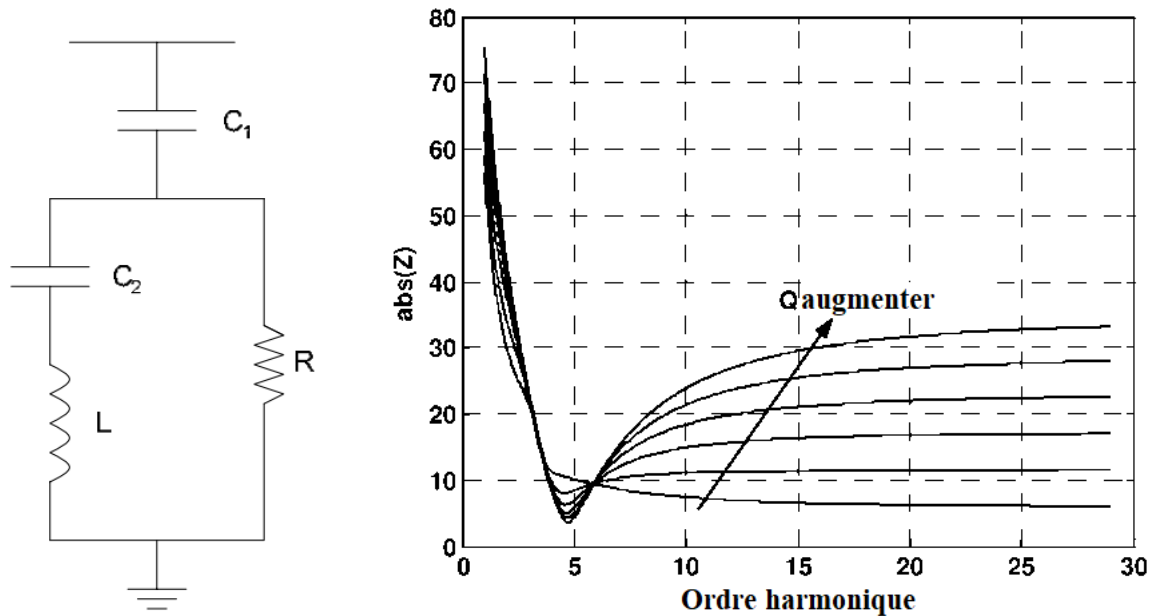


Figure I.17 : Filtre passe-haut de type C et sa courbe d'impédance

Le filtre de type C est un filtre passe-haut de second ordre avec un auxiliaire supplémentaire condensateur C_2 ajouté en série avec l'inductance. Le condensateur auxiliaire est accordé de sorte que sa réactance compense la réactance inductive à la fréquence fondamentale ce qui se traduit par une branche à faible impédance pour le courant fondamental évitant ainsi des pertes élevées dans la branche résistive. Les faibles pertes fondamentales sont le principal avantage des filtres de type C. De plus, une atténuation harmonique supérieure à la fréquence accordée est atteinte par rapport aux filtres passe-haut. De plus, les filtres de type peuvent être réglés pour des ordres harmoniques plus bas que les filtres passe-haut [13]. Son atténuation harmonique pour les fréquences d'ordre élevé est cependant moins efficace que pour les filtres passe-haut de second ordre. En général, le filtre de type C peut ainsi être catégorisé pour avoir un comportement intermédiaire entre les filtres passe - haut du deuxième et du troisième ordre.

En général, la combinaison SFT, HPF2nd et parallèle des deux types est couramment utilisée pour les applications industrielles. La raison en sera discutée. Le filtre passe-haut de troisième ordre et le filtre de type C sont principalement utilisés pour l'atténuation au niveau du réseau de transmission [13].

I.3.5 Filtrage actif

Les inconvénients inévitables aux filtres passifs et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les Transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance (A.P.F). Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser [1] [18,19].

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants [20] :

- ❖ le volume physique du filtre est plus réduit.
- ❖ la capacité de filtrage est supérieure.
- ❖ la flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils présentent quelques inconvénients :

- ❖ Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- ❖ Les pertes sont plus élevées.

Deux types de convertisseurs connus dans la littérature constituent APF: convertisseur à source de courant (CSI) ou à source de tension (VSI).

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré, le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, leurs sources et leurs conséquences. Par conséquent, un domaine de recherche a émergé pour les scientifiques afin d'élaborer des solutions de compensation pour cette pollution harmonique. Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Nous avons montré que la solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrements et de résonance. En revanche, la solution des filtres actifs parallèles et séries avec leurs combinaisons se présente comme la meilleure jusqu'à ce jour pour tous types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique.

Chapitre II

Écoulement de puissance
harmonique basé sur Newton-
Raphson

Sommaire

II.1 Introduction	32
II.2 Résolution d'équations algébriques non linéaires par les méthodes Newton-Raphson	32
II.3 Ecoulement de Puissance basé sur Newton-Raphson	36
II.4 Ecoulement de Puissance harmonique basé sur Newton-Raphson	38
II.5 Modèles de réseau pour l'écoulement de Puissance harmonique.	45
II.5.1 Lignes de transmission.....	45
II.5.2 Transformateurs	46
II.5.3 Générateurs	47
II.5.4 Moteurs à induction	49
II.5.5 Autres charges conventionnelles	52
II.6 Conclusion	54

II. Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de décrire l'extension de l'écoulement de puissance tel que résolu par la méthode de Newton-Raphson, afin de pouvoir effectuer une analyse harmonique du système électrique. Si chaque phase du système électrique triphasé contient des tensions et des courants fondamentaux et harmoniques identiques, le système électrique est dit complètement équilibré [21]. Une propriété d'un système d'alimentation complètement équilibré est que même les courants et tensions harmoniques n'existent pas [22].

Dans le cadre de ce chapitre, les nœuds qui ne contiennent pas de dispositifs de production d'harmoniques seront appelés nœuds conventionnels. En outre, les nœuds qui contiennent des dispositifs de production d'harmoniques seront appelés nœuds harmoniques.

Cette section décrit comment modéliser les éléments d'un système électrique pour les flux de puissance conventionnels et harmoniques basés sur Newton-Raphson. Le réseau de transmission du système électrique, composé de lignes de transmission et de transformateurs, doit être modélisé aux fréquences fondamentales et harmoniques.

II.1 Résolution d'équations algébriques non linéaires par les méthodes Newton-Raphson

Des techniques numériques itératives sont utilisées pour résoudre un ensemble d'équations algébriques non linéaires, pour lesquelles il n'existe pas de méthode formelle de résolution directe des inconnues. Une technique numérique itérative calcule progressivement des estimations plus précises des inconnues, jusqu'à ce que des résultats soient obtenus avec la précision souhaitée en un nombre fini d'itérations. Si de tels résultats sont obtenus, on dit que l'ensemble de solutions converge [23].

Afin d'expliquer la méthode Newton-Raphson et la prudence requise pour utiliser cette méthode, considérons l'équation générale ci-dessous, qui a une inconnue (x).

$$f(x) = 0 \quad (\text{II.1})$$

L'expansion de $f(x)$ dans une série de Taylor autour d'une valeur connue x^r , donne l'équation (II.2). La valeur x^r est appelée la valeur de x à la $r^{\text{ième}}$ itération.

$$f(x) = f(x^r) + \frac{1}{1!} \frac{df(x^r)}{dx} (x - x^r) + \frac{1}{2!} \frac{d^2f(x^r)}{dx^2} (x - x^r)^2 + \dots \quad (\text{II.2})$$

En éliminant tous les termes après la première dérivée, on obtient l'approximation suivante :

$$f(x) \cong f(x^r) - \frac{df(x^r)}{dx} (x - x^r) \quad (\text{II.3})$$

Comme $f(x) = 0$, l'équation (II.3) est réécrite sous la forme de l'équation (II.4), ou de l'équation (II.5).

$$x - x^r \cong 0 - \frac{f(x^r)}{\frac{df(x^r)}{dx}} \quad (\text{II.4})$$

$$\Delta x = - \frac{f(x^r)}{\frac{df(x^r)}{dx}} \quad (\text{II.5})$$

En raison de l'erreur introduite par la négligence des termes d'ordre supérieur dans la série de Taylor, la valeur x n'est pas une vraie racine de $f(x) = 0$. Cependant, il est tout à fait possible que x donne une meilleure estimation d'une vraie racine de $f(x) = 0$ que x^r . Par conséquent, la prochaine approximation de $f(x) = 0$ est donnée en résolvant l'équation (II.4) pour $x = x^{r+1}$.

$$x^{r+1} = x^r - \frac{f(x^r)}{\frac{df(x^r)}{dx}} = x^r + \Delta x \quad (\text{II.6})$$

La méthode Newton-Raphson pour la résolution de l'équation (II.1) commence par la sélection d'une valeur de départ x^0 , à partir de laquelle Δx est calculé par l'équation (II.5). Si $\Delta x > E$, où E est une petite erreur admissible, x^1 est calculé à l'aide de l'équation (II.6). Une fois encore, Δx est calculé, et la procédure se poursuit jusqu'à ce que l'une des trois choses suivantes se produise. Premièrement, on dit qu'une solution de $f(x) = 0$ converge, si $\Delta x \leq E$. Deuxièmement, on dit que la solution de $f(x) = 0$ diverge, si $\Delta x \geq \Delta_{max}$, où Δ_{max} est un changement inacceptable de x . Troisièmement, le processus peut également se terminer si le nombre d'itérations a atteint un nombre maximal autorisé, i.e., $r \geq r_{max}$.

La figure II.1 représente l'interprétation géométrique de la méthode Newton-Raphson pour trouver une valeur de x qui fait que $f(x) = 0$. En notation mathématique, l'équation (II.3) est l'équation de la ligne tangente en x^r [24]. Le point où cette ligne tangente coupe l'axe des x (i.e. x^{r+1}) est le point où une nouvelle ligne tangente est tracée sur la courbe $y = f(x)$. En partant de la valeur initiale x^r de la figure II.1, les lignes tangentes successives mèneront finalement à la solution x^s . La valeur x^s est une valeur de x qui satisfait l'équation (II.1), i.e. $f(x) = 0$.

Un système d'équations qui doit être résolu par la méthode de Newton-Raphson peut être instable (mal conditionné). Un système d'équations est dit stable si des modifications relativement faibles des coefficients entraînent des modifications proportionnellement faibles du vecteur de la solution.

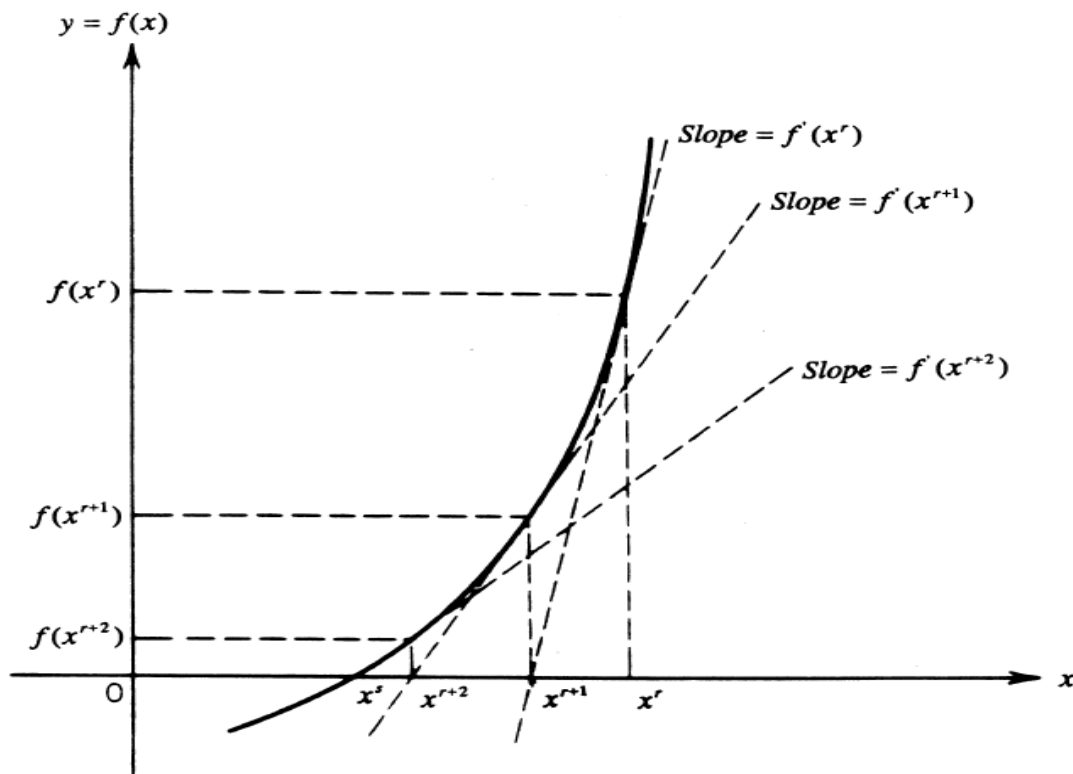


Figure II.1 : Interprétation géométrique de la méthode Newton-Raphson [24].

Pour deux systèmes, $Ax = C$ et $By = D$, si les éléments de A et B diffèrent peu, et ceux de C et D diffèrent peu, alors les éléments de vectrices solutions x et y différeront également peu si le système est stable.

La méthode Newton-Raphson pour la résolution des ensembles d'équations algébriques non linéaires n'est pas parfaite, et il faut savoir comment cette méthode peut échouer pour le problème à analyser.

Pour n équations algébriques non linéaires avec N inconnues comme dans l'équation (II.7) ci-dessous, la méthode de Newton Raphson peut être utilisée pour résoudre l'ensemble des équations $\sin \geq N$.

$$\begin{aligned}
 f^r &= f(A^r, B^r, \dots, N^r) = 0 \\
 g^r &= g(A^r, B^r, \dots, N^r) = 0 \\
 &\vdots \\
 n^r &= n(A^r, B^r, \dots, N^r) = 0
 \end{aligned}
 \tag{II.7}$$

En utilisant ces équations, une matrice Jacobienne est formée par l'équation (II.8). Les valeurs numériques des dérivées partielles sont obtenues en utilisant les valeurs des inconnues à la $r^{\text{ème}}$ itération.

$$J^{(r)} = \begin{vmatrix} \frac{d}{dA} f^r & \frac{d}{dB} f^r & \bullet & \bullet & \bullet & \frac{d}{dN} f^r \\ \frac{d}{dA} g^r & \frac{d}{dB} g^r & \bullet & \bullet & \bullet & \frac{d}{dN} g^r \\ \bullet & \bullet & & & & \\ \bullet & \bullet & & & & \bullet \\ \frac{d}{dA} n^r & \frac{d}{dB} n^r & \bullet & \bullet & \bullet & \frac{d}{dN} n^r \end{vmatrix}
 \tag{II.8}$$

L'erreur dans les inconnues, $\Delta A, \Delta B, \dots, \Delta N$ est trouvée par l'équation (II.9). La matrice de colonnes du côté droit de l'équation (II.9), contient des valeurs numériques pour l'équation (II.7) à la $r^{\text{ème}}$ itération.

$$\begin{vmatrix} \Delta A \\ \Delta B \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \Delta N \end{vmatrix} = -J^{(r)}{}^{-1} \begin{vmatrix} f^r \\ g^r \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ n^r \end{vmatrix}
 \tag{II.9}$$

L'approximation suivante des racines de l'ensemble d'équations (II.7) est obtenue à partir de l'équation (II.10).

$$\begin{aligned}
 A^{r+1} &= A^r + \Delta A \\
 B^{r+1} &= B^r + \Delta B \\
 &\vdots \\
 N^{r+1} &= N^r + \Delta N
 \end{aligned}
 \tag{II.10}$$

Le processus d'itération sur les inconnues se poursuit jusqu'à ce que $|\Delta A| \leq \varepsilon_A, |\Delta B| \leq \varepsilon_B, \dots \leq |\Delta_N| \leq \varepsilon_N$, sauf si l'ensemble de solutions diverge ou si le nombre d'itérations a atteint le maximum autorisé.

II.2 Ecoulement de puissance basé sur Newton-Raphson

L'écoulement de puissance, communément appelé le flux de charge, est un outil permettant de déterminer la tension, le courant, la puissance active et réactive et le facteur de puissance en différents points d'un système électrique dans des conditions de fonctionnement normal existantes ou proposées [16]. Il est nécessaire d'utiliser l'écoulement de puissance pour analyser un système électrique, afin de déterminer les effets des nouveaux sites de production, de l'emplacement des nouvelles lignes de transmission et des interconnexions avec d'autres réseaux électriques.

Lorsqu'on utilise l'écoulement de puissance, on suppose que tous les éléments du système électrique ne produiront pas d'harmoniques de tensions et de courants de fréquence fondamentale.

Les équations de l'écoulement de puissance basé sur Newton-Raphson sont dérivées en observant d'abord le flux de courant à fréquence fondamentale au niveau du nœud i d'un système électrique général à n -nœuds. Le système de puissance est illustré à la figure II.2.

En utilisant la loi des courants de Kirchhoff (*KCL*) au niveau du nœud i , on obtient l'équation (II.11).

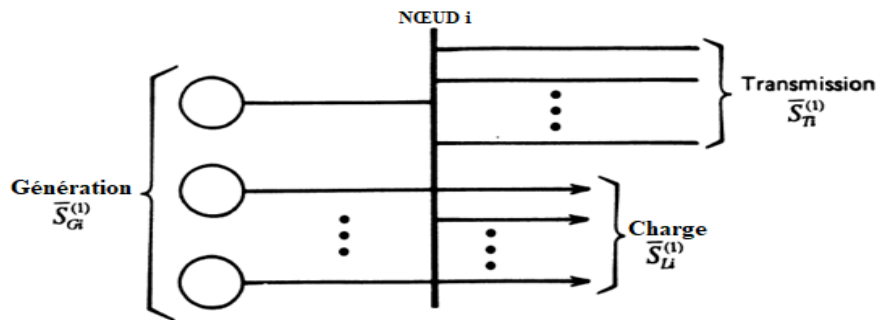
$$\bar{I}_{Gi}^{(1)} = \bar{I}_{Li}^{(1)} + \bar{I}_{Ti}^{(1)} \quad (\text{II.11})$$

Les puissances complexes individuelles de fréquence fondamentale de l'équation (II.12) peuvent être résolues en leurs composantes rectangulaires comme indiqué ci-dessous.

$$\bar{S}_{Gi}^{(1)} = \bar{S}_{Li}^{(1)} + \bar{S}_{Ti}^{(1)} \quad (\text{II.12})$$

$$\bar{S}_{Gi}^{(1)} = P_{Gi}^{(1)} + jQ_{Gi}^{(1)} \quad (\text{II.13})$$

$$\bar{S}_{Li}^{(1)} = P_{Li}^{(1)} + jQ_{Li}^{(1)} \quad (\text{II.14})$$



$$\bar{S}_{Ti}^{(1)} = P_{Ti}^{(1)} + jQ_{Ti}^{(1)} \quad (\text{II.15})$$

Figure II.2 : Diagramme unifilaire au nœud i d'un système électrique général à n - nœuds [23].

$P_i^{(1)}$ et $Q_i^{(1)}$ représentent l'écoulement de puissance net active et réactive à la fréquence fondamentale à chaque nœud i .

$$P_i^{(1)} = -P_{Gi}^{(1)} + P_{Li}^{(1)} + P_{Ti}^{(1)} = 0 \quad (\text{II.16})$$

$$Q_i^{(1)} = -Q_{Gi}^{(1)} + Q_{Li}^{(1)} + Q_{Ti}^{(1)} = 0 \quad (\text{II.17})$$

Les deux équations ci-dessous décrivent les conditions de puissance active et réactive à chaque nœud i du réseau électrique. Elles seront appelées équations de mismatch des puissances active et réactive.

$$P_i^{(1)} = -P_{Gi}^{(1)} + P_{Li}^{(1)} + \sum_{j=1}^n V_i^{(1)} V_j^{(1)} y_{ij}^{(1)} \cos(\delta_i^{(1)} - \delta_j^{(1)} - \delta_i^{(1)}) \quad (\text{II.18})$$

$$Q_i^{(1)} = -Q_{Gi}^{(1)} + Q_{Li}^{(1)} + \sum_{j=1}^n V_i^{(1)} V_j^{(1)} y_{ij}^{(1)} \sin(\delta_i^{(1)} - \delta_j^{(1)} - \delta_i^{(1)}) \quad (\text{II.19})$$

II.3 Écoulement de puissance harmonique basé sur Newton-Raphson

L'écoulement de puissance harmonique est un outil qui est utilisé pour prédire le niveau et la propagation des harmoniques créés par un ou plusieurs dispositifs harmoniques dans le système électrique, leurs effets et l'exploration de mesures correctives telles que l'utilisation de filtres [21].

Les composants non linéaires étant la source des harmoniques dans les réseaux électriques, il est très important, dans l'écoulement de puissance harmonique basé sur Newton Raphson, de modéliser avec précision la relation non linéaire entre les formes d'onde du courant et de la tension à chaque nœud contenant un dispositif harmonique. À cette fin, il est pratique d'exprimer les tensions et les courants déformés sous forme de séries de Fourier [21].

Les nœuds conventionnels peuvent être modélisés exactement de la même manière que les nœuds harmoniques dans l'écoulement de puissance harmonique.

Ainsi, la forme générale des équations de désadaptation de la puissance active et réactive à chaque nœud harmonique m est donnée par les équations (II.20) et (II.21). La lettre h fait référence à l'harmonique la plus élevée à prendre en compte dans l'écoulement de puissance harmonique, et, la lettre f représente la fréquence d'intérêt (fondamental ou harmonique).

$$P_m = \sum_{f=1}^h \left(P_{Lm}^{(f)} + P_{Tm}^{(f)} \right) = 0 \quad (\text{II.20})$$

$$Q_m = \sum_{f=1}^h \left(Q_{Lm}^{(f)} + Q_{Tm}^{(f)} \right) = 0 \quad (\text{II.21})$$

En outre, la forme générale des équations de déséquilibre de la puissance active et réactive à chaque nœud conventionnel i est donnée par les équations (II.22) et (II.23).

$$P_i = -P_{Gi}^{(1)} + \sum_{f=1}^h \left(P_{Li}^{(f)} + P_{Ti}^{(f)} \right) = 0 \quad (\text{II.22})$$

$$Q_i = -Q_{Gi}^{(1)} + \sum_{f=1}^h \left(Q_{Li}^{(f)} + Q_{Ti}^{(f)} \right) = 0 \quad (\text{II.23})$$

Seuls les termes impairs apparaissent dans les équations (II.20) à (II.23) ci-dessus, puisque les harmoniques paires n'existent pas dans un système électrique complètement équilibré.

Les termes de puissance active et réactive transmis dans les équations (II.20) à (II.23) sont obtenus exactement de la même manière pour les fréquences fondamentales et harmoniques. En outre, ces termes sont formés exactement de la même manière que pour le l'écoulement de puissance et doivent être utilisés à chaque nœud j dans un système électrique à n nœuds (à l'exception du slack bus). Par conséquent, les termes de puissance active et réactive transmis dans les équations (II.20) à (II.23), sont obtenus à partir des équations (II.24) à (II.27). Encore une fois, $f \geq 1, f$ impair.

$$P_{Tm}^{(f)} = \sum_{j=1}^n V_m^{(f)} V_j^{(f)} y_{mj}^{(f)} \cos(\delta_m^{(f)} - \delta_j^{(f)} - \alpha_{mj}^{(f)}) \quad (\text{II.24})$$

$$Q_{Tm}^{(f)} = \sum_{j=1}^n V_m^{(f)} V_j^{(f)} y_{mj}^{(f)} \sin(\delta_m^{(f)} - \delta_j^{(f)} - \alpha_{mj}^{(f)}) \quad (\text{II.25})$$

$$P_{Ti}^{(f)} = \sum_{j=1}^n V_i^{(f)} V_j^{(f)} y_{ij}^{(f)} \cos(\delta_i^{(f)} - \delta_j^{(f)} - \alpha_{ij}^{(f)}) \quad (\text{II.26})$$

$$Q_{Ti}^{(f)} = \sum_{j=1}^n V_i^{(f)} V_j^{(f)} y_{ij}^{(f)} \sin(\delta_i^{(f)} - \delta_j^{(f)} - \alpha_{ij}^{(f)}) \quad (\text{II.27})$$

Pour l'écoulement de puissance harmonique, la série de Fourier du courant entrant dans un nœud harmonique m est exprimée en fonction de la série de Fourier de la tension à ce nœud, et de tout paramètre décrivant cette forme d'onde de courant déformée. En supposant que cette série de Fourier a été obtenue, la $k^{\text{ème}}$ puissance de charge complexe harmonique au nœud m est obtenue par observation de la figure II.2, pour donner les équations (II.28) et (II.29).

$$P_{Lm}^{(k)} = V_m^{(k)} g_{Lm}^{(k)} \cos(\delta_m^{(k)} - \beta_m^{(k)}) \quad (\text{II.28})$$

$$Q_{Lm}^{(k)} = V_m^{(k)} g_{Lm}^{(k)} \sin(\delta_m^{(k)} - \beta_m^{(k)}) \quad (\text{II.29})$$

La tension $\bar{V}_m^{(k)} = V_m^{(k)} / \underline{\delta}_m^{(k)}$, représente la $k^{\text{ème}}$ tension harmonique au nœud m .

Le courant $\bar{g}_{Lm}^{(k)} = g_{Lm}^{(k)} / \underline{\beta}_m^{(k)}$ représente le $k^{\text{ème}}$ courant harmonique entrant dans le nœud de charge harmonique m .

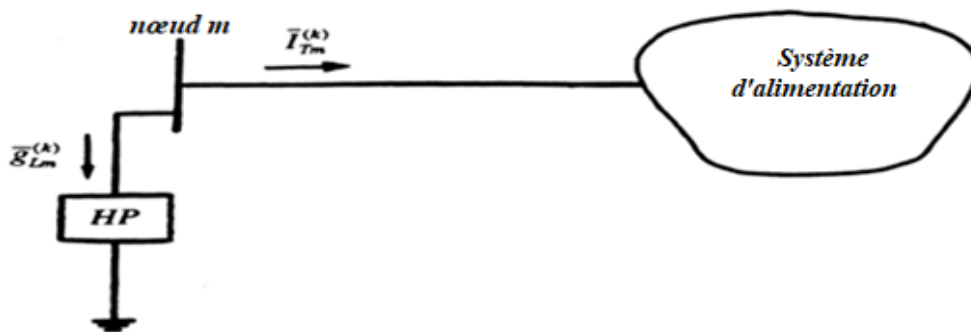


Figure II.3 : Représentation générale d'un réseau électrique à la k^{th} fréquence harmonique, avec une charge produisant des harmoniques (HP) au nœud m .

Les nœuds conventionnels peuvent être modélisés exactement de la même manière que les nœuds harmoniques dans l'écoulement de puissance. Cependant, cette approche n'est pas généralement utilisée, afin de simplifier l'écoulement de puissance. Au lieu de cela, chaque nœud conventionnel est modélisé comme une demande de puissance complexe à la fréquence fondamentale, et est modélisé comme une impédance (qui a une caractéristique tension-courant linéaire) aux fréquences harmoniques. À chaque fréquence harmonique, une impédance différente est utilisée pour modéliser le ou les dispositifs du nœud conventionnel. Par conséquent, il est facile d'obtenir les courants harmoniques entrant dans un bus conventionnel, et d'obtenir la puissance complexe harmonique tirée par un nœud conventionnel.

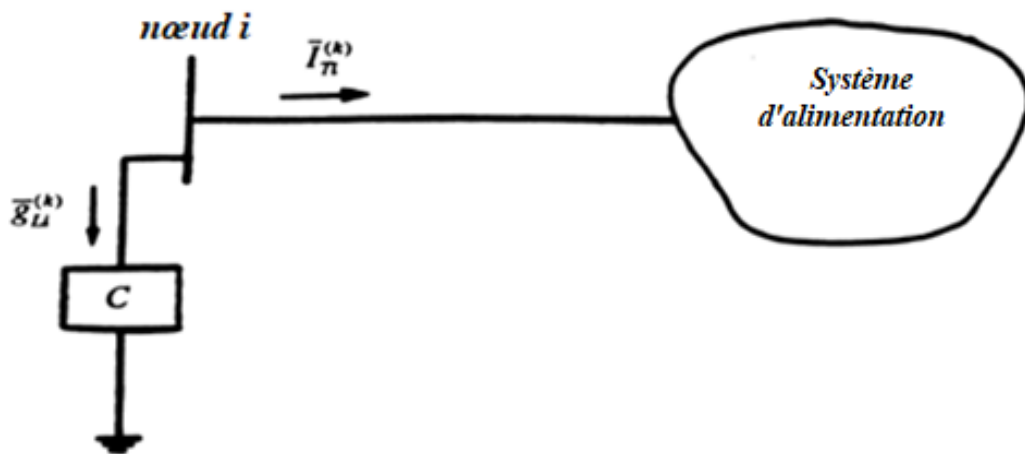
Par exemple, la figure II.4(a), montre une représentation générale d'un système d'alimentation à la k^{th} fréquence harmonique, avec une charge conventionnelle (C) au nœud i . En supposant que le modèle d'impédance de la $k^{\text{ème}}$ harmonique au niveau du nœud conventionnel i est une combinaison R - L en série, comme dans la figure II.4(b), le courant $g_{Li}^{(k)}$ est trouvé par la loi d'Ohm pour donner l'équation (II.30).

$$\bar{g}_{Li}^{(k)} = \frac{\bar{V}_i^{(k)}}{R + j2\pi fL} \quad (\text{II.30})$$

Par substitution de l'équation (II.30) dans $S = V.I^*$, à la $k^{\text{ème}}$ fréquence harmonique, la puissance de charge complexe harmonique pour la charge conventionnelle de la figure II.4(b) est donnée par les équations (II.31) et (II.32)

$$P_{Li}^{(k)} = \frac{R[\bar{V}_i^{(k)}]^2}{R^2 + [2\pi f]^2 L^2} \quad (\text{II.31})$$

$$Q_{Li}^{(k)} = \frac{2\pi fL[\bar{V}_i^{(k)}]^2}{R^2 + [2\pi f]^2 L^2} \quad (\text{II.32})$$



(a)

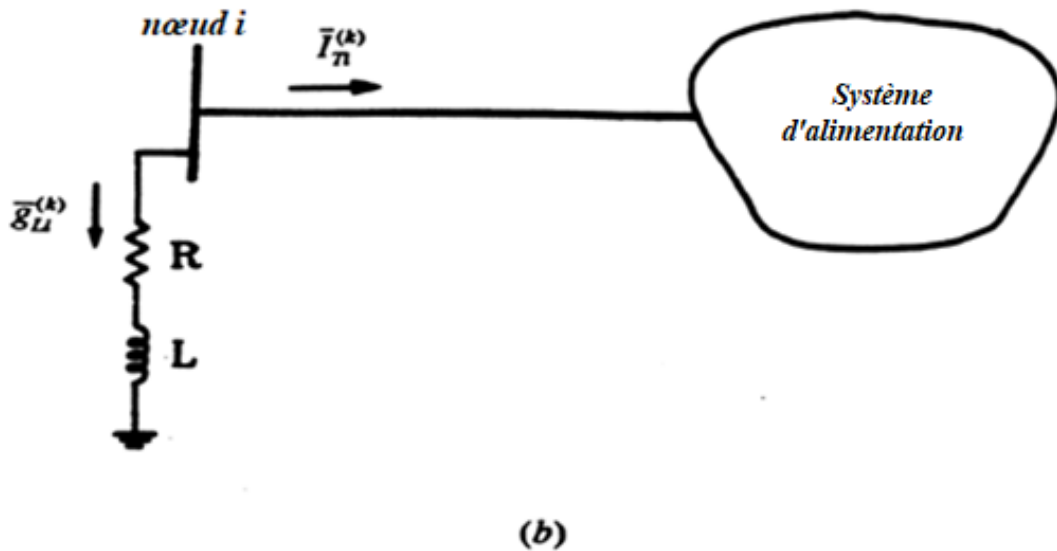


Figure II.4 : (a). Représentation générale d'un réseau électrique à la $k^{\text{ème}}$ fréquence harmonique, avec une charge conventionnelle (C) au nœud i . (b). Représentation équivalente de (a), avec la charge conventionnelle modélisée comme une combinaison R - L en série.

La séparation des équations (II.33) et (II.34) en leurs composantes réelles et imaginaires, donne les équations (II.35) et (II.36), où $f \geq 1, k \geq 3$ et f et k sont d'ordre impair.

$$\sum_{j=1}^n \bar{y}_{mj}^{(f)} \bar{V}_j^{(f)} + \bar{g}_{Lm}^{(f)} = 0 \tag{II.33}$$

$$\sum_{j=1}^n \bar{y}_{ij}^{(k)} \bar{V}_j^{(k)} + \bar{g}_{Li}^{(k)} = 0 \tag{II.34}$$

$$\sum_{j=1}^n y_{mj}^{(f)} V_j^{(f)} \cos(\alpha_{mj}^{(f)} + \delta_j^{(f)}) + g_{Lm,r}^{(f)} = 0 \quad (\text{II.35a})$$

$$\sum_{j=1}^n y_{mj}^{(f)} V_j^{(f)} \sin(\alpha_{mj}^{(f)} + \delta_j^{(f)}) + g_{Lm,i}^{(f)} = 0 \quad (\text{II.35b})$$

$$\sum_{j=1}^n y_{ij}^{(k)} V_j^{(k)} \cos(\alpha_{ij}^{(k)} + \delta_j^{(k)}) + g_{Li,r}^{(k)} = 0 \quad (\text{II.36a})$$

$$\sum_{j=1}^n y_{ij}^{(k)} V_j^{(k)} \sin(\alpha_{ij}^{(k)} + \delta_j^{(k)}) + g_{Li,i}^{(k)} = 0 \quad (\text{II.36b})$$

En résumé, les équations à utiliser dans l'écoulement de puissance harmonique sont présentées ci-dessus.

La forme générale des équations de déséquilibre de la puissance active et réactive à utiliser dans l'écoulement de la puissance harmonique est donnée par les équations (II.20) à (II.23). Les équations (II.24) à (II.32) aident à définir les termes des équations (II.20) à (II.35).

Les équations (II.36) représentent la discussion des équations de désadaptation des courants réels et imaginaires de fréquence fondamentale et harmonique. Cependant, seules les équations (II.35) et (II.36) doivent être utilisées dans l'écoulement de puissance harmonique.

Par conséquent, la forme générale de l'ensemble d'équations l'écoulement de puissance harmonique est donné par les équations (II.20) à (II.35) et les équations (II.35) et (II.36). Cet ensemble d'équations a été dérivé dans un format général et doit être traité de la même manière que tout autre ensemble d'équations algébriques non linéaires, qui doit être résolu par la méthode de Newton-Raphson.

II.4 Modèles de réseau pour l'écoulement de Puissance harmoniques

II.4.1 Lignes de transmission

Pour l'écoulement de puissance harmonique, les lignes de transmission triphasées sont modélisées par un modèle monophasé équivalent au **pi**, avec la séquence de phase correcte, à la fois pour les fréquences fondamentales et harmoniques. Les facteurs les plus importants à prendre en compte pour le modèle **pi** équivalent de la (Figure II.5) sont la longueur de la ligne et l'effet de peau. La modèle pi-équivalent "longue ligne" de la (Figure II.5) est recommandé pour les distances supérieures à cinq pour cent de la longueur d'onde λ de l'harmonique la plus élevée concernée [23].

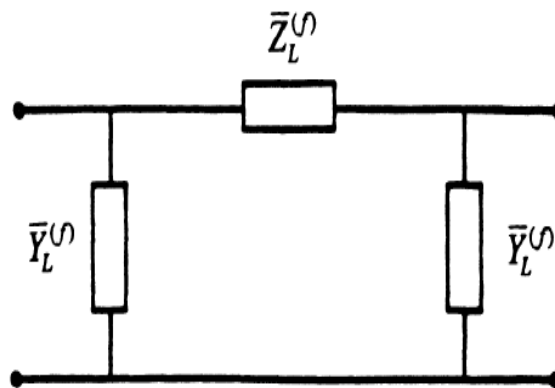


Figure II.5 : Modèle équivalent à Pi- d'une longue ligne de transmission [21].

Où :

$R^{(f)}$: Résistance série par unité de longueur.

$L^{(f)}$: Inductance série par unité de longueur.

$C^{(f)}$:Capacité shunt par unité de longueur

$G^{(f)}$:conductance shunt par unité de longueur.

$d^{(f)}$: Longueur de la ligne de transmission.

II.4.2 Transformateurs

Les transformateurs dans l'écoulement de puissance harmonique sont modélisés de la même manière pour les fréquences fondamentale et harmonique. Ce modèle monophasé est montré à la Figure II.6, et est le même modèle

standard utilisé dans l'écoulement de puissance conventionnel [23], où la branche magnétisante shunt est ignorée. L'impédance de séquence positive est supposée être égale à l'impédance de séquence négative. Dans un système électrique triphasé, l'impédance homopolaire est égale à l'impédance homopolaire si trois transformateurs monophasés interconnectés sont utilisés. Cependant, l'impédance homopolaire sera différente si le transformateur est un dispositif triphasé unique. En outre, le modèle de séquence zéro dépend des connexions du transformateur (c'est-à-dire, connecté en étoile, connecté en triangle, etc.).

Le rapport réactance inductive/résistance à la fréquence fondamentale (c'est-à-dire $X(1)/R(1)$) pour chaque séquence est supposé, par prudence, rester constant et est directement proportionnel à la fréquence [25]. A la connaissance de l'auteur, il n'existe pas encore de modèle qui permette de traiter le transformateur comme une source d'harmoniques pour le modèle de Newton-Raphson basé sur l'écoulement de puissance.

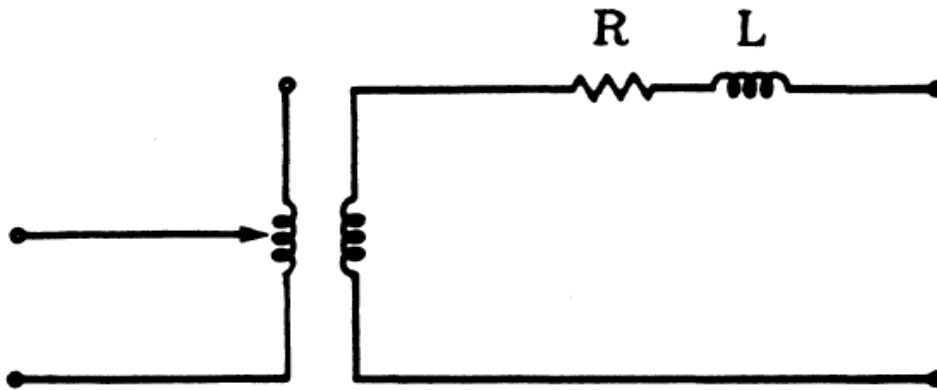


Figure II.6 : Modèle de l'écoulement de puissance d'un transformateur. Source : Grady [21],

Comme le suggère la figure 3.15, les transformateurs de changement de prise doivent être utilisés lorsque cela est nécessaire, par exemple pour modéliser le déphasage. Pour les connexions en étoile-triangle ou en triangle-triangle, le côté haute tension est en avance sur le côté basse tension de trente

degrés pour les réseaux à séquence positive. De même, pour le réseau à séquence négative, le côté haute tension est en retard sur le côté basse tension de trente degrés. Le réseau homopolaire n'introduit aucun déphasage.

II.4.3 Générateurs

Pour chaque fréquence harmonique, un modèle acceptable pour un générateur synchrone consiste à mettre directement à l'échelle la réactance de l'inductance de séquence négative de fréquence fondamentale du générateur avec la fréquence [21]. La composante résistive de l'impédance de séquence négative de fréquence fondamentale est généralement beaucoup plus petite que la composante réactive. De plus, en l'absence d'informations élaborées, la composante résistive est supposée rester constante pour toutes les fréquences harmoniques, et est négligeable.

Les courants statoriques à fréquence fondamentale négative tournent à deux fois la vitesse synchrone, vue du rotor. Le flux résultant est forcé dans des chemins de faible perméabilité, qui ne relie aucun circuit du rotor. Ces chemins sont caractérisés par les inductances subtransitoires directe et en quadrature L_d'' et L_q'' respectivement. Par définition, la réactance homopolaire à fréquence fondamentale d'une machine synchrone est donnée par l'équation (II.37) [26].

$$X_2^{(1)} = \frac{[(X_d'')^{(1)} + (X_q'')^{(1)}]}{2} \quad (\text{II.37})$$

Où :

X_d'' = Réactance subtransitoire de l'axe direct

X_q'' = Réactance subtransitoire de l'axe de quadrature

Ensuite, par observation de l'équation (II.37), l'inductance de fréquence fondamentale à séquence négative d'une machine synchrone est donnée par l'équation (II.38). Il s'agit de l'inductance rencontrée par les courants de

séquence négative de fréquence fondamentale circulant dans l'enroulement statorique d'une machine synchrone.

$$L_2^{(1)} = \frac{[(L_d'')^{(1)} + (L_q'')^{(1)}]}{2} \quad (\text{II.38})$$

Lorsque les courants harmoniques passent du réseau aux enroulements du stator d'un générateur synchrone, ils créent également un flux tournant à des multiples de la vitesse synchrone, dont le sens peut être identique ou opposé au sens de rotation du rotor [27]. De plus, ces flux sont également forcés dans des chemins caractérisés par les inductances subtransitoires. Par conséquent, l'inductance moyenne qui semble être rencontrée non seulement par les courants statoriques de fréquence fondamentale à séquence négative, mais aussi par les courants statoriques de fréquence harmonique est donnée par l'équation (II.38) [21].

Ensuite, la réactance utilisée pour modéliser la machine synchrone comme dans la figure II.7, pour la $k^{\text{ème}}$ fréquence harmonique est donnée par l'équation (II.39), où k est la fréquence harmonique d'intérêt, $X_2^{(1)}$ sont donnés par l'équation (II.37).

$$X_{gen}^{(k)} = kX_2^{(1)} \quad (\text{II.39})$$

II.4.4 Moteurs à induction

La machine à induction est l'une des charges de moteur les plus couramment utilisées aujourd'hui dans les réseaux électriques. Un modèle adéquat de fréquence harmonique de la machine à induction est le même que celui proposé pour la machine synchrone [21]. Cependant si les réactances subtransitoires de l'axe direct et de l'axe en quadrature sont inconnues, un modèle d'impédance harmonique peut être obtenu, basé sur le modèle de fréquence fondamentale par phase présenté à la figure II.8 [21].

L'inductance de magnétisation L_m , est généralement ignorée, car elle est grande par rapport aux autres termes.

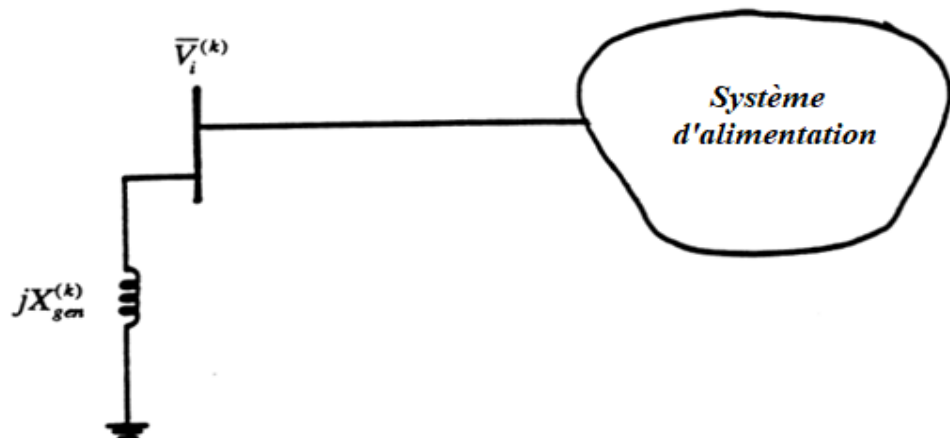


Figure II.7: Modèle de l'écoulement de puissance harmonique d'une machine synchrone pour la $k^{ème}$ fréquence harmonique [21].

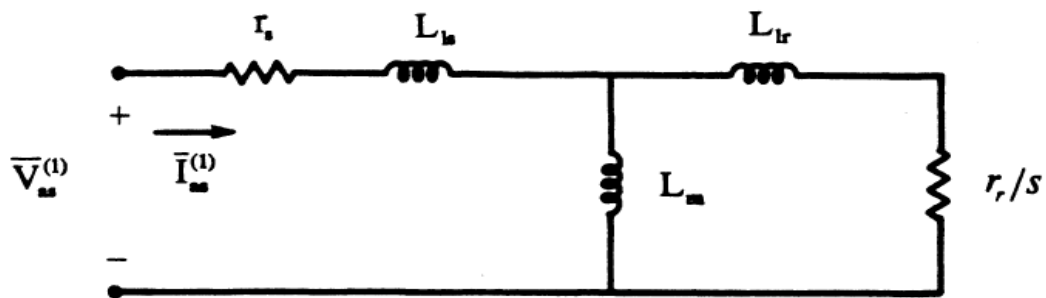


Figure II.8 : Modèle équivalent de fréquence fondamentale par phase pour une machine à induction (phase a représentée) [21].

V_{as} = Tension statorique de fréquence fondamentale par phase.

I_{as} = Courant statorique de fréquence fondamentale par phase.

r_s = Résistance de l'enroulement du stator.

L_{Is} = Inductance de fuite de l'enroulement du stator.

L_m = Inductance de magnétisation.

L_{Ir} = Inductance de fuite de l'enroulement du rotor.

r_r = Résistance de l'enroulement du rotor.

s = Le glissement = $(\Omega_s - \Omega_r) / \Omega_s$

ω = Fréquence angulaire en radians par seconde.

Lorsque des courants harmoniques passent du réseau aux enroulements du stator d'une machine à induction, le flux résultant tourne dans l'entrefer à une vitesse de $\Omega_{sk} = k \Omega_s$ où le sens peut être identique ou opposé au sens de rotation du rotor [27]. Par approximation, la vitesse du rotor Ω_r est supposée être à peu près la même que la fréquence fondamentale, vitesse synchrone Ω_s . Par conséquent, en utilisant la définition du glissement donnée à la figure II.8, le glissement du rotor par rapport à la vitesse synchrone (fréquence fondamentale) à la $k^{\text{ème}}$ fréquence harmonique est approximativement donné par l'équation (II.40).

$$S_k = \frac{(\omega_{sk} \pm \omega_r)}{\omega_{sk}} \cong \frac{(k\omega_s \pm \omega_s)}{k\omega_s} \cong \frac{(k \pm 1)}{k} \cong 1 \quad (\text{II.40})$$

Par conséquent, le terme r_r/s de la figure II.8 est supposé être approximativement r_r pour toutes les fréquences harmoniques. A la fréquence fondamentale, les résistances du rotor et du stator sont généralement faibles par rapport aux réactances. Par conséquent, cette approximation n'introduira pas d'erreur significative.

La résistance et la réactance en série combinées qui en résultent peuvent être déterminées par la demande de puissance active et réactive à la fréquence fondamentale du moteur. Par conséquent, les valeurs de $R_{ind}^{(1)}$ et $L_{ind}^{(1)}$ sont obtenues par l'équation (II.41) ci-dessous, et sont utilisées dans le modèle de l'écoulement de puissance harmonique de la figure II.9. Notez que si Q_{Li} est négatif, alors une capacité $C_{ind}^{(1)}$ doit être utilisée au lieu d'une inductance $L_{ind}^{(1)}$.

$$\bar{V}_i^{(1)} \left(\frac{\bar{V}_i^{(1)}}{R_{ind}^{(1)} + j2\pi(f)L_{ind}^{(1)}} \right) = P_{Li}^{(1)} + jQ_{Li}^{(1)} \quad (\text{II.41})$$

En l'absence d'informations détaillées, la composante résistive de la fréquence fondamentale est supposée rester constante pour toutes les fréquences harmoniques [21]. La réactance de fréquence fondamentale est directement proportionnelle à la fréquence. Par conséquent, l'impédance utilisée pour

modéliser le moteur à induction à toutes les fréquences harmoniques est donnée par les équations (II.42) et (II.43), où k est la fréquence harmonique d'intérêt.

$$X_{ind}^{(k)} = kX_{ind}^{(1)} \quad (II.43)$$

$$R_{ind}^{(k)} = R_{ind}^{(1)} \quad (II.42)$$

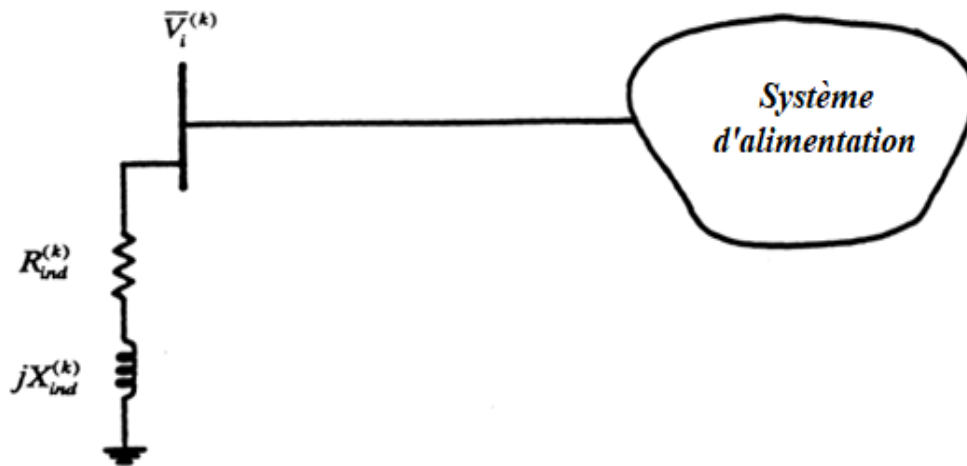


Figure II.9 : Modèle de l'écoulement de puissance [21].

II.4.5 Autres charges conventionnelles

Il est difficile de représenter de nombreux nœuds de charge conventionnels aux fréquences harmoniques, car leur composition exacte est généralement inconnue. Il est suggéré qu'en l'absence d'informations spécifiques, un nœud de charge conventionnel doit être modélisé comme une résistance shunt en parallèle avec une inductance ou un condensateur [21]. La résistance et la réactance peuvent être déterminées par la demande de puissance active et réactive à fréquence fondamentale de la charge conventionnelle. Par conséquent, les valeurs de $R_{charge}^{(1)}$ et $L_{charge}^{(1)}$ sont obtenues à partir des équations (II.44), et (II.45) ci-dessous, et sont utilisées dans le modèle de l'écoulement de puissance

harmonique de la figure II.10. Notez que si $Q_{Li}^{(1)}$ est négatif, alors une capacité $C_{charge}^{(1)}$ doit être utilisée au lieu d'une inductance $L_{charge}^{(1)}$.

$$P_{Li}^{(1)} = \frac{[V_i^{(1)}]^2}{R_{load}^{(1)}} \quad (II.44)$$

$$Q_{Li}^{(1)} = \frac{[V_i^{(1)}]^2}{2\pi(f)L_{load}^{(1)}} \quad (II.45)$$

En l'absence d'informations détaillées, on suppose que la résistance à la fréquence fondamentale reste constante pour toutes les fréquences harmoniques [21]. La réactance à fréquence fondamentale est directement proportionnelle à la fréquence.

Par conséquent, l'impédance utilisée pour modéliser une charge conventionnelle inconnue à toutes les fréquences harmoniques est donnée par les équations (II.46) et (II.47) ci-dessous :

$$R_{charge}^{(k)} = R_{charge}^{(1)} \quad (II.46)$$

$$X_{charge}^{(k)} = kX_{charge}^{(1)} \quad (II.47)$$

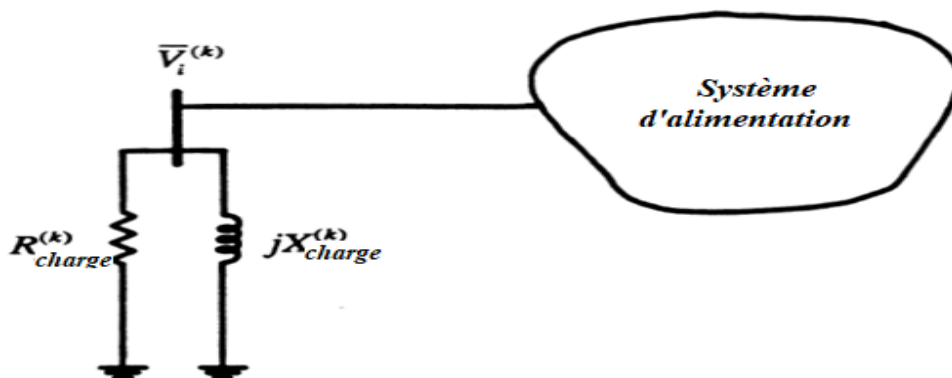


Figure II.10 : Modèle l'écoulement de puissance suggéré d'une charge conventionnelle inconnue pour la $k^{ème}$ fréquence harmonique [21].

II.5 Conclusion

Il a été démontré dans ce chapitre que l'écoulement de puissance harmonique basé sur Newton-Raphson est une extension logique de l'écoulement de puissance basé sur Newton-Raphson. Les équations utilisées pour déterminer les tensions de fréquence fondamentale dans le système électrique pour l'écoulement de puissance harmonique sont très similaires aux équations dérivées pour l'écoulement de puissance. La seule différence est que les équations dérivées pour l'écoulement de puissance sont écrites sous forme de série de Fourier pour l'écoulement de puissance harmonique.

Il a également été démontré qu'un inconvénient majeur de l'utilisation de l'écoulement de puissance harmonique est le grand nombre d'équations algébriques non linéaires qui doivent être résolues simultanément est de $2(n - 1)$, où n est le nombre de nœud dans le système électrique. Pour chaque nœud du système électrique, on souhaite déterminer le module et l'angle de la tension à la fréquence fondamentale.

Chapitre III

Applications et simulation par
le logiciel ETAP

Sommaire

III.1 Introduction	57
III.2 Description du logiciel ETAP	57
III.2.1 Écoulement de Puissance harmonique	58
III.2.2 Balayage de fréquence harmonique	59
III.2.3 Barre d'outils	60
III.3 Application 1 : Réseau 4 nœuds	62
III.3.1 Modélisation du réseau	63
III.3.2 Analyse de l'écoulement de puissance	65
III.3.3 Analyse harmonique	66
III.3.3.1 Écoulement de puissance harmonique	66
III.3.3.2 Balayage de fréquence harmonique	68
III.3.4. Élimination des harmoniques à l'aide d'un filtre	72
III.3.4.1 Analyse harmonique après injection d'un filtre de 11ème ordre	74
III.3.4.2 Analyse harmonique après injection les filtre (11 ^{ème} et 13 ^{ème} ordre)	76
III.4 Application 2 : Réseau IEEE 14 nœuds	79
III.4.1 Analyse de l'écoulement de puissance	80
III.4.2 Écoulement de Puissance harmonique	81
III.4.2.1 Source de courant harmonique	81
III.4.2.2 Source de tension harmonique	83
III.4.2.3 Comparaison des modèles de sources de courant et de tension	84
III.4.2.4 Élimination des harmoniques à l'aide d'un filtre	85
III.4.2.4.1 Élimination des harmoniques (cas de source de courant)	85
III.4.2.4.2 Élimination des harmoniques (cas de source de tension)	86
III.4.3 Balayage de fréquence harmonique	88
III.5 Conclusion	90

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse harmonique des réseaux électriques de 4 nœuds et IEEE 14 nœuds qui sont utilisés pour la simulation dans le logiciel ETAP. Ici, les composants harmoniques sont modélisés pour créer un courant et tension harmoniques pour la distorsion harmonique dans les réseaux électriques. Le module d'analyse des harmoniques dispose de deux méthodes analytiques, l'écoulement de puissance harmonique et le balayage de fréquence harmonique. Après avoir permis une analyse harmonique efficace, des techniques d'élimination populaires seront suivies pour atténuer cette distorsion harmonique. L'ensemble du processus d'analyse harmonique sera décrit en conséquence.

III.2 Description du logiciel ETAP

ETAP est un utilitaire qui aidera les ingénieurs électriciens dans les processus de conception, de simulation, d'exploitation et d'optimisation des systèmes électriques. ETAP offre un large éventail d'outils pour la conception de systèmes électriques. Le projet conçu peut être étudié en effectuant une **analyse l'écoulement de puissance**, une **analyse de court-circuit**, une **analyse d'accélération du moteur**, une **analyse harmonique**, une **analyse de stabilités transitoires** et autres. Les utilisateurs peuvent également créer et modifier des diagrammes unifilaires, des systèmes de câbles en 3D, des tracés, des systèmes de grilles de terre en 3D, et la liste est encore longue. Le programme est destiné à combiner les attributs électriques, mécaniques, logiques et physiques qui décrivent les éléments du système [28].

En utilisant ETAP, les phénomènes d'harmoniques du système électrique peuvent être modélisés et analysés. Le module d'analyse des harmoniques d'ETAP fournit le meilleur outil pour modéliser avec précision divers composants et dispositifs du système électrique afin d'inclure leur dépendance à la fréquence, leur non-linéarité et d'autres caractéristiques en présence de

sources d'harmoniques. Ce module dispose de deux méthodes analytiques, **'l'écoulement de puissance harmonique'** et **'le balayage de fréquence harmonique'**, qui sont les approches les plus populaires et les plus puissantes pour l'analyse harmonique des réseaux électriques. En utilisant ces deux méthodes en combinaison, différents indices harmoniques sont calculés et comparés aux limites des normes industrielles. Les problèmes de qualité d'énergie existants et potentiels associés aux harmoniques peuvent être facilement révélés. Les causes de ces problèmes peuvent être identifiées et différents schémas d'atténuation et de correction peuvent être testés et finalement vérifiés.

III.2.1 Écoulement de puissance harmonique

Dans le module d'analyse harmonique d'ETAP, l'utilisateur peut simuler les sources de courant et de tension harmonique. L'étude de l'écoulement de puissance harmonique effectue d'abord un calcul de l'écoulement de puissance à la fréquence fondamentale. Les résultats du l'écoulement de puissance fondamental concernent les nœuds de tension et les branches de courant fondamentaux qui sont ensuite utilisés pour calculer les différents indices harmoniques.

À partir du calcul de l'écoulement de puissance harmonique, les composantes harmoniques des tensions des nœuds et des courants des branches sont trouvées, puis tous les indices harmoniques sont calculés en conséquence. Les THD et IHD de la tension de nœud calculés sont comparés à leurs limites telles que spécifiées par l'utilisateur dans l'éditeur de nœud. Si des violations sont détectées, elles seront affichées dans la vue d'alerte de l'analyse du l'écoulement de puissance harmonique et des drapeaux seront placés dans le rapport texte à côté du nœud associé dans la section harmonique information.

Parmi les caractéristiques principales de l'étude utilisant le logiciel ETAP sur l'écoulement de puissance harmonique, on cite à titre d'exemple, calcul

complet l'écoulement de puissance, ordre harmonique jusqu'à 250^{ème}, modèle de source de tension harmonique, modèle de source de courant harmonique, bibliothèque de sources harmoniques extensible par l'utilisateur, source d'harmoniques définie soit par le spectre, soit par les paramètres du dispositif, calcul de divers indices harmoniques sur la base des normes IEEE, distorsions harmoniques totales (THD) pour les tensions des nœuds et les courants des branches et tracés graphiques des formes d'onde et spectres de tension et de courant pour visualisation et impression [28].

III.2.2 Balayage de fréquence harmonique

Les harmoniques posent un problème particulier, celui de la résonance dans le système électrique. En raison de l'existence de composants inductifs et capacitifs dans le système, à certaines fréquences, des conditions de résonance peuvent se produire à certains nœuds. Si la résonance se produit à un nœud où un courant harmonique est injecté dans le système, une condition de surtension sera observée.

Le balayage de fréquence utilisant le programme ETAP est le meilleur outil pour étudier le problème de résonance du système. Il calcule et trace les amplitudes et les angles de phase de l'impédance du point d'attaque du nœud sur une plage de fréquences spécifiée par l'utilisateur ; ainsi, toute condition de résonance parallèle et sa fréquence de résonance peuvent être clairement identifiées. L'étude du balayage des fréquences harmoniques permet également aux utilisateurs de régler les paramètres de leur filtre harmonique et de tester les résultats finaux. Le balayage de fréquence utilise la séquence positive du système comme impédance de base.

Les résultats de l'étude de balayage de fréquence sont présentés dans des rapports qui comprennent les données d'entrée du système, les résultats de l'écoulement de puissance fondamental et un tableau énumérant les impédances des points d'attaque des nœuds. Les mêmes informations tabulées sont également données sur le schéma unifilaire, ainsi que sous forme de tracé.

Parmi les caractéristiques principales de l'étude ETAP sur le balayage des fréquences harmoniques, on cite à titre d'exemple, affichage graphique en une ligne des résultats de l'étude, mêmes capacités de modélisation du système et des composants pour l'écoulement de puissance harmonique et l'écoulement de puissance fondamental, filtres harmoniques intégrés de différents types, barre coulissante pour afficher la magnitude et l'angle de phase de l'impédance du point d'attaque du nœud, tracés graphiques de l'impédance du point d'attaque du nœud en ohms pour visualisation et impression, rapportant les fréquences et les magnitudes de résonance [28].

III.2.3 Barre d'outils [28]

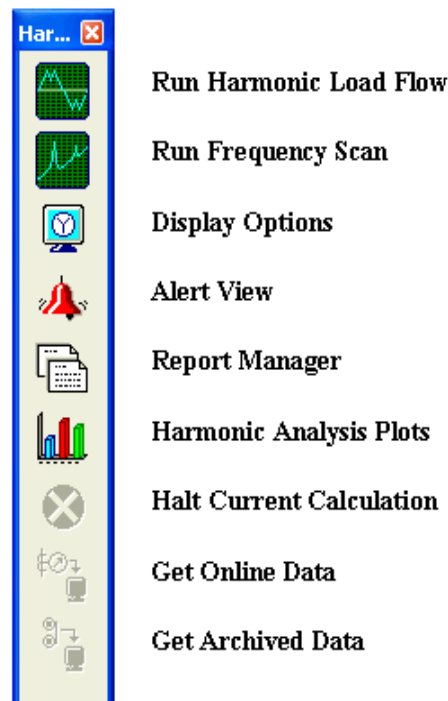


Figure III.1 : Barre d'outils de l'étude harmonique dans ETAP

Exécuter l'écoulement de puissance :

Le bouton "Run Harmonic Load Flow" permet d'exécuter une étude de l'écoulement de puissance harmonique. Le résultat obtenu prend une forme d'un rapport, d'un texte graphique ou peut être visualisé dans le diagramme. Il ouvre

également une autre boîte de dialogue où l'ordre des harmoniques peut être modifié pour afficher le résultat pour différents ordres harmoniques.

Exécuter un balayage de fréquence :

Le bouton "Run - Frequency Scan" permet d'exécuter une étude de fréquence harmonique. Les résultats de l'étude sont affichés sur le diagramme unifilaire et peuvent être visualisés dans les formats texte et graphique du rapport de sortie une fois le calcul du balayage de fréquence harmonique terminé. Le curseur de la fréquence est également disponible pour montrer le résultat dans chaque fréquence harmonique.

Options d'affichage :

Le bouton "Display Options" permet à l'utilisateur de personnaliser le type de résultat à afficher sur le diagramme unifilaire dans le mode d'étude d'analyse harmonique.

Vue d'alerte :

Après avoir effectué une étude de l'écoulement de puissance harmonique ou un balayage de fréquence harmonique, ce bouton permet à l'utilisateur d'ouvrir la vue des alertes, qui liste tous les équipements présentant des violations critiques et marginales en fonction des paramètres du cas d'étude (norme IEEE519 dans ETAP).

Gestionnaire de rapports :

Le bouton "Report Manager" permet à l'utilisateur de sélectionner un format et d'afficher des rapports de sortie optimaux, fournis aux formats Crystal Report Viewer, PDF, MS Word, Rich Text et MS Excel. Un certain nombre de rapports prédéfinis sont disponibles dans les pages Complete, Input, Result et Summary respectivement.

Graphiques d'analyse harmonique :

Le bouton Harmonic Analysis Plots (tracés d'analyse harmonique) permet à l'utilisateur de représenter graphiquement le résultat du fichier de tracé de sortie sélectionné. Le nom du fichier de tracé sera le même que le fichier texte de

sortie affiché dans la liste déroulante rapport de sortie. Les fichiers de tracés pour l'écoulement de puissance harmonique auront l'extension (.hfp) et pour le balayage de fréquence harmonique l'extension (.fsp). Après avoir effectué le calcul du balayage de fréquence harmonique, le module de l'impédance et la courbe d'angle d'impédance peuvent être tracés en utilisant ce bouton.

III.3 Application 1 : Réseau 4 nœuds

Un système à 4 nœuds est modélisé sous la forme d'un diagramme unifilaire pour effectuer une analyse harmonique. La figure 3.2 présente le schéma unifilaire de ce réseau en utilisant le logiciel ETAP. Une charge connectée à la barre de nœud 4 est modélisée comme une source d'harmoniques pour créer une distorsion harmonique dans ce réseau électrique. L'action de cette source harmonique sur le réseau électrique sera étudiée à l'aide de l'analyse harmonique et les techniques d'atténuation seront utilisées pour éliminer toute distorsion harmonique.

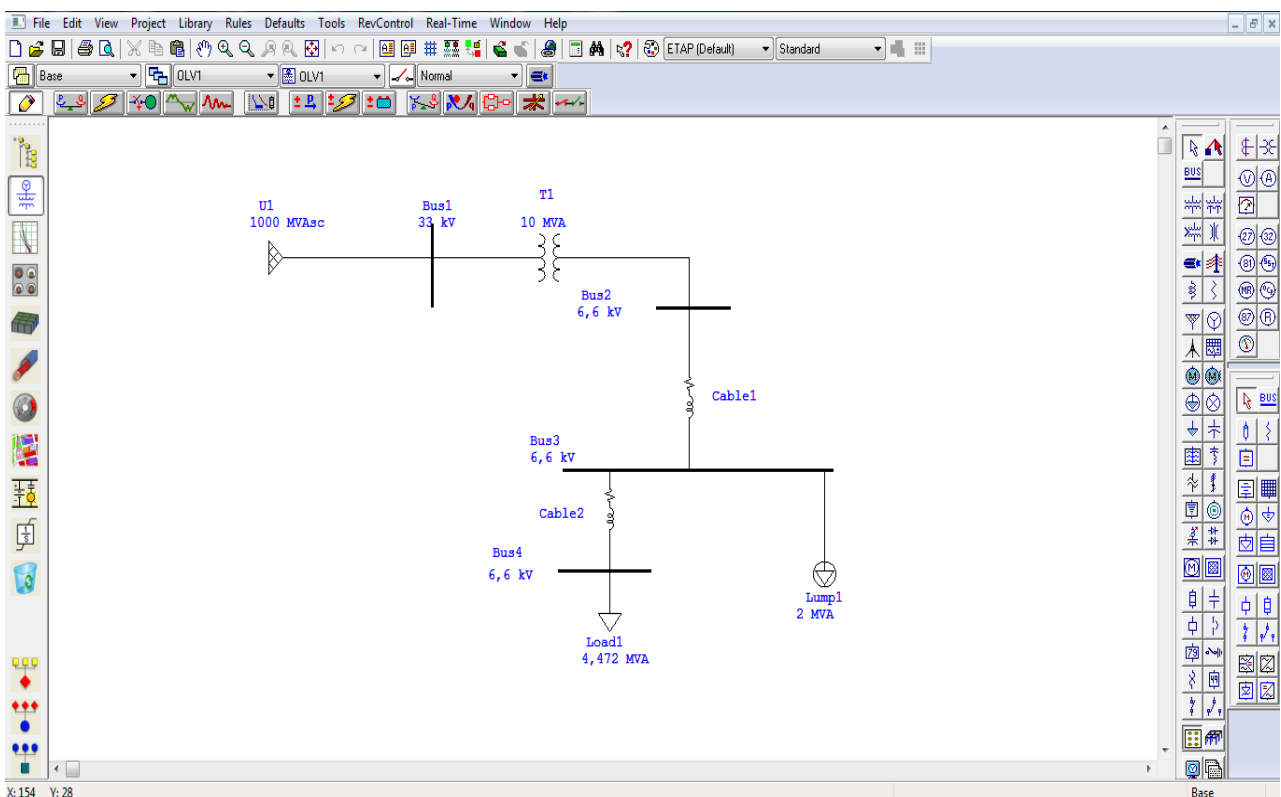


Figure III.2 : Schéma unifilaire du réseau 4 nœuds

III.3.1 Modélisation du réseau

Les données de ce réseau de 4 nœuds trouvé dans la bibliothèque du logiciel ETAP sont résumées dans l'annexe A. Le jeu de barre principal est connecté à la barre 1 de 33 kV (nœud balancier), puis le niveau de tension est abaissé de 33 kV à 6.6 kV à l'aide d'un transformateur de 10 MVA. Les paramètres typiques $Z\%$ et X/R ont été introduits dans la page de l'éditeur de transformateur montrée ci-dessous :

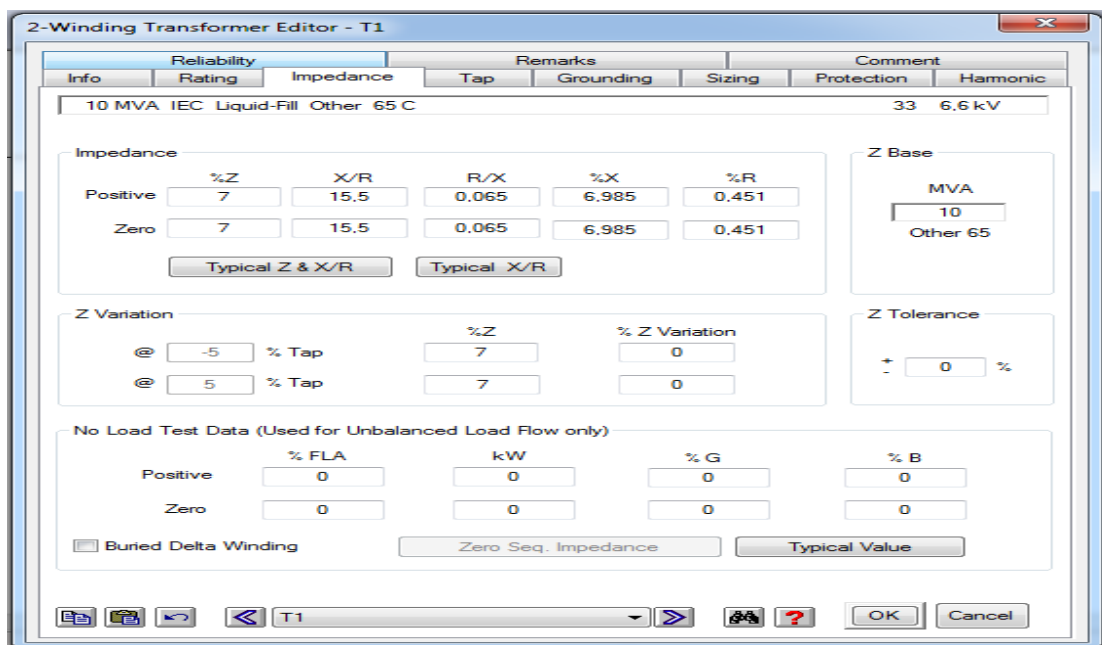


Figure III.3 : Page de l'éditeur du transformateur

L'autre côté du transformateur est connecté au jeu de barres 2 à sa tension nominale de 6.6 kV. Le jeu de barres 2 est relié au jeu de barres 3 par un câble 1. Ce câble est limité à 1 km de longueur avec 2 conducteurs entre phases, les paramètres R , X , L , ... sont montrés dans la page de l'éditeur du câble 1 montré ci-dessous, et le jeu de barres 3 est relié au jeu de barres 4 par un câble 2. Ce dernier est limité à 1 km de longueur avec 1 conducteur entre phases, les paramètres R , X , L , ... sont illustrés aussi dans la page de l'éditeur du câble 2 montré dans la figure III.4.

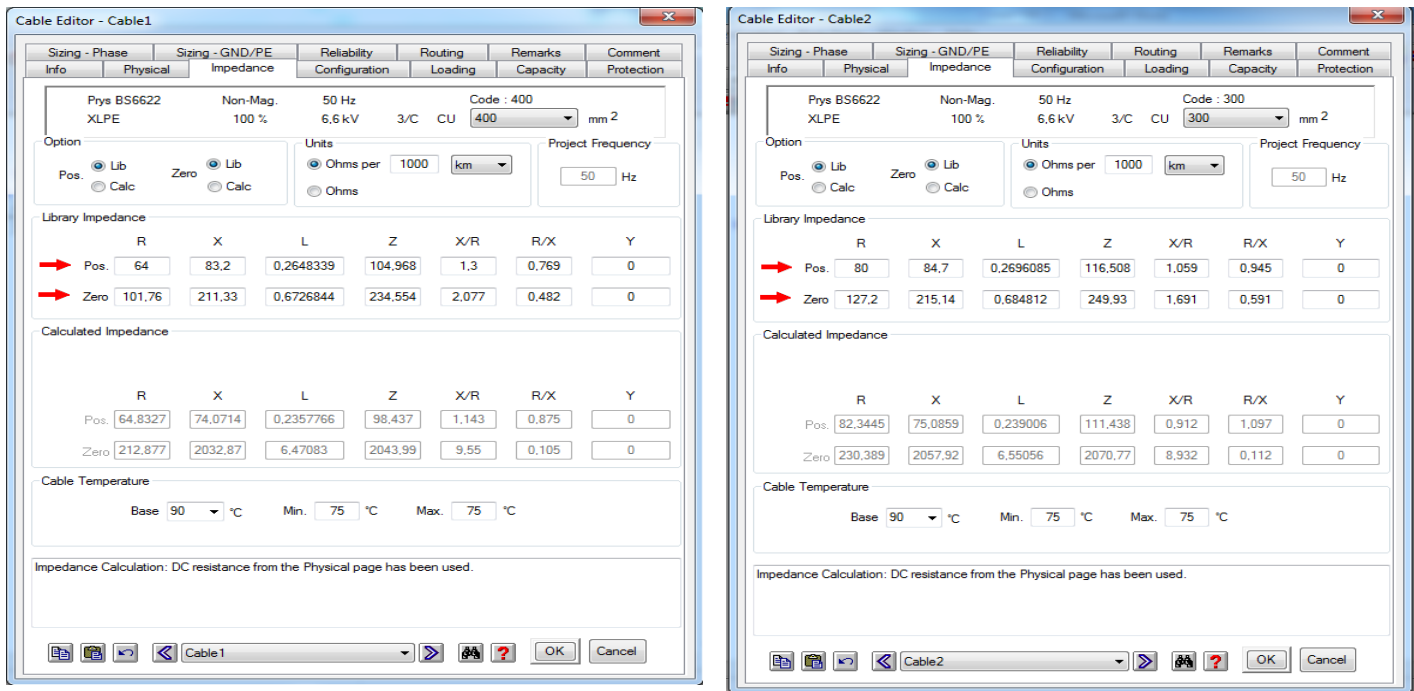


Figure III.4 : Pages de l'éditeur des câbles 1 et 2.

Une charge linéaire est connectée au jeu de barres 3. Une charge modélisée comme une source d'harmoniques est connectée à la barre de nœud 4. Le type de source d'harmonique (source de courant) a été modélisé en cliquant sur la page harmonique de l'éditeur de charge. Le modèle de source d'harmonique 12 pulse1 a été sélectionné dans la bibliothèque d'harmonique. La page d'harmonique de la charge est montrée dans la figure III.5 suivante :

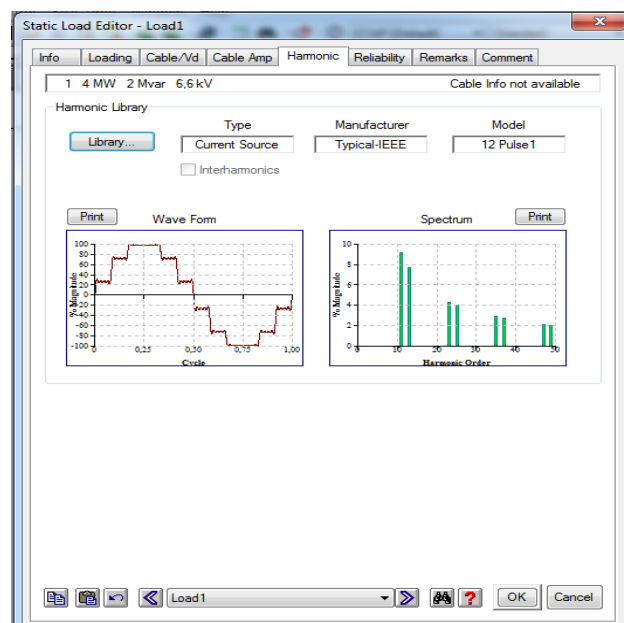


Figure III.5 : Page de source de courant harmonique

III.3.2 Analyse de l'écoulement de puissance

L'écoulement de puissance équilibré doit être réalisé pour obtenir la valeur de la puissance apparente en MVA et le facteur de puissance qui peuvent être utilisés au moment du dimensionnement du filtre. Ici, la méthode Newton Raphson a été utilisée pour effectuer l'analyse de l'écoulement de puissance. Le résultat de l'écoulement de puissance est affiché sur le diagramme de la figure III.6 et est résumé dans le tableau III.1.

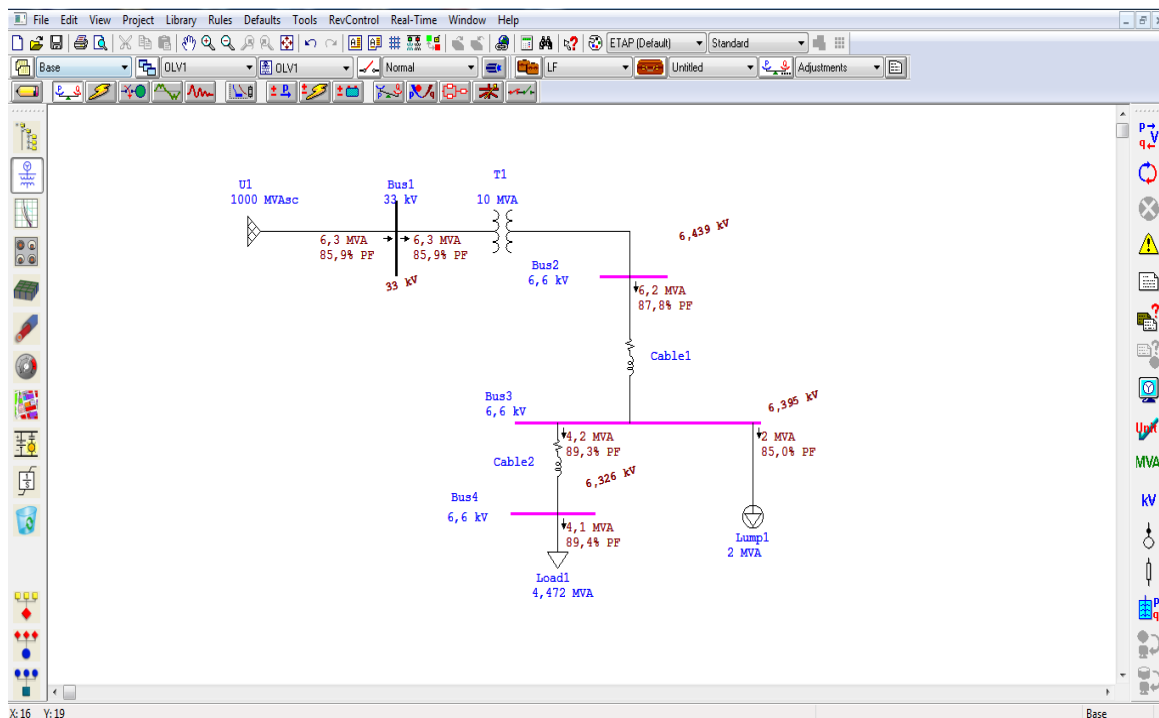


Figure III.6 : Résultat graphique de l'écoulement de puissance (réseau 4 nœuds)

Tableau III.1 : Résultat de l'écoulement de puissance (réseau 4 nœuds)

Nœud	Nominal kV	Tension kV	MW	Mvar	MVA	PF%
Nœud 1	33	33	5.431	3.231	6.3	85.9
Nœud 2	6.6	6.439	5.414	2.952	6.2	87.8
Nœud 3	6.6	6.395	5.386	2.914	6.2	87.15
Nœud 4	6.6	6.326	3.674	1.837	4.1	89.4

III.3.3 Analyse harmonique

Le module d'analyse harmonique d'ETAP fournit un excellent outil pour modéliser précisément divers composants du système électrique afin d'intégrer leurs qualités en présence de sources harmoniques. Il est entièrement conforme aux normes IEEE 519, ANSI/IEEE 399, IEEE 141, IEEE 519-2014, IEC 61000-3-14 et IEC 61000 3-6. La source des problèmes d'harmoniques peut être détectée et les schémas d'atténuation peuvent être testés et finalement vérifiés en utilisant deux méthodes analytiques, à savoir la méthode de l'écoulement de puissance harmonique et la méthode de balayage de fréquence harmonique.

II.3.3.1 Ecoulement de Puissance harmonique

Pour vérifier la distorsion harmonique ou l'effet de la source harmonique sur le réseau électrique, il faut effectuer l'écoulement de puissance harmonique. Dans ce réseau, la charge non linéaire qui peut être modélisée comme une source de courant si elles injectent des courants harmoniques dans le réseau. Les résultats sont directement présentés sur le tableau et les diagrammes ci-dessous.

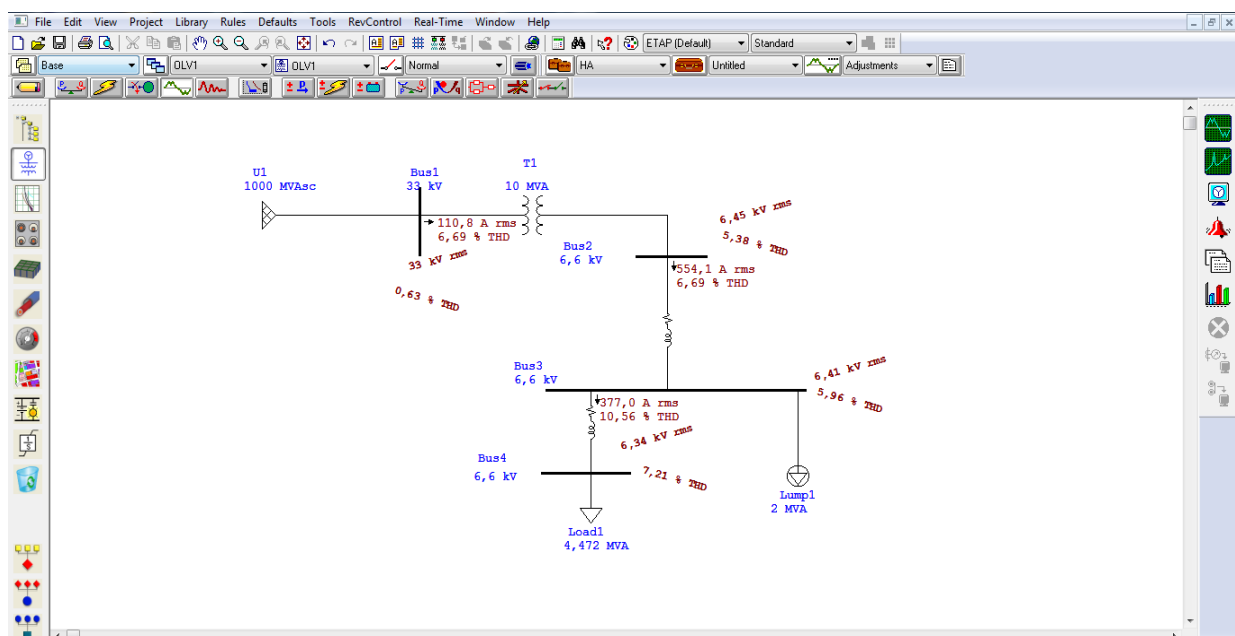


Figure III.7 : Résultat graphique de l'écoulement de puissance harmonique (réseau 4 nœuds)

En effectuant l'étude l'écoulement de puissance harmonique, on peut voir qu'il y a quelques fréquences harmoniques avec une plus grande magnitude dépassant la limite THD et IHD.

Dans le tableau III.2, on peut voir que les harmoniques de 11^{ème} et 13^{ème} ordre apparaissent au nœud 4 et l'ordre 11^{ème} au nœud 3. Les ordres harmoniques donnés dans le tableau III.2 dépassent les limites prédéfinies de THD et IHD.

Tableau III.2 Distorsion harmonique totale en tension (IHD et THD)

Nœuds	IHD (%)	Ordre Harmonique	THD (%)
Nœud2	0	Total	5.38
Nœud3	3.12	11	5.96
Nœud4	3.80 3.58	11 13	7.21

La figure III.8 montre les formes d'onde de tension des quatre nœuds après l'analyse l'écoulement de puissance harmonique. On peut voir que la forme d'onde au nœud 4 (6.6 kV) est la plus déformée en raison de la source de courant harmonique qui est connectée en ce nœud (voir figure III.9). Le spectre des harmoniques de tension est illustré dans la figure III.10.

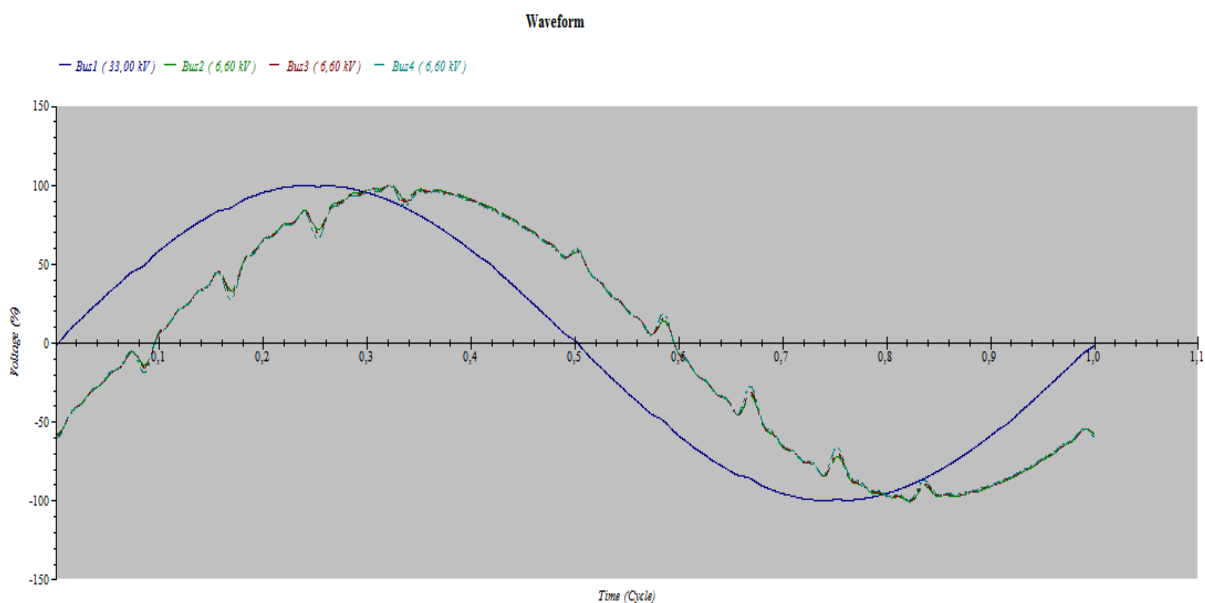


Figure III.8 : Forme d'onde de tension (réseau 4 nœuds)

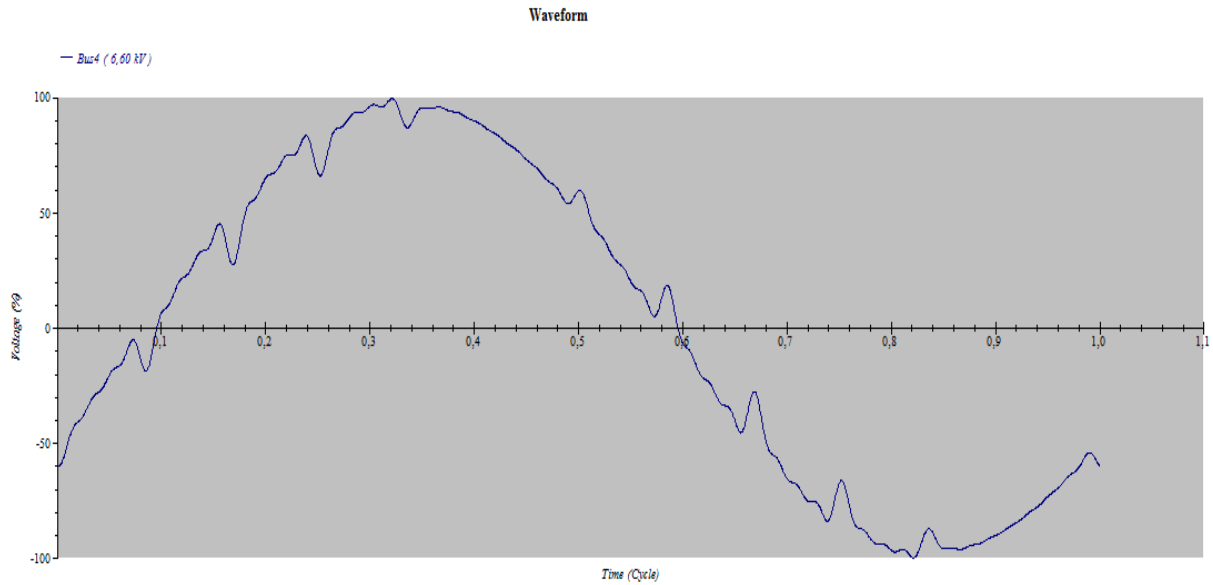


Figure III.9 : Forme d'onde de tension au nœud 4 (réseau 4 nœuds)

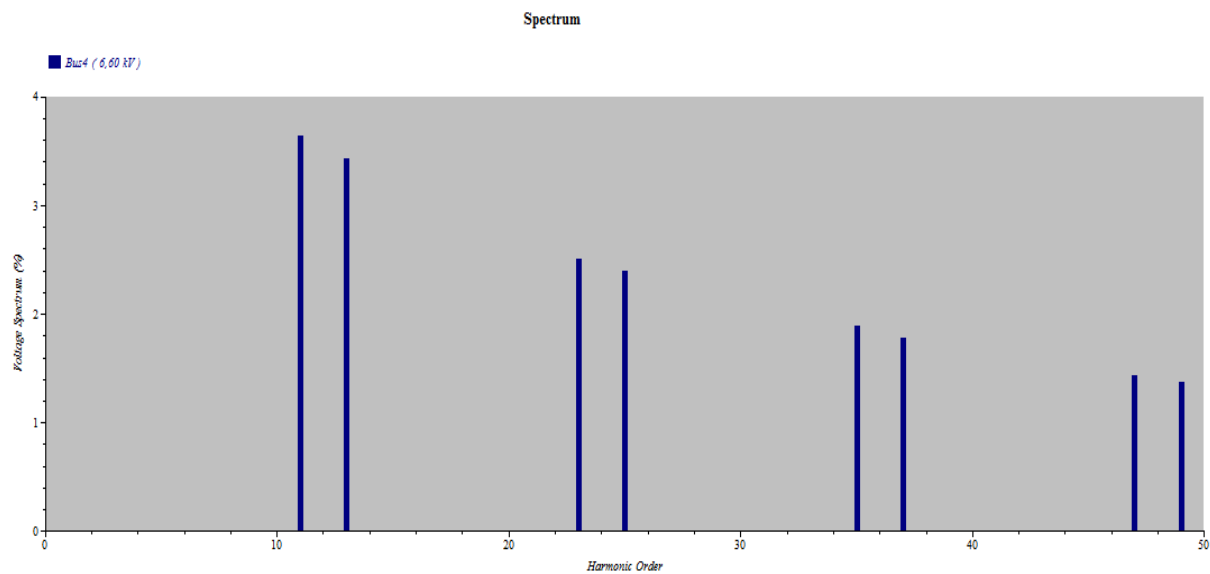


Figure III.10 : Spectre de tension (réseau 4 nœuds)

III.3.3.2 Balayage de fréquence harmonique

Lors de l'étude par balayage de fréquence, l'angle d'impédance peut être vu sur le diagramme unifilaire du réseau électrique. Ici, la fréquence choisie pour le réseau électrique est de 50 Hz. Pour des résultats concluants, nous avons ajouté un condensateur shunt au jeu de barres 3 ayant une capacité de 2.1 Mvar (voir figure III.11).

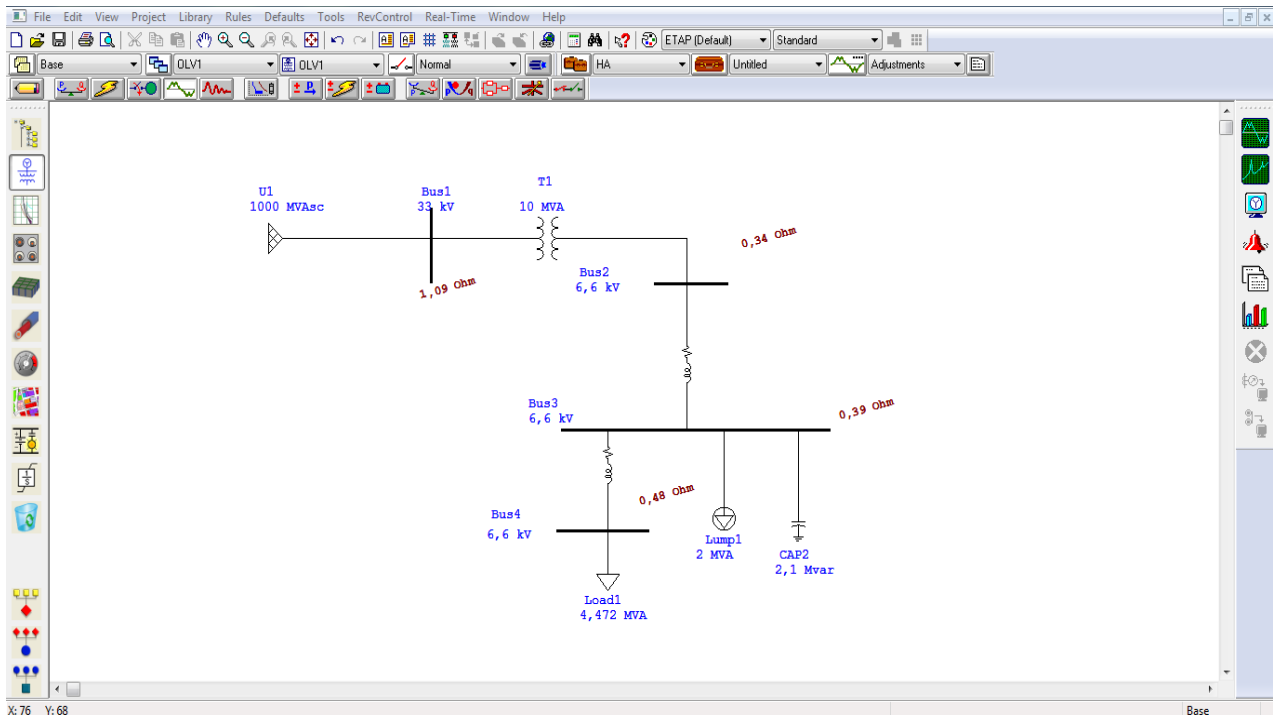


Figure III.11 : Résultat graphique du balayage de fréquence harmonique (réseau 4 nœuds)

A partir de la fenêtre d'alerte (tableau III.3), on peut voir que la résonance parallèle se produit au 7^{ème} harmonique correspondant à la fréquence de 350 Hz. La présence d'un condensateur est à l'origine du problème de **résonance parallèle**.

Tableau III.3 : Fenêtre d'alarme du balayage de fréquence harmonique

Nœuds	Z mag (ohm)	Harmonique	Fréquence (Hz)
Nœud 2	4.92	7	350
Nœud 3	5.94	7	350
Nœud 4	6.01	7	350

La résonance parallèle est le point où les réactances capacitive et inductive d'un réseau électrique deviennent égales. Elle se produit généralement en présence de condensateurs. Dans ETAP, après avoir exécuté l'étude balayage fréquence harmonique, ce point de résonance parallèle peut être identifié. Le résultat de cette résonance harmonique est qu'elle va générer des courants et des tensions circulants à la fréquence de résonance et causer des problèmes de qualité d'énergie.

Cette fréquence de résonance parallèle ne posera problème que si une source d'harmoniques est présente à cette fréquence où les impédances se correspondent. Sur notre page d'alerte de l'écoulement de puissance harmonique, on peut voir qu'il n'y a pas de source d'harmoniques dépassant la limite en 7ème ordre. Donc cette résonance parallèle ne créera aucun problème pour ce réseau électrique. Si la résonance parallèle crée un problème, cela peut être résolu en réglant le filtre pour cet ordre harmonique particulier.

Les figures III.12, III.13 et III.14 représentent respectivement les courbes des angles d'impédance et de module d'impédance, obtenues à partir du balayage de la fréquence harmonique.

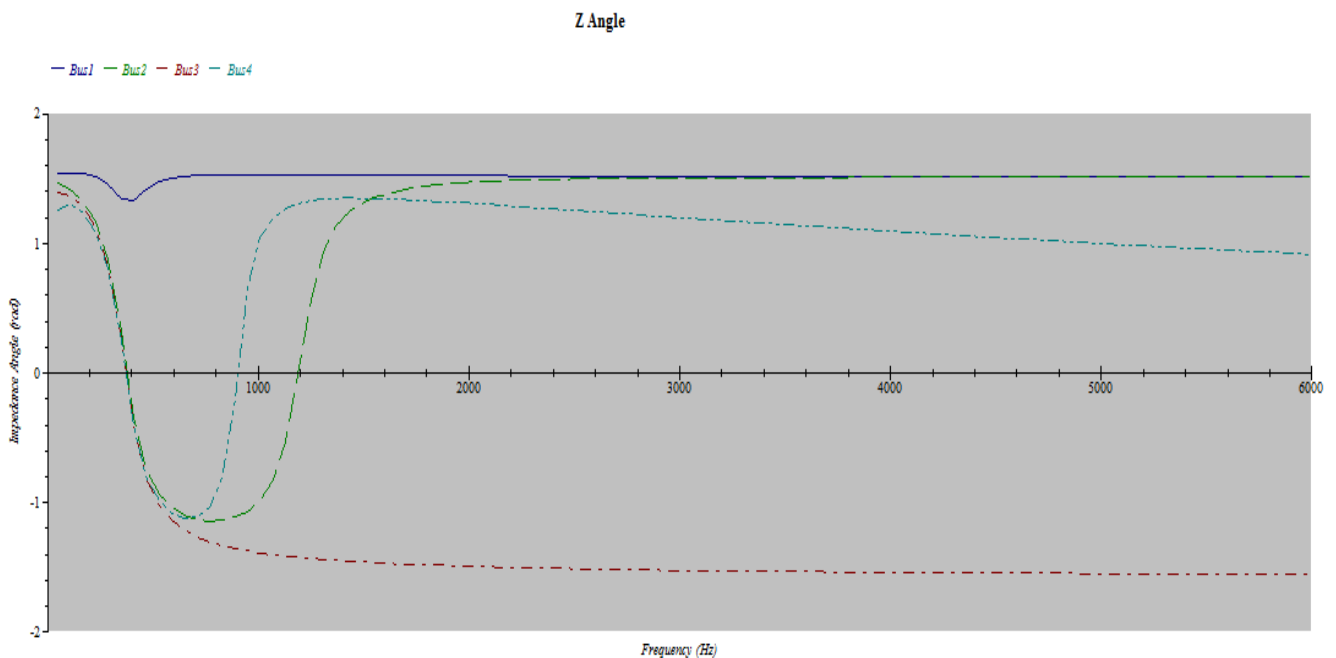


Figure III.12 : Angle d'impédance après le balayage de la fréquence harmonique (réseau 4)

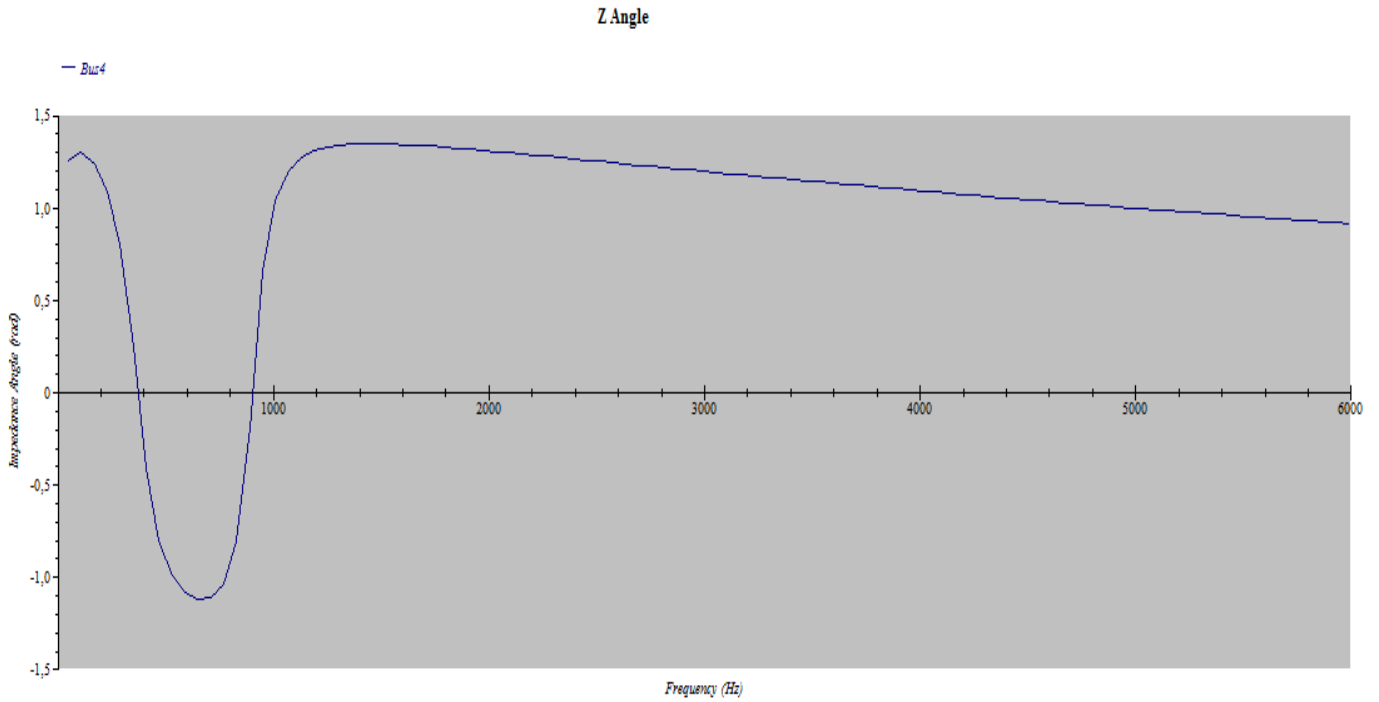


Figure III.13 : Angle d'impédance au nœud 4 après le balayage de la fréquence harmonique (réseau 4)

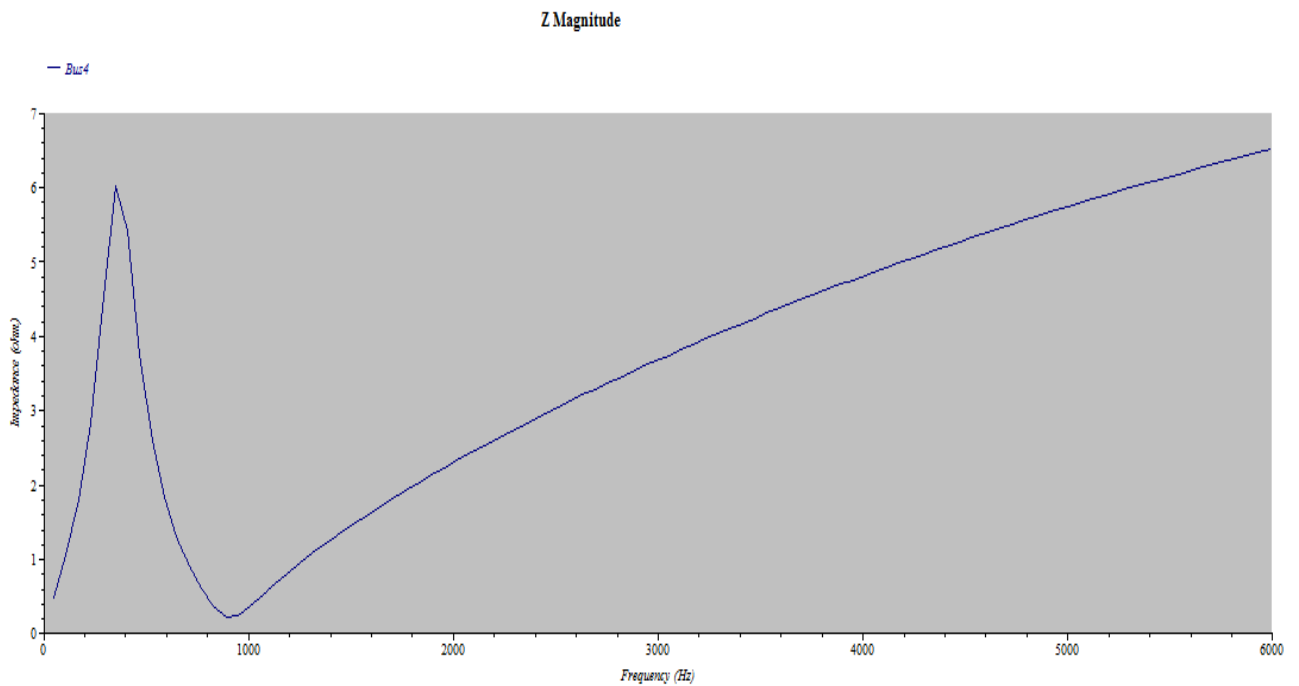


Figure III.14 : Module d'impédance au nœud 4 après le balayage de la fréquence harmonique (réseau 4)

III.3.4 Élimination des harmoniques à l'aide d'un filtre

Un filtre à réglage unique est choisi pour éliminer la distorsion harmonique pour ce réseau électrique. Dans le logiciel ETAP, ce filtre est conçu pour fournir une puissance réactive suffisante au réseau et minimiser les pertes à la fréquence fondamentale. Ce filtre peut calculer automatiquement la valeur de son paramètre en fonction de la modélisation du filtre en utilisant l'option 'Harmonic Filter Sizing'.

Comme il a été décrit dans l'analyse de l'écoulement de puissance harmonique, pour ce réseau électrique, les 11^{ème} et 13^{ème} harmoniques ordres contribuent à la distorsion harmonique dans chaque nœud. Ainsi, si les harmoniques de ces deux ordres peuvent être éliminées, la plupart des distorsions harmoniques de ce réseau électrique peuvent être réduites. Dans cette étude, deux filtres à réglage unique seront conçus pour ces deux ordres harmoniques afin d'éliminer la distorsion harmonique.

L'utilisateur doit cliquer sur la page des paramètres de l'éditeur de filtre harmonique, puis sur l'onglet "Size Filter". En fonction des besoins, l'utilisateur doit introduire les données pour dimensionner un filtre optimal. Si l'utilisateur souhaite concevoir un filtre sur la base de la correction existante du facteur de puissance du système, il peut trouver le facteur de puissance existant et les valeurs MVA en effectuant une analyse de l'écoulement de puissance. Après avoir effectué l'analyse de l'écoulement de puissance pour le réseau électrique à 4 nœuds, le résultat est donnée dans le tableau III.1.

A partir de cette analyse de l'écoulement de puissance, on peut constater que le facteur de puissance existant est de 89.4% et la valeur MVA de 4.1. Ces valeurs doivent être introduites dans l'option de correction du FP et le facteur de puissance désiré de 95% doit être introduit dans l'option 'FP désiré'. Après avoir entré toutes les valeurs requises, l'éditeur de filtre harmonique et la fenêtre de

dimensionnement du filtre harmonique correspondent aux figures III.15 et III.16.

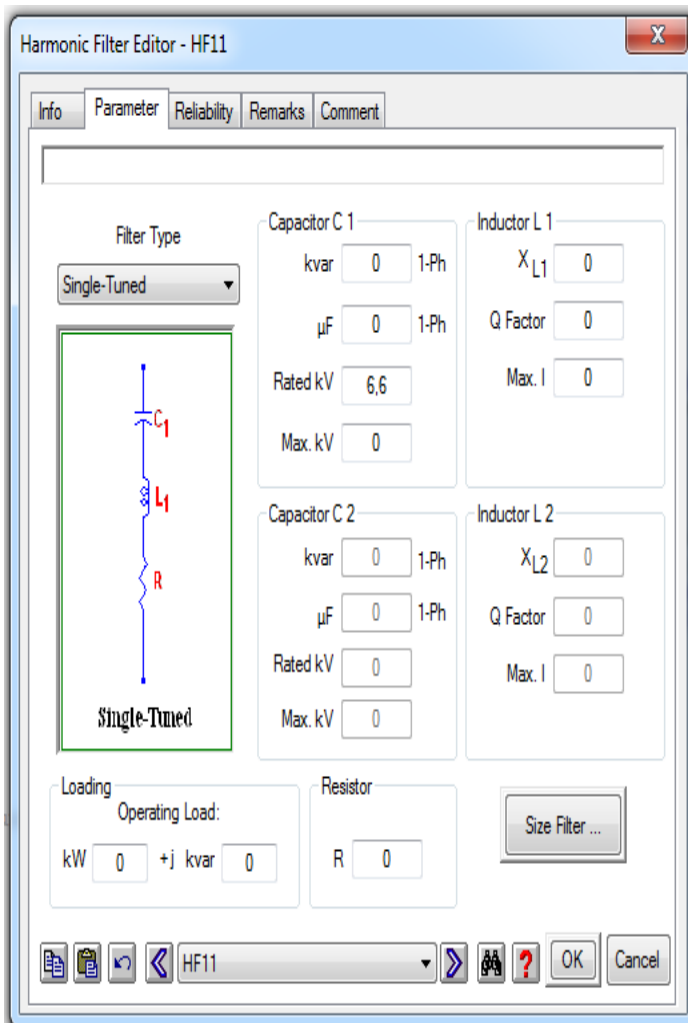


Figure III.15 : Page de paramètres de l'éditeur d'harmoniques

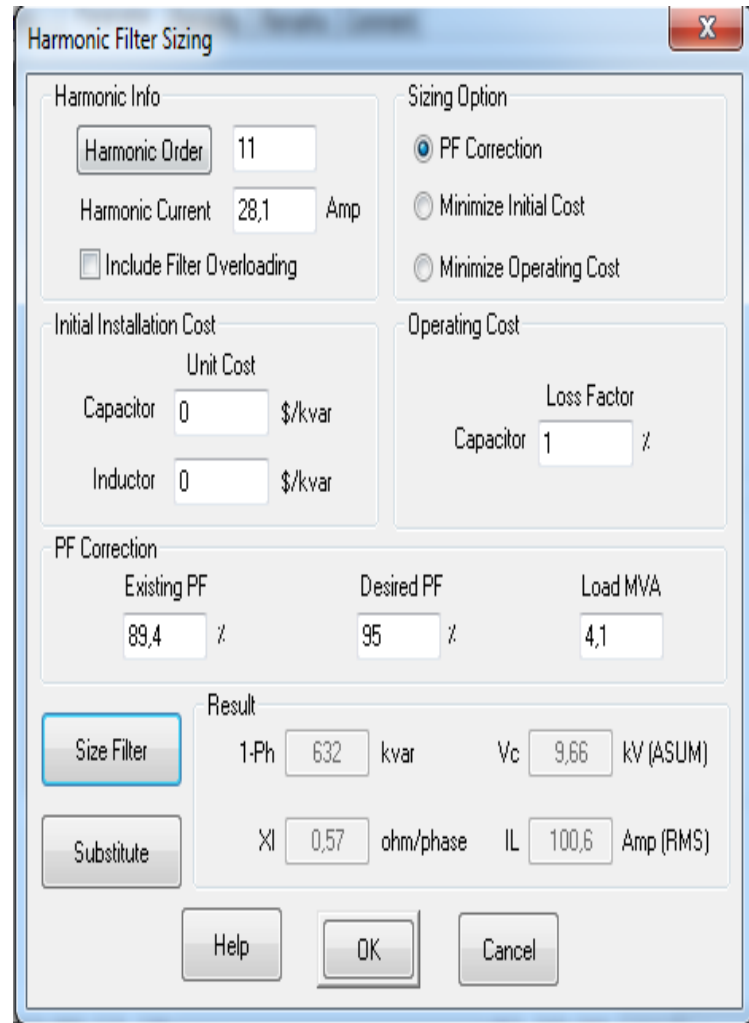


Figure III.16 : Dimensionnement d'un filtre harmonique "Size Filter".

Pour le 11ème ordre harmonique, le courant harmonique est de 28,1 A, ce qui peut être trouvé sur l'affichage d'une ligne après avoir effectué l'étude de l'écoulement de puissance harmonique. Le résultat de l'étude l'écoulement de puissance harmonique est donné à la figure III.17

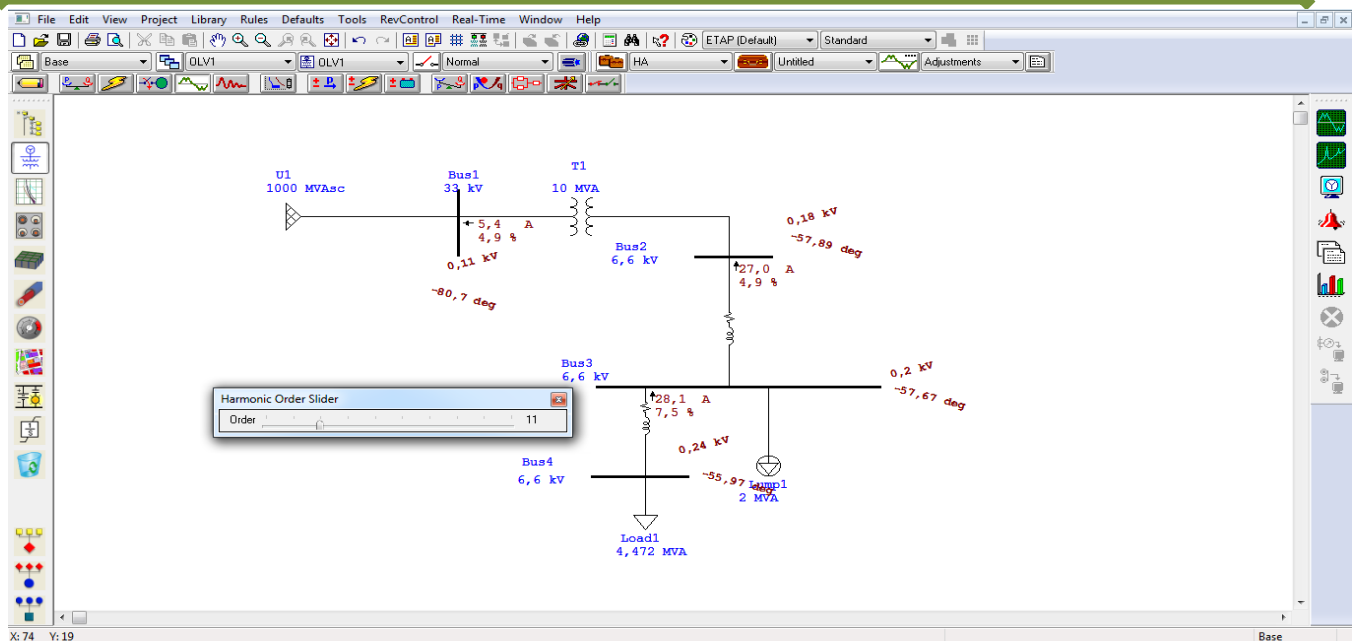


Figure III.17: Résultat graphique de l'écoulement de puissance harmonique pour le 11ème ordre du réseau 4 nœuds

III.3.4.1 Analyse harmonique après injection d'un filtre de 11^{ème} ordre

Après avoir injecté un filtre de 11^{ème} ordre, les résultats de l'écoulement de puissance harmonique du réseau 4 nœuds sont présentés sur le schéma unifilaire de la figure III.18.

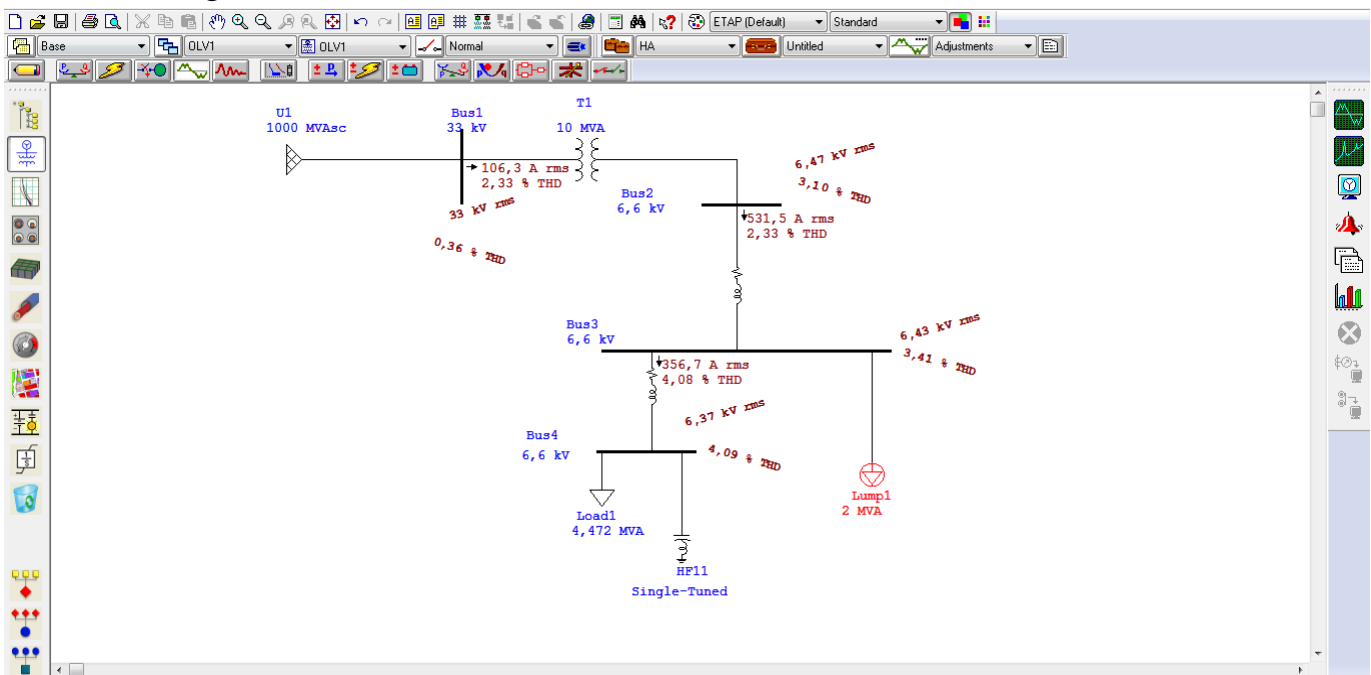


Figure III.18: Résultat graphique de l'écoulement de puissance harmonique du réseau 4 nœuds après injection d'un filtre de 11^{ème} ordre

En comparant avec le résultat de l'analyse l'écoulement de puissance harmonique sans filtre de la figure III.9, on peut voir que le pourcentage de THD a diminué. La nouvelle forme d'onde de tension pour la barre du nœud 4 est donnée dans la figure III.19 montrée ci-dessous.

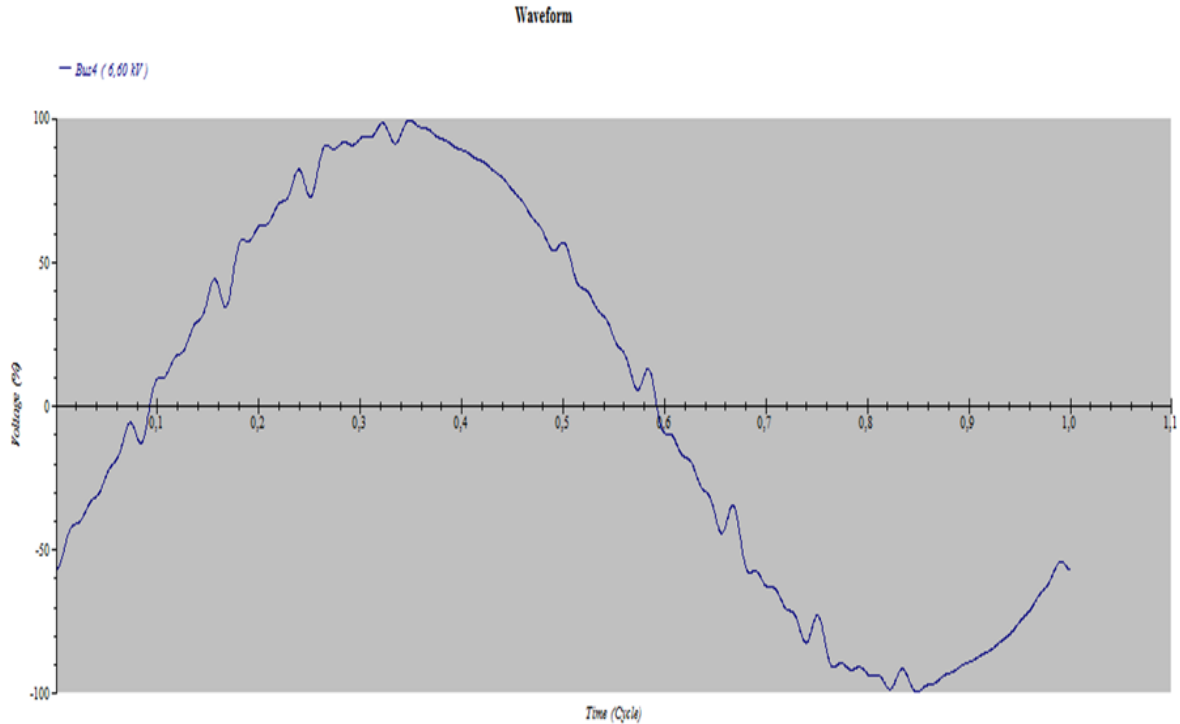
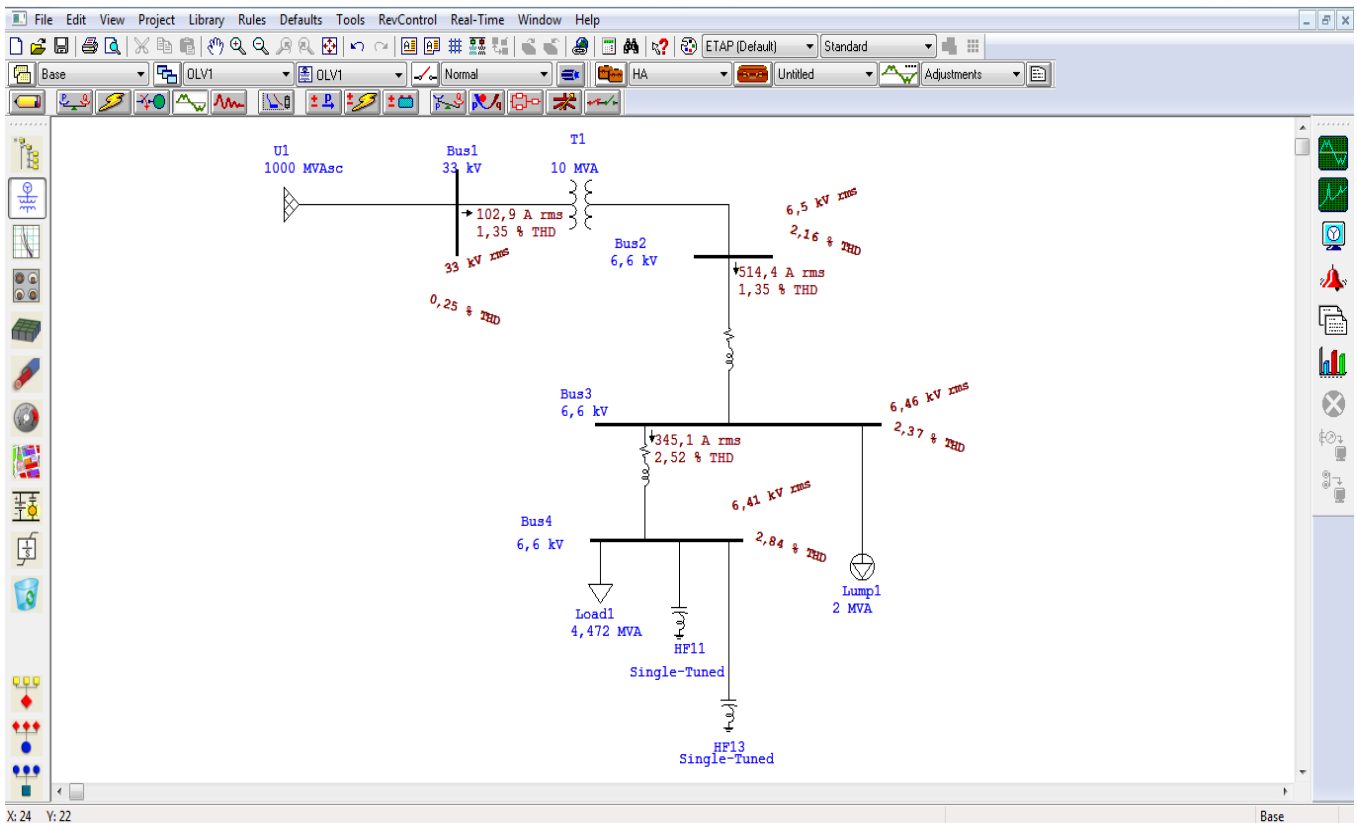


Figure III.19 : Forme d'onde de tension après injection d'un filtre de 11^{ème} ordre (nœud 4)

On peut voir que la forme d'onde de tension après injection du filtre de 11^{ème} ordre est approximativement une onde sinusoïdale pure et que tous les indices harmoniques sont dans les limites (norme IEEE 519). Ainsi, les problèmes d'harmoniques et de facteur de puissance ont été résolus et la qualité globale du système a été améliorée.

III.3.4.2 Analyse harmonique après injection les filtres (11^{ème} et 13^{ème} ordre)

Les résultats l'écoulement de puissance harmonique après injection les filtres (11^{ème} et 13^{ème} ordre) sont présentés sur le schéma unifilaire de la figure



III.21.

Figure III.20: Résultat graphique de l'écoulement de puissance harmonique après injection les filtres (11^{ème} et 13^{ème} ordre)

En comparant avec le résultat de l'analyse l'écoulement de puissance harmonique après injection filtre 11^{ème} à la figure III.19, on peut voir que le pourcentage de THD a diminué. La forme d'onde de tension pour la barre de nœud 4 est donnée dans la figure III.21 ci-dessous.

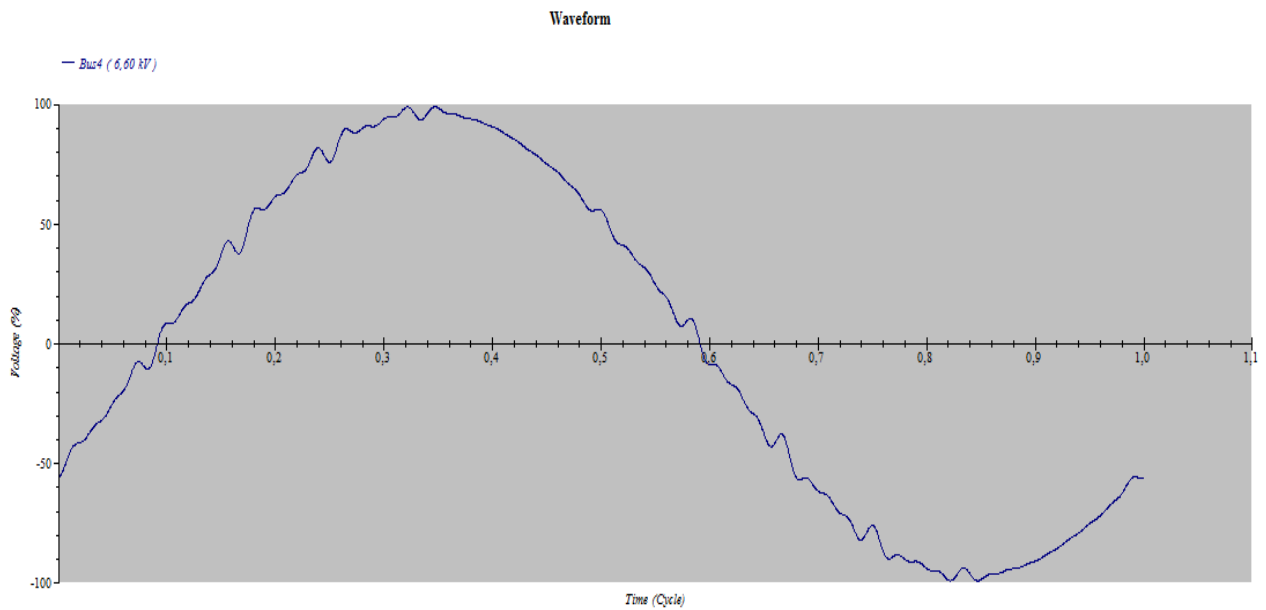


Figure III.21 : Forme d'onde de tension après injection des filtres (11^{ème} et 13^{ème} ordre) nœud 4

La forme d'onde après injection d'un filtre de 13^{ème} ordre a été améliorée par rapport à la forme d'onde après injection d'un filtre de 11^{ème} ordre.

Le résultat du balayage de fréquence après injection d'un filtre de 11^{ème} ordre est présenté sur le schéma unifilaire de la figure III.22.

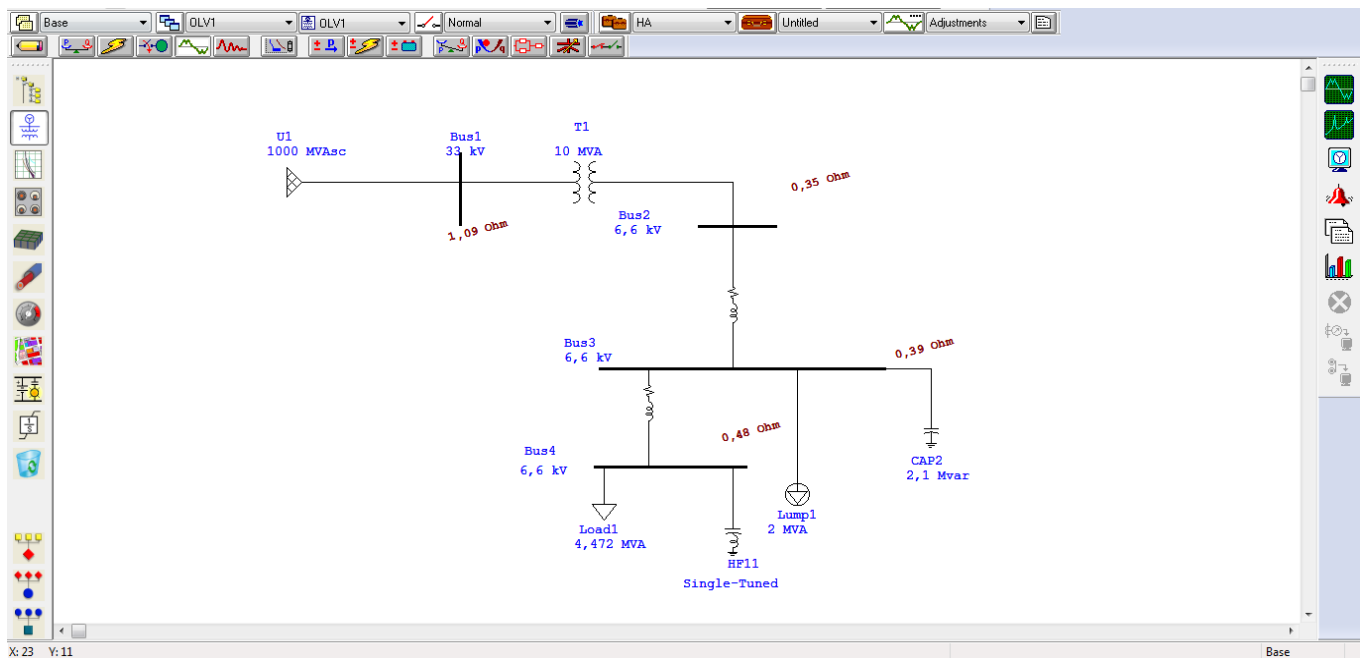


Figure III.22: Résultat graphique de l'écoulement de puissance harmonique après injection d'un filtre de 11^{ème} ordre

Les figures III.23 et III.24 représentent respectivement l'angle et le module d'impédance après et avant injection des filtres au nœud 4 en appliquant le balayage de fréquence.

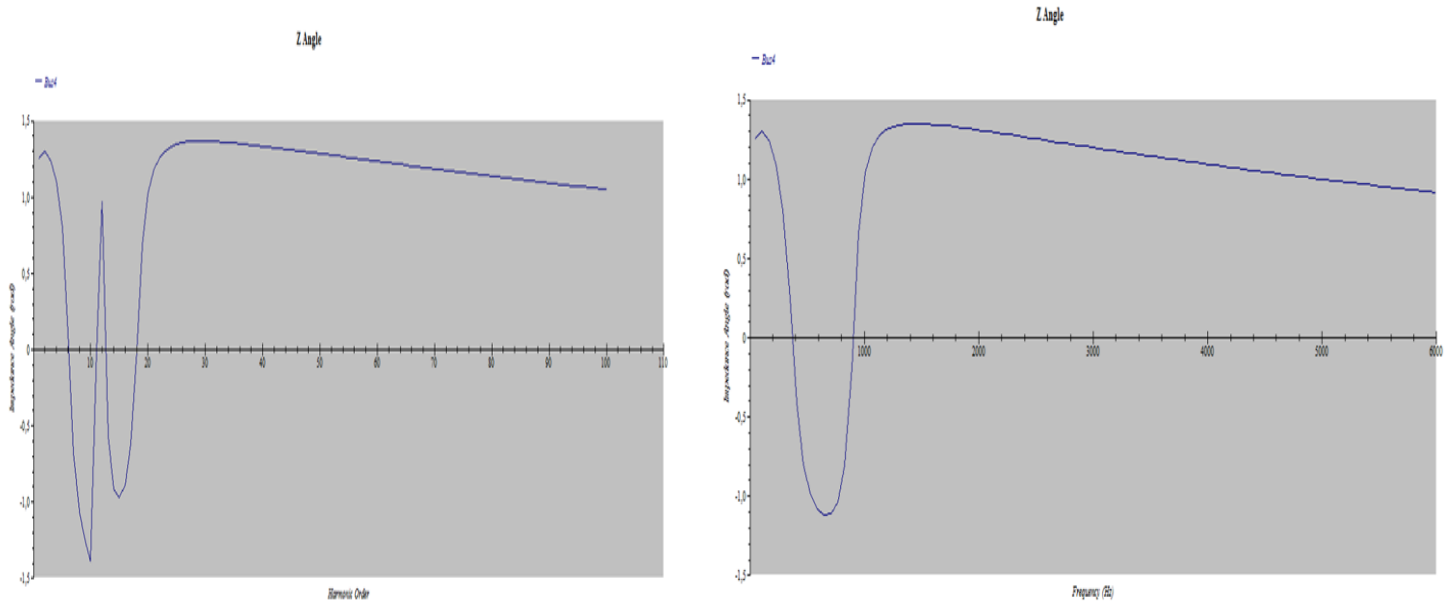


Figure III.23 : Angle d'impédance après et avant injection des filtres (nœud 4)

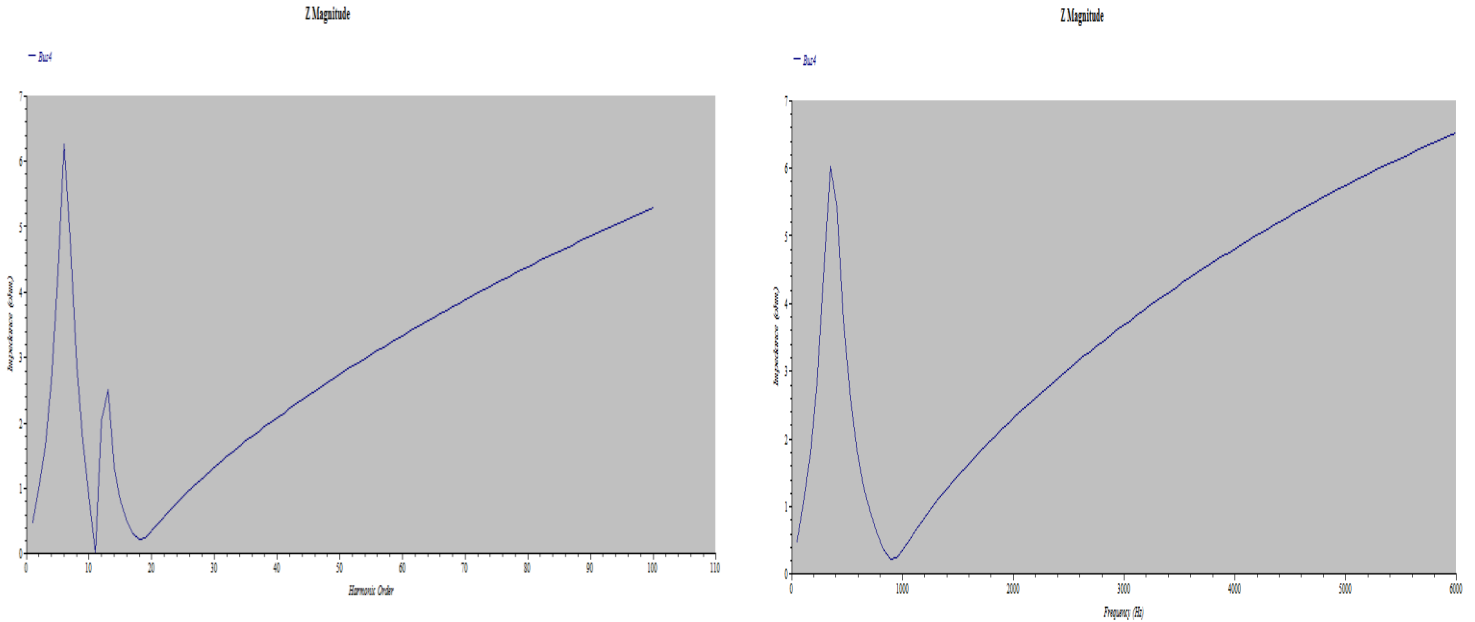


Figure III.24 : Module d'impédance après et avant injection des filtres (nœud 4)

En effectuant un balayage des fréquences harmoniques, on peut voir d'après le tableau III.4 qu'il y a trois fréquences de résonance dues à la présence du filtre harmonique. Les fréquences de résonance se produisent à l'harmonique

de 6^{ème}, 12^{ème} et 13^{ème} ordres. Ces ordres ne correspondent pas à la fréquence caractéristique du convertisseur à 12 pulse, sauf le 13^{ème} ordre.

Tableau III.4 : Fenêtre d'alarme du balayage de fréquence harmonique après injection du filtre du 11^{ème} ordre

Nœuds	Z mag (ohm)	Harmonique	Fréquence (Hz)
Nœud 1	6.57	6	300
	13.21	12	600
Nœud 2	4.57	6	300
	4.88	12	600
Nœud 3	5.56	6	300
	6.28	13	650
Nœud 4	6.26	6	300
	2.5	13	650

III.4 Application 2 : Réseau IEEE 14 nœuds

La deuxième application a concerné le réseau standard IEEE 14 nœuds. De même, on a utilisé le logiciel ETAP pour effectuer une analyse d'harmoniques de ce réseau électrique. La figure III.25 présente le schéma unifilaire du système IEEE14 nœuds en utilisant ETAP. Ce réseau comporte un total de 14 nœuds, 5 jeux de barre principaux (Power Grid) dont le jeu de barre principal 1 est pris comme nœud balancier, 12 charges connectées dont 1 charge non linéaire est les autres charges linéaires, 20 lignes et 3 transformateurs. Les trois transformateurs sont situés entre les nœuds 4 et 7, les nœuds 4 et 9, et les nœuds 5 et 6 (voir annexe B).

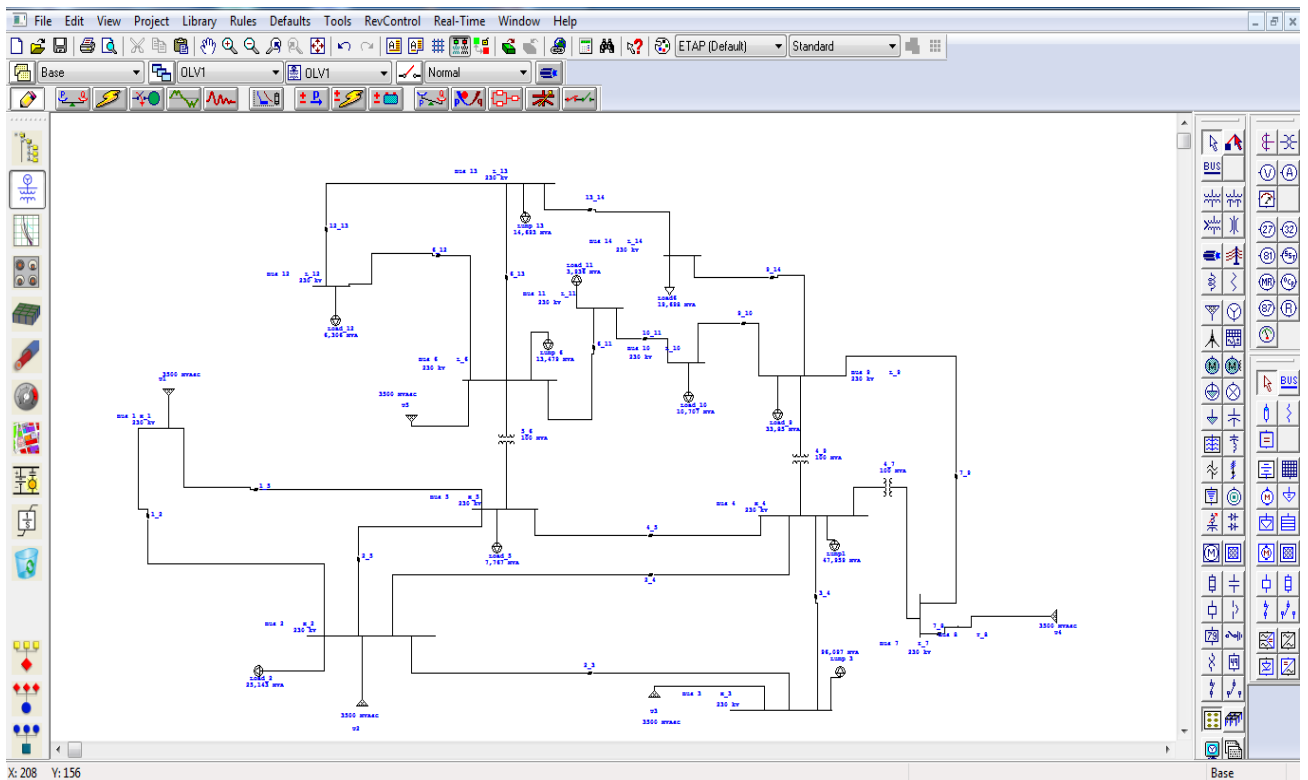


Figure III.25 : Schéma unifilaire du système IEEE 14 nœuds dans ETAP

III.4.1 Analyse l'écoulement de puissance

Les résultats de l'exécution de l'écoulement de puissance de l'ETAP sur le réseau IEEE 14 nœuds sont résumés dans le tableau III.5. Dans ce tableau, on trouve la tension, les puissances active, réactive et apparente en différents nœuds dans des conditions de fonctionnement normal.

Tableau III.5 : Résultat de l'écoulement de puissance (réseau 14 nœuds)

Nœuds	Nominal kV	Tension kV	MW	Mvar	MVA
Nœud 1	230	230	9.128	5.046	10.429
Nœud 2	230	230	50.83	25.361	56.806
Nœud 3	230	230	111.754	25.093	114.536
Nœud 4	230	224.723	54.499	19.225	57.790
Nœud 5	230	225.047	28.002	22.419	35.871
Nœud 6	230	230	69.341	24.041	73.390
Nœud 7	230	226.022	19.583	17.048	25.964
Nœud 8	230	230	17.286	10.087	20.014
Nœud 9	230	221.69	29.081	23.91	37.649
Nœud 10	230	221.69	12.441	5.718	13.692
Nœud 11	230	224.753	16.048	3.332	16.390
Nœud 12	230	228.315	6.082	1.595	6.288
Nœud 13	230	230	31.929	11.208	33.840
Nœud 14	230	220.058	14.841	7.322	16.549

III.4.2 Écoulement de puissance harmonique

Pour vérifier la distorsion harmonique ou l'effet de la source harmonique (courant et tension) sur le réseau électrique, il faut effectuer l'écoulement de puissance harmonique.

III.4.2.1 Source de courant harmonique

La charge non linéaire choisie dans notre cas est modélisée comme une source de courant harmonique (6 pulse+2). Elle est connectée au nœud 14.

Dans le tableau III.6, on peut voir que les harmoniques de 5^{ème}, 7^{ème} et 11^{ème} ordres apparaissent au nœud 14. Les ordres harmoniques donnés dans ce tableau dépassent les limites prédéfinies de THD et IHD qui sont respectivement égaux à 1.5% et 1% pour ce niveau de tension 230 kV.

Tableau III.6 : Résultats de la distorsion harmonique (source de courant)

Nœuds	IHD (%)	Ordre harmonique	THD (%)
Nœud 9	0	total	1.82
Nœud 10	0	total	1.82
Nœud 14	3.16	5	6.19
	3.01	7	
	2.54	11	
	2.30	13	
	1.70	17	
	1.36	19	

La forme d'onde de tension ainsi que le spectre de tension au nœud 14 après l'analyse l'écoulement de puissance harmonique sont présentés respectivement sur les figures III.26 et III.27. On peut constater la grande déformation de la forme d'onde au nœud 14 en raison de la source de courant harmonique installée en ce nœud.

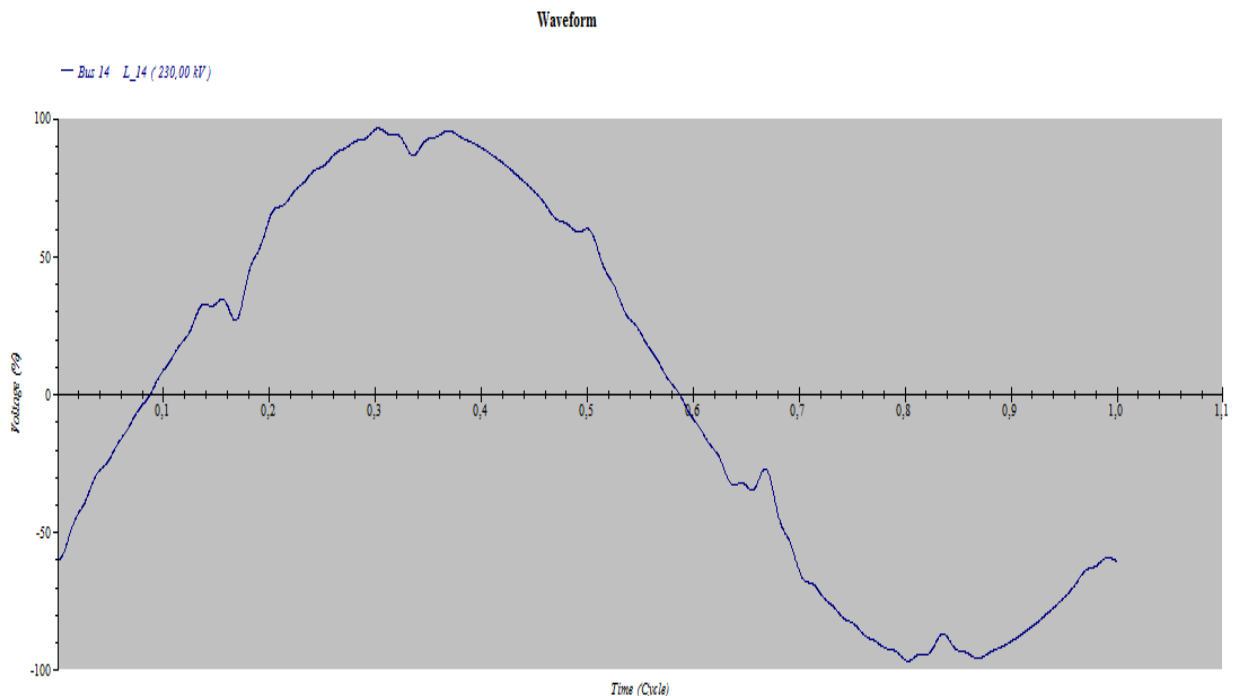


Figure III.26 : Forme d'onde de tension au nœud 14 (cas de source harmonique de courant)

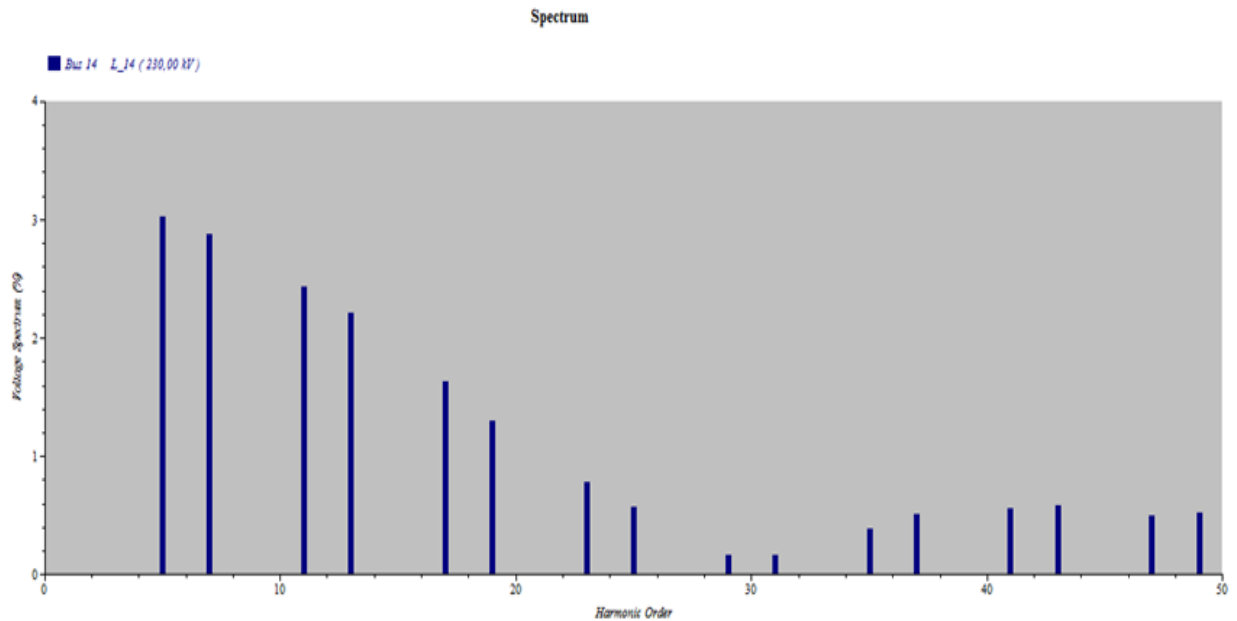


Figure III.27 : Spectre de tension au nœud 14 (cas de source harmonique de courant)

III.4.2.2 Source de tension harmonique

Dans ce cas, la charge non linéaire au nœud 14 est modélisée comme une source de tension harmonique qui est le modèle d’un four à arc.

Dans le tableau III.6, on donne la distorsion harmonique due à cette source d’harmonique de type tension installée au nœud 14. On peut constater que dans ce cas ce sont les harmoniques de 5^{ème} et 7^{ème} ordre qui contribuent le plus c’est-à-dire ce sont celles données dans la fenêtre d’alerte dépassant les limites prédéfinies de THD et IHD.

Tableau III.6 : Résultats de la distorsion harmonique (source de tension)

Nœuds	IHD	Ordre harmonique	THD
Nœud 14	1.54	5	2.06
	1.26	7	

La forme d’onde de tension ainsi que le spectre de tension au nœud 14 après l’analyse l’écoulement de puissance harmonique sont présentés respectivement sur les figures III.28 et III.29. On peut de même que

précédemment constater la déformation de la forme d'onde au nœud 14 en raison de la source de tension harmonique installée en ce nœud.

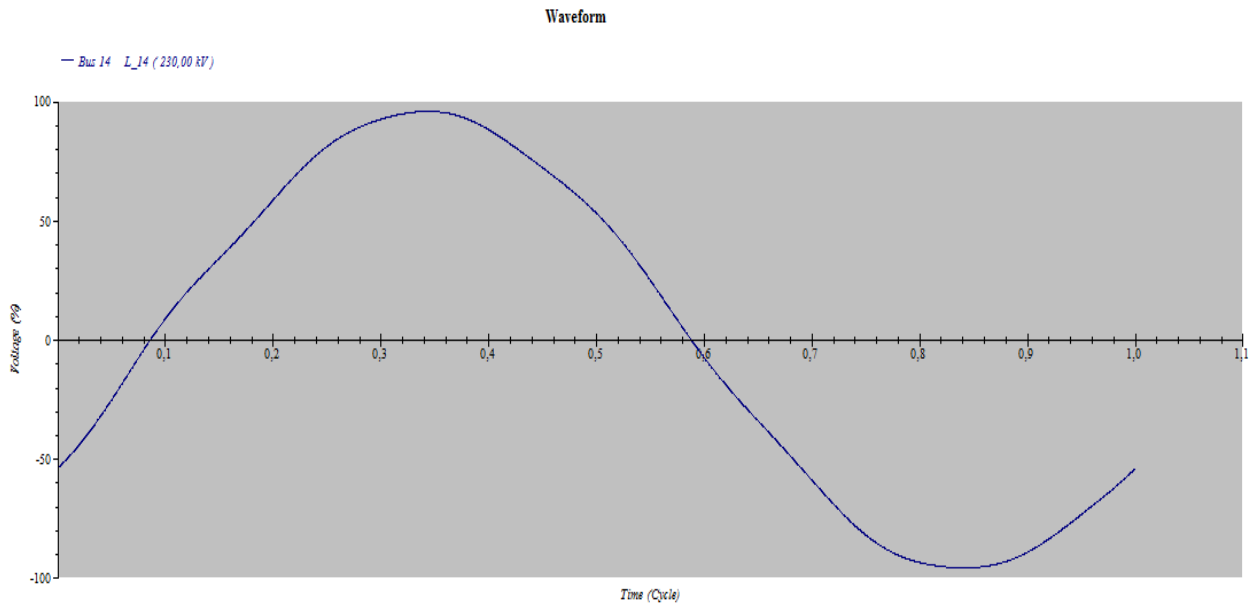


Figure III.28 : Forme d'onde de tension au nœud 14 (cas de source harmonique de tension)

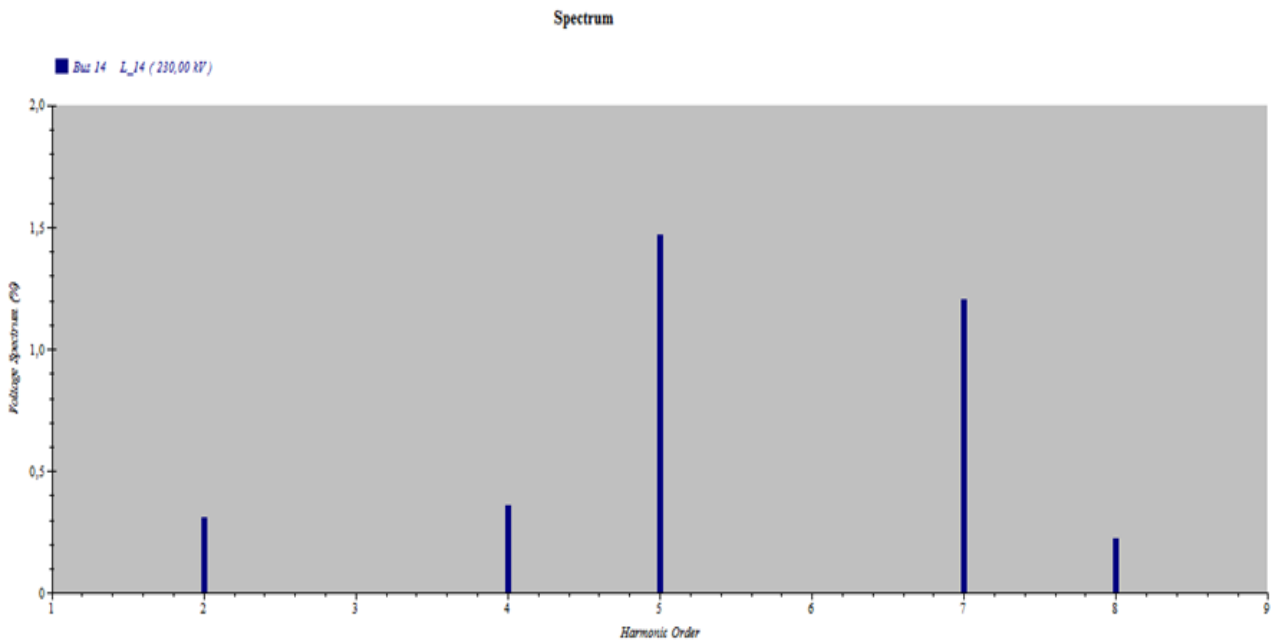


Figure III.29 : Spectre de tension au nœud 14 (cas de source harmonique de tension)

III.4.2.3 Comparaison des modèles de sources de courant et de tension

L'analyse des données mesurées pour le déséquilibre des harmoniques de courant et de tension sur l'alimentation révèle que le niveau de distorsion du modèle de source de courant est plus élevé que celui du modèle de source de tension.

III.4.2.4 Élimination des harmoniques à l'aide d'un filtre

De même que précédemment, des filtres à réglage unique sont choisis pour éliminer la distorsion harmonique pour ce réseau électrique pour les deux cas de sources d'harmonique de courant ou de tension.

III.4.2.4.1 Élimination des harmoniques (cas de source de courant)

Dans cette étude, trois filtres à réglage unique seront conçus pour ces trois ordres harmoniques (5^{ème}, 7^{ème} et 11^{ème}) afin d'éliminer la distorsion harmonique. Pour le dimensionnement du filtre, il faut trouver le facteur de puissance et la valeur MVA en effectuant une analyse de l'écoulement de puissance.

A partir de cette analyse de l'écoulement de puissance, on peut constater que le facteur de puissance existant est de 88,2% et la valeur MVA est de 15,6.

Pour les 5^{ème}, 7^{ème} et 11^{ème} ordres harmoniques, les valeurs du courant harmonique sont 3.8A, 2.7A et 1.5A respectivement, ce qui peut être trouvé sur l'affichage d'une ligne après avoir effectué une étude de l'écoulement de puissance harmonique.

Le résultat de l'analyse de l'écoulement de puissance harmonique après l'injection des filtres, montre que les valeurs de la distorsion harmonique THD et IHD ont diminués selon les normes IEEE 519.

La forme d'onde et le spectre de tension pour la barre de nœud 14 sont donnés respectivement dans les figures III.30 et III.31.

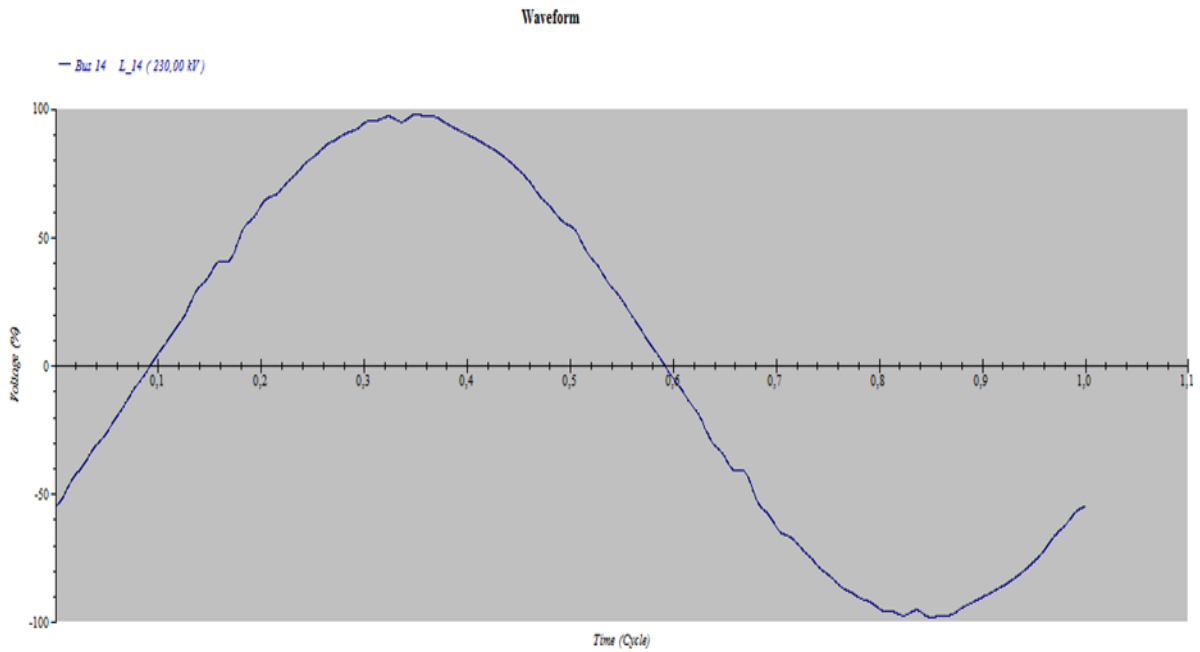


Figure III.30 : Forme d'onde de tension après l'injection des filtres au nœud 14 (cas de source harmonique de courant)

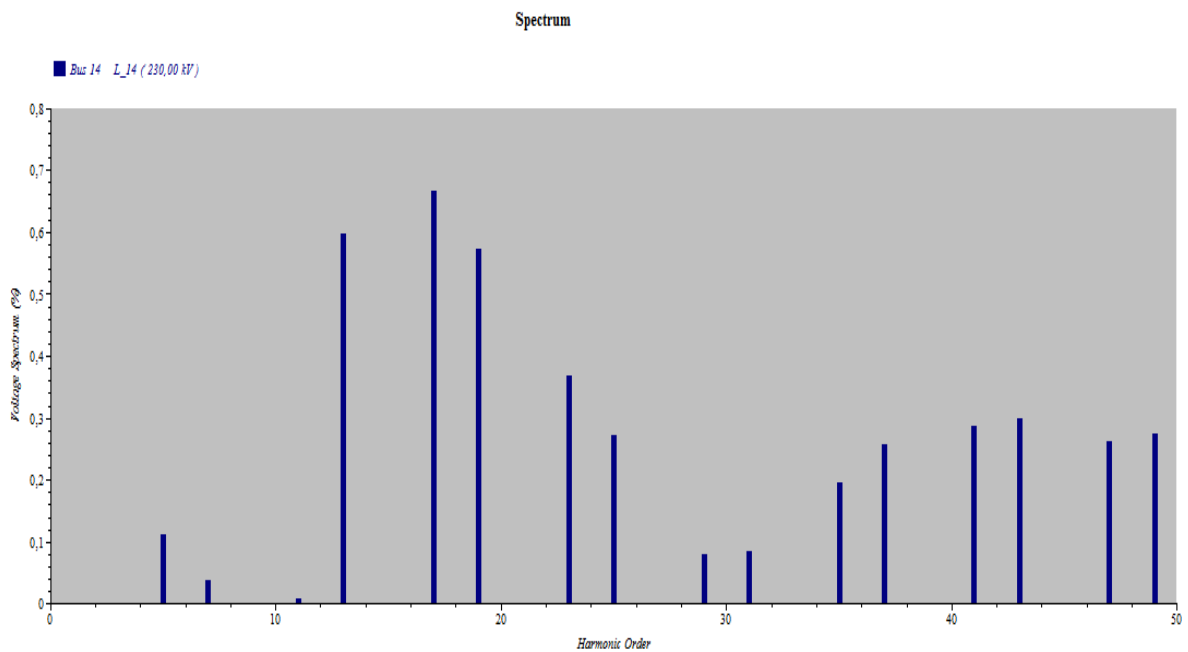


Figure III.31 : Spectre de tension après l'injection des filtres au nœud 14 (cas de source harmonique de courant)

III.4.2.4.2 Élimination des harmoniques (cas de source de tension)

Dans cette étude, un filtre à réglage unique est conçu pour le 5^{ème} ordre harmonique afin d'éliminer la distorsion harmonique. Pour le dimensionnement du filtre, il faut de même trouver le facteur de puissance et la valeur MVA en effectuant une analyse de l'écoulement de puissance comme indiqué précédemment.

Pour le 5^{ème} ordre harmonique, la valeur du courant harmonique est de 0.5, ce qui peut être trouvé sur l'affichage d'une ligne après avoir effectué une étude de l'écoulement de puissance harmonique.

Le résultat de l'analyse de l'écoulement de puissance harmonique après l'injection du filtre, montre que les valeurs de la distorsion harmonique THD et IHD ont diminué selon les normes IEEE 519.

La forme d'onde et le spectre de tension pour la barre de nœud 14 sont donnés respectivement dans les figures III.32 et III.33.

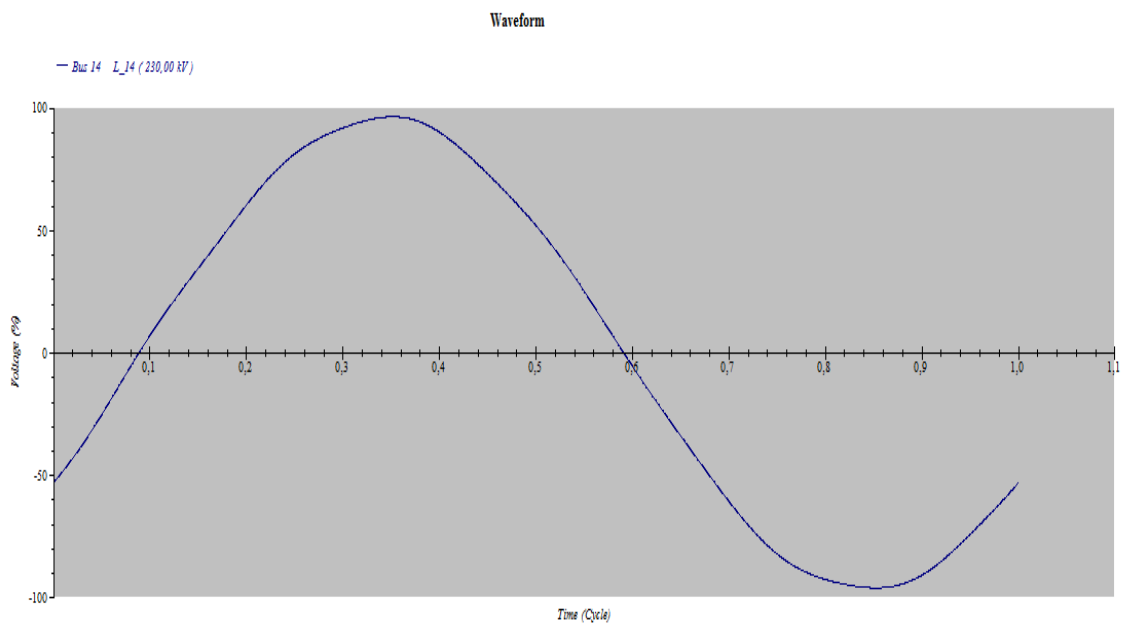


Figure III.32 : Forme d'onde de tension après l'injection du filtre au nœud 14 (cas de source harmonique de tension)

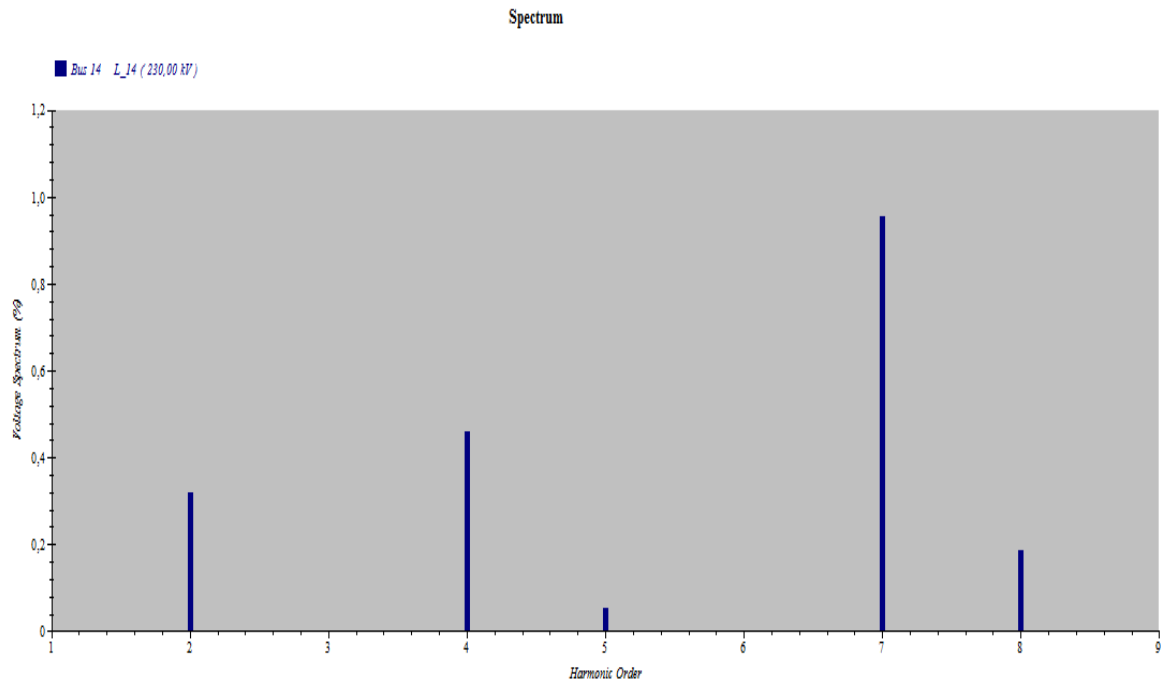


Figure III.33 : Spectre de tension après l'injection des filtres au nœud 14 (cas de source harmonique de tension)

III.4.3 Balayage de fréquence harmonique

Lors de l'étude par balayage de fréquence, l'angle d'impédance peut être vu sur le diagramme unifilaire du réseau électrique. Ceci peut être affiché dans le gestionnaire de rapport, qui est donné en annexe C. Ici, la fréquence choisie pour le réseau électrique est de 50 Hz.

La figure III.34 présente les résultats obtenus dans la fenêtre d'alerte après un balayage de fréquences harmoniques. A partir de cette figure, on peut constater que la résonance parallèle se produit en plusieurs ordres d'harmoniques.

Les figures III.35, et III.36 représentent respectivement les courbes de l'angle d'impédance et du module d'impédance au nœud 14, obtenues à partir du balayage de la fréquence harmonique.

Harmonic Frequency Scan Analysis Alert View - Output Report: Unt...

Study Case: HA
Configuration: Normal

Zone Filter

1

Device ID	Zmag (ohm)	Harmonic	Frequency (Hz)
Bus 1 H_1	924,48	27	1350
Bus 1 H_1	5878,04	35	1750
Bus 2 H_2	1176,87	28	1400
Bus 2 H_2	1270,55	36	1800
Bus 3 H_3	515,76	34	1700
Bus 3 H_3	548,88	40	2000
Bus 4 H_4	721,09	18	900
Bus 4 H_4	392,49	28	1400
Bus 4 H_4	324,36	35	1750
Bus 4 H_4	996,44	47	2350
Bus 5 H_5	1037,62	19	950
Bus 5 H_5	973,47	28	1400
Bus 5 H_5	497,73	44	2200
Bus 7 Z_7	637,6	17	850

Figure III.34 : Fenêtre d'alerte (balayage des fréquences harmoniques)

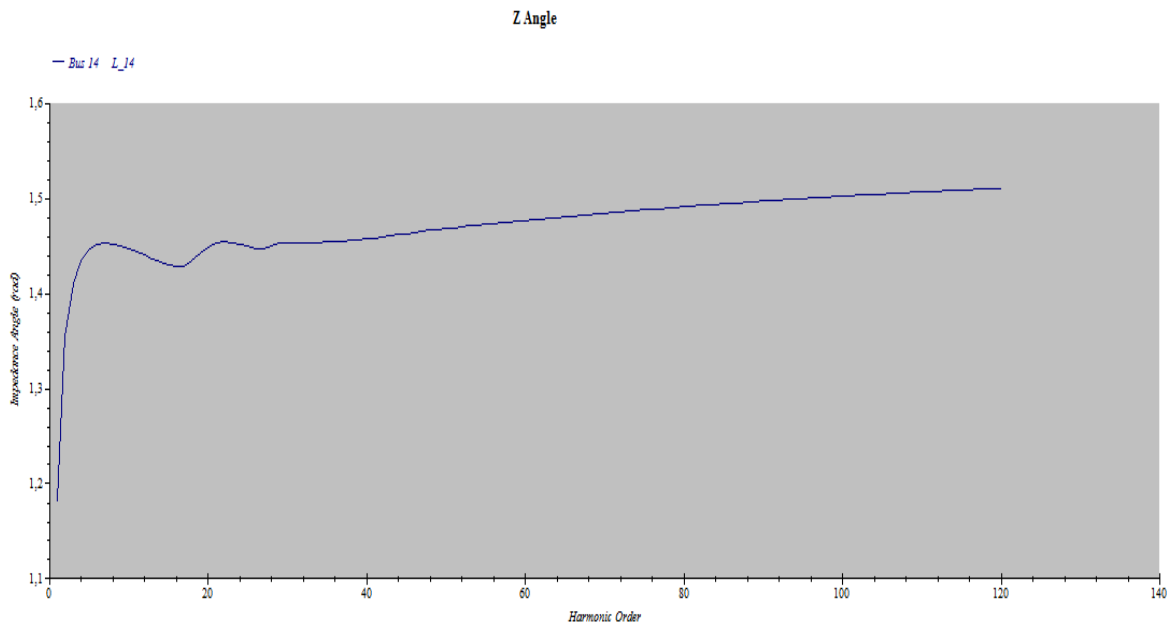


Figure III.35 : Angle d'impédance après le balayage de la fréquence harmonique au nœud 14

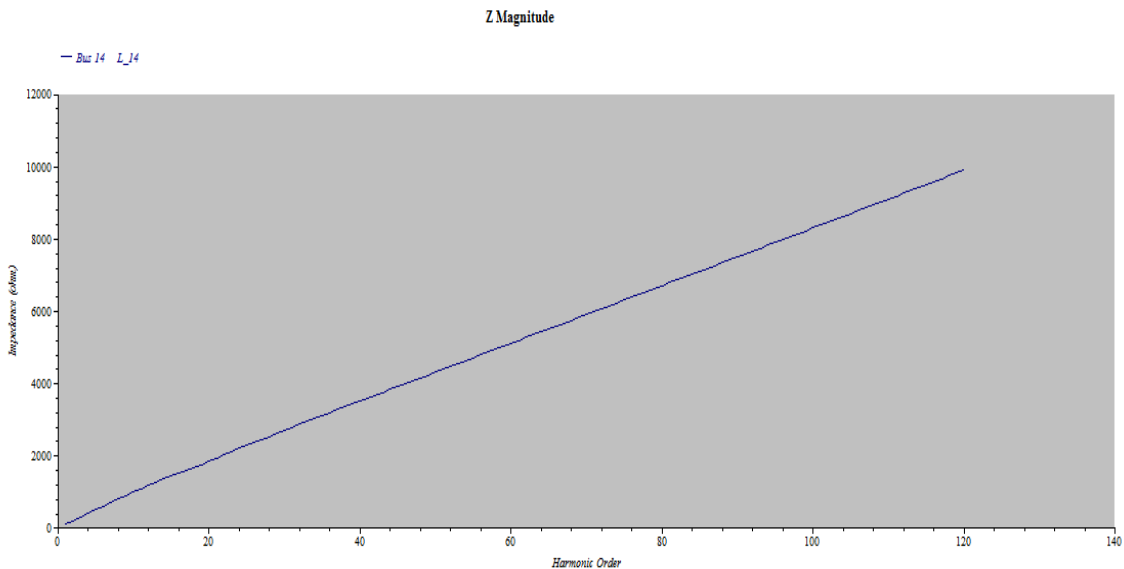


Figure III.36 : Module d'impédance après le balayage de la fréquence harmonique au nœud 14

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, l'analyse harmonique a été menée dans ETAP. Une étude de l'écoulement de puissance harmonique et du balayage de fréquence harmonique a été réalisée pour identifier l'effet du courant et de tension harmoniques sur un réseau électrique. Un seul type de filtre à réglage unique a été analysé et réalisé pour éliminer la distorsion harmonique créée par les sources harmoniques modélisées.

Deux réseaux électriques (4 nœuds/ IEEE 14 nœuds) ont été modélisés pour analyser les harmoniques du système électrique. Une charge générale est modélisée comme une source d'harmoniques pour créer une distorsion harmonique dans ces deux réseaux électriques. Lors de l'étude de l'écoulement de puissance harmonique, la distorsion harmonique a été observée sur l'affichage d'une ligne et sur la courbe tracée.

L'effet du courant et de tension harmoniques a été analysé et une technique d'atténuation a été adoptée pour éliminer la distorsion harmonique. Aussi, un filtre à réglage unique a été utilisé pour éliminer la distorsion harmonique.

Tous les composants modélisés dans ETAP ont suivi les normes IEEE 519. La source de courant et de tension harmoniques a été modélisée à partir de la bibliothèque d'harmoniques qui est (12 pulse 1) dans le réseau 4 nœuds et (6 pulse 2/ four à arc) dans le réseau 14 nœuds. Le filtre à réglage unique a été conçu à partir de filtres prédéfinis de la bibliothèque ETAP.

La "vue d'alerte" est une option très efficace pour visualiser tout composant qui dépasse sa valeur nominale standard. Le filtre a été conçu en considérant les limites de THD et IHD qui ont été dépassées à la vue d'alerte. Dans ETAP, il est facile d'éliminer la distorsion harmonique d'un certain ordre harmonique en mettant l'ordre de l'harmonique et la valeur du paramètre associé sur la page de dimensionnement du filtre.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons traité l'analyse harmonique par deux méthodes l'écoulement de puissance harmonique et du balayage de fréquence harmonique. Il a été réalisé pour identifier l'effet du courant et de tension harmoniques sur un réseau électrique. Après l'analyse harmonique, une technique d'atténuation a été adoptée pour éliminer la distorsion harmonique. Aussi, un filtre a été utilisé pour éliminer la distorsion harmonique.

Dans un premier temps, nous avons illustré le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, leurs sources et leurs conséquences. Par conséquent, un domaine de recherche a émergé pour les scientifiques afin d'élaborer des solutions de compensation pour cette pollution harmonique. Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées telles que la solution classique à base de filtres passifs et la solution des filtres actifs. Aussi, ce sont les normes internationales qui donnent les limites acceptables pour ces perturbations.

Puis, on a présenté dans le deuxième chapitre l'écoulement de puissance harmonique basé sur Newton-Raphson qui est une extension logique de l'écoulement de puissance basé sur Newton-Raphson. Les équations utilisées pour déterminer les tensions de fréquence fondamentale dans le système électrique pour l'écoulement de puissance harmonique sont très similaires aux équations dérivées pour l'écoulement de puissance. L'utilisation de l'écoulement de puissance harmonique est le grand nombre d'équations algébriques non linéaires qui doivent être résolues simultanément est de $2(n - 1)$.

L'ensemble du projet a été réalisé en suivant l'objectif de cette étude. La méthode pour étudier l'analyse harmonique dans ETAP a été décrite en détail au

chapitre 3 pour la rendre plus compréhensible. L'analyse harmonique utilisée en ETAP a été réalisée avec succès en appliquant toutes les méthodes possibles.

Comme perspective à ce travail, nous proposons dans des travaux qui suivent de :

- Compléter ce travail en faisant une comparaison avec d'autres types de filtres de la bibliothèque de ETAP ;
- Faire des applications sur le réseau Algérien ;
- Utiliser d'autres fonctions intégrées dans ETAP telles que la coordination des dispositifs de protection, l'analyse de la stabilité transitoire, l'évaluation de la fiabilité des systèmes électriques, ..., etc
- Les filtres qui utilisent ETAP sont tous des filtres passifs, alors que les filtres actifs doivent être utilisés pour les réseaux complexes en temps réel. Pour tout changement de charge important dans le réseau électrique, ces filtres ne seraient pas capables de filtrer les autres fréquences harmoniques qui sont générées à la suite de ces changements de charge. ETAP devrait considérer les inconvénients des filtres passifs et introduire des filtres actifs dans sa bibliothèque.
- Comme l'utilisation des énergies renouvelables augmente rapidement, l'utilisation de charges non linéaires augmente également sur le réseau électrique. Toute analyse ultérieure doit donc prendre en compte l'effet de ces types de charges sur un réseau électrique.

Bibliographie

- [1] A. Chaoui, « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires » Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2010.
- [2] R. Kifouche Rezki, « Identification des harmoniques et génération du courant de référence : Application au convertisseur statique » Mémoire de Magister, Université M'hamed Bouguarra Boumerdes, 2005.
- [3] C. Collombet, J. M. Lupin et J. Schonek, « Perturbation harmoniques dans les réseaux pollués et leur traitement » Schneider Electric, Cahier Technique n ° 152, septembre 1999.
- [4] R. C. D. M. F. M. S. S. H. W. Beaty, *Electrical Power System Quality: The McGraw-Hill Companies*, 2004.
- [5] J. O. Troxler, R. W. Cox, " An adaptive framework for mitigating current harmonics caused by distributed energy resources", *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2018, pp. 505-512.
- [6] B. Alzari, "Design a single tuned filter as a harmonic reduction appliance dans household charge characteristics 2200 VA", *Programme de Premier Cycle Faculté d'Ingénierie de l'Université d'Indonésie, Depok*, 2011.
- [7] I. o. E. a. E. Engineers, "519-1992 - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems," ed: IEEE 9 April 1993
- [8] R. W. Goody, « Orcad Pspice for Windows : », *Volume I: Digital and Data Communications*, 3rd Edition, 2001.
- [9] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, « *Power Electronics: Converters, Applications and Designs* ». JOHN WILEY & SONS, INC, 3rd Edition, 2003
- [10] D. W. Hart, "Power Electronics", JOHN WILEY & SONS, 1997.
- [11] Dr. Mohamed Darwish (2011) *Power Electronics and FACTS* [Lecture presented to MSc Sustainable Power, Brunel University]. 21 March

- [12] A. Nassif, W. XU, « Filtres harmoniques passifs pour systèmes industriels à moyenne tension: Considérations pratiques et analyse topologique », Power Symposium, SIESTES Amérique du nord, 2007, p. 301-307.
- [13] D. A. Gonzalez, J. C. Mccall, "Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems " " Industrial Applications, IEEE Transaction, Vol. 23, no 3, p. 504-511, 1987.
- [14] G. Wakileh, « Power Systems Harmonics Fundamentals, Analysis and Filter Design », Ed. Springer, 2001.
- [15] J. DAS, "Passive Filters - Potentialities and Limitations, Industrial Applications", IEEE Transaction, Vol. 40, no 1, p. 232-241, 2004.
- [16] "IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters," IEEE Std 1531-2003, pp. 1–60, 2003.
- [17] M. Zamani, et all, "C-type Filter design based on power-factor correction for 12-pulse HVDC converters," Industrial Electronics, 2008. IECON 2008, 34th conférence annuelle de l'IEEE, 2008, pp. 3039-3044.
- [18] M.A.E. ALALI, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse De doctorat, Université Louis Pasteur, ULP-Strasbourg 1, France, Septembre 2002.
- [19] H. Akagi, "Active Harmonic Filters" IEEE Trans. of Power Electronics, vol. 93, no. 12, pp. 2128-2141, dec. 2005.
- [20] L. Amaia, « Commande avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension » Thèse de doctorat, LEG, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, novembre 2006.
- [21] W. M. GRADY, "Harmonic Power Flow Studies", PhD. Thesis, Purdue University, 1983.
- [22] Westinghouse Electric Corporation, "Electrical Transmission and Distribution Reference book", East Pittsburgh, Pennsylvania.
- [23] C.A. Gross, "Power System Analysis", 2nd, John Wiley & Sons, inc., New York, 2013.

[24] J. Choma JR., «“Electrical Networks: Theory and Analysis”, John Wiley & Sons, inc., New York

[25] R.W. Hamming, « Numerical Methods for Scientists and Engineers», 2nd Edition, McGraw-Hill book co., inc., New York, 1973.

[26] A.A. Mahmoud, R.D. Shultz, «Evaluation and Reduction of Harmonic Distortion in Power Systems ", IEEE Transactions on PAS, vol.101, n° 6, 1989, pp. 1815-1824.

[27] ETAP help, ETAP 12.6.0 software.

Annexes

Annexe A

Données du réseau de 4 nœuds

Bus Input Data

Bus			Initial Voltage		Load							
					Constant kVA		Constant Z		Constant I		Generic	
ID	kV	Sub-sys	% Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
Bus1	33.000	1	100.0	0.0								
Bus2	6.600	1	100.0	0.0								
Bus3	6.600	1	100.0	0.0	1.360	0.843	0.340	0.211				
Bus4	6.600	1	100.0	0.0			4.000	2.000				
Total Number of Buses: 4					1.360	0.843	4.340	2.211	0.000	0.000	0.000	0.000

Generation Bus				Voltage		Generation			Mvar Limits	
ID	kV	Type	Sub-sys	% Mag.	Angle	MW	Mvar	% PF	Max	Min
Bus1	33.000	Swing	1	100.0	0.0					
							0.000	0.000		

2-Winding Transformer Input Data

Transformer		Rating					Z Variation			% Tap Setting		Adjusted	Phase Shift	
ID	Phase	MVA	Prim. kV	Sec. kV	% Z1	X1/R1	+ 5%	- 5%	% Tol.	Prim.	Sec.	% Z	Type	Angle
T1	3-Phase	10.000	33.000	6.600	7.00	15.50	0	0	0	0	0	7.0000	Dyn	0.000

Line/Cable Input Data

Ohms or Siemens/1000 ft per Conductor (Cable) or per Phase (Line)

Line/Cable		Length								
ID	Library	Size	Adj. (ft)	% Tol.	#/Phase	T (°C)	R	X	Y	
Cable1	6,6NCUN3	400	3280.8	0.0	2	75	0.018605	0.025359		
Cable2	6,6NCUN3	300	3280.8	0.0	1	75	0.023257	0.025817		

Line / Cable resistances are listed at the specified temperatures.

Annexe B

Données du réseau de 14 nœuds

Bus Input Data

Bus			Initial Voltage		Load							
					Constant kVA		Constant Z		Constant I		Generic	
ID	kV	Sub-sys	% Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
Bus 1 H_1	230.000	1	100.0	0.0								
Bus 2 H_2	230.000	1	100.0	0.0	17.360	10.160	4.340	2.540				
Bus 3 H_3	230.000	1	100.0	0.0	75.360	15.200	18.840	3.800				
Bus 4 H_4	230.000	1	101.9	-10.3	38.240	-3.120	9.560	-0.780				
Bus 5 H_5	230.000	1	102.0	-8.8	6.080	1.280	1.520	0.320				
Bus 6 L_6	230.000	1	100.0	0.0	8.960	6.000	2.240	1.500				
Bus 7 Z_7	230.000	1	106.2	-13.4								
Bus 8 T_8	230.000	1	100.0	0.0								
Bus 9 L_9	230.000	1	105.6	-14.9	23.600	13.280	5.900	3.320				
Bus 10 L_10	230.000	1	105.1	-15.1	7.200	4.640	1.800	1.160				
Bus 11 L_11	230.000	1	105.7	-14.8	2.800	1.440	0.700	0.360				
Bus 12 L_12	230.000	1	105.5	-15.1	4.880	1.280	1.220	0.320				
Bus 13 L_13	230.000	1	105.0	-15.2	10.800	4.640	2.700	1.160				
Bus 14 L_14	230.000	1	103.6	-16.0			15.001	7.998				
Total Number of Buses: 14					195.280	54.800	63.821	21.698	0.000	0.000	0.000	0.000

Generation Bus				Voltage		Generation			Mvar Limits	
ID	kV	Type	Sub-sys	% Mag.	Angle	MW	Mvar	% PF	Max	Min
Bus 1 H_1	230.000	Swing	1	100.0	0.0					
Bus 2 H_2	230.000	Swing	1	100.0	0.0					
Bus 3 H_3	230.000	Swing	1	100.0	0.0					
Bus 6 L_6	230.000	Swing	1	100.0	0.0					
Bus 8 T_8	230.000	Swing	1	100.0	0.0					
						0.000	0.000			

2-Winding Transformer Input Data

Transformer		Rating					Z Variation			% Tap Setting		Adjusted	Phase Shift	
ID	Phase	MVA	Prim. kV	Sec. kV	% Z1	X1/R1	+ 5%	- 5%	% Tol.	Prim.	Sec.	% Z	Type	Angle
4_7	3-Phase	100.000	230.000	230.000	20.91	999.00	0	0	0	-2.200	0	20.9120	Dyn	0.000
4_9	3-Phase	100.000	230.000	230.000	55.62	999.00	0	0	0	-3.100	0	55.6180	Dyn	0.000
5_6	3-Phase	100.000	230.000	230.000	25.20	999.00	0	0	0	-6.800	0	25.2020	Dyn	0.000

Impedance Input Data

Impedance		Positive Sequence Impedanc			
ID	R	X	Y	Unit	
1_2	1.9380000	5.9170000	5.2800000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
1_5	5.4030000	22.3040000	4.9200000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
2_3	4.6990000	19.7970000	4.3800000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
2_4	5.8110000	17.6320000	3.4000000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
2_5	5.6950000	17.3880000	3.4600000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
3_4	6.7010000	17.1030000	1.2800000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
4_5	1.3350000	4.2110000	0.0000000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
6_11	9.4980000	19.8900000	0.0000000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
6_12	12.2910000	25.5810000	0.0000000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
6_13	6.6150000	13.0270000	0.0000000	% in 1.000 kV base and 100.0 MVA base	
7_8	0.0000000	17.6150000	0.0000000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
7_9	0.0000000	11.0010000	0.0000000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
9_10	3.1810000	8.4500000	0.0000000	% in 1.000 kV base and 100.0 MVA base	
9_14	12.7110000	27.0380000	0.0000000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
10_11	8.2050000	19.2070000	0.0000000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
12_13	22.0920000	19.9880000	0.0000000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	
13_14	17.0930000	34.8020000	0.0000000	% in 230.000 kV base and 100.0 MVA base	

Annexe C

Rapport balayage de fréquence harmonique pour le réseau 14 nœuds

Harmonic Frequency Scan Alarm Report

Bus ID	Z mag (ohm)	Harmonic	Frequency
Bus 4 H_4	996.44	47.00	2350.00
Bus 5 H_5	497.73	44.00	2200.00
Bus 3 H_3	548.88	40.00	2000.00
Bus 2 H_2	1270.55	36.00	1800.00
Bus 4 H_4	324.36	35.00	1750.00
Bus 1 H_1	5878.04	35.00	1750.00
Bus 3 H_3	515.76	34.00	1700.00
Bus 5 H_5	973.47	28.00	1400.00
Bus 4 H_4	392.49	28.00	1400.00
Bus 2 H_2	1176.87	28.00	1400.00
Bus 1 H_1	924.48	27.00	1350.00
Bus 5 H_5	1037.62	19.00	950.00
Bus 4 H_4	721.09	18.00	900.00
Bus 7 Z_7	637.60	17.00	850.00