الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

L'Analyse des harmoniques dans les réseaux électriques à l'aide d'ETAP

Présenté par :

AMMAD DJAMILA

GUEBBOUH HAMZA

Proposé et Dirigé par :

Mr. TAMI YOUCEF

L'année universitaire : 2022/2023

Remerciements

A l'issue de ce travail, nous tenons à exprimer toute notre gratitude à l'ensemble des personnes qui ont contribué, chacune à sa manière, à l'accomplissement de notre formation.

En premier temps, toute notre reconnaissance à notre promoteur Monsieur Tamiy youssef pour son aide précieuse qu'il nous a apporté, pour son soutien scientifique et pédagogique tout au long de ce travail.

DEDECASE

Je dédié ce travail à :

Mes très chers parents qui m'ont tant soutenus dans la vie que dieu les protège MES sœurs

Djamila

Dédicace

Je dédié ce modeste travail aux être qui me sont les plus chers.

A mes chers parents qui m'ont toujours encouragé symbole de tendresse pour leur sacrifice estimable "que dieu vous garde"

A mes chères sœurs et à toute ma
familleA mes amis ***moncif*** *et* ***adel***

A mes chers amis de mon quartier.

A mon enseignant Mr. ***Tami youcef***

A mes partenaires dans ce travail ***Ammad djamila***

A tous les professeurs qui m'ont enseigne et mes collègues

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

Hamza

Liste des Figures

Figure 2. 1: Formes d'onde de tension et de courant pour les charges linéaires. ---- 4
Figure 2.2: Forme d'onde de tension et de courant pour une charge non linéaire. ---- 5
Figure 2.3: Forme d'onde avec composantes harmoniques symétriques. ---- 6
Figure 2.4: Distorsion de tension induite par le courant déformé. ---- 7
Figure 2.5: Raccordement d'inductances anti-harmonique. ---- 10
Figure 2.6:Filtre passif résonant. ---- 12
Figure 2.7 : Filtre passif amorti de 2éNe ordre. ---- 13
Figure 2.8: Autres types de filtre passif amorti. ---- 14
Figure 2.9: Schema de principe du filtrage actif parallele ---- 16
Figure 2.10: Schéma de principe du filtrage actif série ---- 16
Figure 2.11 : Filtre active serie et filtre passif parallele. ---- 17
Figure 2.12: Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle ---- 17
Figure 2.13: Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle ---- 17
Figure 2.14: Combinaison parallèle-série des filtres actifs ---- 18
Figure 2.15: Barres d'outils du mode ETAP pour diverses analyses du système électrique. ---- 24
Figure 2.16: Harmonic Analysis Tool Bar ---- 24
Figure 2.17: Barre d'outils de l'éditeur de cas d'étude. ---- 26
Figure 2.18: Cas d'étude en double ---- 27
Figure 2.19: Page d'informations de l'éditeur de cas d'étude. ---- 27
Figure 2.20: Page de tracé de l'éditeur de cas d'étude ---- 28
Figure 2.21: Page Modèle de l'éditeur de cas d'étude. ---- 29
Figure 2.22: Page d'alerte de l'éditeur de cas d'étude ---- 30
Figure 2.23: Option d'affichage du module d'analyse harmonique. ---- 31
Figure 2.24: Curseur d'ordre de l'analyse harmonique ---- 31
Figure 2.25: Curseur de fréquence harmonique ---- 32
Figure 2.26: Raccourci du gestionnaire de rapports. ---- 32
Figure 2.27: Gestionnaire de rapport d'harmoniques ---- 33
Figure 3.28: Page harmonique d'une charge. ---- 37
Figure 3.29: Éditeur de filtre harmonique. ---- 43
Figure 3.30: Différents types de filtres sur ETAP ---- 43
Figure 3.31: Fenêtre du Dimensionnement du filtre. ---- 44
Figure 3.32 : Déphasage du transformateur. ---- 46
Figure 4.33: La barre d'outils d'étude harmonique dans ETAP. ---- 51
Figure 4.34: diagramme unifilaire de l'exemple. ---- 52
Figure 4.35: Le système DC. ---- 53
Figure 4.36: Détermination des caractéristiques des sources harmoniques. ---- 53
Figure 4.37: Analyse du flux de charge harmonique. ---- 54
Figure 4.38: Analyse du flux de charge. ---- 55
Figure 4.39: Opération de dimensionnement du filtre. ---- 56
Figure 4.40: Flux de charge harmonique après filtrage. ---- 56
Figure 4.41: Fenêtre d'alerte (Étude de flux de charge harmonique). ---- 58
Figure 4.42: Graphiques du flux de charge harmonique (tous les bus). ---- 58
Figure 4.43: Graphique du flux de charge harmonique (Barre de bus 1). ---- 59
Figure 4.44: Graphique du flux de charge harmonique (Spectre de tension pour la barre de bus 1). ---- 59
Figure 4.45: Résultat du balayage des fréquences harmoniques. ---- 60
Figure 4.46: Fenêtre d'alerte (Balayage des fréquences harmoniques). ---- 60
Figure 4.47: Graphique du balayage des fréquences harmoniques, impédance-angle (tous les bus). ---- 61
Figure 4.48: Graphique du balayage des fréquences harmoniques, impédance-angle (Barre de bus 1). ---- 61
Figure 4.49: Graphique du balayage des fréquences harmoniques, impédance-amplitude (Barre de bus 1). ---- 62
Figure 4.50: Étude du flux de charge harmonique (après la connexion des banques de condensateurs). ---- 62

Figure 4.51: Analyse du flux de charge harmonique après l'ajustement du filtre. ---------- 63
Figure 4.52: Graphiques du flux de charge harmonique (sans filtre à gauche et avec filtre à droite). ----- 63
Figure 4.53: Graphiques harmoniques (spectre de tension sans filtre à gauche et avec filtre à droite). ---- 64
Figure 4.54: Graphique de l'impédance harmonique-angle (sans filtre à gauche et avec filtre à droite). -- 64
Figure 4.55: Graphique de l'impédance harmonique-amplitude (sans condensateur à gauche et avec condensateur à droite). ---------- 64
Figure 4.56: Graphique des harmoniques (spectre de tension pour les quatre bus). ---------- 65
Figure 4.57: Analyse du flux de charge harmonique - Vue d'alerte. ---------- 66
Figure 4.58: La vue d'alerte pour le balayage des fréquences. ---------- 67
Figure 4.59: Diagramme unifilaire ---------- 68
Figure 4.60: Page de l'éditeur du transformateur d'enroulement 2 ---------- 69
Figure 4.61: Page harmonique de la charge ---------- 70
Figure 4.62: Limite harmonique dans la page de l'éditeur de bus. ---------- 71
Figure 4.63: Résultat de l'analyse du flux de charge équilibré. ---------- 72
Figure 4.64: Résultat du flux de charge harmonique. ---------- 72
Figure 4.65: Fenêtre d'alerte (étude du flux de charge harmonique). ---------- 73
Figure 4.66: Tracés du flux de charge harmonique (tous les bus). ---------- 73
Figure 4.67: Diagramme de flux de charge harmonique (barre omnibus 3). ---------- 74
Figure 4.68 : Diagramme du débit de charge harmonique (spectre de tension pour la barre omnibus 3). 74
Figure 4.69: Résultat du balayage de fréquence harmonique. ---------- 75
Figure 4.70: Fenêtre d'alerte (balayage de fréquence harmonique). ---------- 75
Figure 4.71: Tracé du balayage de fréquence harmonique, angle d'impédance (tous les bus). ---------- 76
Figure 4.72 : Tracé du balayage de fréquence harmonique, angle d'impédance (Bus 3). ---------- 77
Figure 4.73: Harmonic Frequency Scan Plot, impedance- magnitude (Bus 3). ---------- 77
Figure 4.74: Étude du débit de charge harmonique (après connexion des batteries de condensateurs). --- 78
Figure 4.75: Tracés de flux de charge harmonique (sans condensateur à gauche et avec condensateur à droite. ---------- 78
Figure 4.76: Tracés harmoniques (spectre de tension sans le condensateur à gauche et avec le condensateur à droite). ---------- 78
Figure 4.77: Diagramme d'impédance harmonique - magnitude (sans condensateur à gauche et avec condensateur à droite) . ---------- 79
Figure 4.78: Tracé de l'angle d'impédance harmonique (sans condensateur à gauche et avec condensateur à droite) . ---------- 79
Figure 4.79: Tracé des harmoniques (spectre de tension pour les quatre bus). ---------- 81
Figure 4.80: Analyse équilibrée du flux de charge. ---------- 82
Figure 4.81: Page des paramètres de l'éditeur harmonique. ---------- 82
Figure 4.82: Dimensionnement du filtre harmonique. ---------- 83
Figure 4.83: Harmonic Load flow result for 11th order . ---------- 83
Figure 4.84: Analyse du flux de charge harmonique – Vue d'alerte. ---------- 84
Figure 4.85: Analyse du flux de charge harmonique après réglage du filtre. ---------- 85
Figure 4.86: Graphiques du flux de charge harmonique (sans filtre à gauche et avec filtre à droite). ----- 85
Figure 4.87: Tracés harmoniques (spectre de tension sans filtre à gauche et avec filtre à droite). ---------- 85
Figure 4.88:Tracé de l'angle d'impédance harmonique (sans filtre à gauche et avec filtre à droite). ------- 86
Figure 4.89: Impédance harmonique - Magnitude Plot (Sans condensateur à gauche et avec condensateur à droite). ---------- 86
Figure 4.90: Vue d'alerte pour le balayage de fréquence. ---------- 87

LISTE DES TABLEAUX

Table (2. 1): principes et caractéristiques du filtrage passif, actif, hybride. _____ 19

Table (4.1) : affiche les rangs des harmoniques au sub3 et leur niveau de courant et de distorsion associé._____54

Table (4.2) : affiche les rangs des harmoniques au sub3 et leur niveau de courant et de distorsion associé après filtrage._____57

Resume

L'intention principale de toute entreprise de services publics d'électricité est de fournir de l'électricité avec une meilleure qualité. En augmentant l'utilisation d'appareils électroniques de puissance (charge non linéaire), la puissance la qualité a été affectée. L'une des causes les plus importantes d'une mauvaise qualité de l'alimentation est les harmoniques du réseau électrique. Ceci est devenu un problème majeur pour le problème de qualité de l'alimentation

et l'analyse harmonique nécessaires pour étudier dans la modélisation des composants afin de minimiser ou supprimer ce courant ou cette tension harmonique.

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

To eliminate this harmonic distortion, different kinds of technique were followed. Those

are harmonic filter designing, capacitor bank e.t.c.

Pour éliminer cette distorsion harmonique, différents types de techniques ont été suivis. Ceux

sont la conception de filtres harmoniques, la batterie de condensateurs, etc.

les mots clés

- Charge statique
- ASI (l'Alimentation Sans Interruption) UPS (Interruptible Power Supply)
- Chargeur/Convertisseur
- VFD
- SVC
- Transformer
- Réseau électrique
- Générateur synchrone
- Onduleur
- Chargeur/Convertisseur
- Charge statique

ABSTRACT

The main intention of any electrical utility company is to deliver power with better quality. By increasing the use of power electronic devices (Non linear 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 analyse the effect of harmonic current, Harmonic Load Flow analysis was performed and harmonic distortion identified.

Keys word:

tatic load

UPS (Uninterruptible Power Supply) UPS (Interruptible Power Supply)

Charger/Converter

VFDs

CVS

Transform

Electrical network

Synchronous generator

Inverter

Charger/Converter

Static load

مـلخص

الهدف الرئيسي لأي شركة مرافق كهربائية هو توفير الطاقة بشكل أفضل جودة. عن طريق زيادة استخدام الطاقة للأجهزة الإلكترونية (الحمل غير الخطي) ، فإن الطاقة الجودة قد تأثرت. أحد أهم أسباب جودة الطاقة غير الملائمة

هو التوافقيات نظام الطاقة. لقد أصبح هذا مشكلة رئيسية لمشكلة جودة الطاقة والتحليل التوافقي اللازم للتحقيق في مكونات النمذجة لتقليل أو إزالة هذا التوافقيات الحالية أو الجهد. في هذا المشروع ، تم إجراء التحليل التوافقي لنظام الطاقة باستخدام ETAPووصف العملية برمتها بالتفصيل. بادئ ذي بدء ، كان الحمل العام على غرار المصدر التوافقي لحقن التيار التوافقي عبر شبكة الطاقة.بعد ذلك ، لتحليل تأثير التيار التوافقي ، تم تحليل تدفق الحمل التوافقي

تم تحديد التشويه التوافقي المنجز.

للقضاء على هذا التشوه التوافقي ، تم اتباع أنواع مختلفة من التقنية. أولئك هي تصميم مرشح متناسق ،

الكلمات المفتاحية :

حمل ثابت

UPS (مزود الطاقة غير المنقطع) UPS (مزود الطاقة المتقطع)

شاحن / محول

VFDs

CVS

التحويل

شبكة كهربائية

مولد متزامن

العاكس

شاحن / محول

حمل ثابت

Introduction générale

Chapitre 1
INTRODUCTION

Introduction :

L’objectif principale de tout gestionnaire de réseau d’électricité est de fournir l’énergie avec une meilleure qualité. Cela indique de fournir une onde de tension et de courant purement sinusoïdale. Cet objectif est compliqué par le fait qu'il existe des charges sur le réseau qui produisent des courants harmoniques. Ces courants entraînent des tensions et des courants déformés qui peuvent avoir un impact négatif sur les performances du réseau de différentes manières. [1]

Les harmoniques sont des produits secondaires de l’électronique moderne. Les tensions ou courants sinusoïdaux ayant des fréquences qui sont des multiples entiers de la fréquence à laquelle le réseau électrique est conçu pour fonctionner (généralement 50 ou 60Hz) sont appelés harmoniques.

Les courants harmoniques sont les composantes sinusoïdales d'un courant électrique périodique décomposé en série de Fourier. Les harmoniques ont une fréquence multiple de la fréquence fondamentale, généralement de 50 ou 60 Hertz, dans les réseaux électriques. Autrement dit, les harmoniques sont une description mathématique de la distorsion d'un signal a priori sinusoïdal. De même, les tensions harmoniques sont les composantes sinusoïdales d'une tension électrique périodique décomposée en série Fourier.

Les courants harmoniques sont dus à la présence de charges électriques non linéaires dans un réseau électrique. Du fait des impédances du réseau, ces courants harmoniques sont la cause de l'apparition d'harmoniques de tensions qui affectent alors les autres clients du réseau de distribution.

Les courants harmoniques ont divers effets néfastes : augmentation des pertes, augmentation du bruit, interférences et couple vibratoire. Pour la bonne qualité de l'électricité, il est donc important de limiter leur présence. Les gestionnaires de réseaux électriques garantissent la fourniture d'une électricité contenant peu d'harmoniques, en contrepartie, ils obligent leurs clients à limiter leur injection de courants harmoniques dans le réseau. L'installation de filtres, passifs ou actifs, le choix d'un couplage de transformateur adapté ainsi

que de montage d'électronique de puissance produisant moins d'harmoniques sont autant de solution pour limiter le taux de distorsion du courant et de la tension électrique.

Ces courants harmoniques générés à partir de la source harmonique entraînent une distorsion du courant ou de la tension pour l'ensemble du réseau électrique. Ce fait notable est devenu un problème majeur pour le problème de la qualité de l'énergie et l'analyse harmonique nécessaire pour Étudiez comment minimiser ou supprimer ces harmoniques. L'analyse harmonique est utilisée pour identifier les problèmes harmoniques, minimiser les déclenchements gênants, concevoir et tester les filtres et identifier les violations potentielles des limites de distorsion. [4, 5]

Différents types de logiciels réseaux électriques peuvent être utilisés pour effectuer une analyse harmonique sur le réseau électrique. Dans cette étude, ETAP 12.6.0 est utilisé pour

modéliser divers réseaux électriques et effectuer des analyses harmoniques. ETAP est un logiciel très convivial où les outils clés nécessaires à une analyse harmonique efficace sont faciles à utiliser pour obtenir de meilleurs résultats. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

2.1 But et objectifs

L'objectif principal de cette étude est d'effectuer une analyse harmonique sur un réseau électrique en utilisant le logiciel ETAP.

Pour ce faire, l'étude fait l'objet d'une liste d'objectifs comme indiqué ci-dessous :

- Comprendre le module Analyse harmonique dans ETAP.
- Modélisation de différents types de réseaux électriques qui incluront des sources harmoniques dans le réseau électrique.
- Effectuer une analyse harmonique sur ces réseaux électriques afin que la distorsion harmonique puisse être identifiés.
- Minimiser la distorsion harmonique dans le réseau électrique, concevoir/tester les filtres et identifier les violations potentielles des limites de distorsion.

Tous les problèmes clés susmentionnés de cette étude seront analysés lors de l'adoption de la norme IEEE519, où les indices harmoniques seront définis en conséquence dans le logiciel. Pour l'ensemble des objectifs comme dit ci-dessus seront portés sur la base des deux méthodes d'analyse.

- **Etude de Flux de puissance harmonique** :

L'étude de flux de puissance harmonique effectue d'abord un calcul de flux de charge à la fréquence fondamentale. Le résultat du Flux de puissance fondamental définit la base de la tension de bus fondamentale et des courants de branche qui sont utilisés ultérieurement pour calculer différents indices harmoniques. Ensuite, pour chaque fréquence d'harmoniques à laquelle une source d'harmoniques existe dans le réseau, une solution de flux de charge directe est trouvée en utilisant la méthode d'injection de courant. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

- **Etude de balayage de fréquence harmonique** :

Le programme de balayage de fréquence est le meilleur outil pour examiner le problème de résonance du réseau. En raison de l'existence de composants inductifs et capacitifs dans le réseau, à certaines fréquences, des conditions de résonance peuvent se produire sur certains bus. Si la résonance se produit sur un bus où un courant harmonique est injecté dans le réseau, une forme de surtension et de surintensité sera observée. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP] .

CHAPITRE 2

Chapitre 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction :

Au fil des années, avec l'augmentation du nombre de charges générant des harmoniques, il est devenu de plus en plus nécessaire de prendre en compte leur influence lors de l'ajout ou de la modification d'une installation électrique. Pour bien comprendre l'impact de ce phénomène, il est important de considérer deux éléments clés : les caractéristiques des charges générant des courants harmoniques (charges non linéaires) et la façon dont ces courants harmoniques circulent et entraînent le développement de tensions harmoniques. Une recherche initiale permet de recueillir des informations sur ces aspects afin de mieux appréhender les problèmes potentiels liés aux harmoniques dans le réseau électrique.

2.1.1 Charges linéaires et non linéaires :

- **Charge linéaire :**

Les charges linéaires sont des dispositifs dont la relation entre la tension et le courant est linéaire. Cela signifie que la consommation d'énergie est directement proportionnelle à la tension appliquée. Par exemple, une résistance pure (sans éléments capacitifs ou inductifs) est considérée comme une charge linéaire. Si vous doublez la tension aux bornes d'une résistance linéaire, le courant qui la traverse sera également doublé. [1, 3, 8]

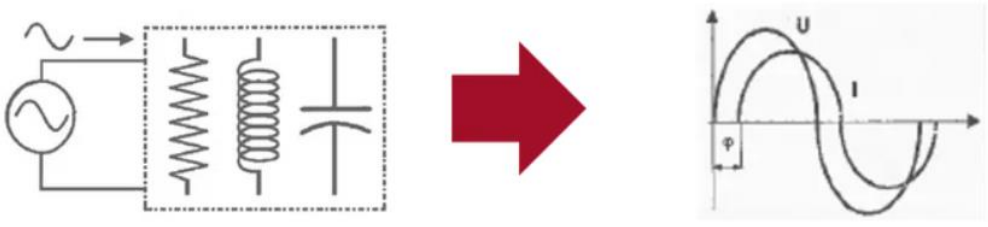


Figure 2. 1: Formes d'onde de tension et de courant pour les charges linéaires..

- **Charge non-linéaire :**

Une charge est dite **non linéaire** lorsque le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme que la tension qui l'alimente. Typiquement, les charges utilisant l'**électronique de puissance** sont non-linéaires. Or, elles sont de plus en plus nombreuses et leur part dans la consommation d'électricité ne cesse de croître.

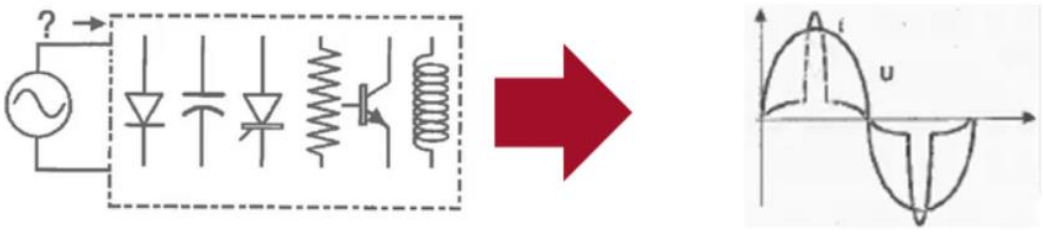


Figure 2.2: Forme d'onde de tension et de courant pour une charge non linéaire.

Exemples de charges non-linéaires :

- ✓ Les équipements industriels (machines à souder, fours à arc, fours à induction, redresseurs).
- ✓ Les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu.
- ✓ Les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, …)
- ✓ Les onduleurs

- **les Harmoniques :**

Une charge non linéaire consomme du réseau électrique un courant déformé, lequel va modifier l'allure de la tension sinusoïdale. Les charges non linéaires génèrent des courants harmoniques qui circulent à partir de la charge vers l'alimentation en empruntant le chemin de la moindre impédance. Les courants harmoniques sont des courants dont la fréquence est un multiple entier de la fondamentale (celle de réseau électrique). La superposition des courants harmoniques sur le courant fondamental provoque les formes d'onde non sinusoïdales associées aux charges non linéaires. La figure 2.3 montre le signal original, fondamental à 50 Hz,ainsi la fréquence de l'harmonique de rang 3 sera égal à 3 fois la fréquence du fondamental, c'est à dire égal à 150 Hz.

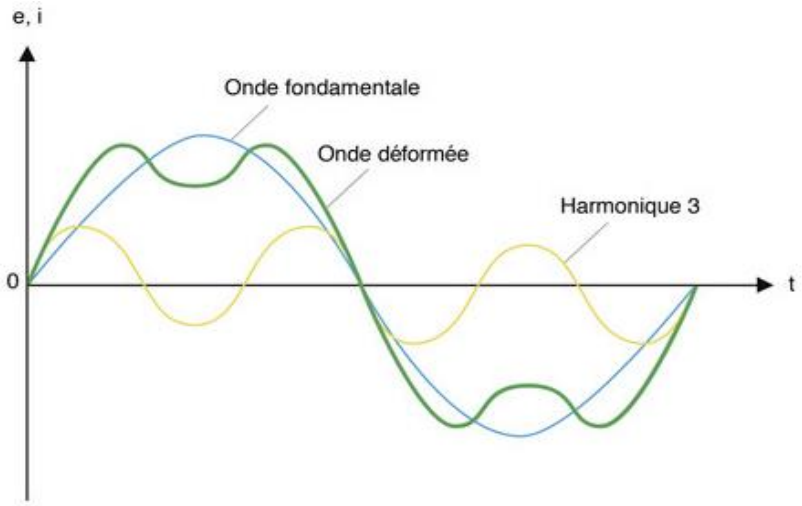


Figure 2.3: Forme d'onde avec composantes harmoniques symétriques.

Ici, la troisième harmonique aura une fréquence de trois fois soit 150 Hz. Les ondes symétriques ne contiennent que des harmoniques impaires et les ondes non symétriques contiennent des 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 non symétrique 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 non symétrique est un redresseur demi-onde. [1]

Dans le système électrique, la plupart des éléments sont symétriques. Ils ne produisent que des harmoniques impaires. Les fours à arc sont une source courante d'harmoniques pairs, mais ils sont connus pour produire des harmoniques pairs et impairs à différentes étapes du processus. [8]

2.1.2 Flux de courant harmonique:

À partir de la figure 2.4, on peut constater que lorsqu'une charge non linéaire consomme du courant, ce courant passe à travers toute l'impédance située entre la charge et la source du système. En conséquence du flux de courant, des tensions harmoniques sont produites par l'impédance du système pour chaque harmonique.[1]

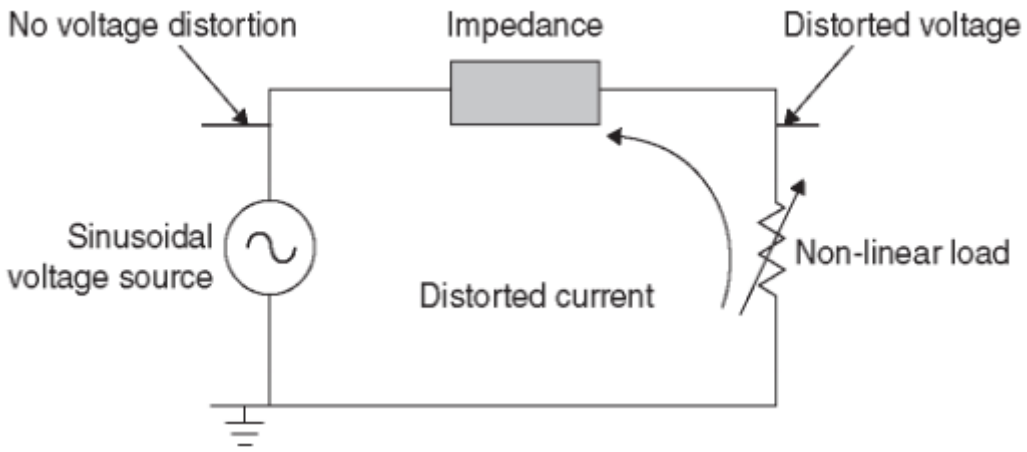


Figure 2.4: Distorsion de tension induite par le courant déformé.

L'amplitude de la distorsion de tension dépend de l'impédance de la source et des tensions harmoniques produites par le réseau électrique. Si l'impédance de la source est faible, la distorsion de tension sera faible. Si une partie importante de la charge devient non linéaire (augmentation des courants harmoniques) et/ou lorsqu'une condition de résonance prévaut (augmentation de l'impédance du système), la tension peut augmenter considérablement. [1, 6]

En conclusion, on peut dire que les courants harmoniques peuvent avoir un impact significatif sur les réseaux électrique de distribution et les installations qu'ils alimentent. L'augmentation de la production d'énergie renouvelable créera un impact majeur sur le réseau électrique. Une analyse harmonique du réseau électrique nécessaire pour améliorer la qualité de l'alimentation en installant des dispositifs appropriés. De plus, l'identification de la taille et de l'emplacement des charges non linéaires devrait être une partie importante de tout programme de maintenance, de dépannage et de réparation.

L'élimination des harmoniques dans un système électrique est un défi important pour assurer un fonctionnement optimal et réduire les effets indésirables des harmoniques sur les équipements électriques et les réseaux.

2.1.3 Élimination des harmoniques :

Il eiste différentes stratégies et techniques pour l'élimination des harmoniques, notamment :

- **Filtrage passif :** L'utilisation de filtres passifs, tels que des filtres LC (inductance-capacité) ou des filtres LCL (inductance-capacité-inductance), permet de réduire les harmoniques en fournissant un chemin alternatif pour les courants harmoniques.[3]
- **Filtrage actif :** Les filtres actifs sont utilisés pour compenser spécifiquement les harmoniques présents dans le système électrique. Ces filtres génèrent des courants de même amplitude mais de phase opposée aux courants harmoniques, annulant ainsi les harmoniques indésirables.
- **Utilisation de transformateurs spéciaux :** Certains transformateurs spéciaux, tels que les transformateurs zigzag, peuvent réduire les courants harmoniques dans le système en fournissant un chemin de retour pour les courants harmoniques.
- **Optimisation de la conception du système :** Une conception appropriée du système électrique, en minimisant les longueurs de câbles, en utilisant des câbles de section adéquate et en évitant les configurations susceptibles de créer des résonances, peut contribuer à réduire les harmoniques.
- **Utilisation de convertisseurs de puissance à faible distorsion harmonique :** Les convertisseurs de puissance tels que les onduleurs et les variateurs de vitesse à faible distorsion harmonique peuvent réduire la génération d'harmoniques dans le système.
- **Gestion des charges non linéaires :** Une gestion efficace des charges non linéaires, telles que l'utilisation de filtres intégrés, de régulateurs de facteur de puissance et de contrôles avancés, peut réduire les harmoniques générés par ces charges.

Il est important de noter que l'élimination complète des harmoniques peut être difficile à atteindre, mais en adoptant une combinaison appropriée de ces techniques, il est possible de réduire efficacement les harmoniques et de maintenir un fonctionnement harmonieux du système électrique. Une analyse préalable du système, incluant la détection et la mesure des harmoniques, est essentielle pour déterminer les mesures d'élimination appropriées à mettre en œuvre.

2.1.4 Besoin de filtres :

Les filtres sont nécessaires dans diverses situations où il y a une présence d'harmoniques indésirables dans un système électrique. Voici quelques besoins courants qui nécessitent l'utilisation de filtres :

- **Réduction des harmoniques :** Lorsque des charges non linéaires sont présentes dans le système électrique, elles génèrent des courants harmoniques qui peuvent perturber le fonctionnement normal du système. Les filtres sont utilisés pour réduire ou éliminer ces harmoniques, ce qui permet d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique.
- **Correction du facteur de puissance :** Les charges non linéaires peuvent entraîner un faible facteur de puissance, ce qui peut causer des pertes d'énergie et des inefficacités dans le système. Les filtres peuvent être utilisés pour corriger le facteur de puissance en réduisant les courants harmoniques et en améliorant ainsi l'efficacité du système.
- **Protection des équipements :** Les harmoniques peuvent avoir un impact néfaste sur les équipements électriques sensibles tels que les transformateurs, les moteurs et les condensateurs. Les filtres sont utilisés pour protéger ces équipements en réduisant les niveaux d'harmoniques et en évitant ainsi les dommages et les défaillances prématurées.
- **Conformité aux normes :** Dans de nombreux pays, il existe des normes réglementaires concernant les niveaux d'harmoniques acceptables dans le réseau électrique. Les filtres sont utilisés pour garantir la conformité à ces normes en réduisant les niveaux d'harmoniques à des valeurs acceptables.
- **Élimination des résonances :** Les systèmes électriques peuvent être sujets à des phénomènes de résonance entre les harmoniques présents dans le système et les caractéristiques électriques des équipements. Les filtres sont utilisés pour éliminer ces résonances et prévenir les problèmes associés tels que les surtensions et les surintensités.[3]

2.1.5 Types de filtres:

Filtrage passif

Le filtrage passif est basé sur l'utilisation de circuits électriques RLC (résistance, inductance, capacité) dit filtre passif, dont le principe est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dévier les courants et à éliminer les tensions harmoniques. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. Donc avant le choix des éléments constituant le filtre passif et leur dimensionnement, une connaissance précise des rangs harmoniques qui devront être filtrés et des atténuations requises est nécessaire car plusieurs types de filtres passifs sont utilisés pour différentes dépollutions à réaliser [9]

2.1.6 Types des filtres passifs :

a- Inductance anti-harmonique

Cette première solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée.

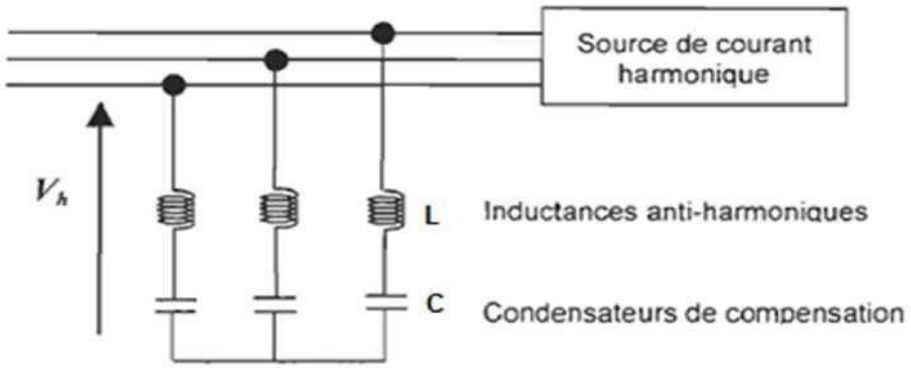


Figure 2.5: Raccordement d'inductances anti-harmonique.

Ce type de filtre a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques. Il a en outre pour effet de réduire les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Il permet souvent de réduire les valeurs

d'impédance harmonique du réseau, vues du point d'injection au voisinage de la fréquence d'accord et donc les tensions harmoniques sur le réseau.

La fréquence de résonance du filtre est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \textit{(II.1)}$$

La fréquence d'anti-résonance far est obtenue lorsque l'impédance équivalente à Lc en parallèle à L, C tend vers l'infini :

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L_{cc})c}} \qquad \textit{(II.2)}$$

Pour éviter que ce filtre présente une résonance parallèle (anti-résonance) avec l'inductance du réseau sur lequel ils sont raccordés, on les accorde sur une fréquence inférieure à celle de la première injection de courant harmonique. A noter aussi que l'installation d'inductances anti-harmoniques accroît la tension permanente à la fréquence fondamentale aux bornes des condensateurs qui doivent donc être dimensionnés en conséquence [10].

b- Filtre passif résonant :

Un filtre passif résonant est un circuit RLC en série, accordé à la fréquence d'une harmonique généralement d'un rang inférieur. Le principe des filtres résonnants et de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique d'un rang déterminé. On installe très souvent plusieurs filtres résonants en parallèle, correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer.

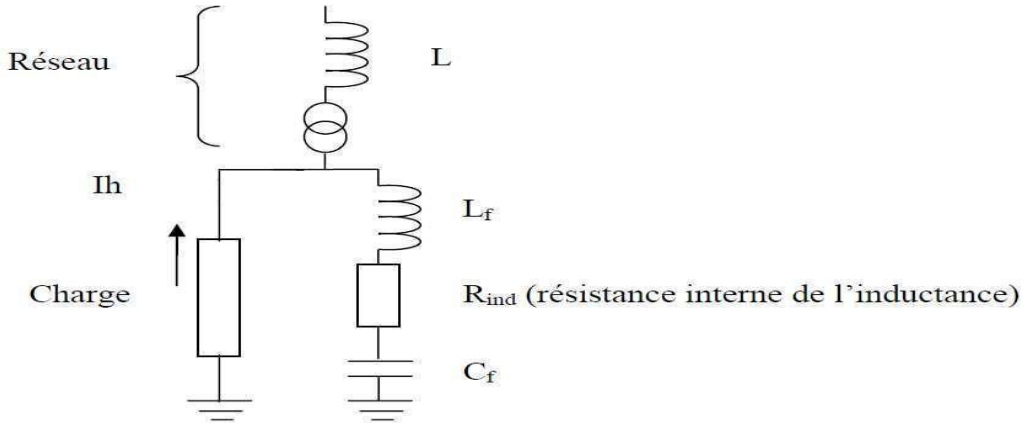


Figure 2.6: Filtre passif résonant.

L'impédance du filtre passif résonant est donnée par l'expression suivante :

$$\boldsymbol{Z = R + \frac{LCW^2 - 1}{CW}} \qquad \textit{(II.3)}$$

La fréquence de résonance du filtre est donnée par :

$$\boldsymbol{f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}} \qquad \textit{(II.4)}$$

A la fréquence de résonance l'impédance du filtre est réduite à $\mathbf{Z = R}$ [11]

La fréquence d'anti-résonance far est obtenue lorsque l'impédance équivalente à Lcc

en parallèle à L , C tend vers l'infini :

$$\boldsymbol{f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L_{cc})C}}} \qquad \textit{(II.5)}$$

L'inductance du shunt possède par nature une résistance R(résistance de la bobine). On définit alors le facteur de qualité

$$\boldsymbol{Q = \frac{Lw_0}{R} = \frac{1}{RCw_0} = \frac{1}{R} \times \sqrt{\frac{L}{C}}}$$

(II.6)

a- Filtre passif amorti :

Le filtre passif amorti est un circuit RLC constitué par la mise en série d'une capacité avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une résistance dite résistance d'amortissement et d'une inductance.

On utilise les filtres amortis pour filtrer simultanément des harmoniques du rang supérieur, et non une harmonique d'un rang particulier. Il est recommandé lorsque les performances demandées ne sont trop élevées. On l'appelle aussi un filtre passe haut.

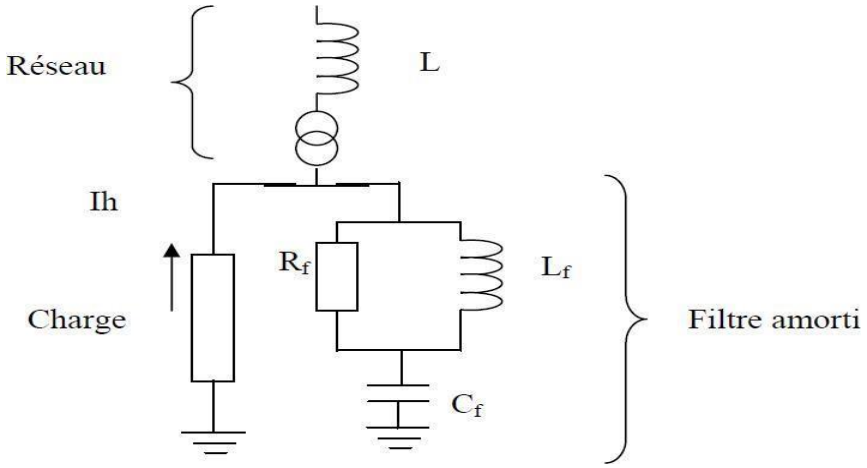


Figure 2.7: Filtre passif amorti de 2éNe ordre.

Après quelques calculs, on montre que la fréquence de résonance de ce filtre est :

$$f_r = \frac{1+qQ_f}{2\pi q\sqrt{LCf(Q^2-1)}} \qquad (II.7)$$

Qf : est le facteur de qualité du filtre.

$$Q_f = \frac{1}{rf}\frac{\sqrt{Lf}}{Cf} \qquad (II.8)$$



- (A) filtre amorti de 1er ordre - (B) filtre amorti de 3ème ordre

Figure 2.8: Autres types de filtre passif amorti.

Le filtre amorti est moins sensible aux variations de ses éléments qu'un filtre résonant. L'utilisation des filtres amortis rend nécessaire le filtrage des rangs harmoniques inférieurs à f_r. D'ailleurs lors du choix des filtres, très souvent plusieurs filtres résonants pour les rangs harmoniques inférieurs et un filtre amorti sont utilisés, tous montés en parallèle avec la charge polluante [11].

2.1.7 Avantages et inconvénients des filtres passifs :

a- Avantages des filtres passifs :

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance.

Les filtres amortis offrent plusieurs avantages :

- Leurs performances sont moins sensibles aux variations de température, aux déviations de fréquence, aux tolérances des composantes, etc.
- Ils présentent une faible valeur d'impédance pour une large gamme de fréquences harmoniques.
- L'usage de multiples filtres résonants peut provoquer des résonances parallèles

entre les filtres et l'admittance du réseau. Dans ce cas, l'usage d'un ou de plusieurs filtres amortis est préférable [12].

b- Inconvénients des filtres passifs :

- Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre.
- Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance ou de la capacité ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble [11].
- Les pertes dans la résistance sont généralement élevées.
- Le filtre de premier ordre n'est pas très utilisé, car il exige une grande capacité et présente une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale.
- Le filtre de second ordre fournit de meilleures performances de filtrage, mais avec des pertes plus élevées à la fréquence fondamentale que le filtre de troisième ordre [12].
- Lorsqu'il y a plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs correspondants.

Filtrage actif

Les filtres actifs sont des convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur) associes a un dispositif de contrôle adapte. Ils sont assimilables à des sources de courant ou de tension qui éliminent directement les perturbations harmoniques en injectant sur le réseau des courants ou des tensions en oppositions par rapport aux perturbations existantes [14].

Filtres actif parallèle (FAP) :

Le filtre actif connecte en parallele sur le reseau, comme le montre la figure (2.9), est le plus souvent commande comme un generateur de courant. Il injecte dans le reseau des courants perturbateurs egaux a ceux absorbes par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant cote reseau est alors sinusoidal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallele (FAP) consiste a empecher les courants perturbateurs, produits par des charges polluantes, de circuler a travers l'impedance du reseau, situee en amont du point de connexion du filtre actif [15].

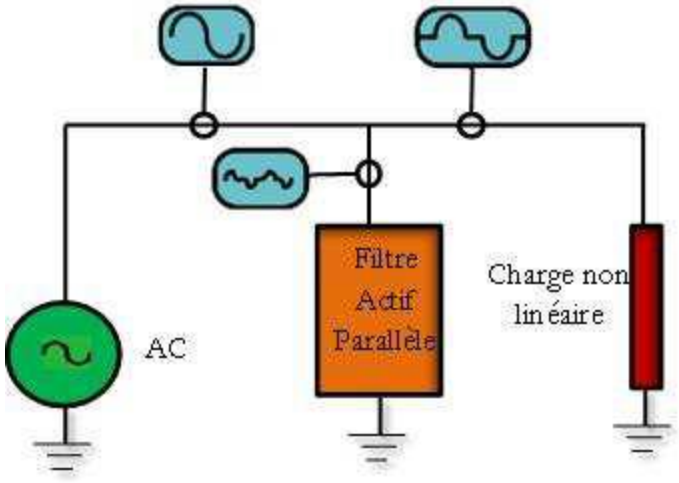


Figure 2.9: Schema de principe du filtrage actif parallele

Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif serie se comporte dans ce cas, comme le montre la figure 2.10, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices venant de la source et egalement a celles provoquees par la circulation des courants perturbateurs a travers l'impedance du reseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge a proteger est purement sinusoidale [15].

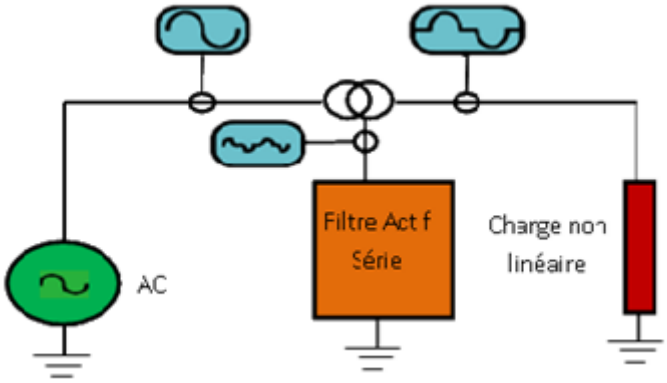


Figure 2.10: Schéma de principe du filtrage actif série

Filtrage à structure hybride

Le filtre hybride est l'association de filtre(s) passif(s) avec filtre actif. Les filtres passifs sont chargés pour éliminer les harmoniques de rangs élevés, tandis que le filtre actif s'occupe des autres rangs d'harmonique. On distingue alors plusieurs types d'association de filtres actifs et passifs, les plus étudiées étant :

- ❖ Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles ;
- ❖ Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles ;

- ❖ Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

Les figures 2.11 à 4.13 montrent la configuration de chaque un de ces types.

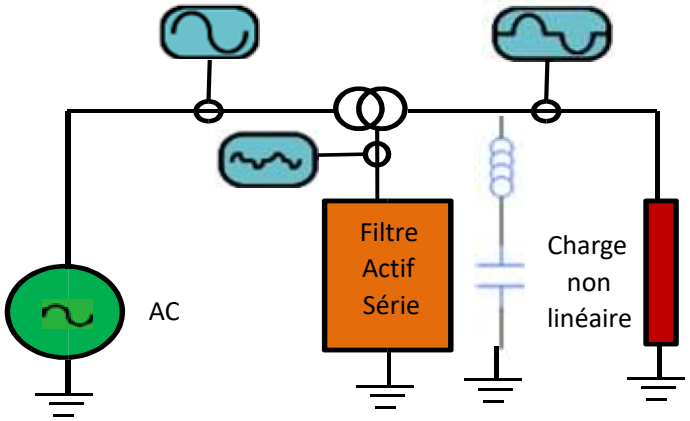


Figure 2.11 : Filtre active serie et filtre passif parallele.

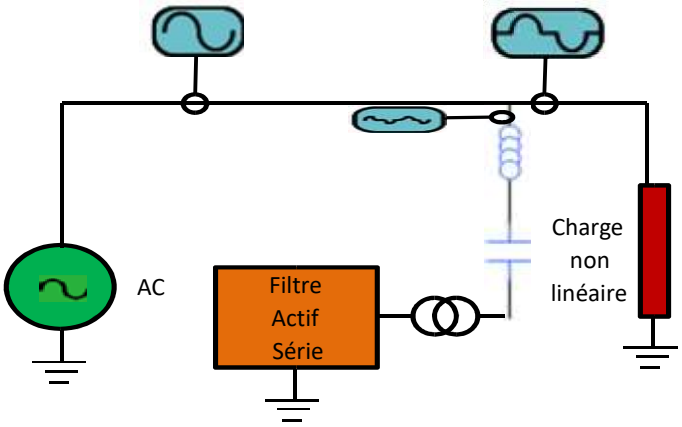


Figure 2.12: Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

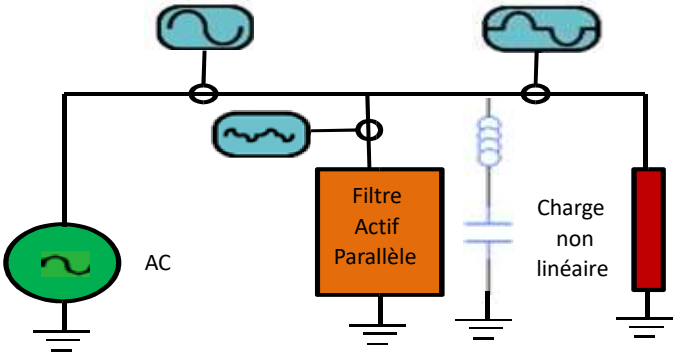


Figure 2.13: Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle

Filtre universel

La combinaison parallèle-série des filtres actifs, aussi appelée, en anglais, Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série profitant des avantages des deux. L'UPQC assure la forme d'onde sinusoïdale pour le courant et de même pour la tension [13].

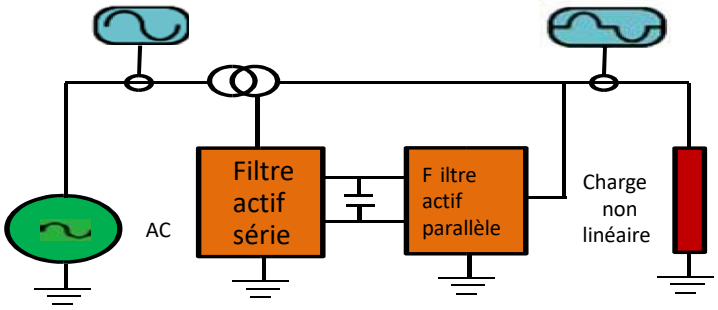


Figure 2.14: Combinaison parallèle-série des filtres actifs

Dans le cas où **Gh/Sn** > 60 %, le calcul et l'installation de filtre d'harmonique doivent être réalisés par des spécialistes (**Tab II. 1)**

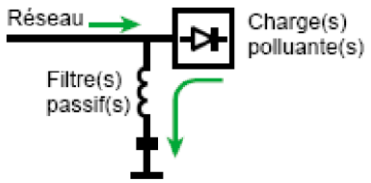
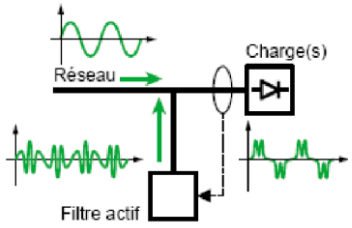
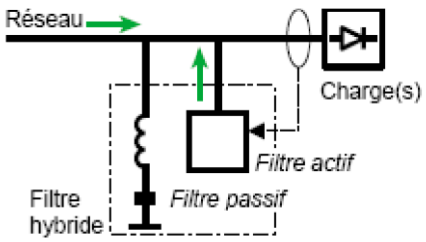
filtre	principe	caractéristiques
passif	Dérivation par un circuit LC accordé sur chaque fréquence harmonique à éliminer. 	✓ Pas de limites en courant harmonique. ✓ Compensation d'énergie réactive assurée. ✓ Elimination d'un ou plusieurs rangs harmoniques (habituellement : 5, 7, 11). Un filtre pour un ou deux rangs à compenser. ✓ Risque d'amplification des harmoniques en cas de modification du réseau. ✓ Risque de surcharge par pollution extérieure.
actif	Génération d'un courant annulant tous les harmoniques créés par la charge. 	✓ solution bien adaptée au filtrage « machine » (local) ✓ Filtrage sur une large bande de fréquence (élimination des harmoniques des rangs 2 à 25). ✓ modification du réseau sans influence, s'adapte à toutes variations de charge et de spectre harmonique. ✓ solution évolutive et souple en fonction de chaque type de charge.
hybride		✓ Cumule les avantages des solutions filtrage passif et actif et couvre un large domaine de puissance et de performances : ✓ Filtrage sur une large bande de fréquences (élimination des harmoniques de rangs 2 à 25). ✓ Compensation d'énergie réactive. ✓ Grande capacité de filtrage en courant.

Table (2. 1) : principes et caractéristiques du filtrage passif, actif, hybride.

2.2 Logiciel ETAP en général

ETAP propose une suite de solutions logicielles entièrement intégrées en génie électrique. Sa fonctionnalité modulaire peut être adaptée aux besoins de toute entreprise, des systèmes de petite taille aux systèmes de grande envergure. Pour effectuer une analyse harmonique, le logiciel ETAP est choisi pour le projet. Ce logiciel convivial permet de modéliser facilement les sources harmoniques. ETAP peut également effectuer d'autres types d'analyses comme indiqué ci-dessous.[8]

- **Types d'analyses que peut effectuer ETAP :**

- ✓ Analyse de stabilité transitoire
- ✓ Analyse du flux de charge
- ✓ Analyse du déséquilibre du flux de charge
- ✓ Analyse des courts-circuits
- ✓ Analyse de l'accélération du moteur
- ✓ **Analyse harmonique**
- ✓ Coordination des dispositifs de protection en étoile
- ✓ Analyse de la puissance optimale
- ✓ Évaluation de la fiabilité
- ✓ Analyse du flux de charge en courant continu
- ✓ Dimensionnement de la décharge de la batterie [8]

ETAP est en effet un logiciel d'analyse de système d'alimentation électrique AC (courant alternatif) et DC (courant continu) entièrement intégré. Il est utilisé par de nombreuses entreprises et services publics d'électricité à travers le monde pour la conception, l'analyse, la maintenance et l'exploitation des systèmes d'alimentation électrique.

Une caractéristique clé d'ETAP est son système de base de données centralisé. Toutes les analyses effectuées à l'aide du logiciel sont stockées dans cette base de données centralisée. Cela permet de conserver un enregistrement précis de toutes les études réalisées, des résultats obtenus et des données du système électrique. L'accès à ces données peut être facilité en utilisant Microsoft Accès, ce qui permet d'extraire facilement les informations nécessaires pour des analyses ultérieures ou des rapports.[7]

ETAP propose également un module appelé "ETAP Real-Time" qui est une suite de logiciels permettant la surveillance continue, la simulation et l'optimisation des systèmes électriques, des processus de fabrication et de gestion en temps réel. En utilisant ETAP Real-Time, les

utilisateurs peuvent surveiller en temps réel les performances du système électrique, simuler des scénarios pour évaluer les impacts des changements ou des événements futurs, et optimiser les opérations pour maximiser l'efficacité, réduire les pertes et augmenter les bénéfices.[7]

En résumé, ETAP est un logiciel puissant et polyvalent utilisé dans le domaine de l'énergie électrique pour la conception, l'analyse et la gestion des systèmes d'alimentation électrique. Son système de base de données centralisé et son module Real-Time en font un outil complet pour les ingénieurs travaillant sur les réseaux électriques.

La coordination des appareils ETAP Star est une approche novatrice pour réaliser la coordination des appareils, la sélectivité de la protection et les tests dans les régimes permanents et dynamiques. Elle tire parti de schémas unifilaires intelligents, de bibliothèques de dispositifs étendues et d'une base de données tridimensionnelle intégrée.

Le système ETAP Automatic Relay Testing and Transient Simulator (ARTTS) est un composant clé de cette approche. Il regroupe trois dispositifs de test de haute précision en un seul ensemble. ARTTS permet de tester différents types de relais de protection, tels que les relais de distance, ainsi que les compteurs d'énergie et les transducteurs. L'utilisation d'ARTTS offre la possibilité de réaliser des tests précis, de simuler des conditions transitoires et de calibrer les relais.

Les outils de système d'alimentation ARTTS utilisent des technologies matérielles et logicielles avancées pour effectuer ces tests et simulations. Ils permettent de comparer la réponse réelle des relais testés avec les données publiées par le fabricant. Cette comparaison aide à évaluer les performances des relais, à détecter d'éventuels problèmes de coordination ou de sélectivité, et à garantir le bon fonctionnement du système de protection.[7]

En résumé, la coordination des appareils ETAP Star repose sur l'utilisation de schémas unifilaires intelligents, de bibliothèques de dispositifs étendues et d'une base de données tridimensionnelle intégrée pour réaliser la coordination des appareils, la protection de la sélectivité et les tests. Le système ARTTS, quant à lui, fournit des fonctionnalités avancées de test, de simulation et de calibrage des relais de protection, des compteurs d'énergie et des transducteurs.

Le module Ground Grid Systems dans ETAP permet aux ingénieurs de concevoir et d'analyser efficacement la protection du sol dans les systèmes électriques. Il utilise une technologie

avancée en 3D qui s'intègre aux schémas unifilaires, ce qui permet aux ingénieurs de visualiser les systèmes de mise à la terre et d'utiliser les résultats des analyses de court-circuit de manière transparente.

ETAP intègre également l'analyse des circuits de puissance et de contrôle dans un seul programme d'analyse électrique. Le diagramme du système de contrôle (CSD) permet de simuler la séquence d'opération des dispositifs de contrôle tels que les solénoïdes, les relais, les contacts contrôlés, les contacts multi-séquences et les actionneurs, y compris les conditions d'appel. Le CSD peut déterminer les tensions d'activation et de désactivation, les pertes et les flux de courant à tout moment, ainsi que les alertes globales marginales et critiques. Une vaste bibliothèque d'équipements est disponible pour modéliser et simuler rapidement l'action des relais associés aux verrouillages de contrôle après des délais spécifiques.[7]

ETAP propose une interface utilisateur graphique conviviale, qui est appréciée par de nombreux ingénieurs électriciens. Le module ETAP GIS Map permet de superposer les schémas électriques unifilaires avec les cartes géographiques associées aux systèmes de production, de transmission et de distribution d'électricité. Cela permet de synchroniser les informations pertinentes sur les équipements électriques provenant des systèmes d'information géographique (SIG) dans ETAP, tout en maintenant leur relation. De plus, les systèmes de panneaux peuvent également être inclus avec les schémas unifilaires, ce qui constitue une autre fonctionnalité unique d'ETAP.[7]

ETAP offre également une grande flexibilité en termes de modélisation des appareils électriques utilisés dans les systèmes électriques réels. La plupart des appareils peuvent être facilement modélisés dans ETAP, ce qui facilite l'analyse et la simulation précises des systèmes électriques.

2.2.1 Module Analyse Harmonique :

Un module d'analyse harmonique est un outil utilisé pour évaluer les effets des harmoniques dans un réseau électrique. Les harmoniques sont des composantes sinusoïdales supplémentaires présentes dans le courant ou la tension d'un système électrique, en plus de la fréquence fondamentale. Ces harmoniques sont généralement causés par des charges non linéaires telles que les convertisseurs de puissance, les variateurs de vitesse, les onduleurs, etc.

L'analyse harmonique est importante car les harmoniques peuvent causer des problèmes tels que des pertes d'énergie, des surcharges des équipements, des distorsions du courant et de la tension, des interférences électromagnétiques, etc. Les modules d'analyse harmonique permettent aux ingénieurs de simuler et d'analyser ces effets pour prendre des mesures appropriées afin de les atténuer.

Il existe au total 13 modes d'étude dans ETAP, comme illustré dans la Figure 2-12. Chacun d'entre eux est brièvement décrit dans l'ordre de gauche à droite :

Load Flow (Écoulement de charge) : Utilisé pour effectuer un écoulement de charge (ou flux de puissance) sur le système électrique modélisé dans le schéma unifilaire.

Unbalanced Load Flow (Écoulement de charge déséquilibré) : Utilisé pour effectuer un écoulement de charge déséquilibré sur le système électrique.

ANSI Short Circuit Analysis (Analyse des courts-circuits selon les normes ANSI) : Utilisé pour effectuer une analyse des courts-circuits selon les normes ANSI.

Motor Starting Analysis (Analyse du démarrage des moteurs) : Utilisé pour analyser le démarrage des moteurs électriques.

Harmonic Analysis (Analyse harmonique) : Utilisé pour effectuer une analyse harmonique sur le système électrique.

Transient Analysis (Analyse transitoire) : Utilisé pour effectuer une analyse transitoire sur le système électrique.

Star Protection Coordination (Coordination de protection en étoile) : Utilisé pour coordonner la protection en régime permanent et dynamique du système électrique.

Optimal Load Flow (Écoulement de charge optimal) : Utilisé pour optimiser l'écoulement de charge dans le système électrique.

Reliability Analysis (Analyse de fiabilité) : Utilisé pour effectuer une analyse de fiabilité du système électrique.

Optimal Capacitor Placement (Placement optimal des condensateurs) : Utilisé pour optimiser le placement des condensateurs dans le système électrique.

DC Load Flow (Écoulement de charge en courant continu) : Utilisé pour effectuer un écoulement de charge en courant continu sur le système électrique.

DC Short Circuit Analysis (Analyse des courts-circuits en courant continu) : Utilisé pour effectuer une analyse des courts-circuits en courant continu.

Battery Sizing Analysis (Analyse de dimensionnement des batteries) : Utilisé pour analyser le dimensionnement des batteries dans le système électrique.

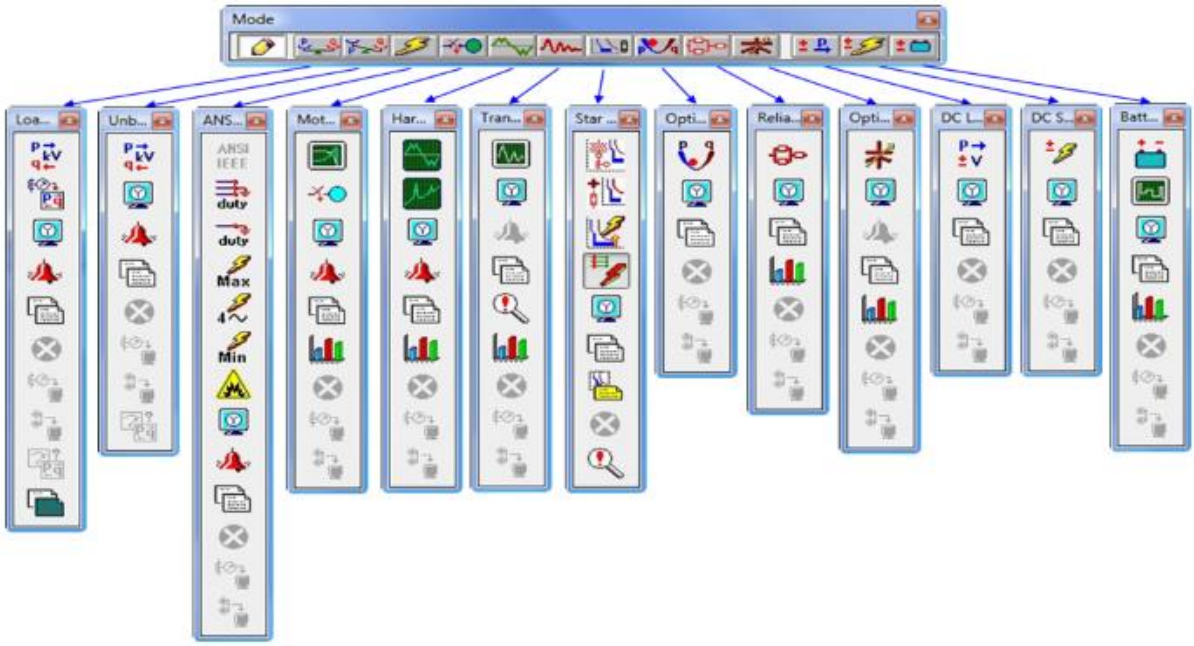


Figure 2.15: Barres d'outils du mode ETAP pour diverses analyses du système électrique.

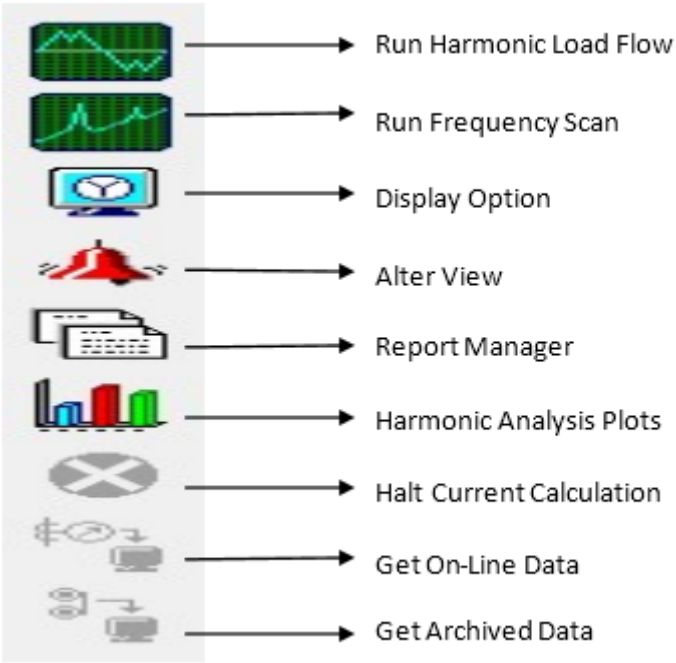


Figure 2.16: Harmonic Analysis Tool Bar

Barre d'outils de l'analyse harmonique :

Run Harmonic Load Flow (Lancer l'écoulement de charge harmonique) : Cette option permet de lancer le calcul de l'écoulement de charge harmonique dans le système électrique.[8]

Run Frequency Scan (Lancer le balayage de fréquence) : Cette option permet d'effectuer un balayage de fréquence pour analyser les harmoniques présentes dans le système électrique sur une plage de fréquences spécifiée.[8]

Display Options (Options d'affichage) : Cette option permet de configurer les paramètres d'affichage des résultats de l'analyse harmonique, tels que l'affichage des valeurs RMS ou des composantes harmoniques individuelles.[8]

Alert View (Affichage des alertes) : Cette option affiche les alertes générées lors de l'analyse harmonique, telles que les dépassements de seuils de distorsion harmonique ou les problèmes de résonance.[8]

Report Manager (Gestionnaire de rapports) : Cette option permet de gérer les rapports générés lors de l'analyse harmonique, tels que leur création, leur visualisation ou leur exportation.[8]

Harmonic Analysis Plots (Graphiques d'analyse harmonique) : Cette option permet d'afficher les graphiques et les résultats des analyses harmoniques, tels que les spectres harmoniques, les diagrammes de distorsion harmonique ou les courbes de réponse en fréquence.

Ces options de la barre d'outils de l'analyse harmonique offrent des fonctionnalités spécifiques pour l'exécution, l'affichage et la gestion des résultats de l'analyse harmonique dans ETAP.[8]

Halt Current Calculation (Calcul d'interruption de courant) : Cette option permet de calculer la valeur maximale de courant que le système de protection doit pouvoir interrompre afin d'assurer la sécurité du système électrique.[8]

Get Online Data (Obtenir les données en ligne) : Cette option permet de récupérer les données en temps réel du système électrique, telles que les mesures de courant, de tension, de puissance, etc., à partir des équipements de surveillance en ligne.[8]

Get Archived Data (Obtenir les données archivées) : Cette option permet de récupérer les données archivées du système électrique, qui ont été enregistrées précédemment, telles que les données historiques de consommation d'énergie, les enregistrements de défauts, les événements passés, etc.

Ces options permettent d'accéder et de récupérer les données nécessaires pour les calculs, les analyses et les rapports dans ETAP, que ce soit en temps réel à partir du système en ligne ou à partir de données archivées.[8]

Éditeur de cas d'étude d'analyse harmonique :

L'éditeur de cas d'étude de l'analyse harmonique contient des variables de contrôle de la solution, des conditions de charge et différents types d'options pour les rapports de sortie. ETAP permet à l'utilisateur de créer et de sauvegarder un nombre illimité de cas d'étude. Les calculs d'écoulement de charge sont effectués et rapportés en fonction des paramètres du cas d'étude sélectionné dans la barre d'outils. L'utilisateur peut facilement basculer entre les cas d'étude sans avoir à réinitialiser les options du cas d'étude à chaque fois. Cette fonctionnalité unique, que la plupart des autres logiciels n'ont pas, permet de gagner un temps et un effort considérables.

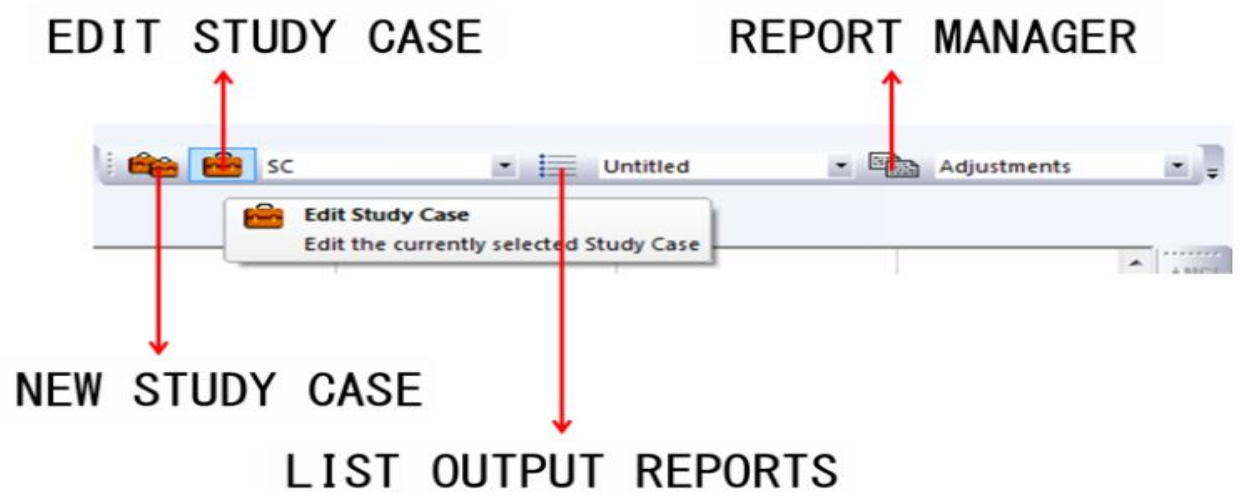


Figure 2.17: Barre d'outils de l'éditeur de cas d'étude.

Pendant le mode d'analyse harmonique, l'utilisateur peut accéder à l'éditeur de cas d'étude d'analyse harmonique en cliquant sur le bouton "Cas d'étude" de la barre d'outils de l'analyse harmonique. Cela permet à l'utilisateur de modifier et de personnaliser les paramètres du cas d'étude spécifiques à l'analyse harmonique en cours.

Dans la barre d'outils des cas d'étude, l'utilisateur peut créer une copie du cas d'étude actuel en cliquant sur le bouton "Nouveau cas d'étude". Cela permet à l'utilisateur de créer une version dupliquée du cas d'étude existant, qui peut ensuite être modifiée selon des besoins particuliers.[8]

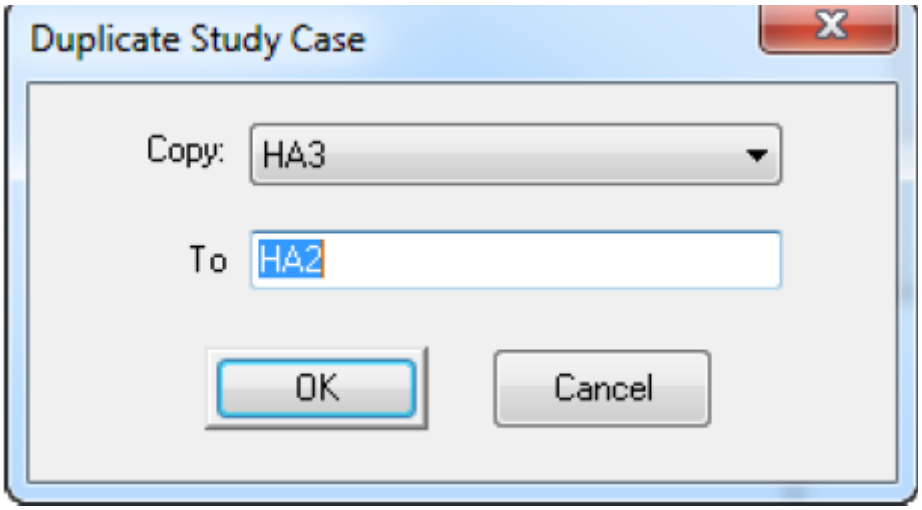


Figure 2.18: Cas d'étude en double

Page Info :

La page Info permet à l'utilisateur de fournir des informations générales sur le cas d'étude, telles que le nom du cas d'étude, une description, des notes et d'autres détails pertinents.

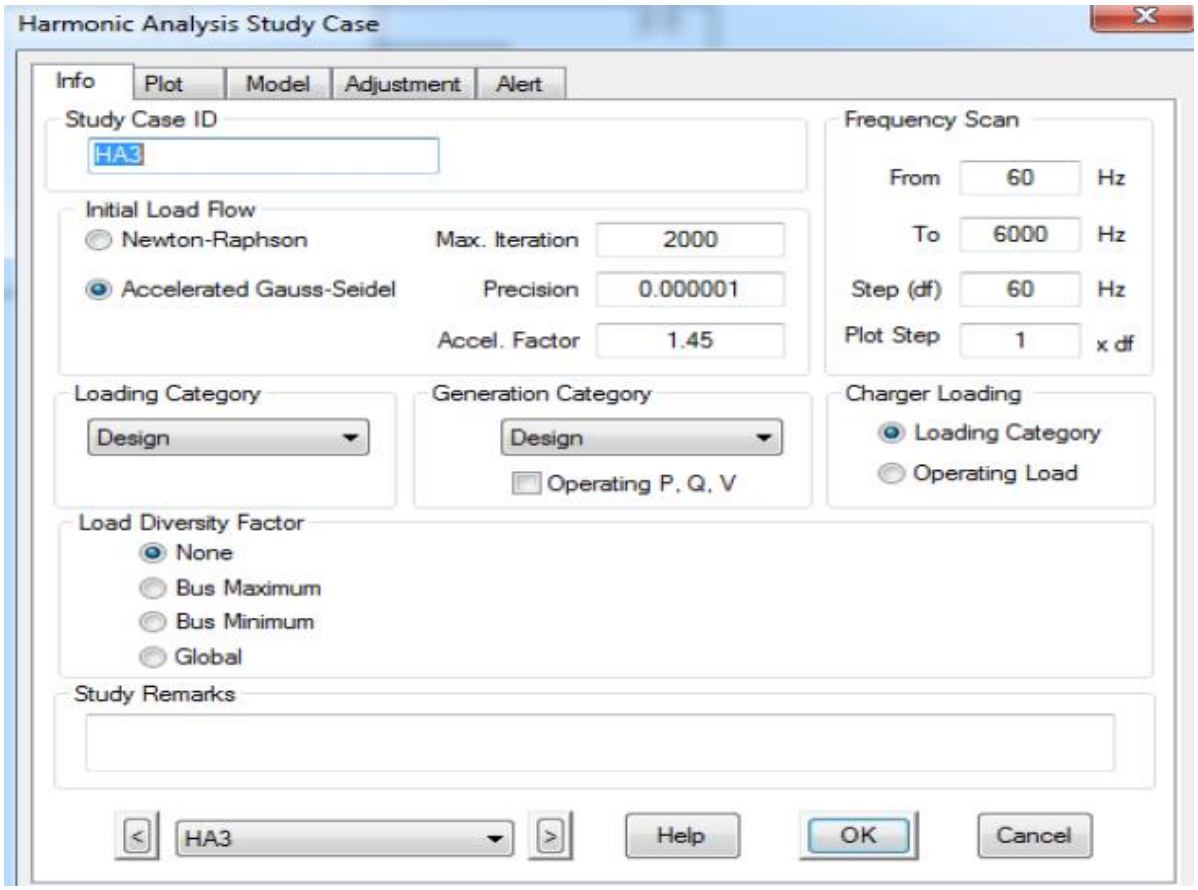


Figure 2.19: Page d'informations de l'éditeur de cas d'étude.

Les méthodes disponibles sont Newton-Raphson et Gauss-Seidel accéléré. La valeur maximale d'itération peut également être saisie selon les besoins de l'utilisateur. Lors de l'utilisation de Gauss-Seidel accéléré, la valeur recommandée et par défaut pour l'itération maximale est de 2000. Lors de l'utilisation de Newton-Raphson, la valeur recommandée et par défaut pour l'itération maximale est de 99. [8]

La section Scan de fréquence est utilisée uniquement pour les calculs de balayage de fréquence harmonique. Les conditions limites et la taille du pas de fréquence peuvent être saisies. La résolution du tracé du balayage de fréquence peut être définie par l'intermédiaire du pas de tracé. Plus la valeur est petite, plus le tracé sera lisse, mais cela nécessitera l'enregistrement de plus de données.[8]

Page Plot :

La page Plot permet à l'utilisateur de configurer les options d'affichage pour les résultats de l'analyse harmonique. Il peut sélectionner les types de tracés souhaités, tels que les spectres harmoniques, les distorsions harmoniques, les courbes de tension, etc.

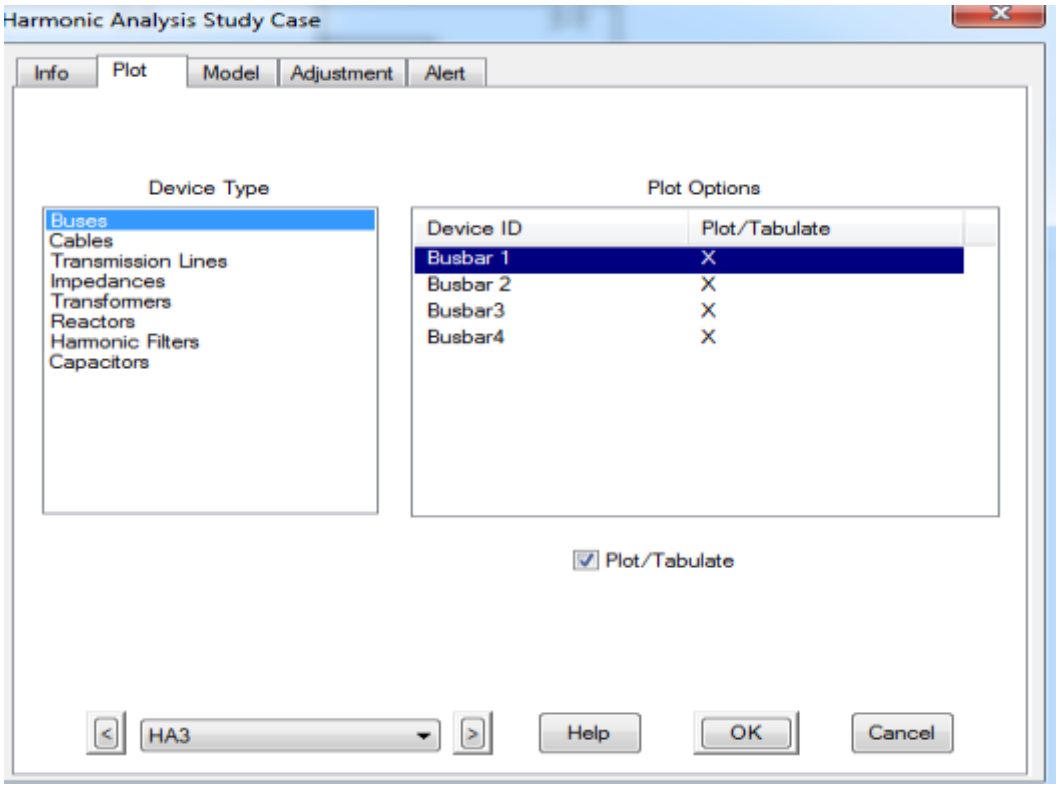


Figure 2.20: Page de tracé de l'éditeur de cas d'étude

Page Model :

La page Model permet à l'utilisateur de sélectionner et de configurer les composants du modèle de système électrique utilisé dans l'analyse harmonique. Il peut choisir les transformateurs, les générateurs, les charges, les câbles et d'autres éléments du système.

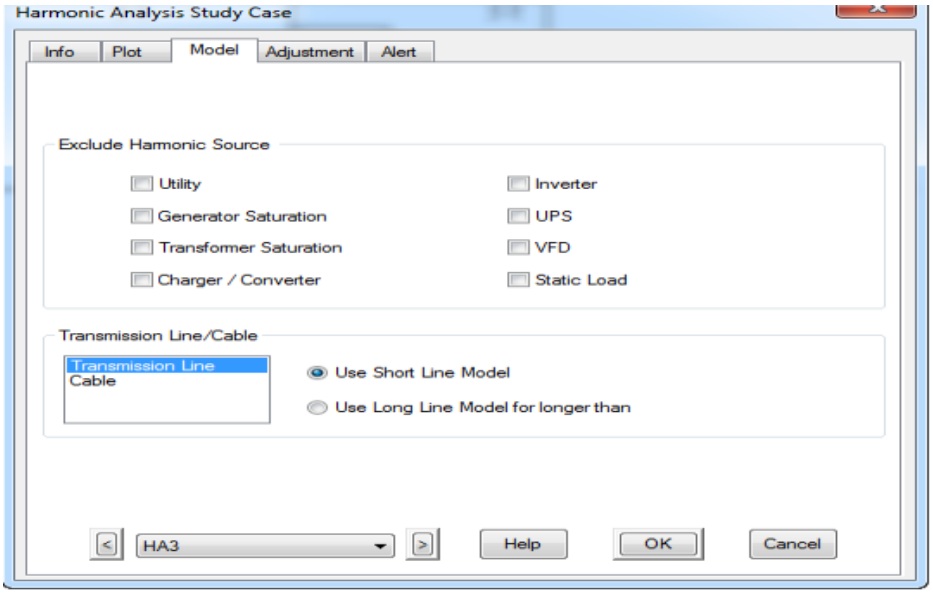


Figure 2.21: Page Modèle de l'éditeur de cas d'étude.

Page d'alerte :

Sur cette page, la distorsion harmonique totale (VTHD) et la distorsion harmonique individuelle (VIHD) peuvent être sélectionnées individuellement ou globalement. Dans tous les cas, si le VIHD et le VTHD dépassent leur limite, une fenêtre d'alerte s'affichera lors de l'exécution d'une étude de flux de charge harmonique. Ces niveaux de VIHD et VTHD sont définis conformément à la norme IEEE519-1992. Des alertes critiques ou marginales seront générées pour le transformateur, le condensateur, le câble et le filtre, si les composants sont soumis à des conditions de surcharge. Le réseau électrique peut être examiné pour toute condition de résonance harmonique en activant l'option de résonance parallèle. Il existe une option d'affichage automatique pour vérifier automatiquement les alertes.

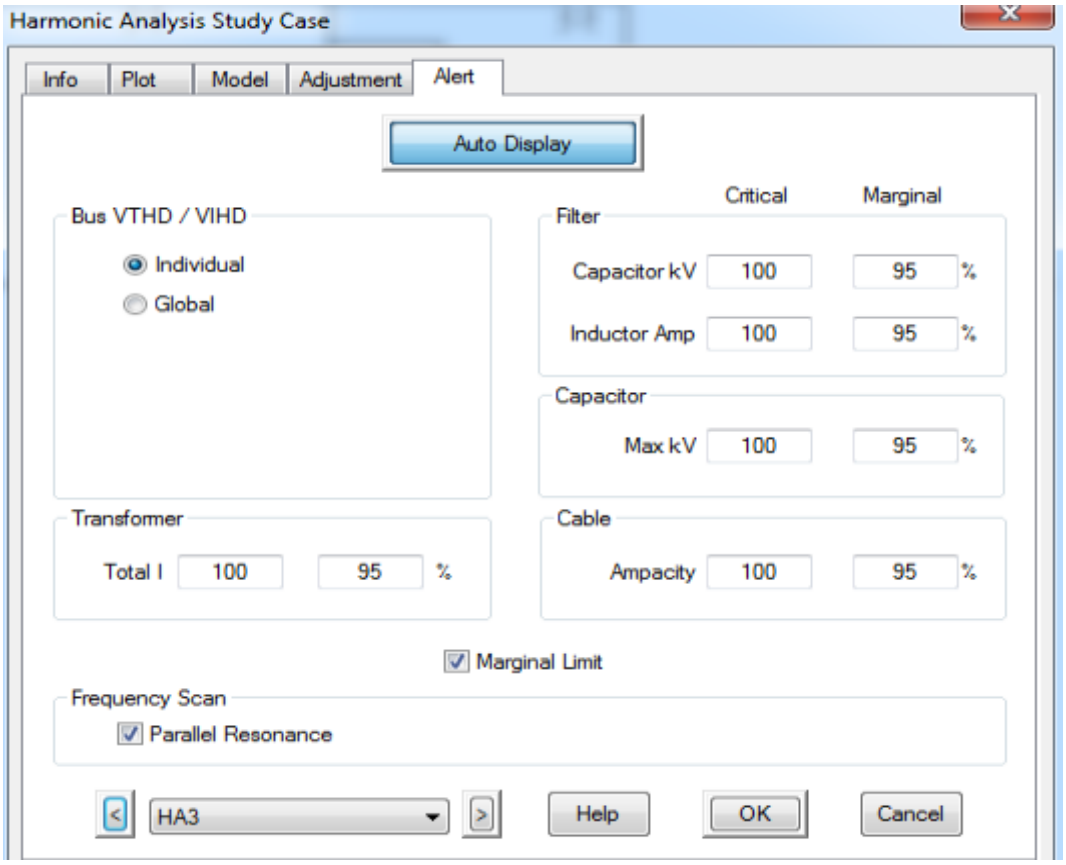


Figure 2.22: Page d'alerte de l'éditeur de cas d'étude

Option d'affichage de l'analyse harmonique :

L'utilisateur peut également personnaliser les options d'affichage de l'analyse harmonique en utilisant les pages de résultats, AC, AC-DC et Couleurs. Les couleurs et les annotations affichées peuvent être sélectionnées pour chaque cas d'étude spécifique. Les options d'affichage permettent de sélectionner les informations de résultat à afficher sur le schéma unifilaire. Par exemple, pour l'analyse harmonique, l'utilisateur peut choisir d'afficher la tension sous forme de tension réelle ou en pourcentage.

En cochant la case du courant de branche, l'utilisateur peut inclure ou exclure l'affichage du courant de branche et d'autres informations sur les lignes pour les calculs de flux de charge harmonique et de balayage de fréquence harmonique. Il est également possible d'afficher les unités sur le schéma unifilaire en cochant la case "Afficher les unités".

Dans le groupe "Harmoniques totales", l'utilisateur peut sélectionner les informations spécifiques à afficher pour les bus et les branches liées à la distorsion harmonique totale. Dans l'option de balayage de fréquence, il est possible d'afficher l'amplitude et l'angle d'impédance sur le schéma unifilaire.

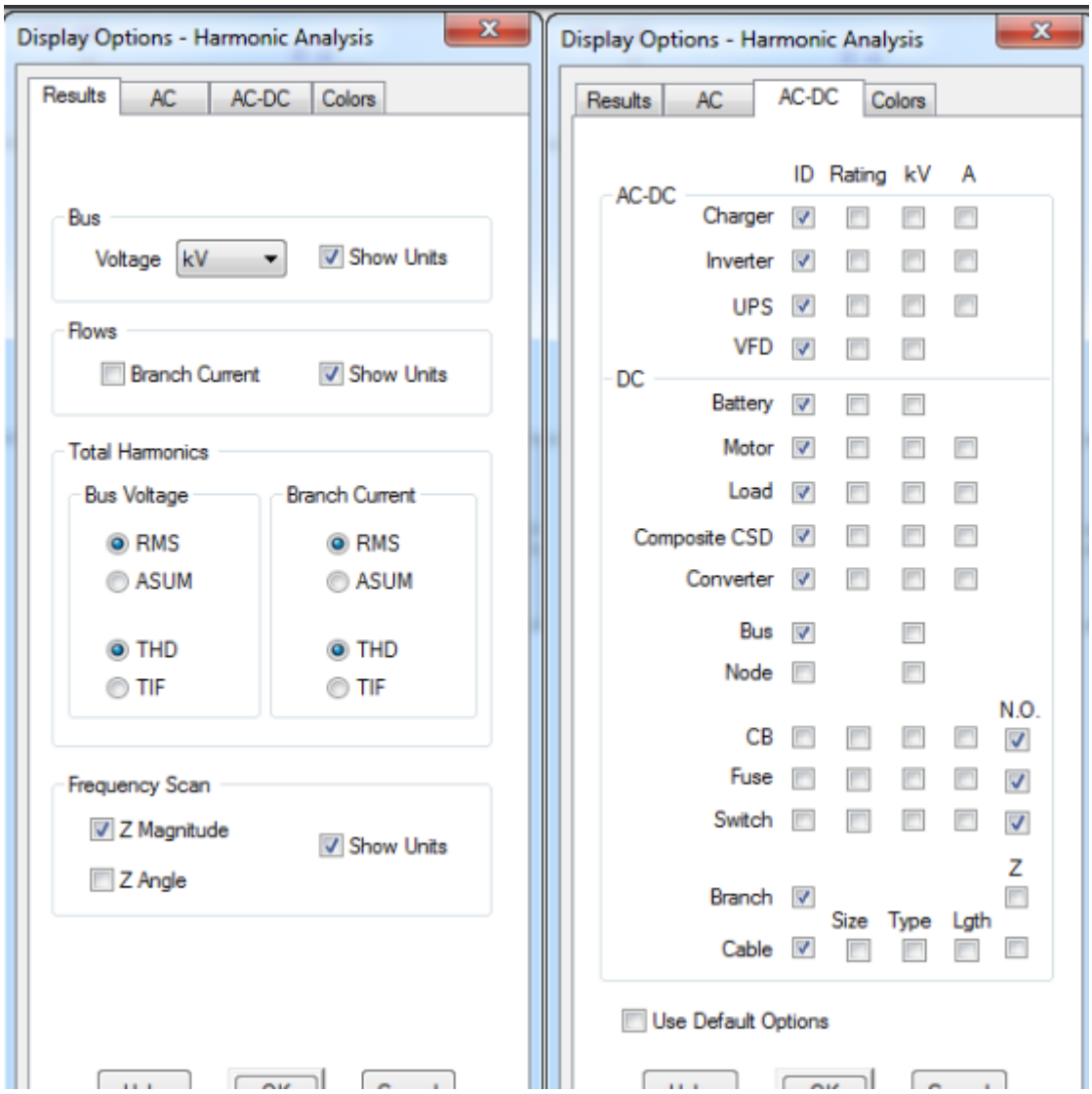


Figure 2.23: Option d'affichage du module d'analyse harmonique.

Curseur d'ordre d'analyse harmonique :

Le curseur d'ordre d'analyse harmonique permet à l'utilisateur de sélectionner l'ordre harmonique spécifique à afficher ou à analyser dans les résultats de l'analyse harmonique. Il permet de choisir un ordre harmonique particulier, tel que le 3e harmonique, le 5e harmonique, etc., afin de se concentrer sur un aspect spécifique de la distorsion harmonique dans le système.[8]

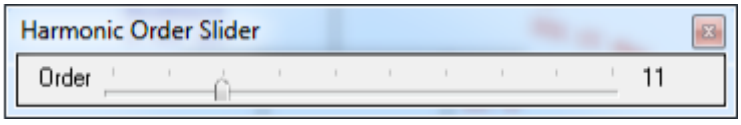


Figure 2.24: Curseur d'ordre de l'analyse harmonique

Curseur de fréquence harmonique :

Le curseur de fréquence harmonique permet à l'utilisateur de sélectionner la fréquence harmonique spécifique à afficher ou à analyser dans les résultats de l'analyse harmonique. Il permet de choisir une fréquence harmonique particulière, telle que 50 Hz, 60 Hz, etc., afin de visualiser les composantes harmoniques à cette fréquence spécifique.[8]

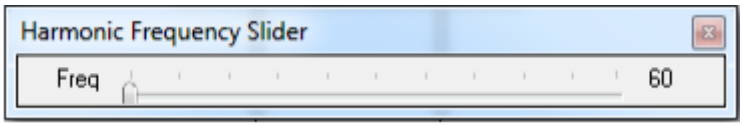


Figure 2.25: Curseur de fréquence harmonique

Rapports de sortie d'analyse harmonique :

Les rapports de sortie d'analyse harmonique sont des documents générés par le logiciel ETAP qui fournissent un résumé des résultats de l'analyse harmonique. Ces rapports peuvent inclure des informations telles que les niveaux harmoniques, les distorsions, les valeurs efficaces, les valeurs limites, les recommandations, etc. Les rapports de sortie permettent de documenter et de partager les résultats de l'analyse harmonique avec d'autres parties prenantes du projet ou de l'étude.

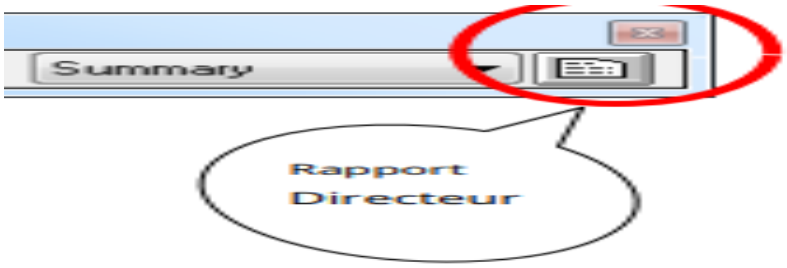


Figure 2.26: Raccourci du gestionnaire de rapports.

Pour accéder au gestionnaire de rapports complet, l'utilisateur peut cliquer sur le bouton "Gestionnaire de rapports" dans la barre d'outils de l'analyse harmonique. Le gestionnaire de rapports harmoniques propose cinq formats de rapport texte : Viewer Crystal Reports, PDF, MS Word, RTF et MS Excel.

Le gestionnaire de rapports harmoniques est composé de quatre pages : Complet, Entrée, Résultat et Résumé. Dans le rapport "Complet", l'utilisateur peut visualiser tous les résultats de l'analyse harmonique. Le rapport "Entrée" fournit les formats des différentes données

d'entrée utilisées. La page "Résultat" présente les formats des différents résultats de calcul obtenus.

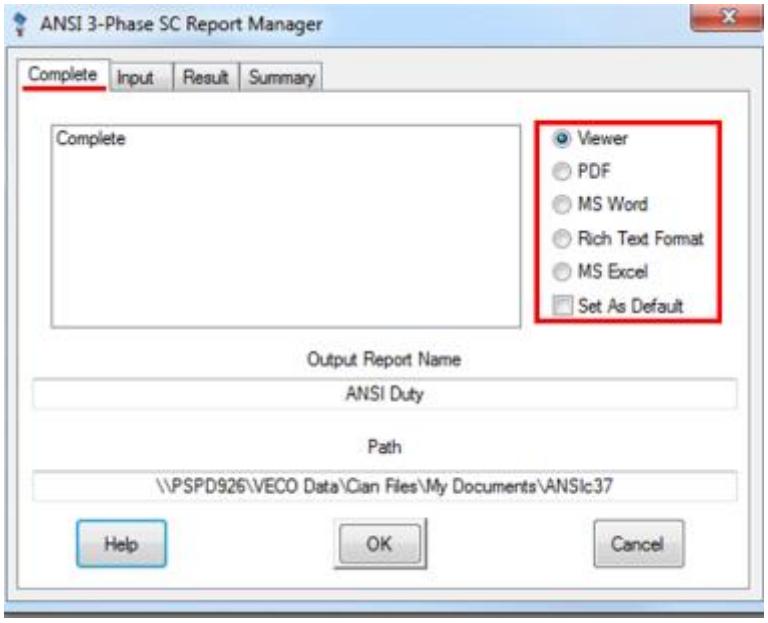


Figure 2.27: Gestionnaire de rapport d'harmoniques

2.3 conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons discuté brièvement des causes, des effets et du processus d'élimination des harmoniques dans une enquête initiale. Nous avons également décrit le logiciel ETAP de manière générale, ainsi que le module d'analyse harmonique. Chaque outil disponible dans le module d'analyse harmonique a été examiné en détail avec une description précise.

Le prochain chapitre se concentrera sur les méthodes de calcul utilisées par le module d'analyse harmonique d'ETAP pour analyser les harmoniques dans un réseau électrique.

CHAPITRE 3

Chapitre 3

Méthode d'analyse harmonique dans ETAP

3. Introduction :

Le module ETAP Harmonic Analysis fournit le meilleur outil pour modéliser avec précision

différents composants et dispositifs du système d'alimentation pour inclure leur dépendance à la fréquence, non-linéarité et autres caractéristiques en présence de sources harmoniques. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP].

Ce module utilise deux méthodes analytiques, la méthode du flux de charge harmonique et la Méthode de balayage de fréquence harmonique. Les deux méthodes sont les plus populaires et les plus puissantes Approches pour l'analyse harmonique des systèmes électriques. En combinaison avec ces deux méthodes,

Différents indices harmoniques sont calculés et comparés à la norme industrielle

Limitations ; Problèmes existants et potentiels de qualité de l'alimentation, ainsi que problèmes de sécurité associé aux harmoniques peut être facilement révélé. Les causes de ces problèmes peuvent être identifié et différents schémas d'amélioration et correctifs, tels que le facteur de puissance correction, le filtre harmonique peut être testé et finalement vérifié. **[**Power System Harmonic Analysis Using ETAP].

3.1 Modélisation des composantes pour l'analyse harmonique :

Pour une analyse harmonique, des caractéristiques de fréquence et une non-linéarité efficace, les composants du réseaux elecctrique doivent être reconnus et modélisés correctement. Selon leur nature et comportement, ces composants sont modélisés de différentes manières [Power System Harmonic Analysis Using ETAP].

Les charges non linéaires sont généralement modélisées comme des sources de courant et des sources de tension avec des fréquences harmoniques, car elles injectent essentiellement des courants harmoniques dans le système ou appliquent des tensions harmoniques ou appliquent des tensions harmoniques à des points donnés. Les sources d'énergie normales telles que les réseaux électriques ou les générateurs sont modélisées comme des sources de tension

harmoniques Les fréquences, si elles contiennent des composants harmoniques dans leurs tensions fixes.

Les charges non linéaires qui peuvent être modélisées comme source de courant harmonique dans ETAP sont :

- Charge statique
- ASI (l'Alimentation Sans Interruption) UPS (Interruptible Power Supply)
- Chargeur/Convertisseur
- VFD(
- SVC
- Transformer

Les charges statiques, les chargeurs/convertisseurs et les VFD injecteront du courant harmonique dans les bus sont connectés, s'ils sont modélisés comme une source de courant harmonique. Lorsque le transformateur est légèrement chargé, il peut contribuer à un courant harmonique important dans le reseaux . La source de courant harmonique générée par un transformateur est normalement placée du côté primaire.

Un ASI injecte du courant harmonique dans le bus connecté s'il est modélisé comme une charge et si ASI est modélisé comme une branche, il injectera du courant harmonique dans le bus d'entrée CA et le bus de sortie.

Pour modéliser un composant non linéaire en tant que source de courant harmonique, l'utilisateur peut sélectionner une bibliothèque de courant harmonique appropriée via le bouton Bibliothèque et l'éditeur de sélection rapide de la bibliothèque harmonique sur la page Harmonique de ce composant. La page Harmonique d'une charge non linéaire est donnée ci-dessous.

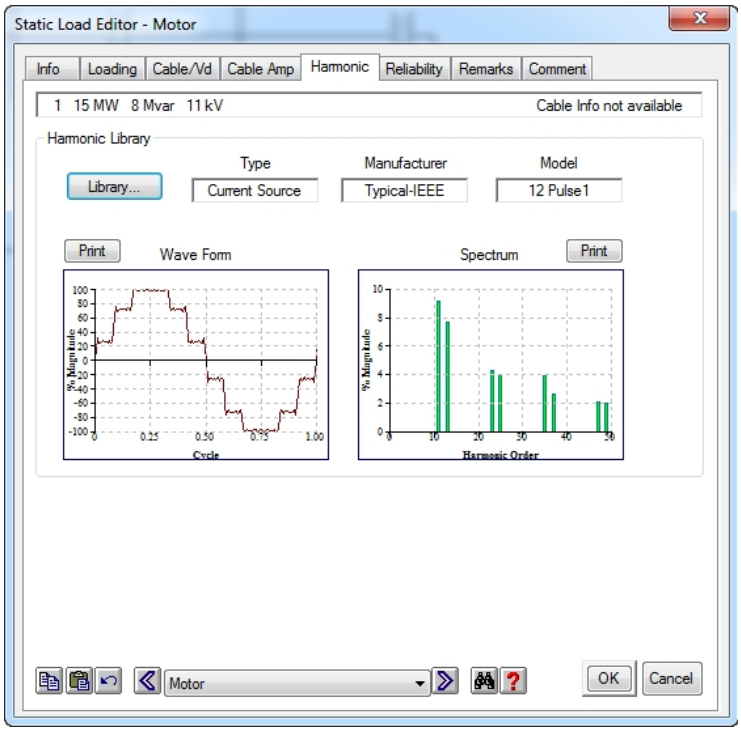


Figure 3.28: Page harmonique d'une charge.

Les composants qui peuvent être modélisés comme une source de tension harmonique dans ETAP sont donnés ci-dessous:

- Réseau électrique
- Générateur synchrone
- onduleur
- Chargeur/Convertisseur
- Charge statique

Si les onduleurs, les chargeurs/convertisseurs et les charges statiques provoquent principalement une distorsion de tension au lieu d'une distorsion de courant, peuvent également être modélisés comme des sources de tension harmoniques. Ces composants peuvent être modélisés en tant que source de tension harmonique également similaire aux sources de courant harmonique dans ETAP. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

Si une machine tournante n'est pas modélisée comme une source harmonique, son impédance harmonique équivalente est son impédance négative. Lorsqu'une composante de charge ou de shunt n'est pas modélisée en tant que source harmonique, son impédance

harmonique équivalente est calculée à partir de sa charge fondamentale à l'aide d'un circuit parallèle R et X équivalent et la partie réactance de l'impédance harmonique pour les machines tournantes et les composants de charge est réglée linéairement en fonction de l'ordre harmonique. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

3.2 Indices harmoniques

Le résultat des harmoniques est généralement mesuré en termes de plusieurs indices définis ci-dessous.

Taux de distosion harmonique(THD): La distorsion harmonique totale (THD), également connue sous le nom de facteur de distorsion harmonique facteur de distorsion harmonique (HDF), implique le calcul du niveau de distorsion harmonique de la tension et du courant. C'est une mesure qui montre le rapport de la racine carrée moyenne de Toutes les harmoniques à la composante fondamentale. Pour un système electrique idéal, THD est nul. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_2^\infty F_i^2}}{F_1} \qquad \textit{(III.1)}$$

Ici, Fi est l'amplitude de la i^{th}

harmonique, et F1 est la composante fondamentale.

Distorsion harmonique individuelle (IHD) : La distorsion harmonique individuelle (IHD) mesure le rapport d'une certaine composante harmonique à la composante fondamentale. Ils sont très efficaces pour concevoir des filtres à réglage unique. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

$$\text{IHD}=\frac{F_i}{F1} \qquad \textbf{(III.2)}$$

RMS carré moyen de la racine : C'est la racine carrée de la somme des carrés des quantités de la fondamentale et de toutes les harmoniques

Dans le système électrique. Pour un système d'alimentation sans harmoniques, la RMS totale doit être égale à la composante RMS fondamentale [Power System Harmonic Analysis Using ETAP].

$$\mathbf{RMS}=\sqrt{\sum_1^\infty F_I^2} \qquad \textbf{(III.3)}$$

Somme arithmétique (ASUM): C'est la sommation mathématique du Quantités de la fondamentale et de toutes les harmoniques. Il ajoute directement les magnitudes de tous les composants pour avoir une estimation prudente de la valeur maximale de la tension et , et est utile pour évaluer les indices de résistance maximale d'un périphérique. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

$$\mathbf{ASMUM}=\sum_1^\infty F_i$$

(III.4)

Facteur d'influence téléphonique (TIF): Le facteur d'influence téléphonique (TIF) est une variante du THD avec un poids différent donné à chacune des harmoniques en fonction de sa quantité d'interférence avec un signal audio dans la même gamme de fréquences. Normalement, le TRG actuel a un impact plus important sur les systèmes de communication. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

$$\mathbf{TIF}=\sqrt{\frac{\sum_1^\infty(\mathbf{w_i F_i})}{\sum_1^\infty \mathbf{F_i^2}}} \qquad \textbf{(III.5)}$$

Oùw_i est le facteur de pondération du TIF. Les valeurs des facteurs de pondération pour différentes fréquences harmoniques sont données dans la norme IEEE 519.

Produit I*T (I*T): Produit les composants actuels (fondamentaux et harmoniques) et les facteurs de pondération. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

$$\mathbf{I*T}=\sqrt{\sum_1^H(I_h T_h)} \qquad \textbf{(III.6)}$$

T_h= Facteur de pondération

h= Ordre harmonique (H = 1 pour fondamental)

H= ordre harmonique maximal à prendre en compte

3.3 Harmonic charge flow

Dans le module d'analyse harmonique d'ETAP, l'utilisateur peut simuler des sources de courant harmonique et de tension, catégoriser les problèmes harmoniques, réduire les

déclencheurs gênants, concevoir et tester des filtres, et signaler des violations de la tension harmonique et de la limite de distorsion du courant. Harmonic Charge Flow Study effectue d'abord un calcul du taux de charge à la fréquence fondamentale. Les résultats du flux de charge fondamental définissent la base des tensions fondamentales des courants de bus et de branche qui sont ensuite utilisés pour calculer différents indices harmoniques. Ensuite, ETAP Utilisez la méthode d'injection actuelle pour produire une solution de flux de charge pour chaque harmonique La fréquence à laquelle une source harmonique existe. Les fréquences harmoniques mesurées sont toutes les fréquences d'ordre bas de la 2e à la 15e, les harmoniques caractéristiques de 17 à 73. L'impédance des composants est ajustée en fonction des fréquences harmoniques et des types de composants. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

Les bus THD et IHD calculés sont comparés à leurs limites telles que spécifiées par l'Utilisateur dans l'éditeur de bus et, si des violations sont détectées, des indicateurs sont placés dans le texte À côté du bus associé dans la section Informations harmoniques. [8]

Ce calcul du débit de charge est basé soit sur la méthode de Newton Raphson, soit sur la

méthode accélérée de Gauss Seidel.

L'étude du flux de charge harmonique génère des rapports de sortie montrant les données d'entrée du système, les résultats fondamentaux du flux de charge, les informations sur le système harmonique et la tabulation du bus Tensions et courants de branche avec tous les contenus harmoniques. Ces résultats peuvent également être visualisés directement à partir du diagramme unifilaire à l'aide du curseur Flux de charge harmonique et de l'éditeur d'options d'affichage harmonique. Tension du bus et bypass current plots are also Displayed in the time domain and harmonic spectra in a bar graph. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

3.4 Balayage de fréquence harmonique:

La préoccupation importante avec les harmoniques est la condition de résonance dans le système d'alimentation.

En raison de l'existence de composants inductifs et capacitifs dans la puissance, à certaines fréquences, des conditions de résonance peuvent se produire à certains bus. Si le courant harmonique est injecté dans le même bus où la résonance se produit, il créera une condition de surtension. La résonance parallèle n'est un problème que si une source d'harmoniques existe à

la fréquence où les impédances correspondent. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

Le programme ETAP Frequency Scan est le meilleur outil pour étudier la résonance du problème du système.

Il calcule et trace les magnitudes et les angles de phase de l'impédance du point de conduite du bus sur une gamme de fréquences spécifiée par l'utilisateur; Ainsi, toute résonance parallèle et sa fréquence de résonance peuvent être clairement reconnues. Harmonique L'étude de balayage fréquentiel permet également aux utilisateurs d'ajuster leurs paramètres de filtre harmonique et de tester les résultats finaux. L'utilisateur peut définir la gamme de fréquences qui commence à partir de la fréquence fondamentale et peut aller aussi haut que les besoins de l'utilisateur.

Les résultats de l'analyse de fréquence sont rapportés dans des rapports qui incluent les entrées du système.

les résultats du flux de charge fondamental et un onglet listant les impédances des points de conduite du bus.

Les mêmes informations sont également données sur le diagramme unifilaire, ainsi que dans un format graphique.

3.5 Élimination harmonique :

La plupart des charges dans un système réseaux électrique sont non linéaires et produisent un courant harmonique ou une tension harmonique.

Il est donc essentiel de concevoir des composants électriques pour éliminer les systèmes d'alimentation harmoniques. Certaines des techniques les plus avancées seront analysées sur ETAP telles que le filtre, les transformateurs à déphasage, etc..

3.5.1 Filtre harmonique

Les filtres harmoniques sont largement utilisés pour atténuer les problèmes harmoniques. Un Le filtre harmonique peut empêcher l'injection de courant harmonique ou un faible Le chemin d'impédance à la fréquence accordée pour supprimer une résonance parallèle. [8]

ETAP fournit actuellement six des filtres les plus populaires utilisés dans l'industrie de l'énergie.

Un programme de dimensionnement des filtres est également disponible dans l'éditeur harmonique pour le type de filtre Single Tuned, avec lequel les utilisateurs peuvent optimiser les paramètres de filtre en fonction de différents critères d'installation ou de fonctionnement. [Power System Harmonic Analysis Using ETAP]

Les filtres de données dans ETAP sont les suivants :

- Filtre de contournement
- Filtre passe-haut (amorti)
- Passe-haut (non amorti)
- Filtre de réglage unique
- Filtre amorti de 3e ordre
- Filtre de type C de 3e ordre

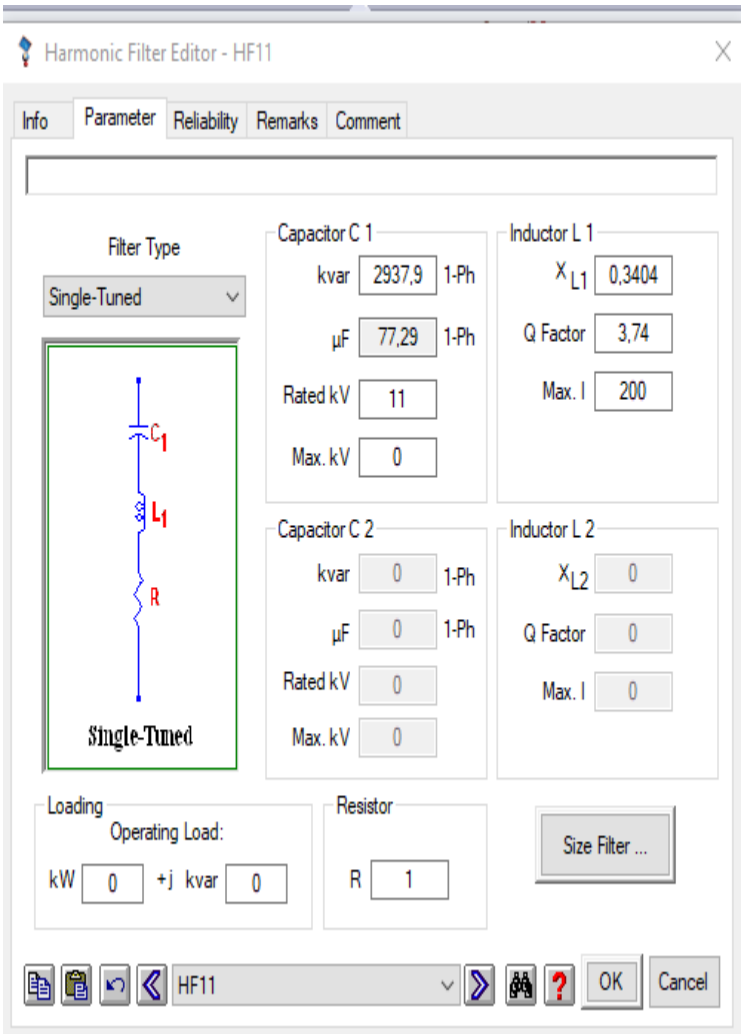


Figure 3.29: Éditeur de filtre harmonique.

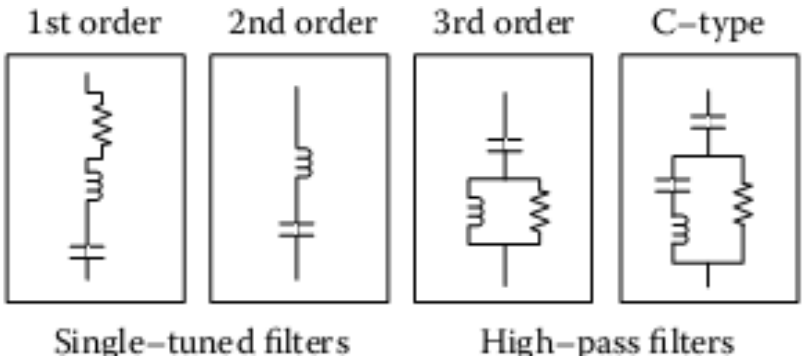


Figure 3.30: Différents types de filtres sur ETAP

Les filtre passifs d'harmonique est l'une des solutions efficaces utilisees pour réduire ou empêcher la propagation des harmoniques dans le réseau electrique. Un tel filtre consiste`a combiner entre des réactances

capacitives et inductives afin de constituer un ou des piéges aux harmoniques dont on veut éviter la propagation. Il y a plusieurs configurations possibles de filtres passifs qu'on peut classer en filtre résonant simple.

filtre multi-résonant, filtre passe haut (ou filtre amorti de second degré). Bien que les configurations sont très diverses.

Filtre résonant : Accordé a une fréquences spécifiques, et donc capable de piéger éliminer un seul harmonique ;

Filtre passe haut : Accordé `a une fréquence à partir de laquelle il doit piégera tous les harmoniques supérieurs, donc capable d´éliminera plusieurs harmoniques ;

Filtre à double résonnance : Accordé `a deux fréquences distinctes pour pouvoir éliminer deux harmoniques ;

Filtre type C **:** C'est une filtre passe haut également mais avec des caractéristiques meilleurs (compensation de la puissance réactives, et moins de pertes).

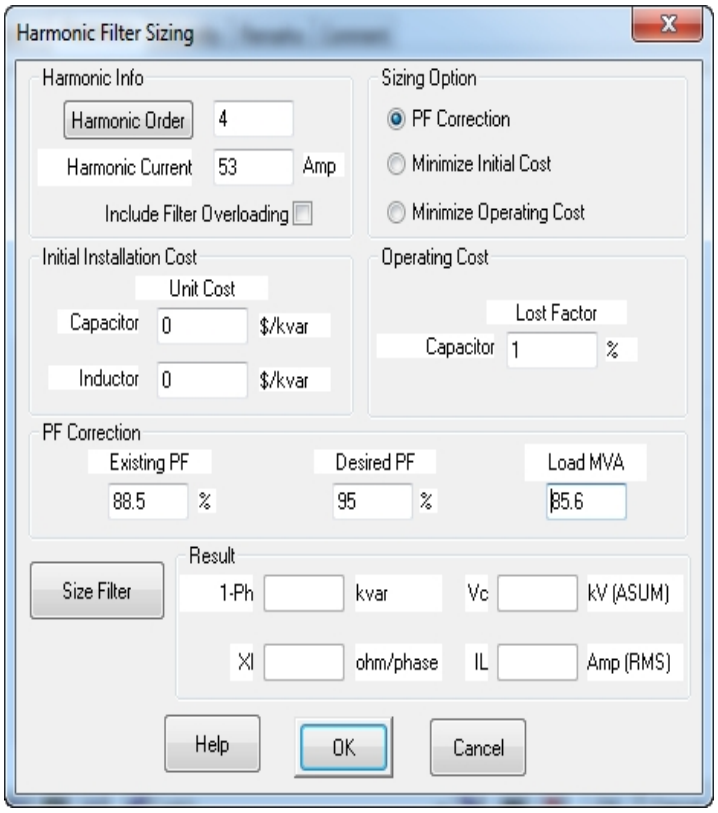


Figure 3.31: Fenêtre du Dimensionnement du filtre.

Les filtres à simple accord ne peuvent fournir qu'un chemin de faible impédance à une composante harmonique particulière; L'utilisateur doit spécifier le numéro d'ordre harmonique. Pour un ordre harmonique particulier, une analyse du flux de charge harmonique est effectuée pour trouver le courant harmonique qui peut être utilisé dans l'option de dimensionnement du filtre. Le facteur de puissance existant et

les valeurs MVA de charge doivent être tirées de l'analyse du flux de charge équilibré sur la puissance réseau. En cliquant sur le bouton 'Filtre de taille', les paramètres du composant de filtre sont calculé et substitué au filtre. L'utilisateur peut dimensionner le filtre pour un coût initial minimum ou Coût d'exploitation minimal en utilisant l'option coût d'installation initial ou coût d'exploitation.

3.5.2 Transformateur Déphasage

Les harmoniques de reseaux electrique speuvent être minimisées par un réglage approprié du robinet. L'ETAP Harmonic Le module d'analyse utilise le déphasage du transformateur pour ajuster l'angle de phase d'impédance du réseau dans l'étude Harmonic Load Flow. Le déphasage du transformateur est spécifié dans le Éditeur de transformateur Appuyez sur la

page basée sur la convention de connexion du transformateur, à savoir Connexion de séquence positive standard et connexion de séquence négative standard.

De plus, un utilisateur peut également spécifier un déphasage spécial pour un transformateur. Sur 'défini par l'utilisateur' option, l'utilisateur peut entrer manuellement le degré de changement de phage pour réduire certaines harmoniques.

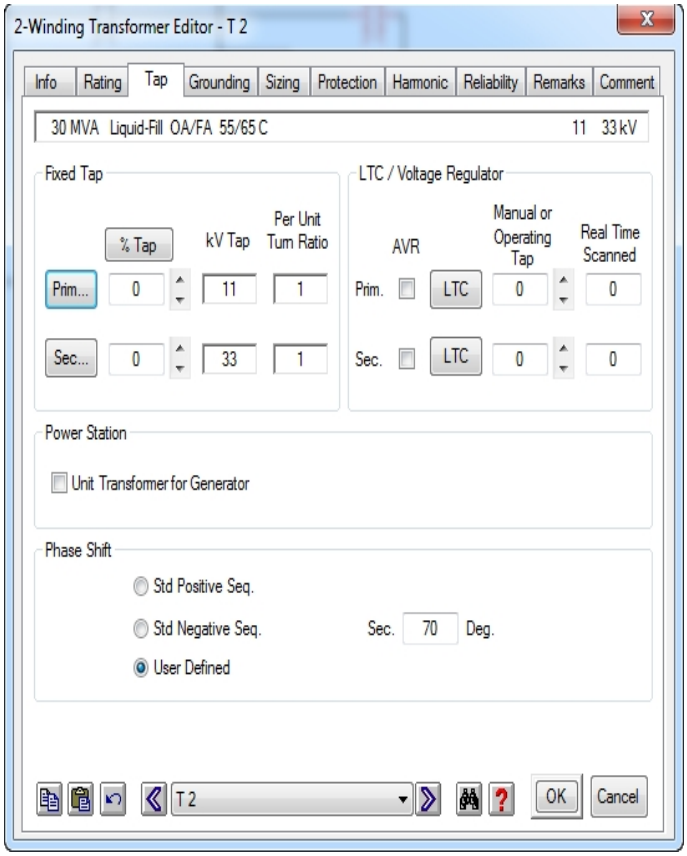


Figure 3.32 : Déphasage du transformateur.

3.5.3 Isolation du transformateur :

Le transformateur d'isolation peut correspondre à la tension en augmentant ou en diminuant en tension du système et en fournissant une référence neutre à la terre pour les sols nuisibles Défauts. Les pertes de puissance sont la principale pénurie de ce transformateur.

3.6 Normes :

Le module ETAP Harmonic Analysis est entièrement conforme à la dernière version du

Les normes suivantes sont indiquées ci-dessous :

- Normes IEEE 519-1992, Pratiques recommandées de l'IEEE et

Exigences relatives au contrôle harmonique dans les systèmes d'alimentation électrique [10]

3.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, la méthode d'analyse harmonique à l'aide du logiciel ETAP a été étudié.

Le flux de charge harmonique, balayage de fréquence harmonique, modélisation des composants et le processus d'élimination harmonique sont inclus dans ce chapitre.

Le chapitre suivant traitera de la simulation et des résultats correspondants à l'aide de la méthode de ce chapitre.

CHAPITRE 4

CHAPITRE 4

Simulation harmonique

4.1 Introduction :

ETAP Electrical Transient Analyzer Program) est un logiciel utilisé par les ingénieurs électriciens pour la conception, la simulation, l'exploitation et l'optimisation des systèmes électriques. Il propose une gamme complète d'outils pour la conception de ces systèmes.

Grâce à ETAP, les ingénieurs peuvent effectuer diverses analyses, telles que l'analyse du flux de charge, l'analyse des courts-circuits, l'analyse de l'accélération du moteur, l'analyse des harmoniques, l'analyse de la stabilité transitoire, et bien d'autres encore. Ces analyses permettent de mieux comprendre le comportement du système électrique, d'identifier les problèmes potentiels et d'optimiser les performances.

En ce qui concerne les harmoniques, ETAP dispose d'un module d'analyse harmonique qui permet de modéliser et d'analyser ces phénomènes dans le système électrique. Ce module offre deux méthodes analytiques principales : le Flux de Charge Harmonique (Harmonic Load Flow) et le Scan de Fréquence Harmonique (Harmonic Frequency Scan). Ces deux approches sont largement utilisées et puissantes pour l'analyse des harmoniques.

En utilisant ces méthodes, le logiciel calcule différents indices d'harmoniques qui peuvent être comparés aux limites définies par les normes industrielles existantes. Ainsi, les problèmes potentiels de qualité de l'alimentation liés aux harmoniques peuvent être facilement identifiés. ETAP permet également d'identifier les causes de ces problèmes et de tester différents schémas d'atténuation et de correction.[16].

4.1.1 Les principales caractéristiques de l'étude du débit de charge harmonique ETAP sont résumées ci-dessous :

- **Calcul fondamental du débit de charge :** ETAP effectue le calcul fondamental du débit de charge, ce qui permet d'évaluer la demande de puissance réactive et de déterminer les profils de courant et de tension harmoniques dans le système électrique.

- **Modélisation de la dépendance en fréquence :** ETAP permet de modéliser avec précision la dépendance en fréquence des composants et des charges du système d'alimentation. Cela inclut la représentation précise des caractéristiques de réponse en fréquence des dispositifs non linéaires et des charges harmoniques.

- **Méthode d'injection de courant harmonique :** ETAP utilise la méthode d'injection de courant harmonique pour introduire des courants harmoniques dans le système et évaluer leur impact sur les performances du réseau électrique.

- **Harmoniques de séquence positive, négative et nulle :** ETAP prend en compte les harmoniques de séquence positive, négative et nulle, ce qui permet une analyse plus complète des harmoniques présents dans le système électrique.
- **Ordre harmonique élevé :** ETAP permet d'analyser les harmoniques jusqu'à l'ordre 73, ce qui est utile pour évaluer les distorsions harmoniques élevées et les effets potentiels sur le système.
- **Calcul d'indices harmoniques :** ETAP calcule divers indices harmoniques tels que le taux de distorsion harmonique total (THDI), le taux de distorsion de tension (THDV), le facteur d'interharmoniques total (TIF), etc. Ces indices permettent d'évaluer les niveaux de distorsion harmonique dans le système.
- **Filtres harmoniques intégrés :** ETAP dispose de filtres harmoniques intégrés de différents types pour atténuer les harmoniques indésirables. Ces filtres peuvent être dimensionnés automatiquement selon différents critères pour optimiser leur performance.

4.1.2 Les principales caractéristiques de l'étude d'acquisition de fréquence harmonique ETAP sont résumées ci-dessous :

- **Affichage graphique des résultats :** ETAP permet d'afficher graphiquement les résultats de l'étude de balayage des fréquences harmoniques. Cela permet aux utilisateurs de visualiser facilement les composantes harmoniques et leurs amplitudes à différentes fréquences.

- **Barre de défilement :** ETAP propose une barre de défilement pour afficher l'amplitude et l'angle de phase de l'impédance du point d'entraînement du bus aux fréquences sélectionnées. Cela permet d'obtenir des informations détaillées sur les caractéristiques du système à différentes fréquences harmoniques.
- **Indication des fréquences de résonance :** ETAP indique les fréquences de résonance dans le système électrique étudié. Cela permet d'identifier les fréquences où les phénomènes de résonance peuvent se produire et d'ajuster en conséquence la conception et le fonctionnement du système.

EXEMPLE 1 :

Barre d'outils de l'examen :

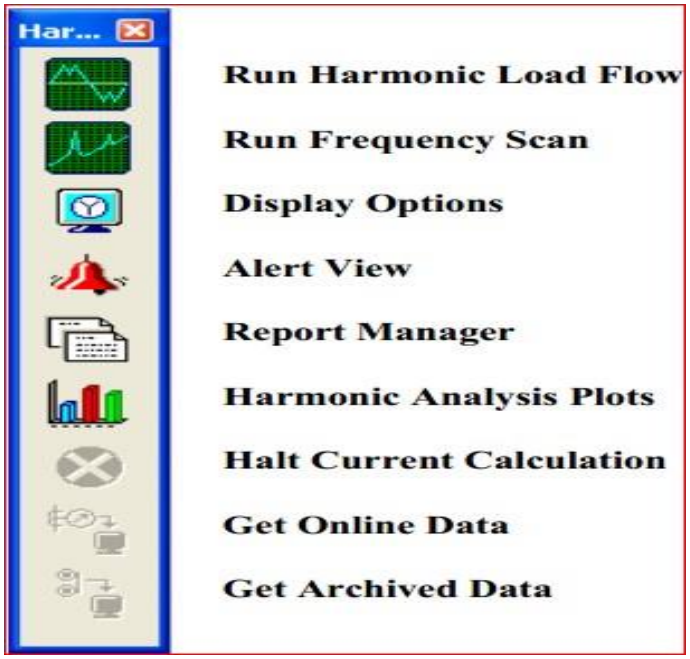


Figure 4.33: La barre d'outils d'étude harmonique dans ETAP.

4.2 Exemple d'analyse harmonique et de traitement par ETAP :

Le schéma unifilaire du système pris comme exemple est illustré à la figure. (4.34) :

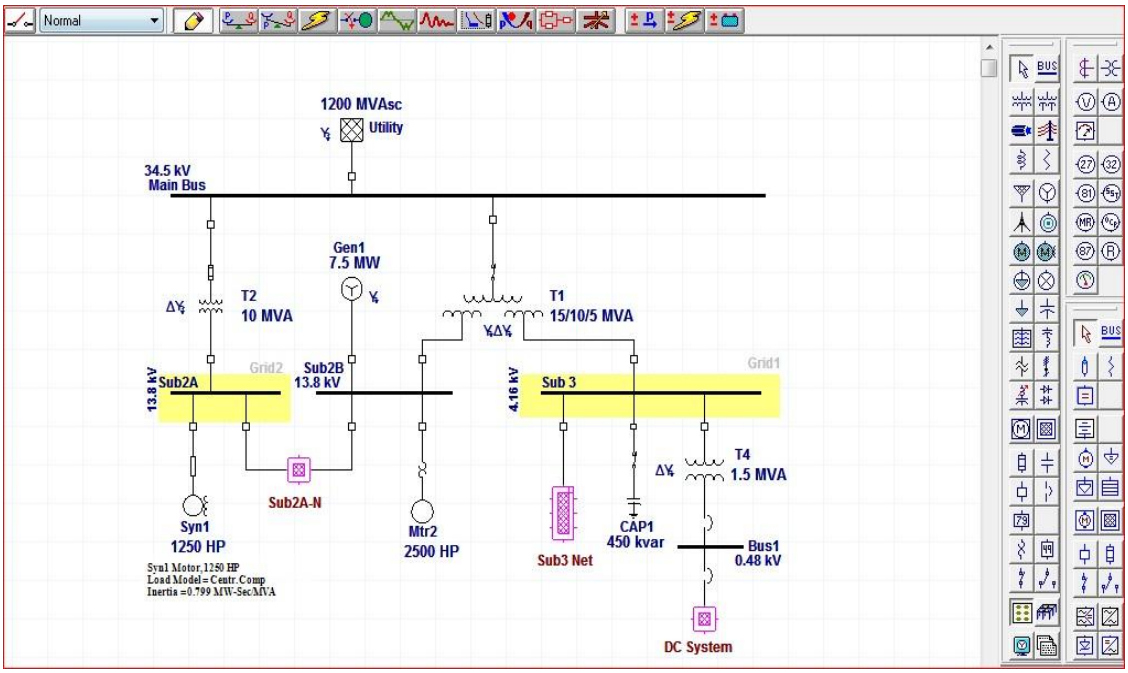


Figure 4.34: diagramme unifilaire de l'exemple.

4.2.1 Scénarios de simulation harmonique :

1. dentifier les sources d'harmoniques où les harmoniques de ce système proviennent du système DC au niveau du bus 1 et les détails du système DC sont indiqués dans la figure (4.35) (double-cliquez sur l'image dans ETAP pour obtenir les détails). Dans ce système, les sources d'harmoniques sont l'UPS et le chargeur.

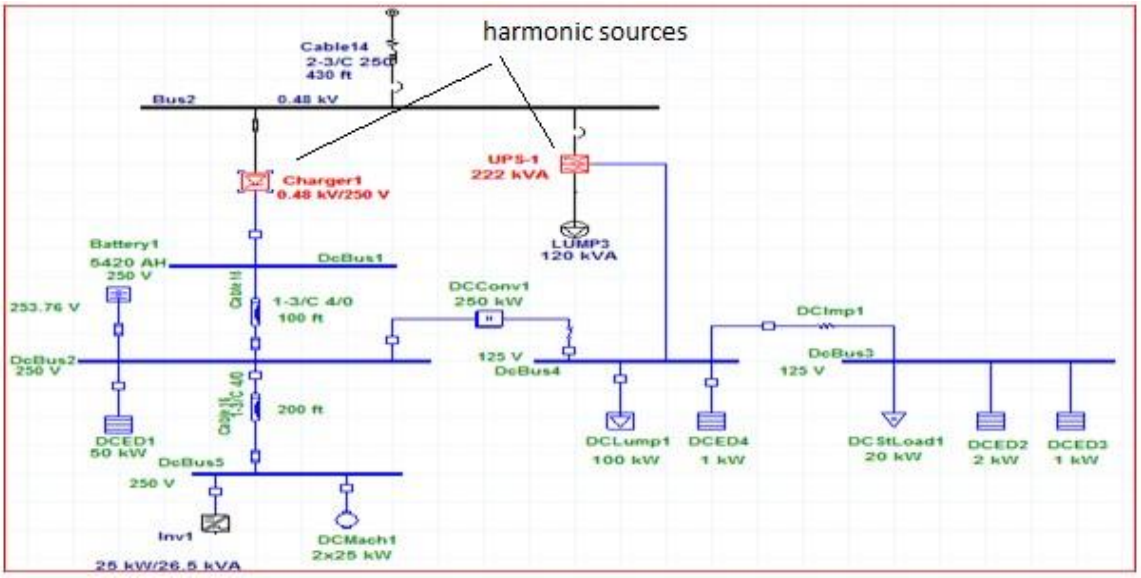


Figure 4.35: Le système DC.

2. Déterminez les types de sources d'harmoniques (source de courant ou de tension) et les modèles (6 impulsions, 12 impulsions… etc.) fournis par cet appareil et illustrés sur la figure. (4.36)(Appuyez sur les doubles clics sur les appareils).

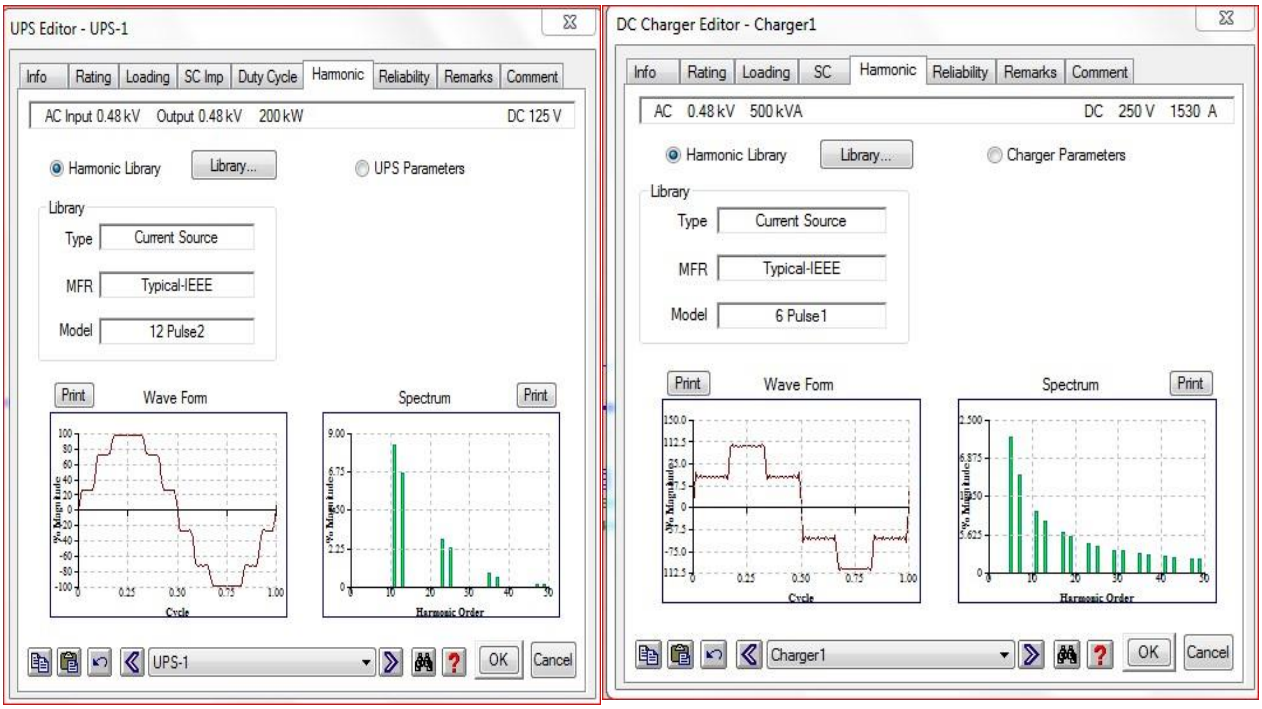


Figure 4.36: Détermination des caractéristiques des sources harmoniques.

3. Une analyse du flux de charge harmonique et un balayage de fréquence sont effectués pour déterminer l'IHD pour chaque ordre et identifier où les limites sont dépassées et déterminer les ordres qui causent la distorsion maximale (pour la filtrer). Les résultats du flux de charge harmonique sont présentés dans la figure (4.37) et le tableau (4.1).

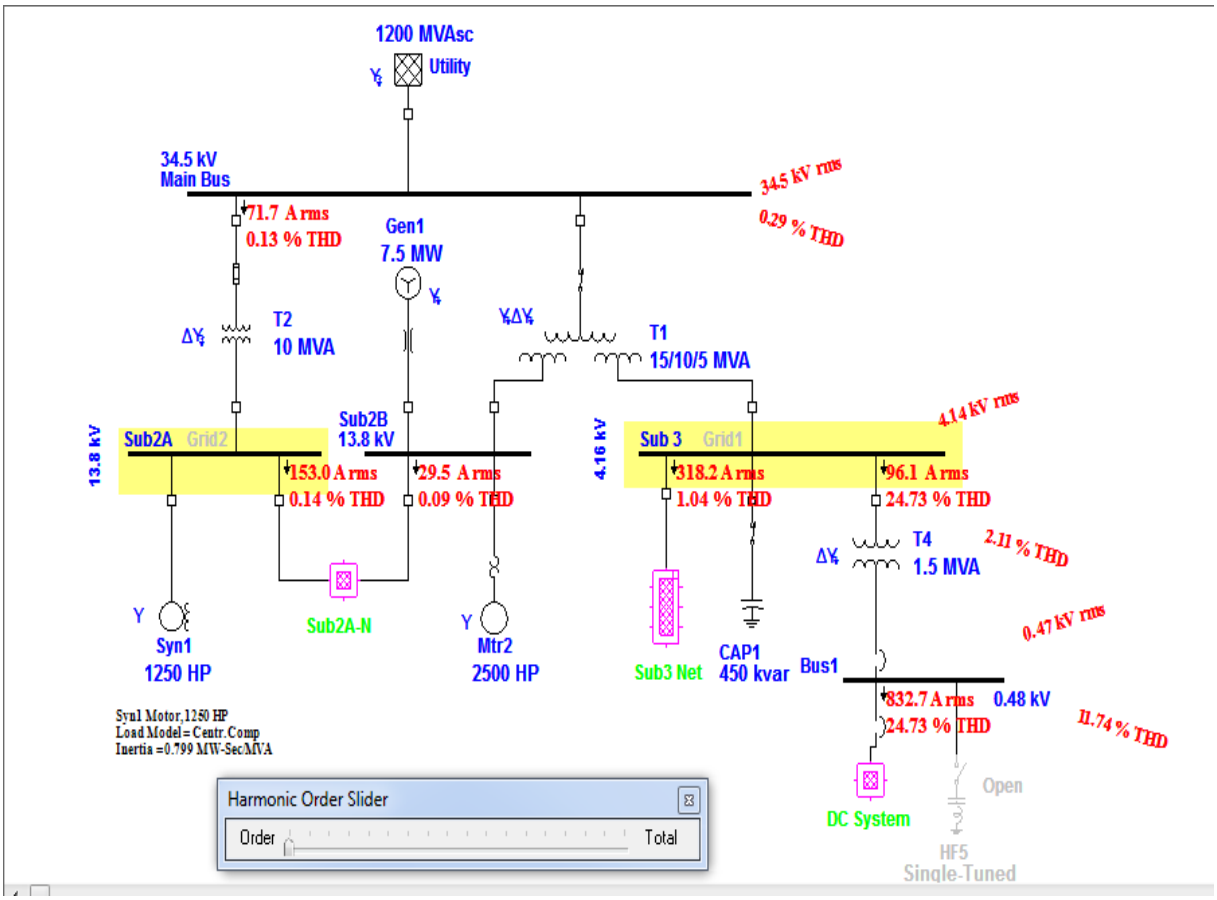


Figure 4.37: Analyse du flux de charge harmonique.

Harmonic order	Distortion (%)	harmonic current injected (A)
5	15.9	14.8
7	11.4	10.6
11	8.8	8.2
13	7.3	6.8

Table (4.1) : affiche les rangs des harmoniques au sub3 et leur niveau de courant et de distorsion associé.

4.2.2 Étapes du traitement harmonique :

1- Exécutez une analyse de flux de charge pour déterminer la MVA et le facteur de puissance existant à l'autobus désiré. Le résultat est illustré à la Fig. (4.38).

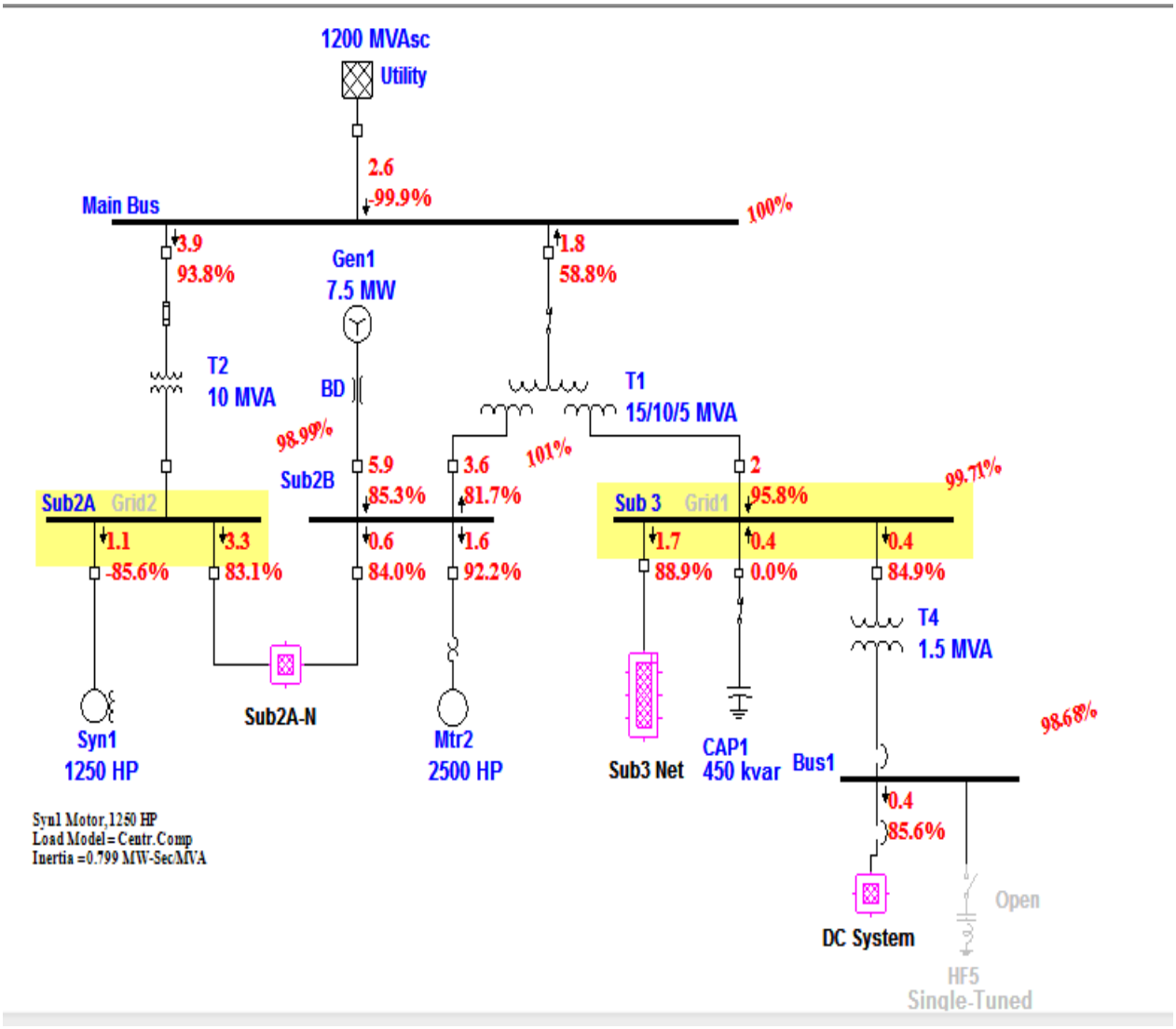


Figure 4.38: Analyse du flux de charge.

2- sélectionnez le type de filtre (par exemple filtre monoaccord) et dimensionnez-le en insérant le ordre à filtrer (ordre responsable à partir du niveau de distorsion maximal -ici 5ème ordre-), le courant harmonique qui lui est associé, le facteur de puissance existant, le facteur de puissance souhaité et la charge MVA sur le bus . Ce est montré dans la fig. (4.39) (l'ETAP dimensionne automatiquement le filtre et calcule le paramètre du filtre).

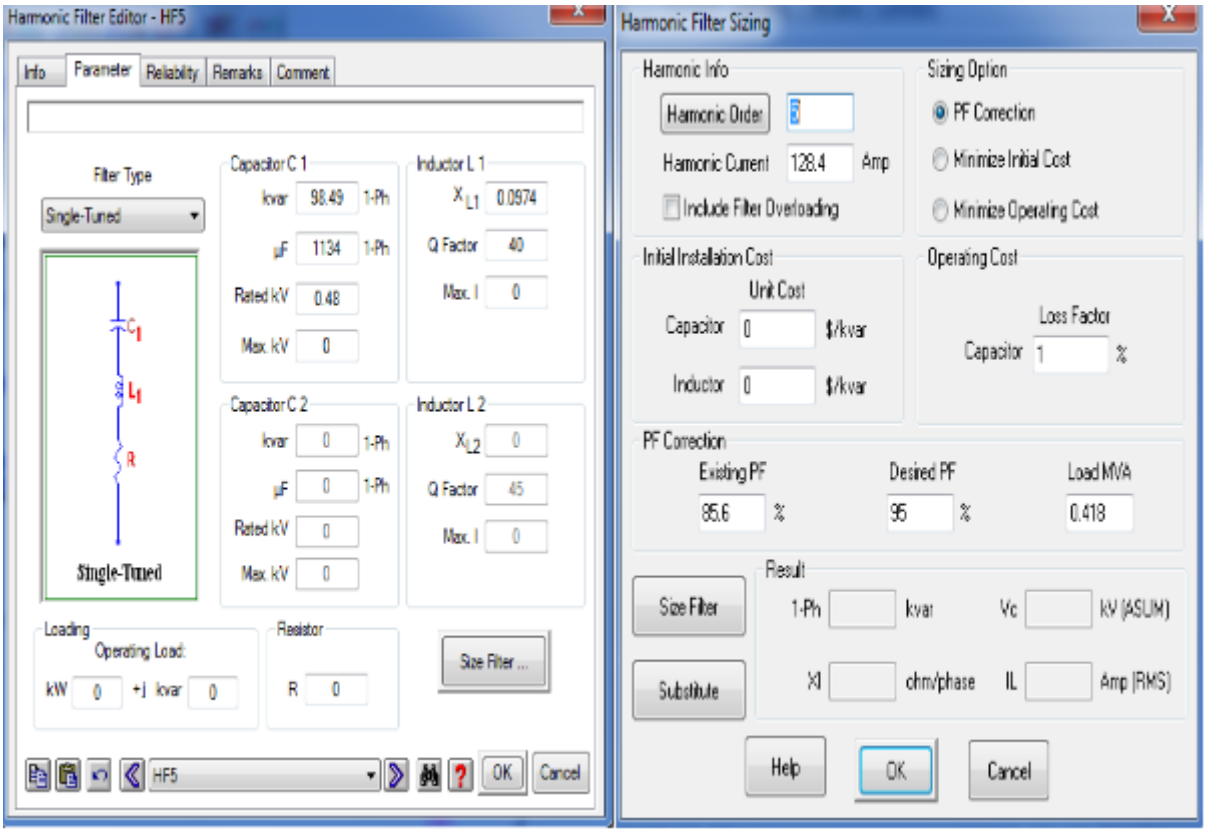


Figure 4.39: Opération de dimensionnement du filtre.

Les résultats de l'analyse du flux de charge harmonique après l'insertion du filtre à réglage unique du cinquième ordre sont illustrés à la fig. (4.40)

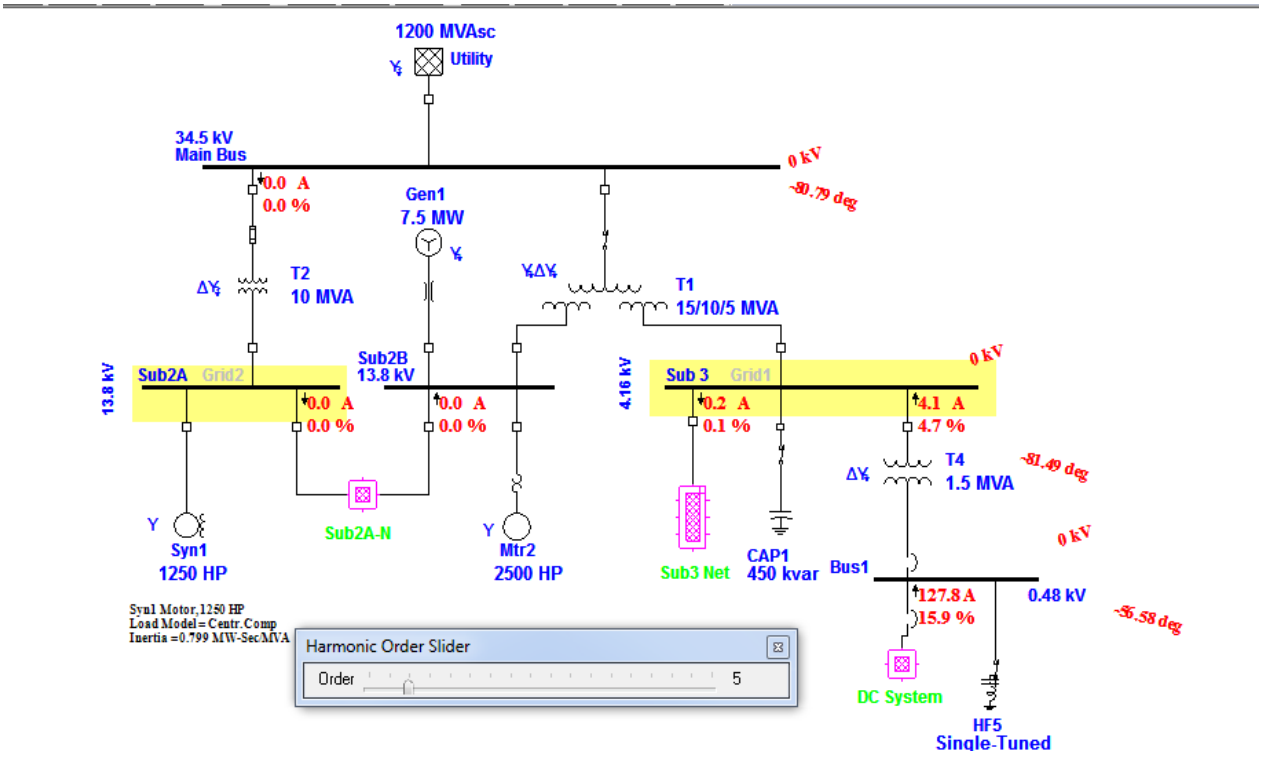


Figure 4.40: Flux de charge harmonique après filtrage.

Harmonic order	Distortion (%)	harmonic current injected (A)
5	4.7	4.1
7	10.1	8.7
11	8.3	7.2
13	6.9	6

Table (4.2) : affiche les rangs des harmoniques au sub3 et leur niveau de courant et de distorsion associé après filtrage.

L'opération consiste à injecter des filtres continus jusqu'à ce que la distorsion introduite dans le système à partir des sources harmoniques soit ramenée dans les limites définies par la norme IEEE.

Lors de l'exécution de l'étude de débit de charge harmonique, il est observé qu'il existe une fréquence harmonique avec une amplitude plus élevée dépassant les limites de THD (Total Harmonic Distortion) et IHD (Individual Harmonic Distortion). À partir de la fenêtre d'alerte (Figure), on peut observer que les 7ème, 11ème, 13ème, 17ème et 19ème ordres harmoniques contribuent à deux bus chacun. Les ordres harmoniques mentionnés dans la fenêtre d'alerte dépassent les limites prédéfinies de THD et IHD.

Critical

Device ID	Type	Condition	Rating /Limit	Operating	% Operating	Harmonic
Bus1	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	2.18	145.07	7.00
Bus1	Bus THD	Exceeds Limit	2.5	2.62	104.75	Total
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	2.68	178.33	5.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	3.09	206.28	7.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	2.07	137.78	11.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	2.08	138.77	13.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	1.74	116.16	17.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	1.77	118.31	19.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	1.93	128.84	23.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	1.93	128.7	25.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	1.81	120.71	29.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	1.83	122.25	31.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	1.83	121.9	35.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	1.86	123.99	37.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	1.85	123.5	41.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	1.87	124.38	43.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	1.84	122.81	47.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	1.83	121.76	49.00
Bus2	Bus THD	Exceeds Limit	2.5	8.13	325.13	Total
Bus4	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	9.75	649.95	11.00
Bus4	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	7.87	524.89	13.00

Critical

Device ID	Type	Condition	Rating /Limit	Operating	% Operating	Harmonic
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	5.51	367.02	11.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	5.52	367.75	13.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	5.02	334.38	17.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	5.41	360.35	19.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	4.18	278.65	23.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	4.17	278.31	25.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	4.07	271.55	29.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	4.19	279.31	31.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	4.3	286.38	35.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	4.43	295.21	37.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	4.53	302.14	41.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	4.63	308.51	43.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	4.7	313.38	47.00
Bus2	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	4.73	315.23	49.00
Bus2	Bus THD	Exceeds Limit	2.5	18.68	747.13	Total
Bus4	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	9.75	649.95	11.00
Bus4	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	7.87	524.89	13.00
Bus4	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	3.29	219.53	23.00
Bus4	Bus IHD	Exceeds Limit	1.5	2.71	180.34	25.00
Cable2	Amp	Overload	275	318.22	115.72	Total

Figure 4.41: Fenêtre d'alerte (Étude de flux de charge harmonique).

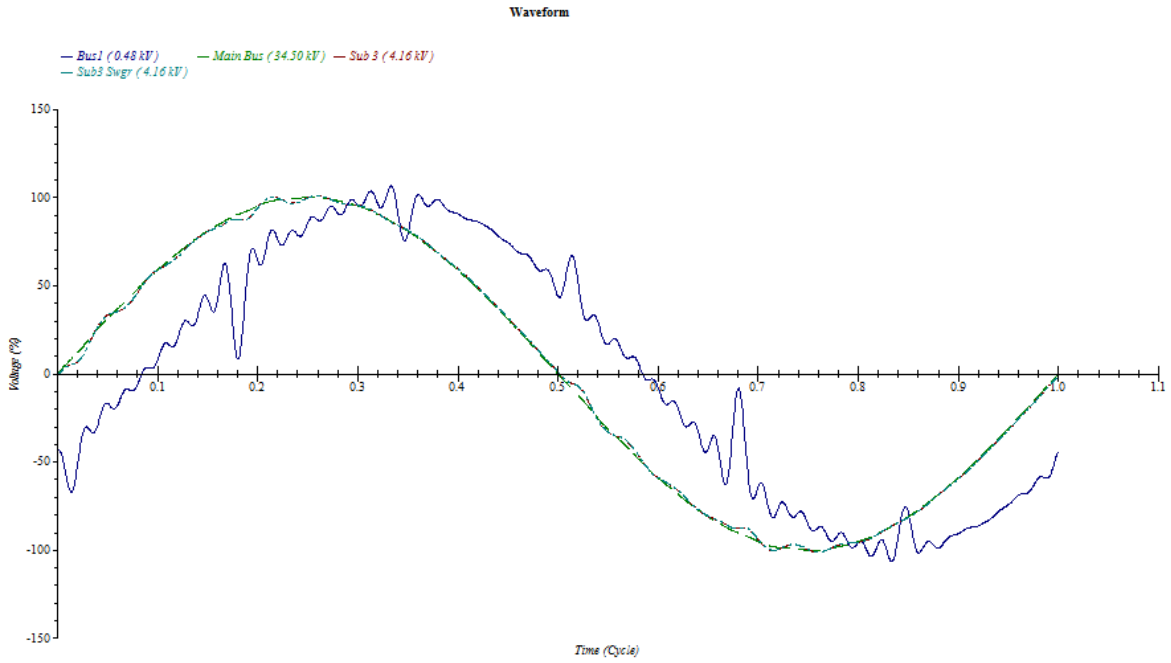


Figure 4.42: Graphiques du flux de charge harmonique (tous les bus).

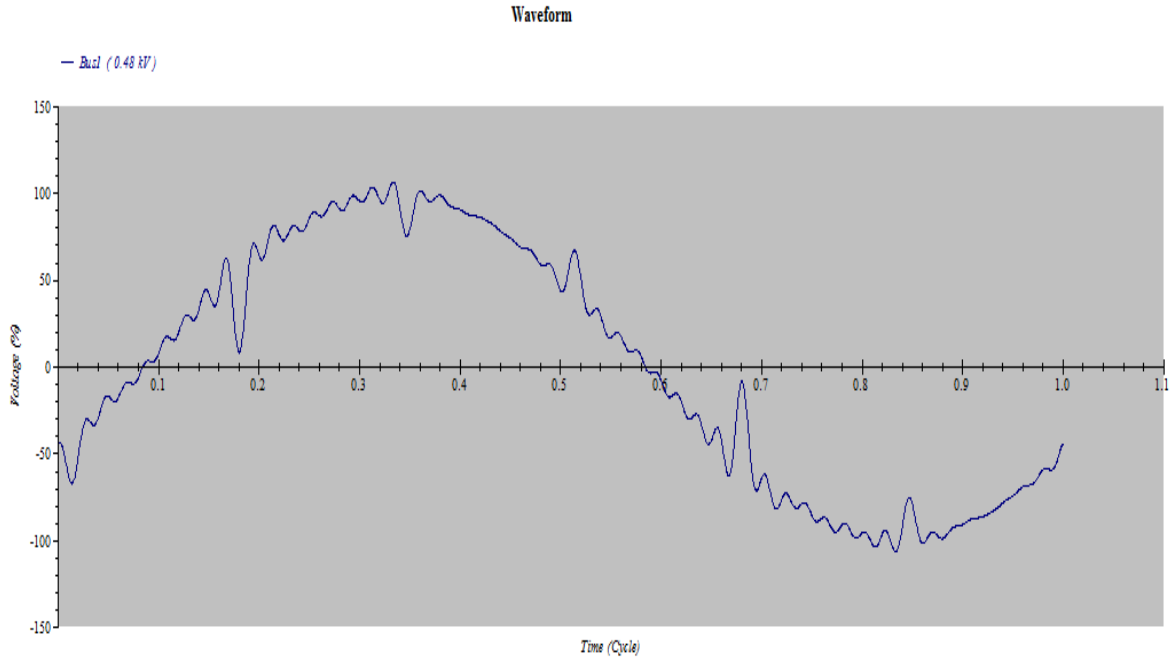


Figure 4.43: Graphique du flux de charge harmonique (Barre de bus 1).

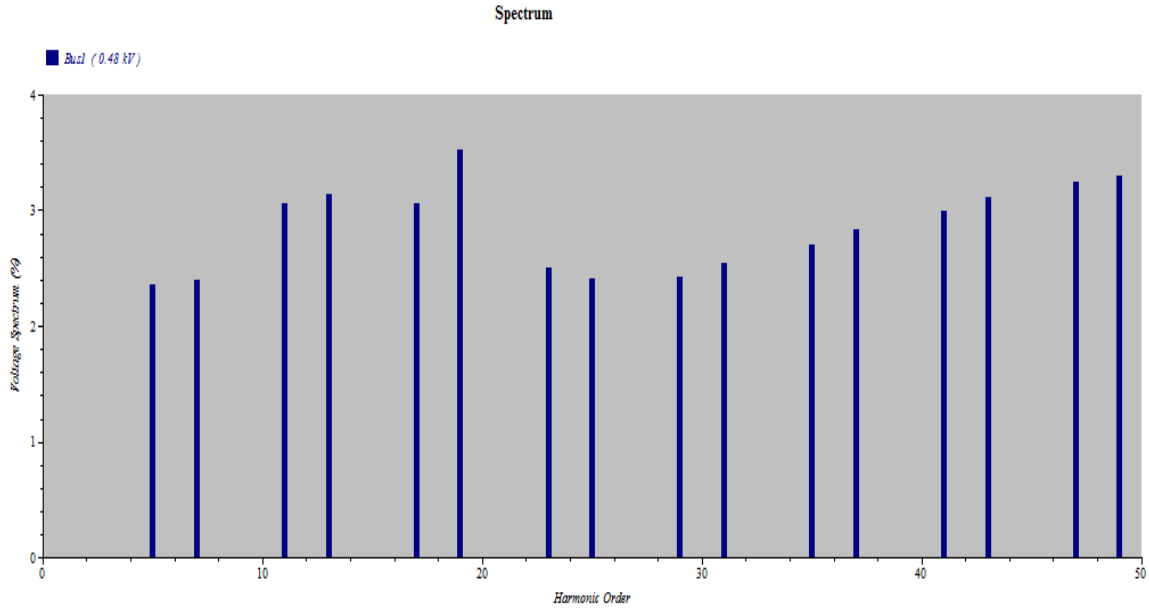


Figure 4.44: Graphique du flux de charge harmonique (Spectre de tension pour la barre de bus 1).

Ceci peut être affiché au gestionnaire de rapport, qui est donné en annexe. Ici la fréquence choisie pour le réseau d'alimentation est 60 Hz.

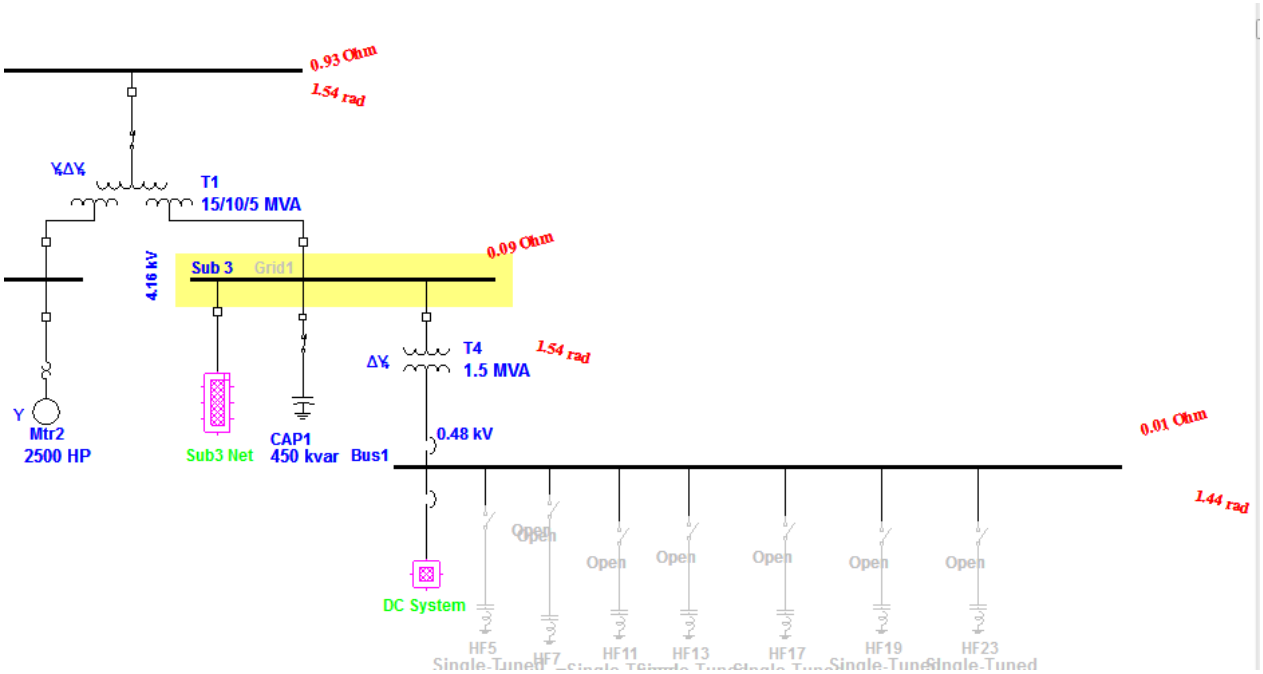


Figure 4.45: Résultat du balayage des fréquences harmoniques.

De la fenêtre d'alerte, on peut voir que, résonance parallèle s'est produite aux 20ème et 21ème ordre harmonique à la fréquence de 1200 Hz et 1260 Hz. La présence de condensateurs a causé le problème de résonance parallèle.

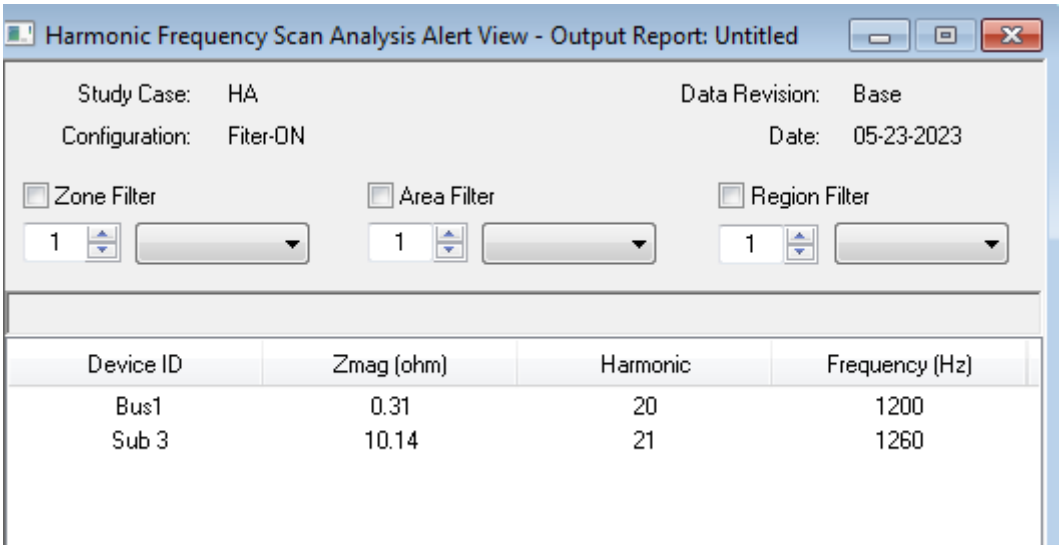
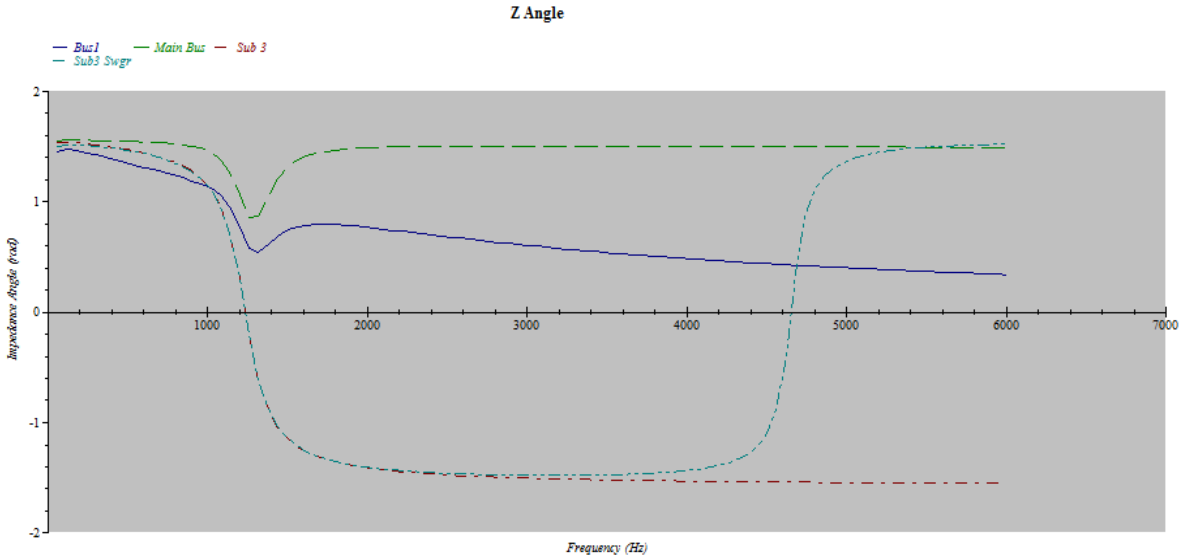


Figure 4.46: Fenêtre d'alerte (Balayage des fréquences harmoniques).

Les courbes de magnitude et d'angle d'impédance après l'acquisition de fréquence harmonique sont indiquées ci-dessous.



***Fig*ure 4.47: Graphique du balayage des fréquences harmoniques, impédance-angle (tous les bus).**

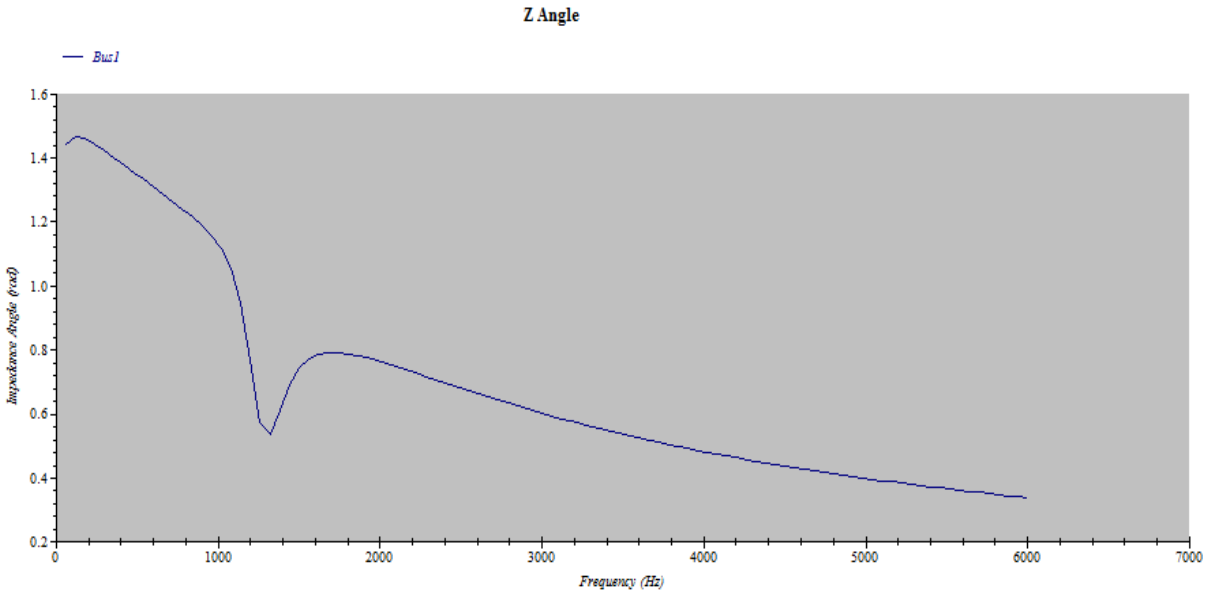


Figure 4.48: Graphique du balayage des fréquences harmoniques, impédance-angle (Barre de bus 1).

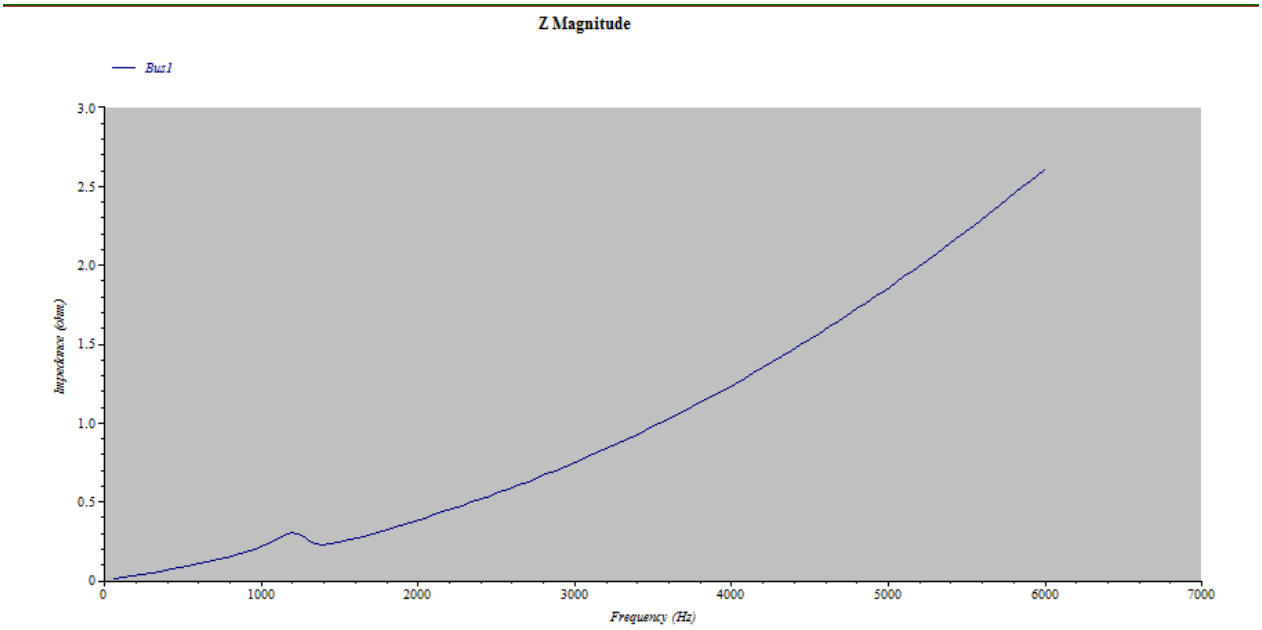


Figure 4.49: Graphique du balayage des fréquences harmoniques, impédance-amplitude (Barre de bus 1).

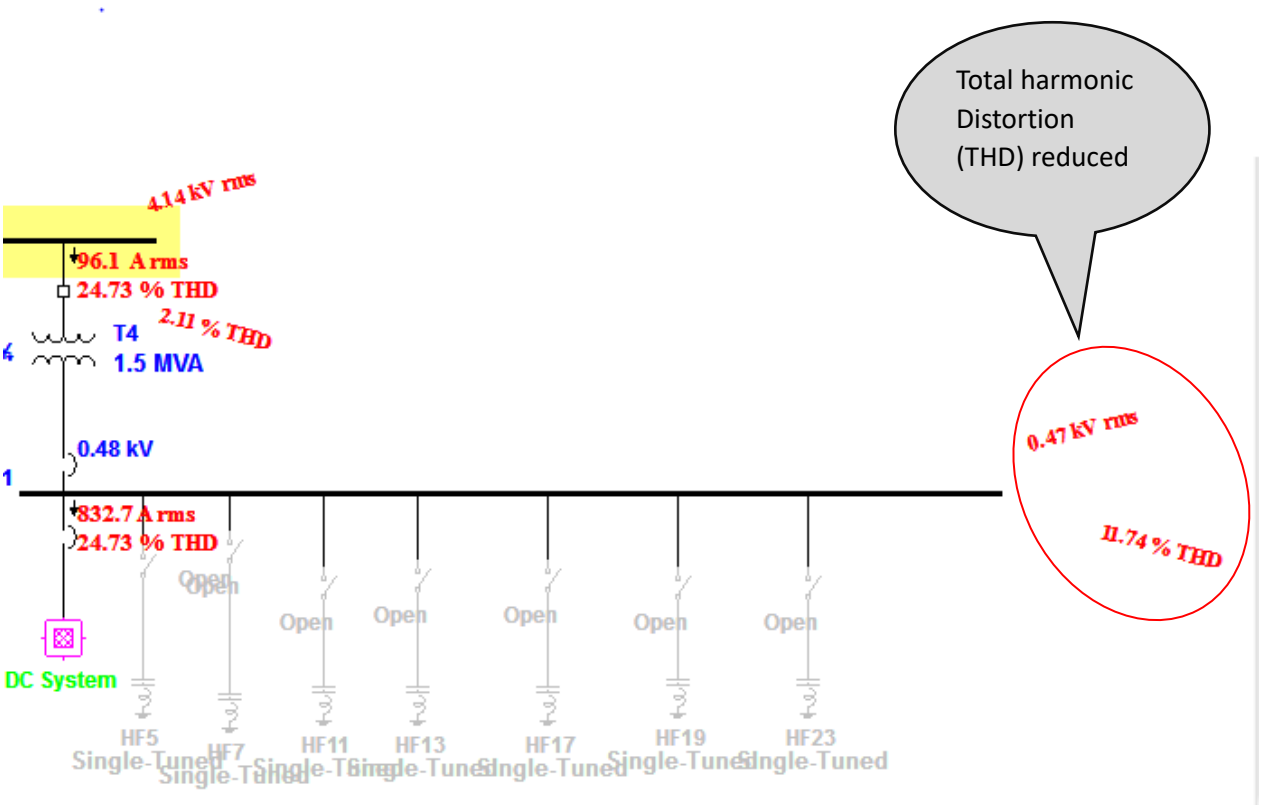


Figure 4.50: Étude du flux de charge harmonique (après la connexion des banques de condensateurs).

La conception du filtre pour le 7ème, 9ème, 11ème, 13ème, 17ème, 19 et 23ème ordre harmonique peut être faite par la même procédure où les valeurs de taille du filtre sont changées pour l'ordre. Les résultats du débit de charge harmonique sont présentés sur le diagramme d'une ligne à la figure 4.51.

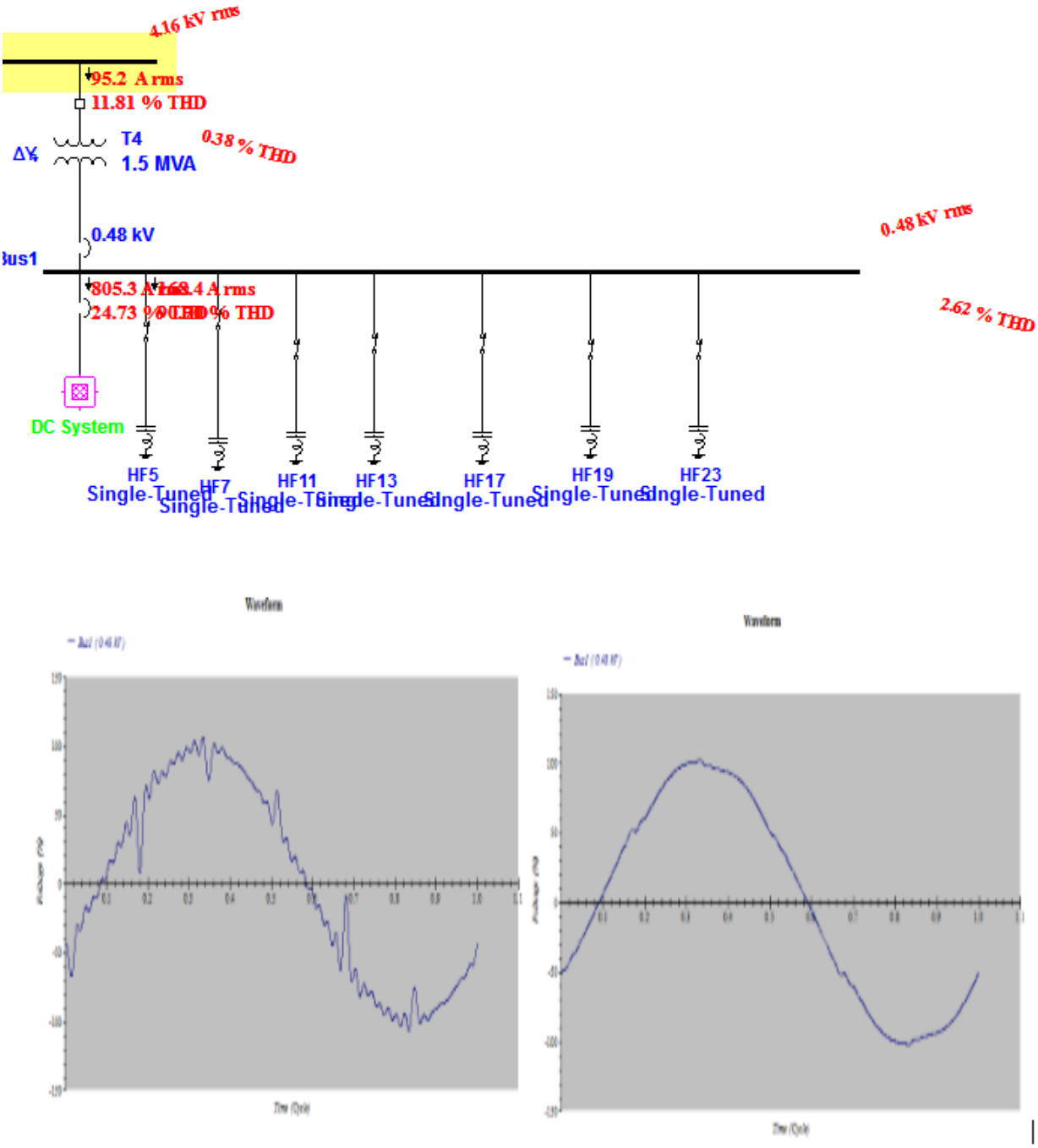


Figure 4.52: Graphiques du flux de charge harmonique (sans filtre à gauche et avec filtre à droite).

Figure 4.51: Analyse du flux de charge harmonique après l'ajustement du filtre.

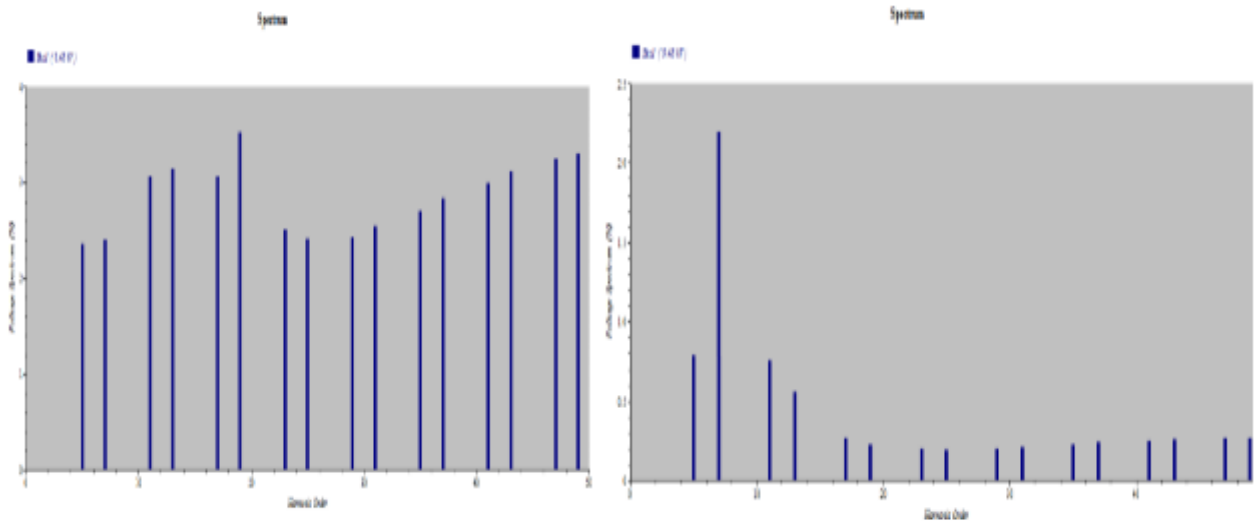


Figure 4.53: Graphiques harmoniques (spectre de tension sans filtre à gauche et avec filtre à droite).

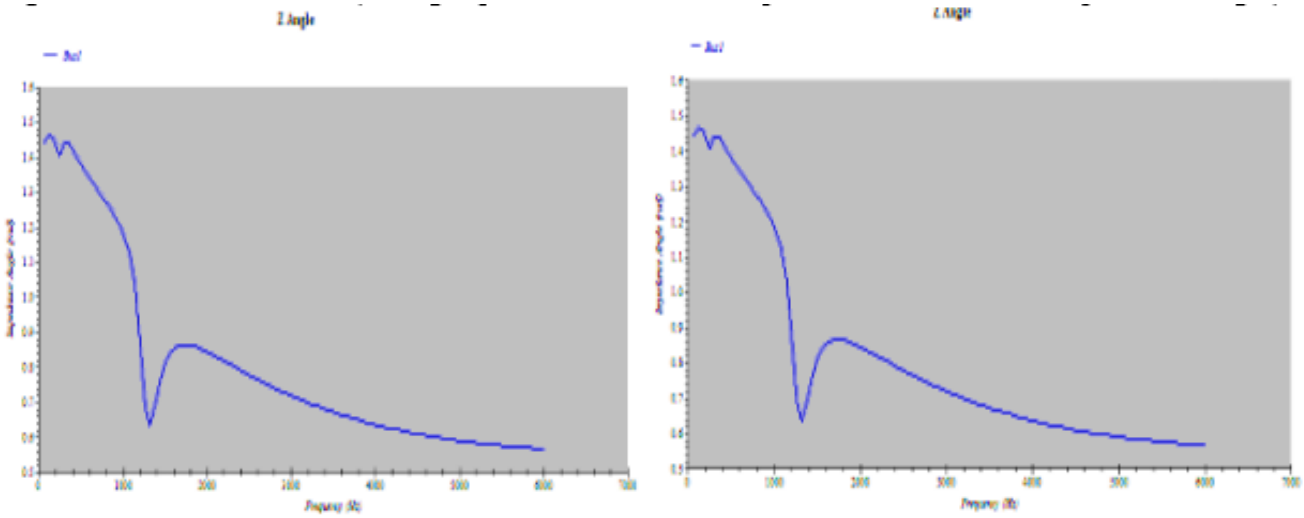


Figure 4.54: Graphique de l'impédance harmonique-angle (sans filtre à gauche et avec filtre à droite).

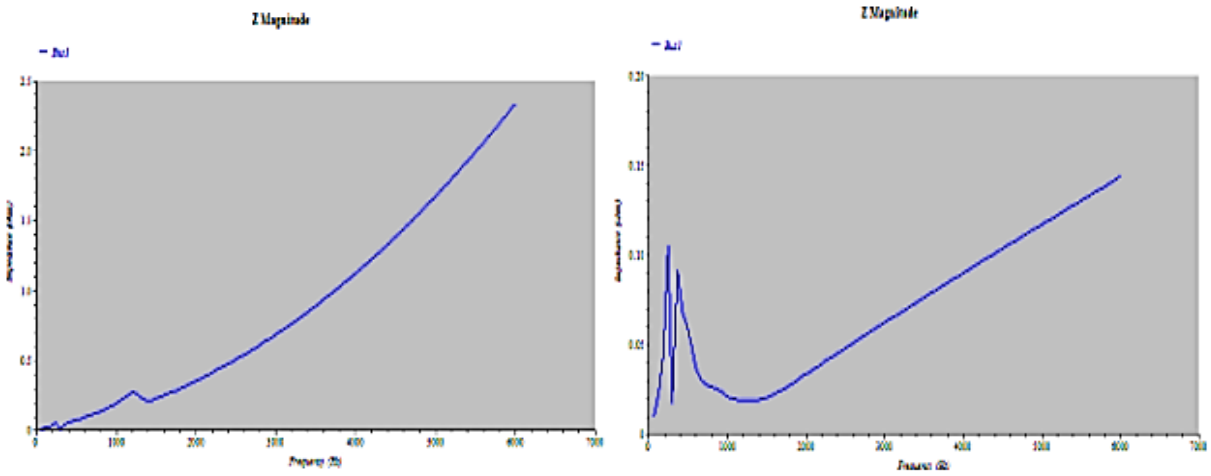


Figure 4.55: Graphique de l'impédance harmonique-amplitude (sans condensateur à gauche et avec condensateur à droite).

4.2.3 Élimination des harmoniques à l'aide d'un filtre

Pour éliminer la distorsion harmonique de ce réseau d'alimentation, un filtre à réglage unique est choisi. Dans ETAP, ce filtre est conçu pour fournir suffisamment de puissance réactive au réseau de la centrale et réduire les pertes à la fréquence fondamentale. Le filtre peut calculer automatiquement sa valeur de paramètre en fonction de la modélisation du filtre en utilisant l'option de taille du filtre harmonique.

Comme indiqué dans l'analyse du flux de charge harmonique, les 7ème, 9ème, 11ème, 17ème, 19ème et 23ème ordres harmoniques contribuent à la déformation harmonique dans deux bus chacun pour ce réseau d'alimentation.

Le processus de conception du filtre harmonique pour le 5ème ordre harmonique sera détaillé. Le spectre de distorsion harmonique pour les quatre bus est montré ci-dessous, où la barre du bus 1 (0,48 kV) présente la plus grande déformation en raison de la source harmonique.

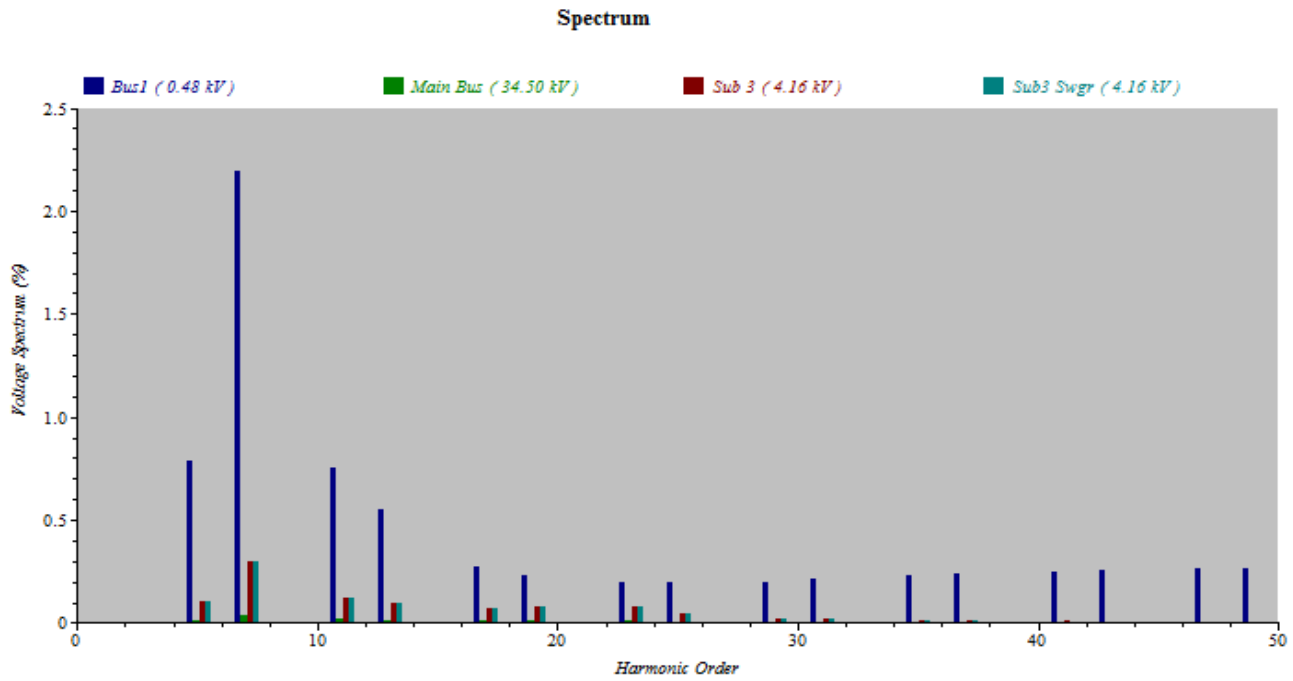


Figure 4.56: Graphique des harmoniques (spectre de tension pour les quatre bus).

En examinant la valeur de fonctionnement de la fenêtre d'alerte, on constate que la valeur maximale peut être saisie dans une limite marginale. La page d'alerte pour cette étude du débit de charge harmonique est présentée à la figure 4.57.

Study Case: HA
Configuration: Fiter-ON
Data Revision: Base
Date: 05-24-2023

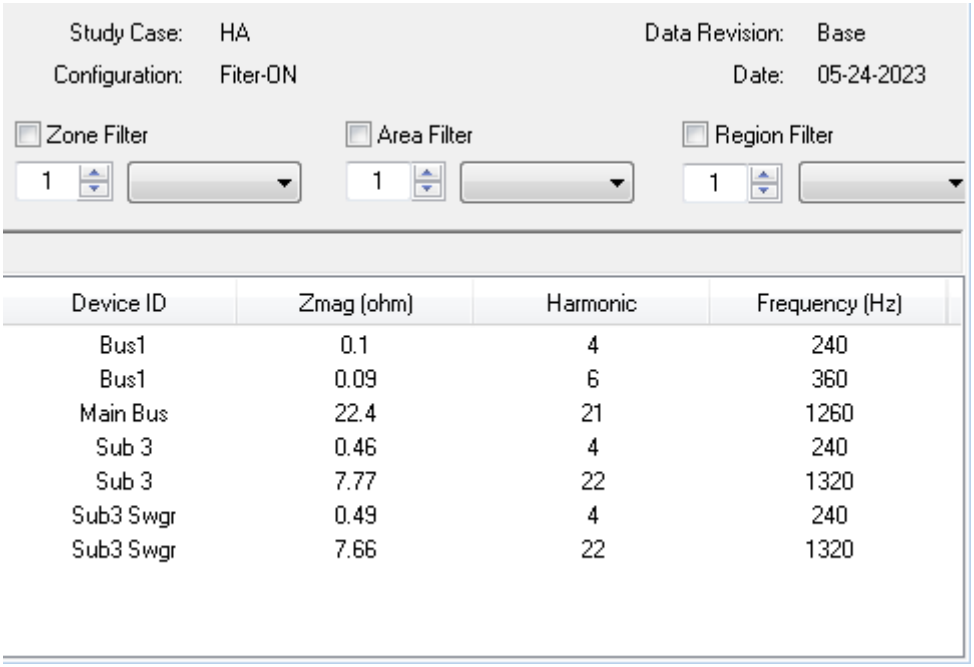
Zone Filter 1
Area Filter 1
Region Filter 1

Critical

Device ID	Type	Condition	Rating /Limit	Operating	% Operating	Harmonic
HF11	kV	Over Voltage	0	0.43	999	Capacitor1 ..
HF11	Amp	Overcurrent	0	126.94	999	Inductor1 A..
HF13	kV	Over Voltage	0	0.43	999	Capacitor1 ..
HF13	Amp	Overcurrent	0	126.52	999	Inductor1 A..
HF17	kV	Over Voltage	0	0.43	999	Capacitor1 ..
HF17	Amp	Overcurrent	0	125.46	999	Inductor1 A..
HF19	kV	Over Voltage	0	0.43	999	Capacitor1 ..
HF19	Amp	Overcurrent	0	125.29	999	Inductor1 A..
HF23	kV	Over Voltage	0	0.43	999	Capacitor1 ..
HF23	Amp	Overcurrent	0	125.91	999	Inductor1 A..
HF5	kV	Over Voltage	0	0.5	999	Capacitor1 ..
HF5	Amp	Overcurrent	0	168.44	999	Inductor1 A..
HF7	kV	Over Voltage	0	0.43	999	Capacitor1 ..
HF7	Amp	Overcurrent	0	129.33	999	Inductor1 A..

Figure 4.57: Analyse du flux de charge harmonique - Vue d'alerte.

De plus, lors de l'exécution d'un balayage des fréquences harmoniques, on peut observer la présence de cinq fréquences de résonance dues à la présence de trois filtres harmoniques. Ces fréquences de résonance se produisent aux harmoniques d'ordre 4, 6, 21 et 22. Ces ordres harmoniques ne correspondent pas aux caractéristiques de fréquence d'un convertisseur à 12 impulsions, ce qui permet de traiter efficacement le problème de résonance harmonique.



Device ID	Zmag (ohm)	Harmonic	Frequency (Hz)
Bus1	0.1	4	240
Bus1	0.09	6	360
Main Bus	22.4	21	1260
Sub 3	0.46	4	240
Sub 3	7.77	22	1320
Sub3 Swgr	0.49	4	240
Sub3 Swgr	7.66	22	1320

Figure 4.58: La vue d'alerte pour le balayage des fréquences.

4.3 Conclusion:

L'objectif principal de ce chapitre était de développer une compréhension approfondie de l'analyse des harmoniques et de présenter des méthodes pour atténuer les problèmes qui y sont associés. En comprenant les sources d'harmoniques dans un système électrique, il devient possible d'adopter des techniques de filtrage appropriées pour réduire ces harmoniques indésirables.

Pour atténuer les harmoniques, le chapitre a présenté des techniques telles que l'utilisation de filtres harmoniques et de banques de condensateurs. Ces méthodes permettent de réduire la distorsion harmonique et de maintenir la qualité de l'alimentation électrique dans les limites acceptables définies par les normes industrielles.

En conclusion, ce chapitre met l'accent sur l'importance de comprendre les harmoniques, d'identifier leurs sources et de mettre en œuvre des mesures correctives appropriées. En suivant ces approches, il est possible de prévenir les problèmes de qualité de l'alimentation électrique liés aux harmoniques et de garantir un fonctionnement fiable et conforme aux normes du système électrique.

EXEMPLE 2 :

4.4 INTRODUCTION :

Pour l'analyse harmonique, différents types de réseaux électriques sont utilisés pour la simulation dans le logiciel ETAP. Ici, les composants harmoniques sont modélisés pour créer un courant harmonique pour la distorsion harmonique dans les réseaux électriques. 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.

4.5 Un réseau simple à 4 bus :

Un système simple à 4 bus est modélisé comme un diagramme en ligne pour effectuer une analyse harmonique. Une charge connectée à la barre omnibus 3 modélisée comme source harmonique pour créer une harmonique distorsion dans ce réseau électrique. L'action de cette source harmonique sur la puissance Le réseau sera étudié à l'aide de l'analyse harmonique et des techniques d'atténuation. sera pris pour éliminer toute distorsion harmonique.

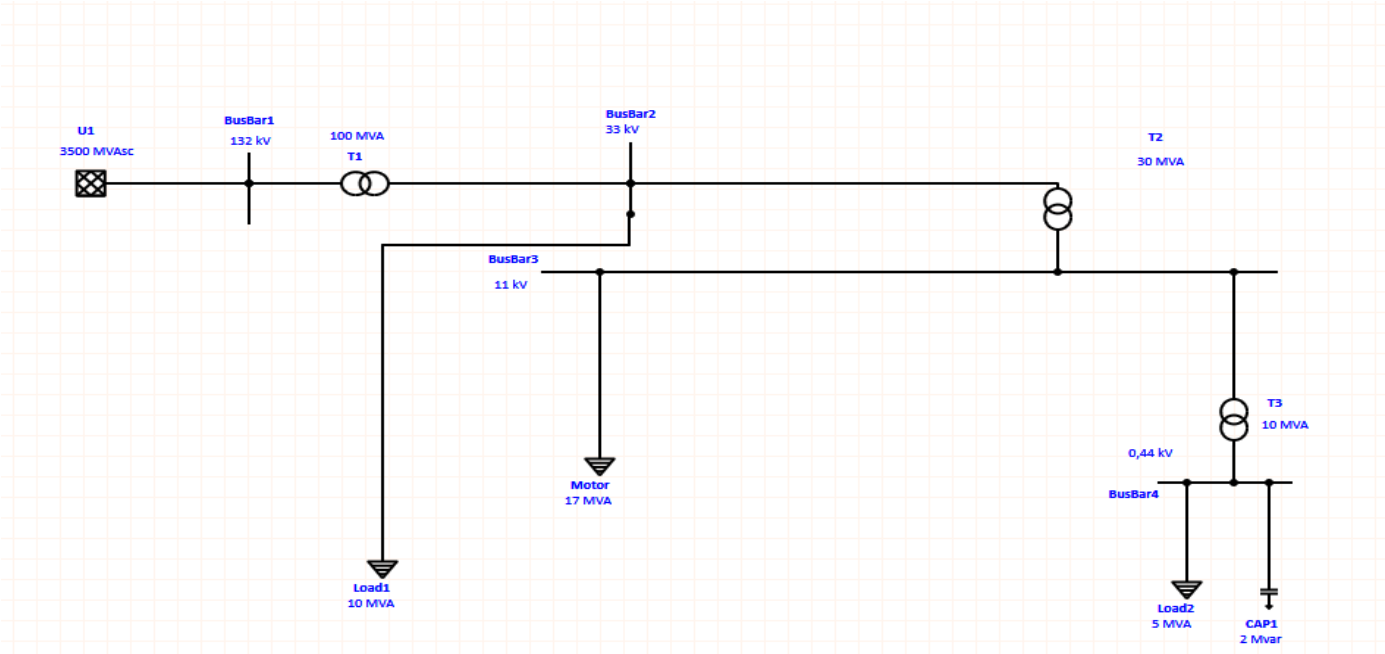


Figure 4.59: Diagramme unifilaire

4.5.1 Modélisation du réseau :

Les composants de ce réseau à 4 bus proviennent de la bibliothèque ETAP. L'extérieur Le réseau est connecté à une barre omnibus de 132 kV (le bus Swing), puis le niveau de tension a est passé de 132 kV à 33 kV en utilisant 2 transformateurs d'enroulement de 100 MVA.

Les paramètres Z% et X/R typiques ont été introduits dans la page de l'éditeur de transformateur illustrée ci-dessous.

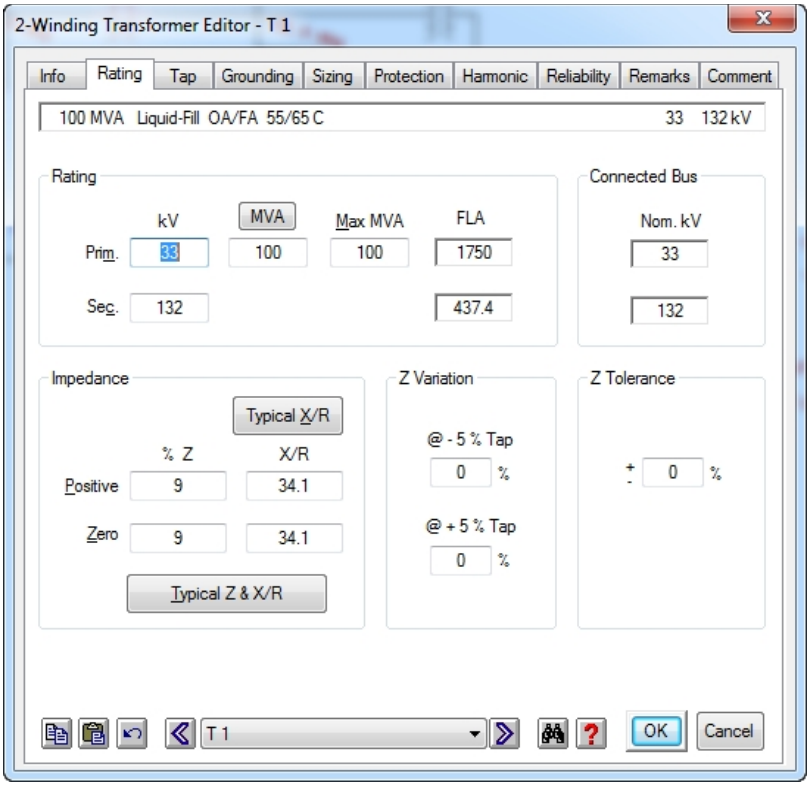


Figure 4.60: Page de l'éditeur du transformateur d'enroulement 2

Un autre côté du transformateur est connecté à la barre omnibus 2 à sa tension nominale de 33 kV. Transformateur T2 de charge 1 et 30 MVA connecté à cette barre omnibus et au secondairecôté du transformateur est connecté avec la barre omnibus 3 à 11kV.

Ici aussi le Z% typique et Les valeurs X/R ont été introduites dans la page de l'éditeur du transformateur T2. La barre de bus 3 est connectée avec barre omnibus 4 par un autre transformateur T3 (10 MVA classé). Une charge modélisée comme une harmonique source nommée 'Motor' connectée à la barre de bus 3. Cette source harmonique a été modélisée en cliquant surla page **Harmonic** de l'éditeur de charge. L'harmonique à 12 impulsions a été

sélectionnée dans la bibliothèque d'harmoniques. La page harmonique du moteur est représentée sur la figure.

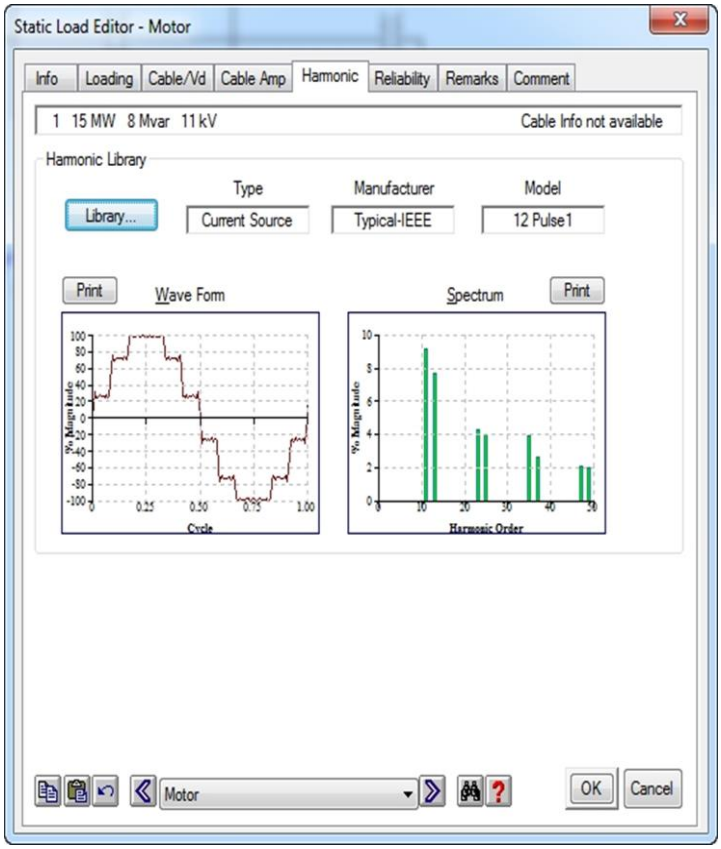


Figure 4.61: Page harmonique de la charge

Une autre charge nommée 'Charge 2' et condensateur connecté à la barre omnibus 4 à 440 V nominal tension. Toutes les connexions du modèle sont étoile-delta, de sorte que le déphasage a été réglé à 30 . Tous les bus sont conçus conformément aux normes IEEE519 pour vérifier la distorsion harmonique. Par défaut, ETAP définit tous les bus pour autoriser 2,5% THD (Total Distorsion harmonique) et 1,5% IHD (distorsion harmonique individuelle) et peut être Personnalisé en fonction des besoins des utilisateurs.

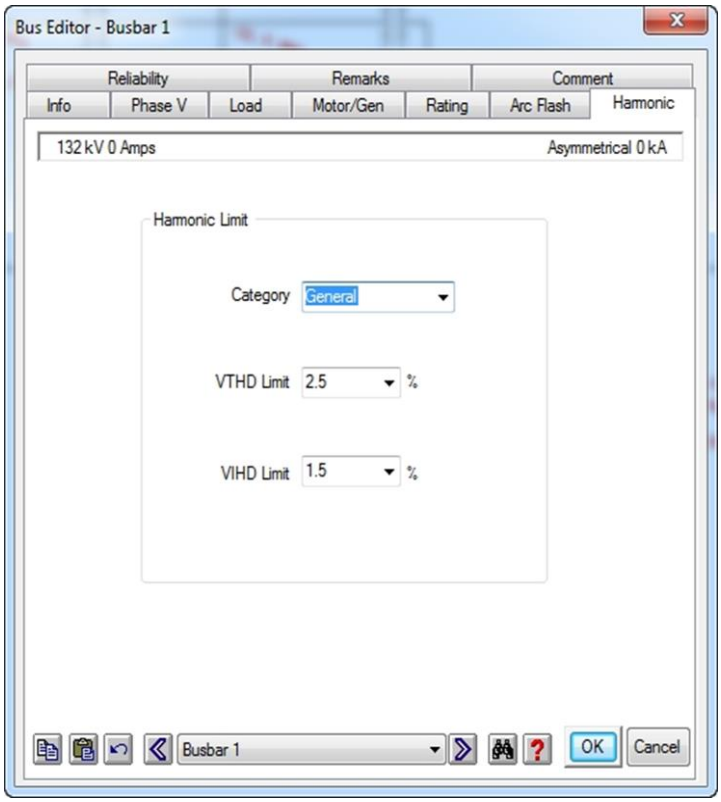


Figure 4.62: Limite harmonique dans la page de l'éditeur de bus.

Ces valeurs sélectionnées seront comparées aux valeurs THD et IHD calculées après Réalisation d'une étude de flux de chargeharmonique. Si un bus va au-delà ou au-dessus de ce prédéfini limite, le message d'alerte clignotera pour prendre connaissance de cette condition en indiquant clairement le limite et limite d'exploitation. Les conditions de surtension et de sous-tension doivent également être indiquées dans la fenêtre d'alerte. Cette violation pourrait être critique (lorsque les conditions doivent être vérifié dès que possible) ou marginal (où l'alternance de charge fixerait habituellement le problème). Après avoir modélisé tous les composants du réseau électrique, le système sera Prêt à exécuter l'analyse du flux de charge équilibré.

4.5.2 Analyse du flux de charge équilibré :

Un flux de charge équilibré doit être performant pour obtenir la valeur MVA et le facteur de puissance qui peut être utilisé au moment du dimensionnement du filtre. Ici, la méthode Gauss Seidel a été menée pour effectuer l'analyse du flux de charge. Le résultat d'un flux de charge équilibré est affiché sur une ligne et peut être affiché par le Gestionnaire de rapports.

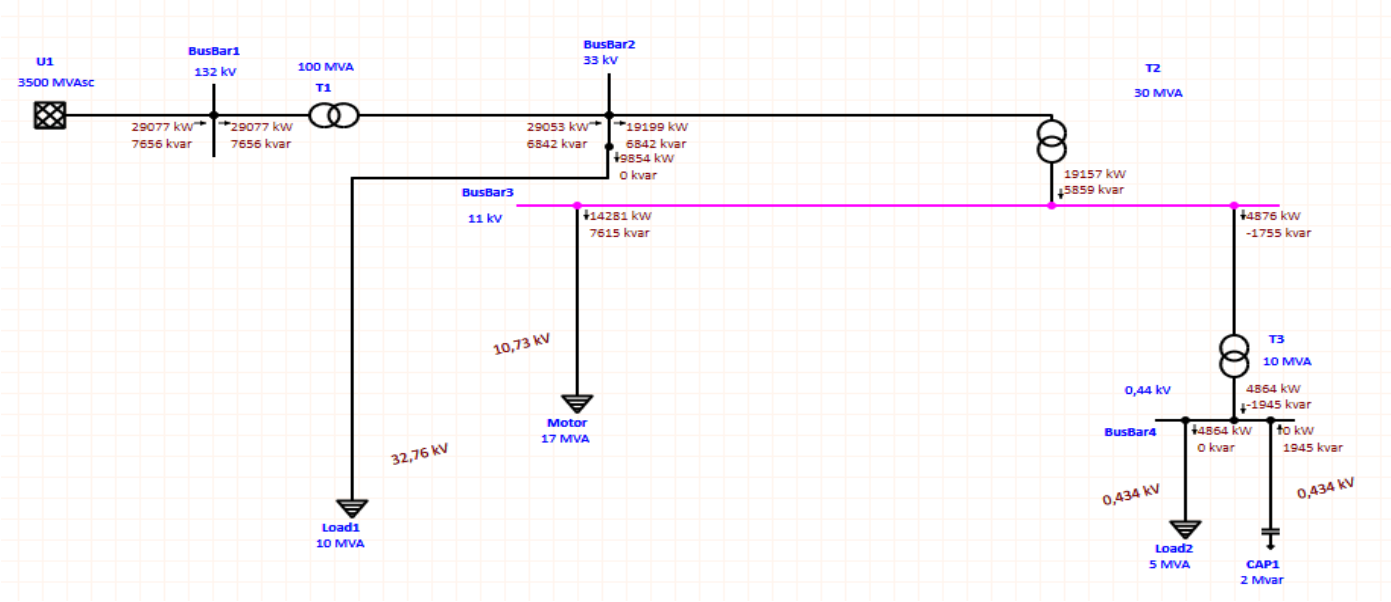


Figure 4.63: Résultat de l'analyse du flux de charge équilibré.

4.5.3 Analyse du flux de charge harmonique :

Pour vérifier la distorsion harmonique ou l'effet de la source harmonique sur le réseau électrique, Le flux de charge harmonique doit être effectué. Ici, le flux de charge harmonique est effectué pour condition générale de chargement, peut être changé à l'état d'hiver ou d'été.

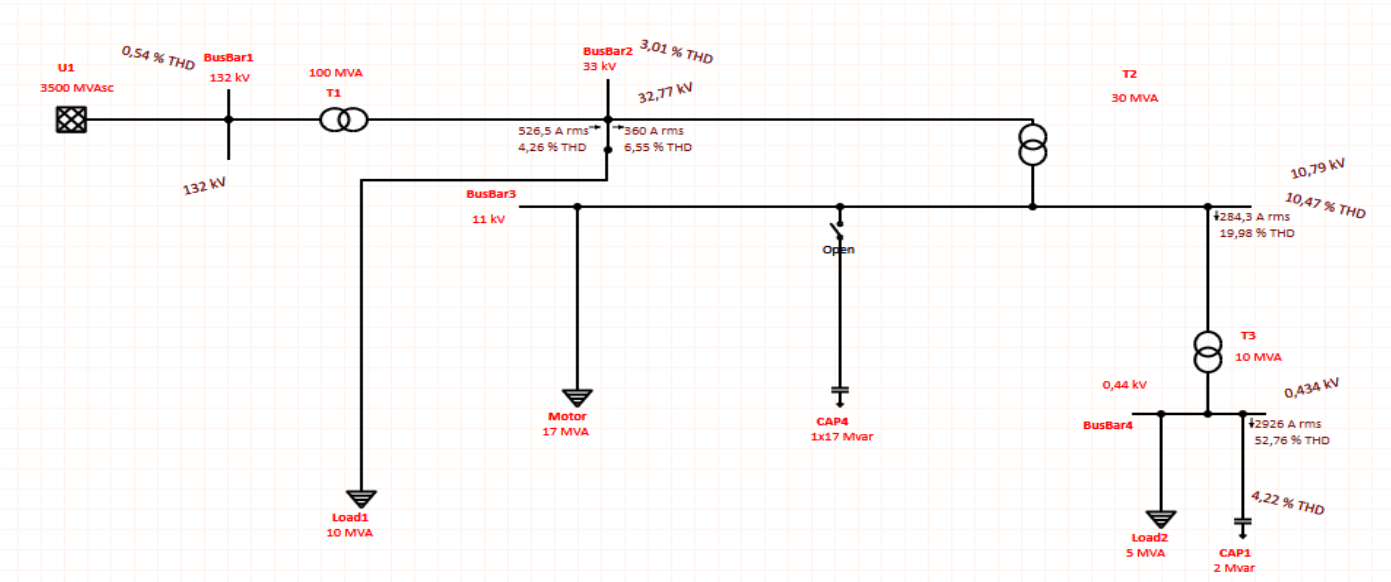


Figure 4.64: Résultat du flux de charge harmonique.

En effectuant l'étude du flux de charge harmonique, on peut voir qu'il y a des fréquence d'une plus grande ampleur dépassant la limite THD et IHD.

De la fenêtre d'alerte (figure), on peut voir que, les 11ème, 13ème et 35ème ordres Harmonic contribue dans deux bus chacun. Les ordres harmoniques donnés dans l'alerte dépassent la limite prédéfinie de THD et IHD

Harmonic Load Flow Analysis Alert View - Output Report: Untitled

Study Case: HA
Configuration: Normal

Data Revision: Base
Date: 12-05-2023

Filter
☐ Zone ☐ Area ☐ Region

Critical

Device ID	Type	Condition	Rating /Limit	Operating	% Operating	Harmonic
BusBar4	Bus IHD	Exceeds Limit	1,5	3,51	233,98	11.00
BusBar4	Bus IHD	Exceeds Limit	1,5	2,2	146,96	13.00
BusBar4	Bus THD	Exceeds Limit	2,5	4,22	168,86	Total
BusBar3	Bus IHD	Exceeds Limit	1,5	2,97	198,3	11.00
BusBar3	Bus IHD	Exceeds Limit	1,5	3,25	216,84	13.00
BusBar3	Bus IHD	Exceeds Limit	1,5	3,7	246,61	23.00
BusBar3	Bus IHD	Exceeds Limit	1,5	3,78	251,82	25.00
BusBar3	Bus IHD	Exceeds Limit	1,5	3,96	263,94	35.00
BusBar3	Bus IHD	Exceeds Limit	1,5	3,92	261,08	37.00
BusBar3	Bus IHD	Exceeds Limit	1,5	3,96	264,07	47.00
BusBar3	Bus IHD	Exceeds Limit	1,5	3,95	263,43	49.00
BusBar3	Bus THD	Exceeds Limit	2,5	10,47	418,94	Total
BusBar2	Bus THD	Exceeds Limit	2,5	3,01	120,42	Total

Figure 4.65: Fenêtre d'alerte (étude du flux de charge harmonique).

Les formes d'onde de tension des quatre bus après analyse du flux de charge harmonique. Il pe ut être vu que, la forme d'onde de la barre de bus 3 (11 kV) est la plus déformée en raison de la source harmonique connectée à ce bus.

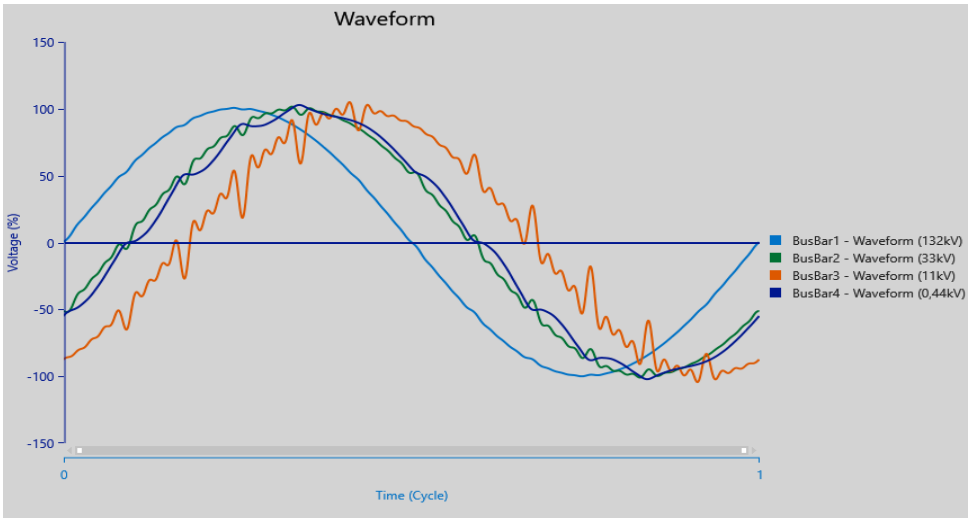


Figure 4.66: Tracés du flux de charge harmonique (tous les bus).

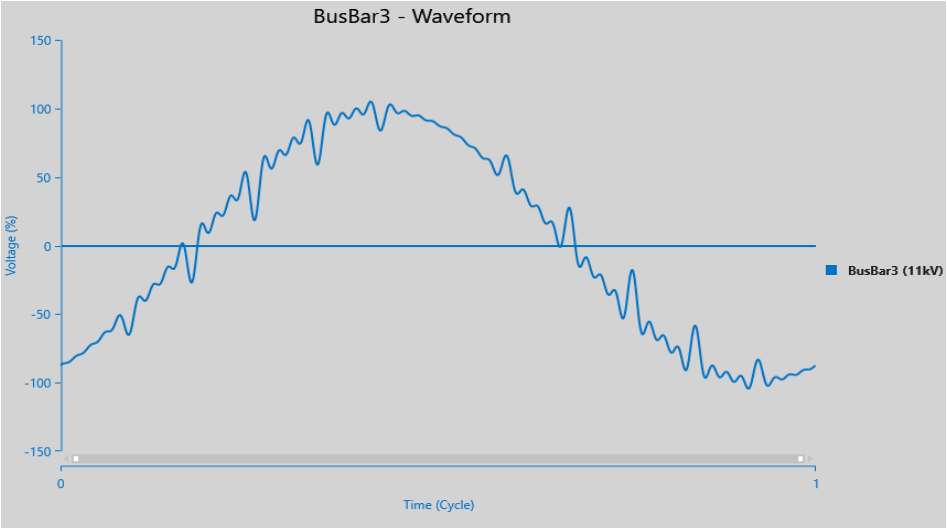


Figure 4.67: Diagramme de flux de charge harmonique (barre omnibus 3).

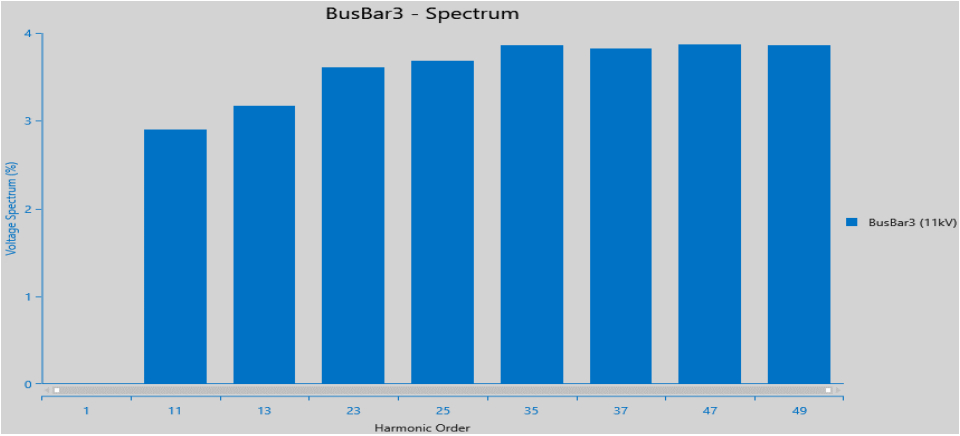


Figure 4.68 : Diagramme du débit de charge harmonique (spectre de tension pour la barre omnibus 3).

4.5.4 Balayage de fréquence harmonique :

Lors de l'étude du balayage de fréquence de fonctionnement, l'angle d'impédance peut être vu sur le diagramme d'une ligne du réseau électrique. Cela peut être affiché dans le gestionnaire de rapports, qui est donné sur appendice. Ici, la fréquence choisie pour le réseau électrique est de 50Hz.

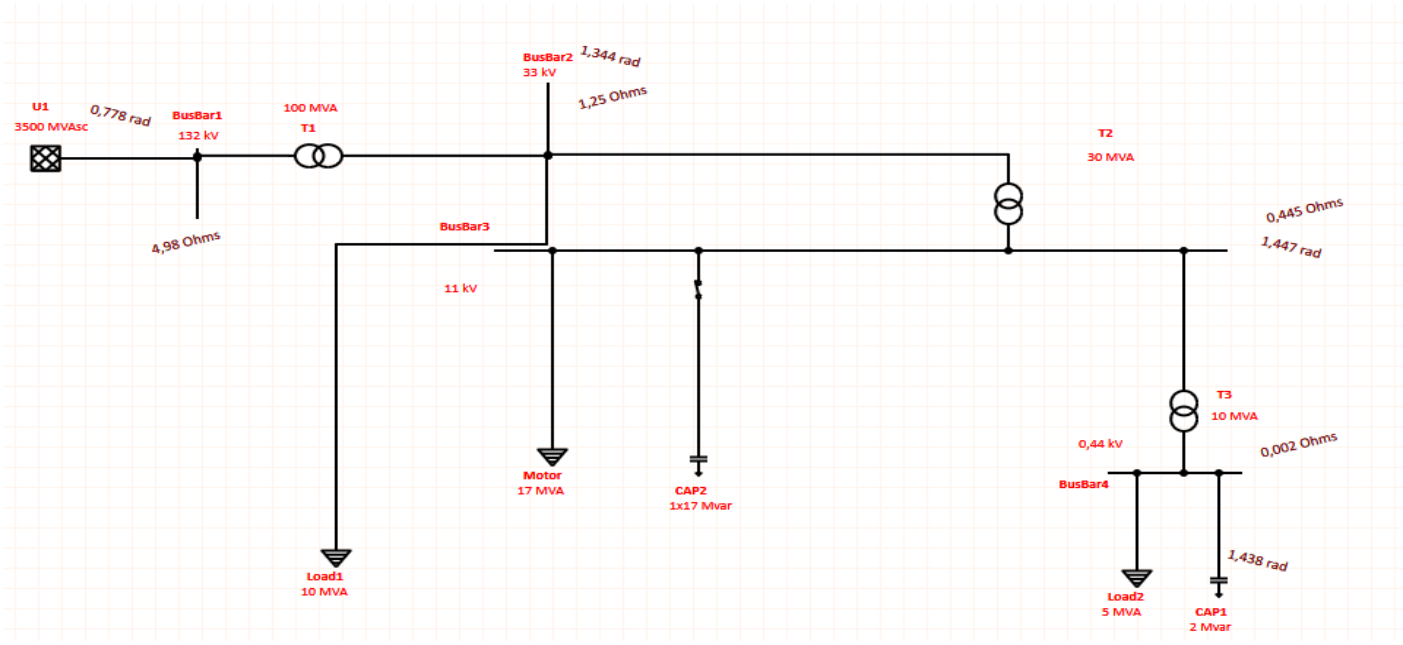


Figure 4.69: Résultat du balayage de fréquence harmonique.

De la fenêtre d'alerte, on peut voir que la résonance parallèle s'est produite aux 6ème et 7ème ordre harmonique à la fréquence de 300 Hz et 350Hz. le problème de la résonance parallèle.

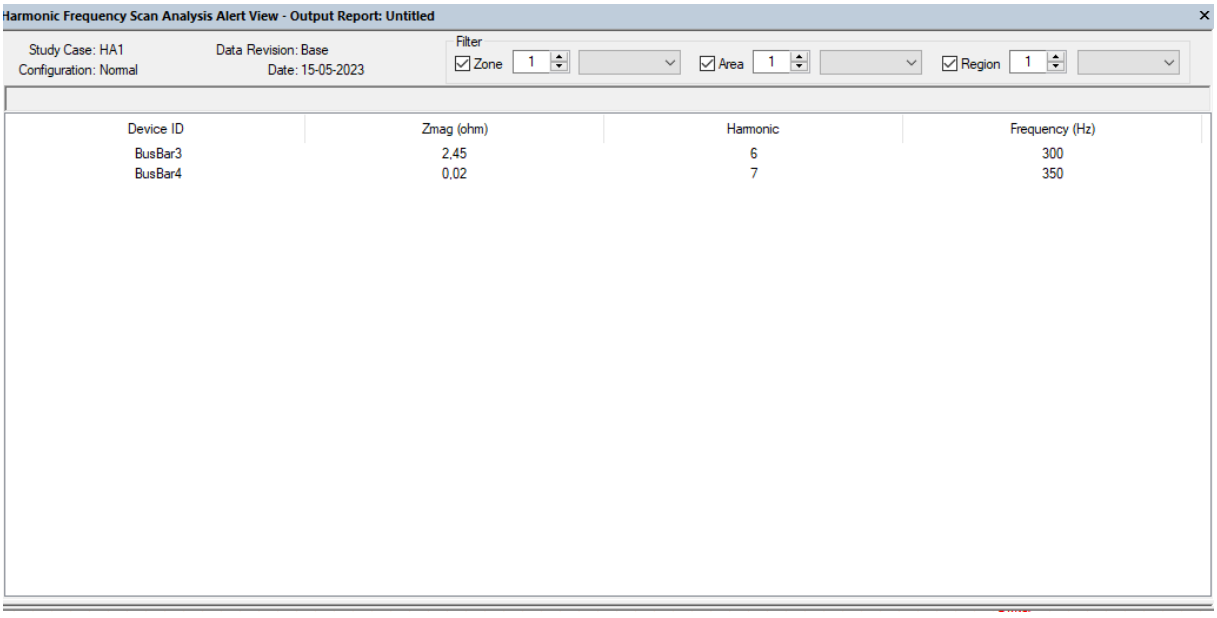


Figure 4.70: Fenêtre d'alerte (balayage de fréquence harmonique).

Résonance parallèle:

La résonance parallèle est le point où la réactance capacitive et inductive de tout réseau électrique est égale. Ce phénomène se produit généralement en présence de condensateurs. Après avoir exécuté une étude de fréquence harmonique dans ETAP, il est possible d'identifier ce point de résonance parallèle. Si cette résonance harmonique se produit, elle peut générer des courants et des tensions hautement cotés à la fréquence de résonance, ce qui peut provoquer des problèmes de qualité d'énergie. Cependant, cette fréquence de résonance ne causera de problèmes que s'il y a une source d'harmoniques présente à cette fréquence où les impédances correspondent les unes aux autres. Dans notre étude de la charge harmonique, nous pouvons constater qu'il n'y a pas de sources harmoniques dépassant la limite en 6e et 7e ordre, donc cette résonance parallèle ne devrait pas causer de problèmes pour le réseau électrique. Si la résonance parallèle crée des problèmes, cela peut être résolu par le réglage d'un filtre pour cet ordre harmonique particulier.

Courbes d'amplitude d'impédance et d'angle d'impédance après balayage de fréquence harmonique sont donnés ci-dessous.

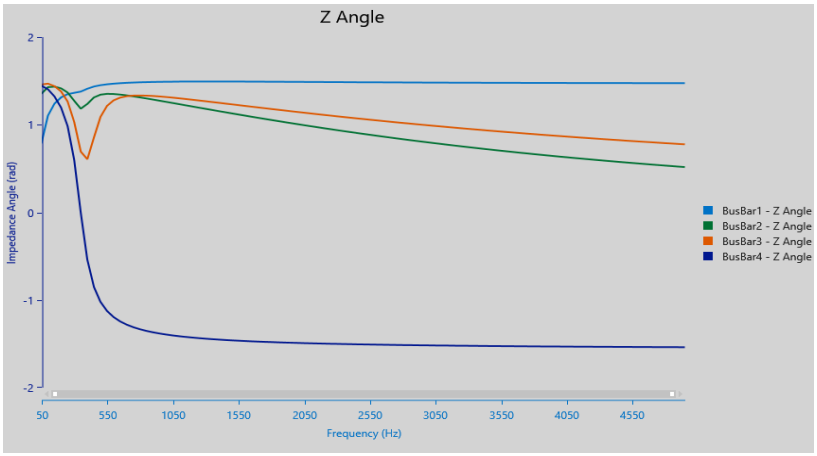


Figure 4.71: Tracé du balayage de fréquence harmonique, angle d'impédance (tous les bus).

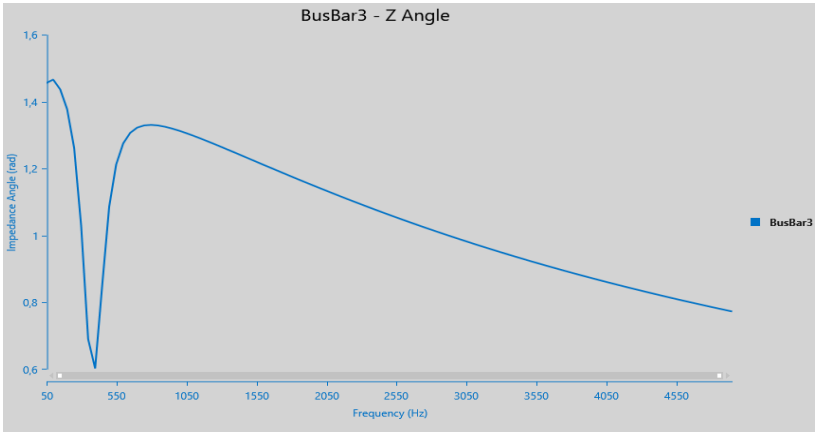


Figure 4.72 : Tracé du balayage de fréquence harmonique, angle d'impédance (Bus 3).

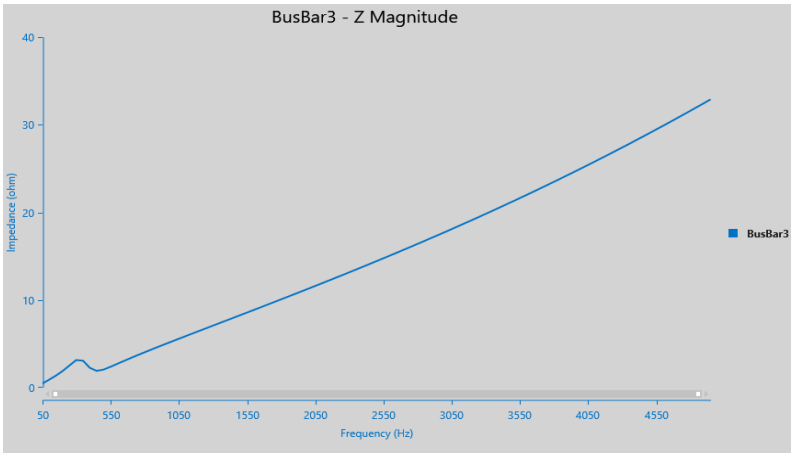


Figure 4.73: Harmonic Frequency Scan Plot, impedance- magnitude (Bus 3).

4.5.5 Élimination des harmoniques à l'aide de batteries de condensateurs :

Pour éliminer les harmoniques de ce réseau électrique, 17 batteries de condensateurs Mvar ont été utilisées avec barre de bus 3. En utilisant le mécanisme d'essai et d'erreur de la page d'alerte, cette valeur Mvar ont été choisis pour fournir la puissance réactive nécessaire pour contrôler la tension et l'augmenter au-dessus de 98 % de la tension nominale du bus. Lors de

l'exécution d'une autre charge harmonique analyse de flux après connexion des batteries de condensateurs, on peut voir que le THD et l'IHD La distorsion a considérablement diminué et tous les bus sont dans les limites harmoniques.

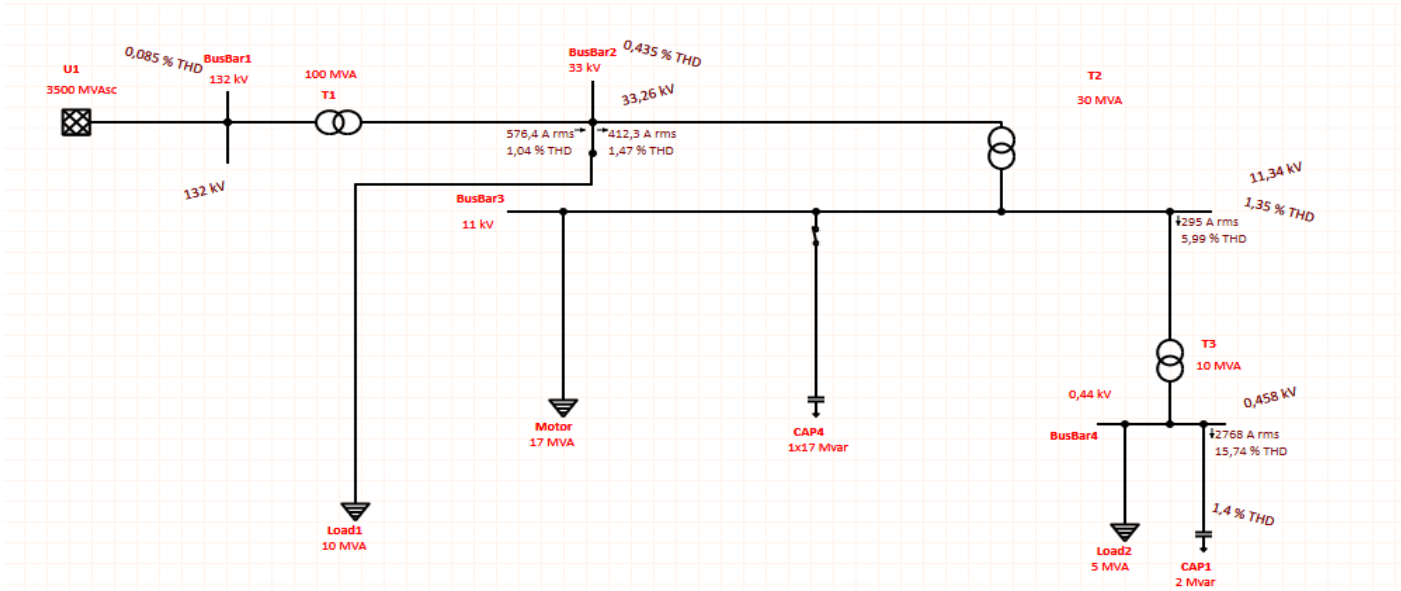


Figure 4.74: Étude du débit de charge harmonique (après connexion des batteries de condensateurs).

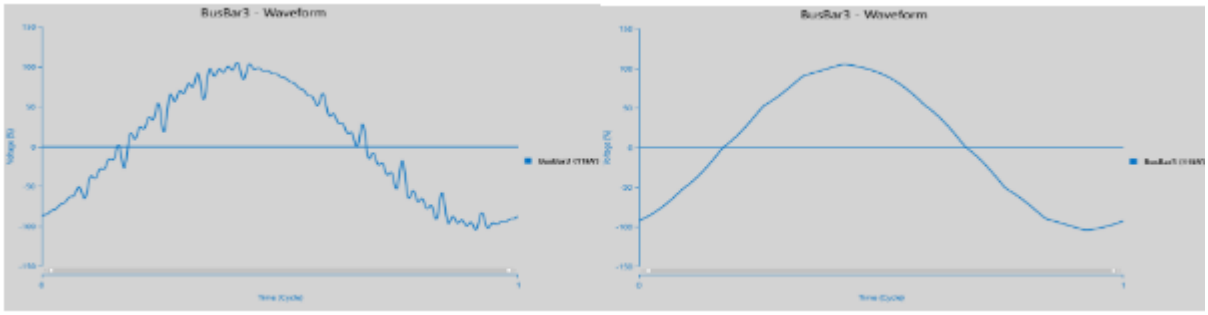


Figure 4.75: Tracés de flux de charge harmonique (sans condensateur à gauche et avec condensateur à droite.

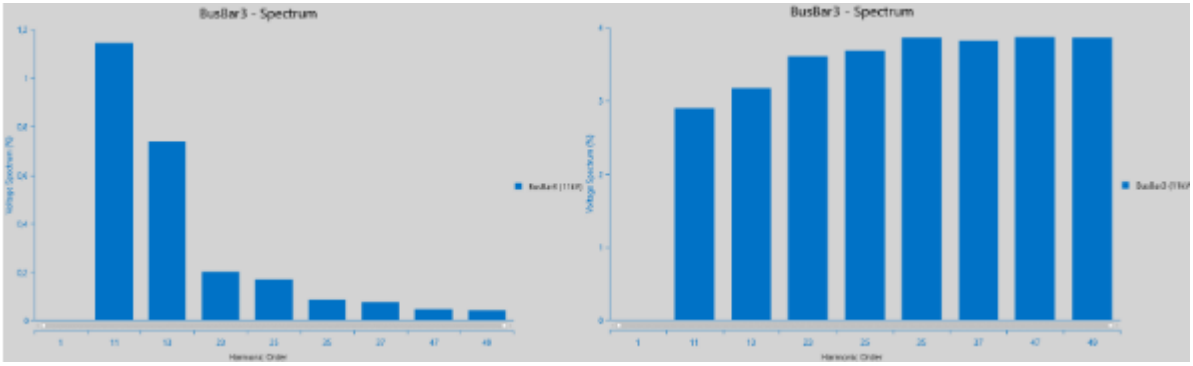


Figure 4.76: Tracés harmoniques (spectre de tension sans le condensateur à gauche et avec le condensateur à droite).

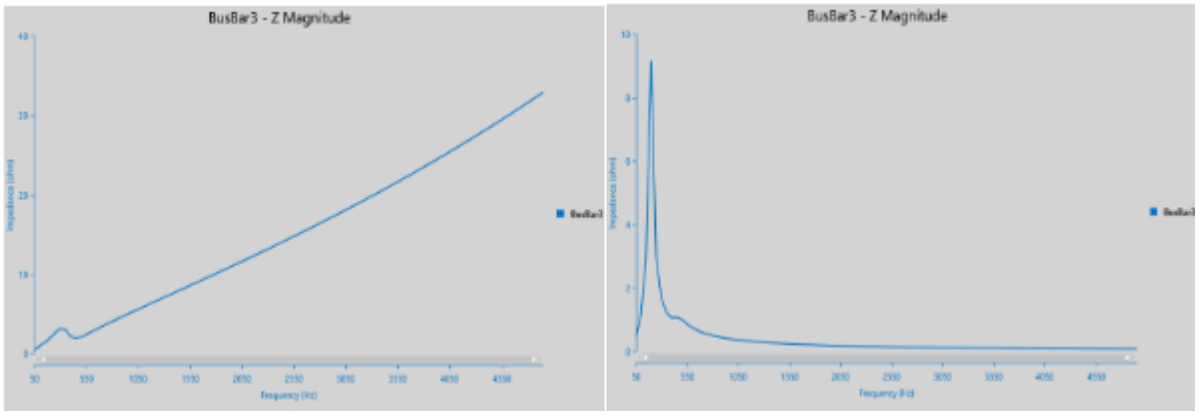


Figure 4.77: Diagramme d'impédance harmonique - magnitude (sans condensateur à gauche et avec condensateur à droite) .

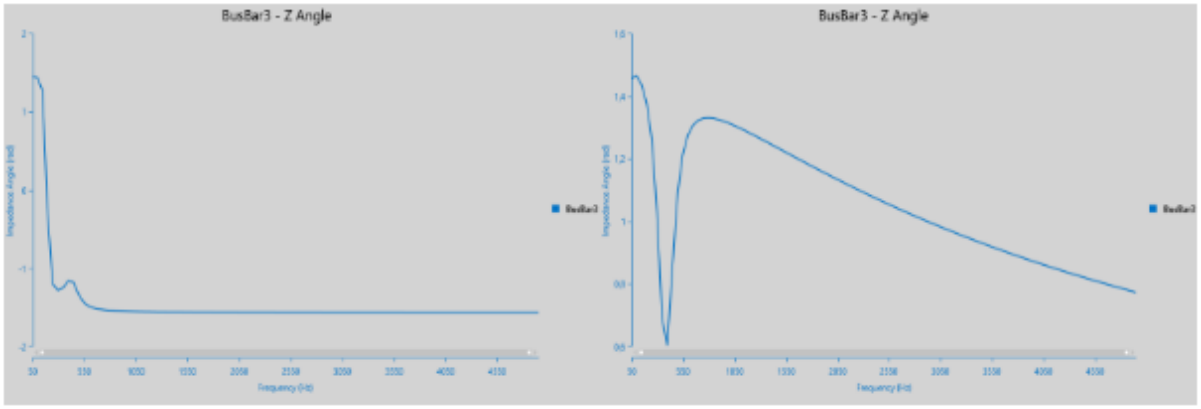


Figure 4.78: Tracé de l'angle d'impédance harmonique (sans condensateur à gauche et avec condensateur à droite) .

Après avoir connecté les batteries de condensateurs, il peut être vu dans un schéma linéaire, une forme d'onde ou spectre de tension que la distorsion harmonique totale (THD) a considérablement réduit. Le condensateur qui a été utilisé pour corriger la distorsion harmonique est pratiquement très coûteux. À partir du « gestionnaire de rapports », un rapport complet peut être généré, qui est joint à l'adresse L'annexe du présent rapport et le présent dossier de projet sont copiés sur CD aux fins d'une analyse plus approfondie.

4.5.6 Élimination des harmoniques à l'aide du filtre :

Un filtre à un seul réglage est choisi pour éliminer la distorsion des harmoniques pour cette puissance réseau. Dans ETAP, ce filtre est conçu pour fournir une puissance réactive suffisante au réseau d'usine et minimiser les pertes à la fréquence fondamentale. Ce filtre peut calculer automatiquement sa valeur de paramètre en fonction de la modélisation du filtre par en utilisant l'option 'Dimensionnement du filtre harmonique**.**

L'utilisateur peut concevoir le filtre en double-cliquant sur le composant de filtre et le paramètre de modification page. Le filtre à réglage unique peut être sélectionné dans l'option déroulante Type de filtre. Dans Condition initiale Tous les paramètres de ce filtre afficheront zéro. Afin de calculer le valeurs des paramètres du filtre le bouton 'Filtre de taille' doit être pressé pour en ouvrir un autre page où l'ordre harmonique requis dans lequel la distorsion harmonique doit être éliminé et le courant harmonique pour cet ordre harmonique particulier peut être entré dans Dimensionnez le filtre correctement. Le courant harmonique peut être trouvé sur le diagramme d'une ligne surtout après avoir effectué une étude de flux de charge harmonique au point de couplage commun

L'utilisateur peut concevoir le filtre en double-cliquant sur le composant de filtre et le paramètre de modification Comme décrit dans l'analyse du flux de charge harmonique, pour ce réseau électrique 11ème, 13ème et Le 35e ordre harmonique contribue à la distorsion harmonique dans deux bus chacun. Donc, si le harmoniques de cet ordre harmonique trois peuvent être éliminées, la plupart des harmoniques La distorsion de ce réseau électrique peut être réduite. Dans cette étude, trois filtres à réglage uniquesera conçu pour ces trois harmoniques afin d'éliminer la distorsion des harmoniques. Le processus de conception du filtre harmonique pour le 11e ordre harmonique sera montré dans Détails.

Le spectre de distorsion harmonique pour les quatre bus donnés ci-dessous où Bus

La mesure 3 (11kV) est la plus déformée pour la source harmonique.

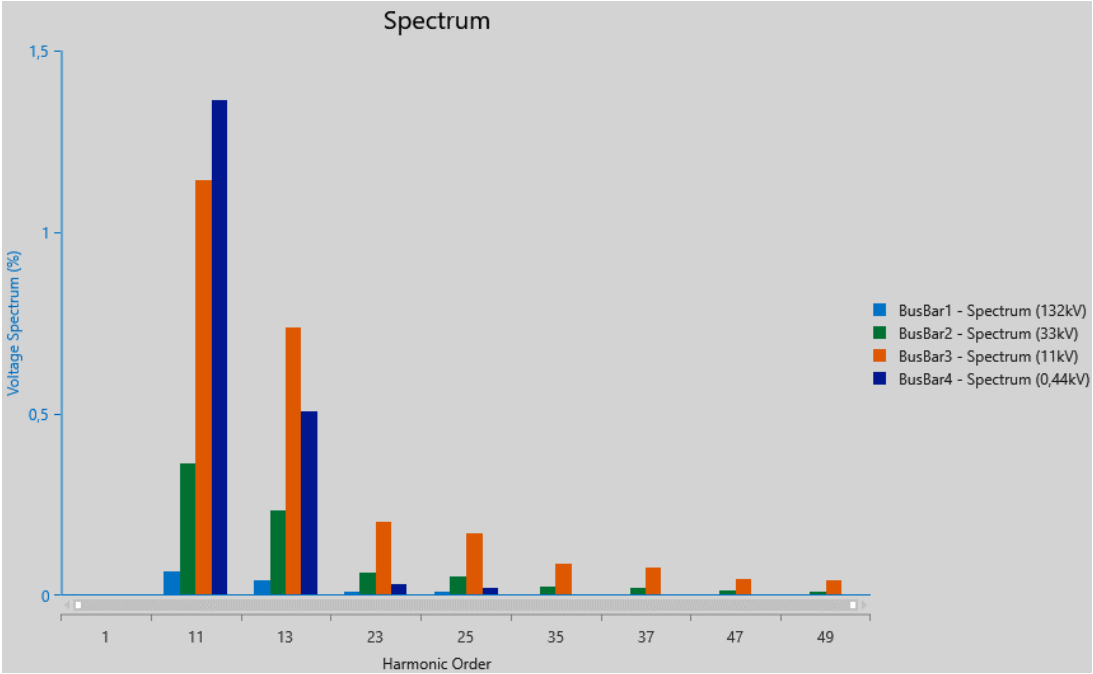


Figure 4.79: Tracé des harmoniques (spectre de tension pour les quatre bus).

La forme et le spectre des ondes déformées pour la barre omni bus 3 sont donnés aux figures et Dans Afin de concevoir un filtre à réglage unique pour la 11e commande, l'utilisateur doit cliquer sur la page des paramètres de éditeur de filtre harmonique, puis onglet 'Filtre de taille'. Selon les exigences, L'utilisateur doit alimenter les données pour dimensionner un filtre optimal. Si l'utilisateur est prêt à concevoir un filtrer sur la base de la correction existante du facteur de puissance du système, puis sur effectuer une analyse équilibrée du flux de charge, du facteur de puissance existant et de la MVA Les valeurs peuvent être trouvées . Après avoir effectué une analyse équilibrée du flux de charge pour la puissance , le résultat peut être trouvé comme indiqué ci-dessous.

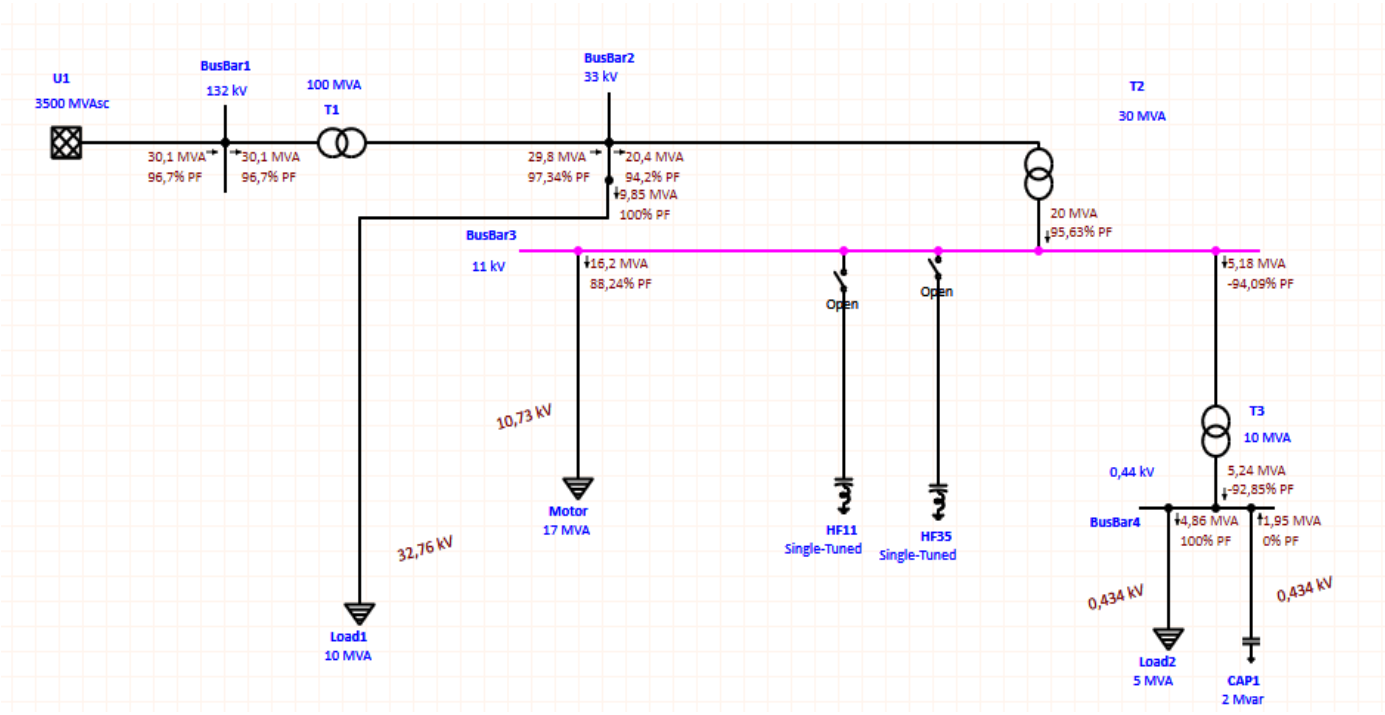


Figure 4.80: Analyse équilibrée du flux de charge.

À partir de cette analyse du flux de charge équilibré, on peut constater que le facteur de puissance existant 88,2 % et valeur MVA 16,2. Ces valeurs doivent être alimentées par l'option de correction PF et le facteur de puissance souhaité 95% doit être mis à l'option « PF souhaité ». Après avoir mis tous les valeur requise, l'aspect de l'éditeur de filtres harmoniques et du dimensionnement du filtre harmonique Comme les figures.

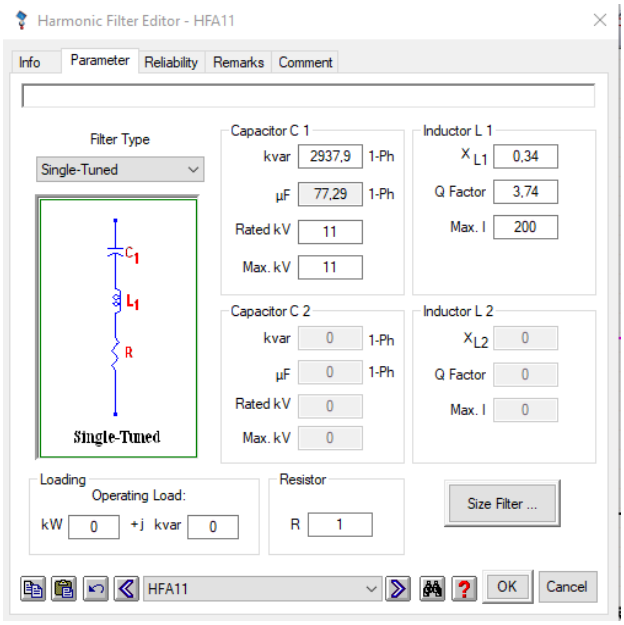


Figure 4.81: Page des paramètres de l'éditeur harmonique.

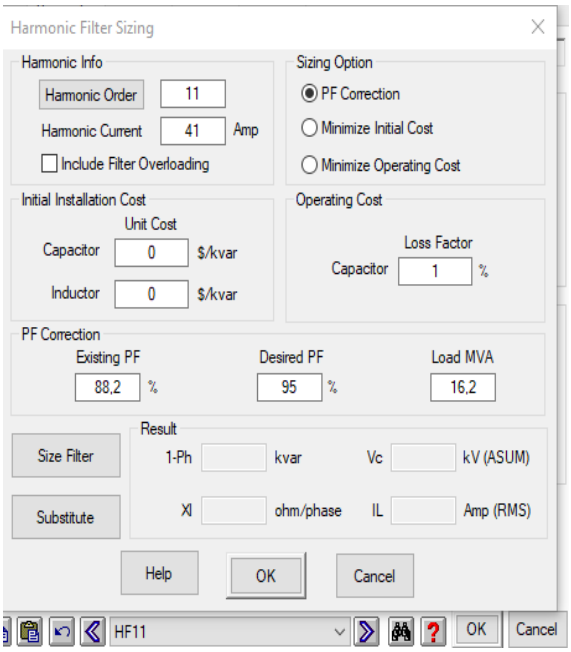


Figure 4.82: Dimensionnement du filtre harmonique.

Pour le 11ème ordre harmonique, courant harmonique 42Amp, qui peut être trouvé à une ligne

afficher après avoir effectué l'étude du flux de charge harmonique. Le résultat de la charge harmonique L'étude des flux est donnée à la figure

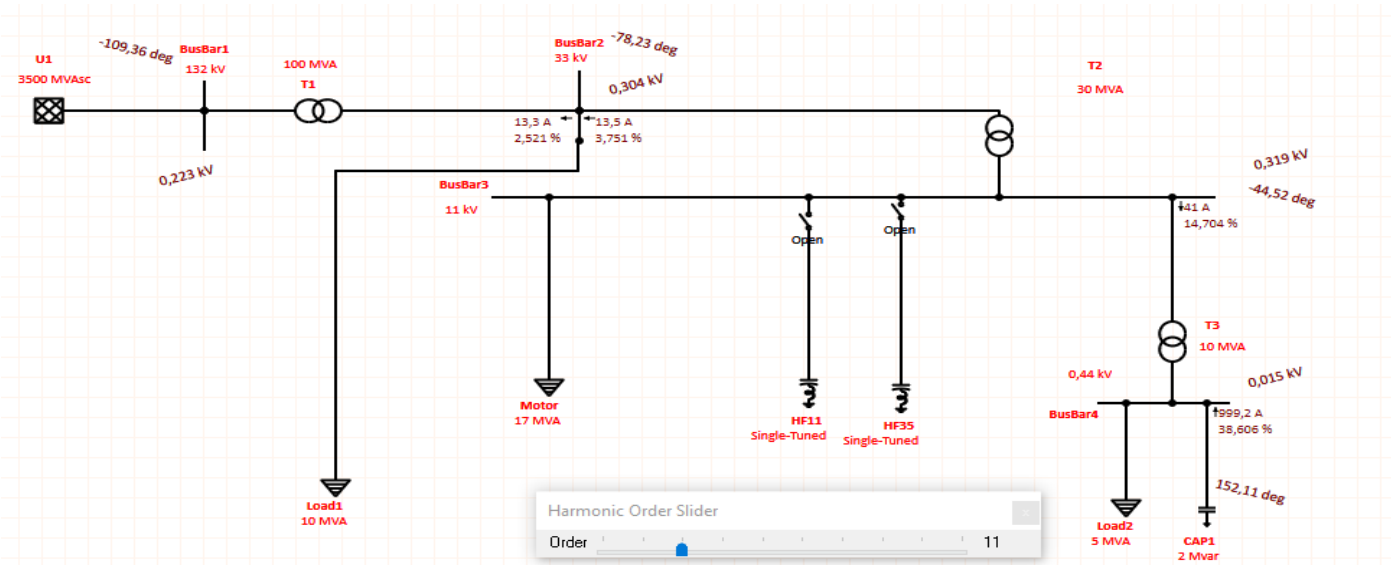


Figure 4.83: Harmonic Load flow result for 11th order .

Après avoir mis toute la valeur, l'utilisateur doit appuyer sur 'Filtre de taille'puis 'Substituer'.

ETAP a la fonction intégrée pour calculer les valeurs appropriées pour le condensateur et inducteur.

Le facteur de qualité du filtre est basé sur la réactance de la fréquence accordée

point, c'est-à-dire

Q = (nXL) / R (Ici, R = Résistance, XL = Valeur de réactance du filtre qui est pris de la page de l'éditeur de filtres et n = Ordre de la fréquence harmonique.)Pour l'harmonique du 11e ordre,

Q = (11 * 0,3404) / 1 = 3,74

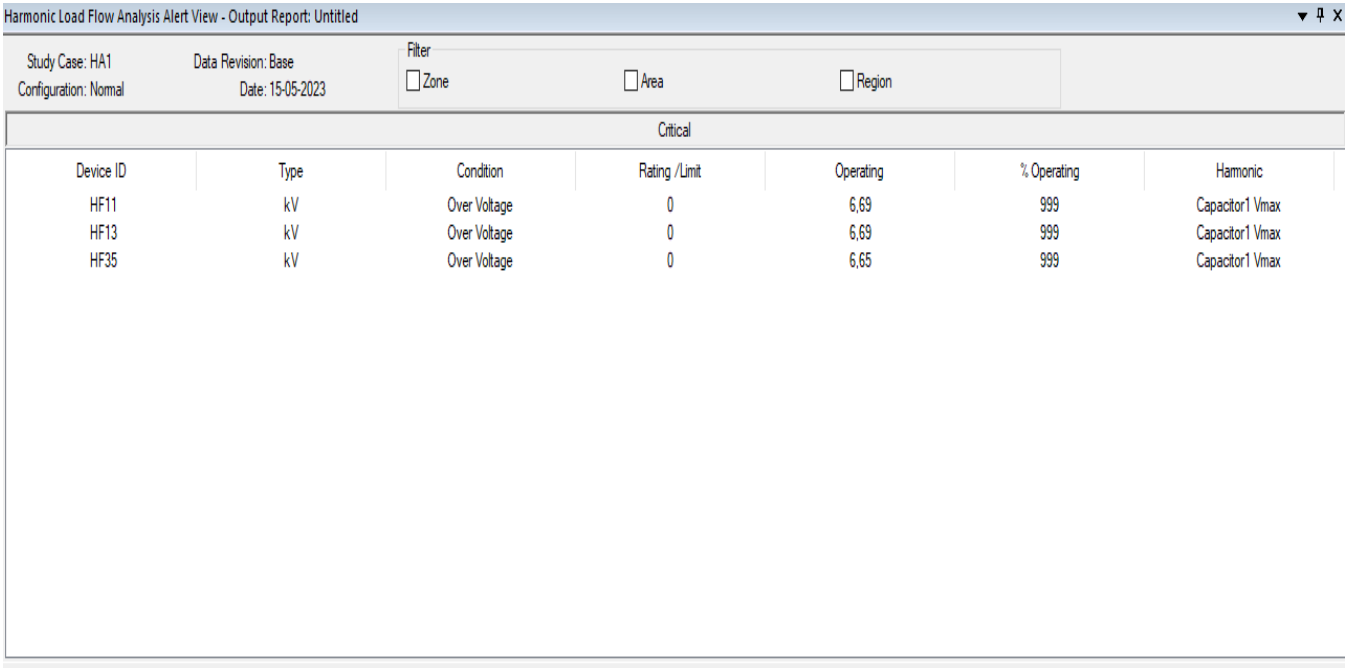


Figure 4.84: Analyse du flux de charge harmonique – Vue d'alerte.

Lors de l'exécution de l'étude du débit de charge harmonique, une alerte s'est affichée sur la vue d'alertepour la valeur Max kV et Max I. En suivant la valeur opérationnelle de la fenêtre d'alerte, le valeur maximale peut être saisie dans la limite marginale. La page d'alerte pour cette harmonique L'étude du débit de charge est donnée à la figure

Figure: Analyse du flux de charge harmonique – Vue d'alerte La conception du filtre pour les 13e et 35e ordres harmoniques peut être effectuée par la même procédure où les valeurs du dimensionnement du filtre sont modifiées pour la commande. Les résultats d'Harmonic Les flux de charge sont indiqués sur le diagramme linéaire de la figure

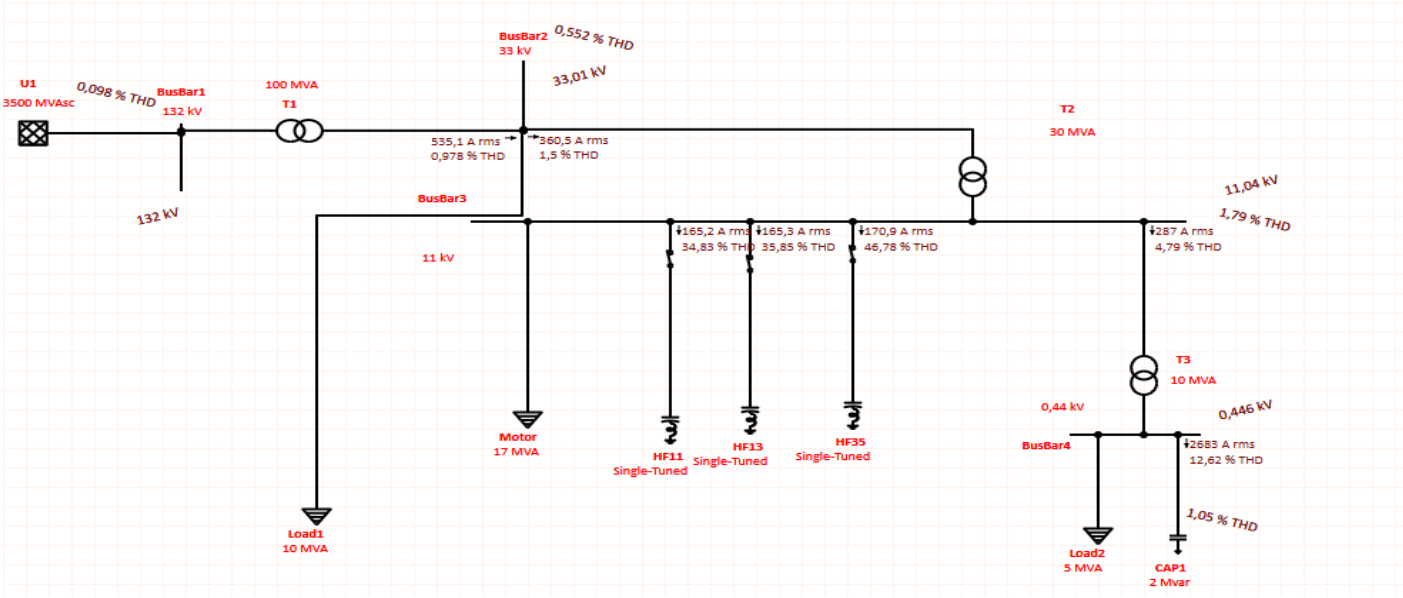


Figure 4.85: Analyse du flux de charge harmonique après réglage du filtre.

En comparant avec le résultat de l'analyse du flux de charge harmonique sans filtre à la figure

on peut voir que le pourcentage de THD a diminué. La forme d'onde et le spectre de tension Pour le bus, la barre 3 est donnée ci-dessous.

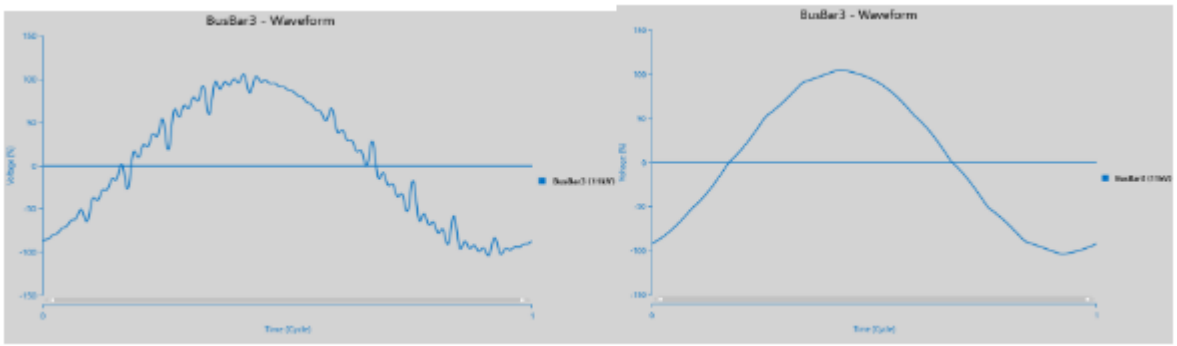


Figure 4.86: Graphiques du flux de charge harmonique (sans filtre à gauche et avec filtre à droite).

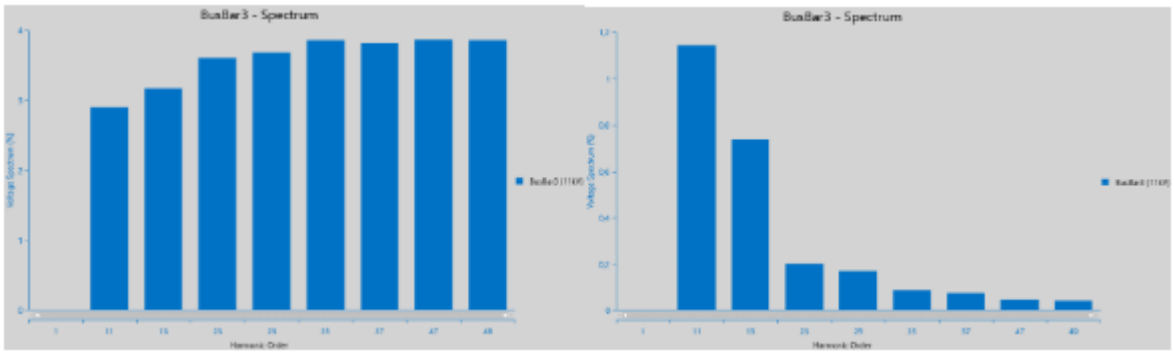


Figure 4.87: Tracés harmoniques (spectre de tension sans filtre à gauche et avec filtre à droite).

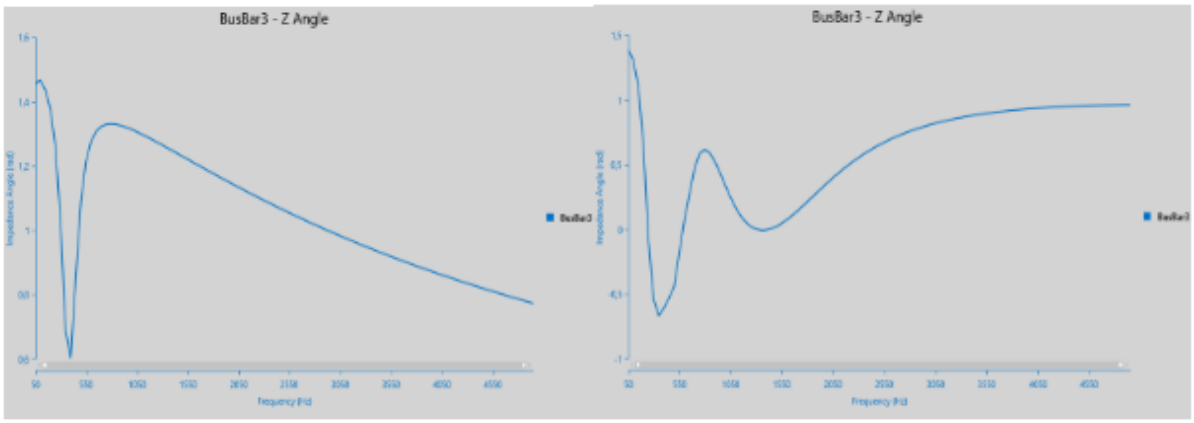


Figure 4.88:Tracé de l'angle d'impédance harmonique (sans filtre à gauche et avec filtre à droite).

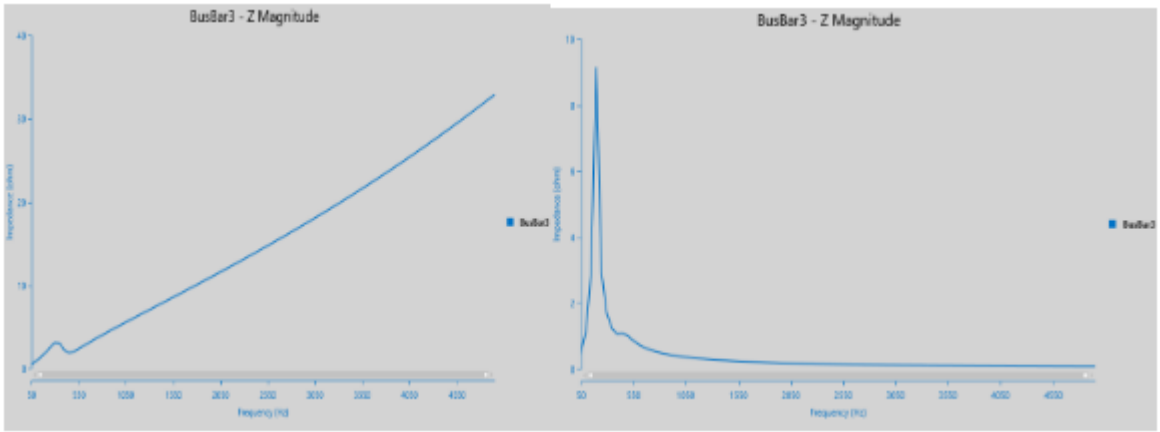


Figure 4.89: Impédance harmonique - Magnitude Plot (Sans condensateur à gauche et avec condensateur à droite).

On peut voir à partir de la forme d'onde et du spectre de tension que, la distorsion harmonique réduit et la forme ondulatoire est devenue lisse.

Il peut être rendu plus lisse en concevant filtre à simple accord pour un autre ordre harmonique où l'IHD et le THD dépassent leur Limites. En outre, lors de l'exécution d'un

balayage de fréquence harmonique, on peut voir qu'il y a Cinq fréquences de résonance dues à la présence de trois filtres harmoniques. Le Les fréquences de résonance se produisent aux harmoniques de 4e, 5e, 21e et 9e ordres. Ceux-ci Les commandes ne correspondent pas à la fréquence des caractéristiques du convertisseur 12 impulsions et s'attaquant ainsi efficacement au problème de la résonance harmonique.

Un rapport complet est joint à l'annexe et une copie électronique de l'ETAP simulé est gravé sur CD.

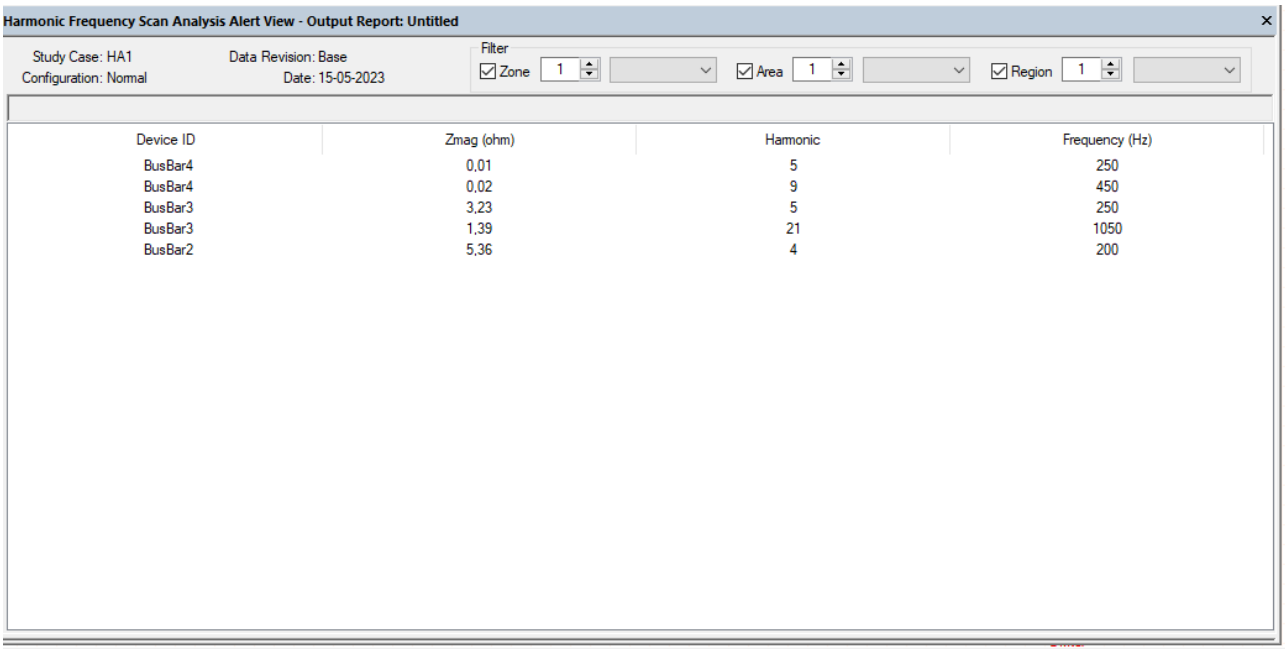


Figure 4.90: Vue d'alerte pour le balayage de fréquence.

4.6 conclusion :

L'objectif principal de ce chapitre était d'analyser les harmoniques en incluant toutes les Critères.Tout d'abord, les courants harmoniques ont été générés à partir d'harmoniques spécifiées et a identifié le problème en effectuant une analyse du flux de charge harmonique. Alors En utilisant des batteries de condensateurs et en concevant un filtre, la distorsion harmonique a été éliminée. Le La procédure deI'ensemble du processus a été expliquée en détail avac le chiffre requis.

Conclusion générale :

Une étude du flux de charge harmonique et du balayage de fréquence harmonique a été réalisée pour identifier l'effet du courant harmonique sur un réseau électrique .

Différents types de processus d'atténuation (conception de filtres, utilisation de batteries de condensateurs, déphasage de transformateur) ont été analysés et réalisés pour éliminer la distorsion harmonique créée par les sources harmoniques modélisées.

Un réseau électrique simple avec quatre barres omnibus a été modélisé pour analyser le système d'alimentation Harmoniques. Une charge générale est modélisée comme une source harmonique pour créer une harmonique distorsion du réseau électrique. Lors de l'étude Harmonic Load Flow, harmonique La distorsion a été observée sur l'affichage d'une ligne et la courbe tracée.

L'effet du courant harmonique a été analysé et la technique d'atténuation a été utilisée pour

éliminer la distorsion harmonique. Une batterie de condensateurs et quelques filtres à réglage unique ont été utilisé individuellement pour éliminer la distorsion harmonique.

Tous les composants modélisés dans ETAP ont été suivis par les normes IEEE 519.

La source de courant harmonique a été modélisée à partir de la bibliothèque harmonique IEEE – 12 impulsions et le filtre à réglage unique a été conçu à partir d'un filtre prédéfini de la bibliothèque ETAP.

La « vue d'alerte » est une option très efficace pour visualiser tout composant qui dépasse son

Évaluation standard. Le filtre a été conçu en tenant compte des limites THD et IHD qui

ont été dépassées à la vue d'alerte. Dans ETAP, il est facile d'éliminer l'harmonique

distorsion d'un certain ordre harmonique en mettant l'ordre harmonique et connexe

Valeur du paramètre sur la page de dimensionnement du filtre. Cette option de conception de filtre est l'une des plus outils efficaces d'ETAP

Le curseur d'ordre harmonique et le curseur de fréquence sont uniques en analyse harmonique

ce qui permet des résultats pour différents ordres dans un seul affichage. Le gestionnaire de rapports d'ETAP est Très efficace pour exécuter les résultats dans différents formats selon les besoins de l'utilisateur.

ETAP permet à l'utilisateur de créer et de sauvegarder un nombre illimité de cas d'étude. Flux de charge Les calculs sont effectués et rapportés conformément aux paramètres du cas d'étude

Sélectionné dans la barre d'outils. L'utilisateur peut facilement basculer entre les cas d'étude sans problème de réinitialiser les options de cas d'étude à chaque fois. Cette caractéristique unique que la plupart des autres Les packages n'auraient pas permettra d'économiser une quantité comparable d'efforts et de temps.

Une autre caractéristique importante de l'ETAP est l'étude du balayage de fréquence harmonique qui permet pour voir l'effet capacitif et inductif sur le réseau électrique et la condition de résonance ce qui se produit pour la corrélation capacitive et inductive. Cette condition de résonance est très important à savoir car c'est la cause d'une énorme distorsion harmonique dans un certain fréquence. La vue d'alerte affiche la fréquence de résonance après l'exécution de l'Harmonique Étude de balayage de fréquence.

Bibliographie

[1] Roy W. Goody. *OrCAD PSpice for Windows, Volume I: DC and AC Circuits,* 3rd edition. 2001

[2] Muhammad H. Rashid. *Power Electronics: Circuit Devices and Applications*. third edition. 2004

[3] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Desi.* third edition. 2003

[4] *ETAP help*, ETAP 7.5.0 software, Phoenix, AZ, 2010

[5] *User manual*, Power Factory 14.0, 2011

[6] Daniel W. Hart. *Introduction to Power Electronics*. 1997

[7] Product Data Bulletin (1994), *Power System Harmonics Causes and Effects of Variable Frequency Drives Relative to the IEEE 519-1992 Standard.* [On Line]. Available at: http://www.alamedaelectric.com/Modicon%20Documents/AC%20Drive%20Power%20System%20Harmonics.pdf// [Accessed: 10 September 2011]

[8] Dr. Mohamed Darwish (2011) *Power Electronics and FACTS* [Lecture presented to MSc Sustainable Power, Brunel University]. 21 March

[9] KEBIRI SAMIA << modélisation et simulation d un filtre actif multi niveaux >> thèse magistrale, université mouloud Mammeri, tizi_ ouzou, 2009

[10] Boucif Abdelmalek «Filtrage actif d'un réseau Électrique», Mémoire de Fin d'Etudes Université Mohamed Khider Biskra, 2013 / 2014

[11] « Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie

électrique », mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.

[12] Mohamed Alaa Eddin Alali. « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des

réseaux électriques basse tension (Automatisation des systèmes de puissance électrique) », Thèse de Doctorat de l'université Louis Pasteur-Strasbourg, 2002.

[13] M. Ferhat, "Commande en temps réel d'un filtre actif de puissance". Mémoire de magister, 2012, Université de Sétif, Algérie.

[14] CEI, 61000.1.1: Electromagnetic compability (EMC), Part 1: General, section 1: application and interpretation of fundemantal definitions and terms, 2001.

[15] M. A. E. Alali, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension". Thèse de doctorat, 2002, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, France.

Annexe