

N° série :

N° ordre:

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Center Universitaire D'el oued



Institut des sciences de Technologie
Département de Génie Électrique

Mémoire de Fin d'études
MasterAcadémique en Électrotechnique

Option : RE
Réseaux électrique

Réalise par :

Missi Omar
Toma Mammar

Licenciés en Electrotechnique, Option réseaux électrique
Centre Université d'El Oued

Encadré par :

Dr: Y.DJEGHADER

**Etude et simulation d'un compensateur
statique variable dans le cas de la
qualité d'énergie électrique**

Promotion: 2011/2012

Sommaire

Remerciements

Résumé

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction Générale1

Chapitre I

Système de transmission flexible en courant alternatif (FACTS)

NO TABLE OF CONTENTS ENTRIES FOUND.

ملخص

هذا العمل يتطرق إلى التحسين لجودة الطاقة الكهربائية، ودراسة مشاكل التوافقيات في الشبكات الكهربائية، ولتحقيق هذا الهدف نستعمل التقنية الجديدة المعروفة ب (FACTS)، والتي قمنا بدراسة عامة عليها و تطرقنا في الفصل الثاني إلى نمذجة المعوض الساكن للطاقة المتفاعلة "SVC" مع الحمولة الخطية و محاكاتها باستعمال تقنية برنامج (MATLAB/SMLINK).

و بعد ذلك عملنا في الفصل الثالث دراسة خاصة بالتوافقيات وأنواعها و أسباب حدوثها أو ما يعرف بالتلوث الكهربائي و في الفصل الرابع حاولنا التخفيف من ظاهرة التوافقيات في الشبكة الكهربائية عن طريق استخدام "SVC" بوجود حمولة غير الخطية (مقومات التيار) و بعد ذلك استنتجنا بأن (SVC) يقوم بتقليل من تواجد التوافقيات في الشبكة الكهربائية.

Résumé

Ce travail porte sur l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, et d'étudier les problèmes des harmoniques dans les réseaux électriques, et pour atteindre cet objectif, nous utilisons la nouvelle technique, connue sous le nom (FACTS), que nous faisons une étude générale sur elle, puis dans le chapitre deux nous avons fait une modélisation du compensateur statique variable (SVC) avec une charge linéaire, en utilisant l'environnement MATLAB/ SMILINK)

Ensuite nous avons fait une étude spéciale sur les harmoniques, leurs types, causes et conséquences.

Au quatrième chapitre, nous avons essayé d'atténuer les perturbations, en utilisant le dispositif shunt «SVC» avec charge non linéaire et en fin on conclue que (SVC) réduire l'existence des harmoniques dans les réseaux électriques.

Summary

This work focuses on improving the quality of electric power, and to study the problems of harmonics in power systems, and to achieve this goal, we use the new technique, known as (FACTS), that we make a general study of it, puis in chapter two we made a model of variable static compensator (SVC) with a linear load, using the MATLAB / SMILINK)

Then we made a special study of harmonics, their types, causes and consequences.

In the fourth chapter, we tried to mitigate the disruption, by using the device shunt "SVC" with non-linear load and at the end we concluded that (SVC) reduce the occurrence of harmonics in power systems.

LISTE DES FIGURE

Figure (I.1) : Schéma du SVC	5
Figure (I.2) : Présentation d'un compensateur SVC	6
Figure (I.3) : fonctionnement du compensateur statique	4
Figure (I.4) : Schéma d'un compensateur synchrone statique SVC	7
Figure (I.5) Principe d'un compensateur synchrone statique.....	8
Figure (I.6): Structure de STATCOM	9
Figure (I.7b): Courant inductive.....	10
Figure (I.7a): Courant capacitive	10
Figure (I.8): Caractéristique statique du STATCOM STATCOM.....	10
Figure (I.9) : Schéma d'un statique compensateur STATCOM	11
Figure (I.10) : Insertion d'un TCSC sur une ligne.....	11
Figure (I.11) : Deux schémas des compensations série typiques avec un condensateur série fixe et un TCSC	12
Figure (I.12) : Schéma de base du SSSC.....	Error! Bookmark not defined.
Figure(I.13) Configuration de base d'un compensateur série synchrone statique (SSSC).....	Error! Bookmark not defined.
Figure (I.14) : Caractéristique statique du SSSC	Error! Bookmark not defined.
Figure (I.15) : Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow controller)	Error! Bookmark not defined.
Figure (I.16) : Configuration de base du circuit d'un contrôleur de transit de puissance unifié ..	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.1):Nombre approximatif d'installations du SVC de 1970 à 2006. ..	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.2) : Schéma du SVC.....	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.3):Présentation d'un compensateur SVC	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.4): Modèle mathématique de SVC.....	Error! Bookmark not defined.

Figure(II.5): La variation de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage.	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.6) : La variation de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage pour différente valeur de X_L	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.7) : Réseau électrique simple avec SVC	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.8): Schéma de simulation	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.9) : Caractéristique de courant (sans SVS)	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.10): Caractéristique de la tension (sans SVS)	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.11): Variation de la susceptance (sans SVS)	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.12): Caractéristique de la puissance active (sans SVS)	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.13): Caractéristique de la puissance réactive (sans SVS)	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.14): Caractéristique de courant (avec SVS)	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.15): Caractéristique de tension (avec SVS)	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.16): Variation de la susceptance (avec SVS)	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.17): caractéristique de la puissance active en Mw (avec SVS)	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.18): Caractéristique de la puissance réactive (avec SVS)	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.19) : Caractéristique de courant de court-circuit triphasé à la terre (sans compensation)	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.20): Caractéristique de la tension court-circuit triphasé à la terre (sans compensation)	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.21) : Variation de la susceptance court-circuit triphasé à la terre (sans compensation)	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.22) : Caractéristique de la puissance active. court-circuit triphasé à la terre (sans compensation)	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.23): Caractéristique de la puissance réactive court-circuit triphasé à la terre (sans compensation)	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.24): Caractéristique de courant court-circuit triphasé à la terre (avec compensation)	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.25) : Caractéristique de tension court-circuit triphasé à la terre (avec compensation)	Error! Bookmark not defined.

Figure (II.26) : Variation de la susceptance court-circuit triphasé à la terre (avec compensation)	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.27): Caractéristique de la puissance active. court-circuit triphasé à la terre (avec compensation)	Error! Bookmark not defined.
Figure(II.28): Caractéristique de la puissance réactive court-circuit triphasé à la terre (avec compensation).....	Error! Bookmark not defined.
Figure (III.1) : Onde déformée	Error! Bookmark not defined.
Figure (III.2) : charge linéaire	Error! Bookmark not defined.
Figure (III.3) : Charge non linéaire.....	Error! Bookmark not defined.
Figure (III.4) : Gradateur de lumière ou de chauffage.....	Error! Bookmark not defined.
Figure (III.5) : Redresseur triphasé avec inductance de lissage en alternatif(ASI)	Error! Bookmark not defined.
Figure (III.6) : Redresseur d'alimentation à découpage(Ordinateur Electroménager)	Error! Bookmark not defined.
Figure (III.7) : Redresseur triphasé avec condensateur en tête par(Variateur de vitesse).....	Error! Bookmark not defined.
Figure (III.8) : Redresseur triphasé avec inductance de filtrage en continu(Chargeur d batterie)	Error! Bookmark not defined.
Figure (III.9) :Facteur de puissance	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.1) : Allure du courant (Redresseur 6 pulses sans inductance).....	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.2) : Spectre d'harmonique du courant (Redresseur 6 pulses sans inductance)	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.3) : Allure du courant (Redresseur 6 pulses avec inductance).....	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.4) : Spectre d'harmonique du courant (Redresseur 6 pulses avec inductance).....	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.5) : Allure du courant (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur).	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.6) : Spectre d'harmonique du courant (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur).	Error! Bookmark not defined.

Figure (IV.7) : Allure du courant (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur à double enroulement)	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.8) : Spectre d'harmonique du courant (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur à double enroulement).....	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.9) : Allure du courant (Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements).....	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.10) : Spectre d'harmonique du courant (Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements).....	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.11) : Allure du courant (Redresseur actif à IGBT)	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.12) : Spectre d'harmonique du courant (Redresseur actif à IGBT)....	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.13) : Allure du courant (Alimentation à découpage de type informatique)	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.14) : Spectre d'harmonique du courant (Alimentation à découpage de type informatique)	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.15) : allure e du courant (Charges d'éclairage)	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.16) : Spectre d'harmonique du courant (Charges d'éclairage)	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.17) : allure du courant (Alimentations sans interruption)	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.18) : Spectre d'harmonique du courant (Alimentations sans interruption)	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.19) : allure du courant (variateurs de vitesse).....	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.20) : Spectre d'harmonique du courant (variateurs de vitesse).....	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.21) : allure du courant (ACEAF)	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.22) : Spectre d'harmonique du courant (AC EAF)	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.23) : allure du courant (DC EAF).....	60
Figure (IV.24) : Spectre d'harmonique du courant (DC EAF)	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.25) : Le modèle du SVC utilisé dans cette application.....	Error! Bookmark not defined.
Figure (IV.26) : Allure du courant avec SVC (redresseur 6 pulses sans inductance)	Error! Bookmark not defined.

Figure (IV.27) : Spectre d'harmonique avec SVC (redresseur 6 pulses sans inductance)**Error! Bookmark not defined.**

Figure (IV.28) : allure du courant avec SVS (redresseur 6 pulses avec inductance) .. **Error! Bookmark not defined.**

Figure (IV.29) : Spectre d'harmonique avec SVC (redresseur 6 pulses avec inductance)**Error! Bookmark not defined.**

Figure (IV.30) : allure du courant avec SVS (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur)...**Error! Bookmark not defined.**

Figure (IV.31) : Spectre d'harmonique avec SVC (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur)**Error! Bookmark not defined.**

Figure (IV.32) : allure du courant avec SVC (Redresseur 12 pulses avec transformateur à double enroulement)**Error! Bookmark not defined.**

Figure (IV.33) : Spectre d'harmonique avec SVC (Redresseur 12 pulses avec transformateur à double enroulement)**Error! Bookmark not defined.**

Figure (IV.34) : allure du courant avec SVC (Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements).....**Error! Bookmark not defined.**

Figure (IV.35) : Spectre d'harmonique avec SVC (Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements).....**Error! Bookmark not defined.**

Figure (IV.36) Allure du courant avec SVC (Redresseur actif à IGBT) ..**Error! Bookmark not defined.**

Figure (IV.37) : Spectre d'harmonique avec SVC (Redresseur actif à IGBT)..... **Error! Bookmark not defined.**

Liste des tableaux

Tableau (I.1)	Avantages techniques des dispositifs FACTS	14
Tableau(IV.1)	les harmoniques de courant (Redresseur 6 pulses sans inductance)	49
Tableau (IV.2)	les harmoniques de courant (Redresseur 6 pulses vec inductance)	50
Tableau (IV.3)	les harmoniques de courant (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur)	51
Tableau (IV.4)	les harmoniques de courant (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur à double enroulement)	52
Tableau (IV.5)	les harmoniques de courant (Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements)	53
Tableau (IV.6)	les harmoniques de courant (Redresseur actif à IGBT)	54
Tableau (IV.7)	les harmoniques de courant (Alimentation à découpage de type informatique)	55
Tableau (IV.8)	les harmoniques de courant (Charges d'éclairage)	56
Tableau (IV.9)	les harmoniques de courant (Alimentations sans interruption)	57
Tableau (IV.10)	les harmoniques de courant (variateurs de vitesse)	58
Tableau (IV.11)	les harmoniques de courant ((AC EAF)	59
Tableau (IV.12)	les harmoniques de courant (DC EAF)	60
Tableau (IV.13)	Tableaux récapitulatif (sans SVC)	68
Tableau (IV.14)	Tableaux récapitulatif (sans SVC)	69

Liste des symboles

Symbole	Désignation
<i>FACTS</i>	Flexible Alternating Current Transmission Systems
<i>TSR</i>	Thyristor Switched Reactor
<i>TSC</i>	Thyristor Switched Capacitor
<i>SVC</i>	Static Var Compensator
<i>STATCOM</i>	Static Compensator
<i>TCSC</i>	Thyristor Controlled Series Capacitor
<i>SSSC</i>	Static Synchronous Series Compensator
<i>TCPAR</i>	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
<i>UPFC</i>	Unified Power Flow Control
V_k	La tension du réseau où est connecté le SVC.
I_{SVS}	le courant dans le SVC
Q_{SVS}	la puissance réactive de SVC
B_{SVS}	La susceptance de SVC
α	l'angle d'amorçage des thyristors
THD	Taux global de distorsion harmonique
S ; P ; Q ; D	Puissance (apparente ; active ; réactive ; déformante)
F_p	Facteur de puissance
I_h	Courant harmonique du rang h
f	Fréquence
H5, H7	Harmonique de range 5et 7
F.A.P	Le filtre actif parallèle
F.A.S	Le filtre actif série
UPQC	La combinaison parallèle série actifs
ASI	Alimentations sans interruption
AC EAF	Les fours à arc à courant alternatif
DC EAF	Les fours à arc à courant continu

Introduction générale

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

La correction de la forme d'onde est rendue nécessaire si la déformation dépasse certaines limites, souvent atteintes dans les réseaux possédant des sources de perturbations harmoniques tels que : fours à arc, convertisseurs statiques de puissance, ou encore certains types d'éclairage.... etc.

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la qualité du courant et de la tension des réseaux électriques. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale : ils se comportent comme des générateurs de ***courants harmoniques***

Le concept FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems), s'impose comme solution pour couvrir un certain nombre de technologie destiné à renforcer la sécurité, la capacité de transit et la flexibilité des réseaux de transport d'énergie.

Cette technique de (FACTS) est le moyen de l'étude la plus réussie et la meilleure pour elle. Ils ont bon effet sur le niveau d'énergie dans le réseau électrique. Cependant, cette technique (FACT) dépend de beaucoup de routes à l'amélioration de l'équilibre entre production et consommation.

Dans notre mémoire nous avons fait une application (SVC / charge polluante), dont le but est d'atténuer les perturbations harmoniques générées par ces charges non linéaires.

De manière à atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire sera divisé en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre nous traiterons les dispositifs FACTS, leurs modélisations, application et leurs avantages.
- Le deuxième chapitre est consacré à la description de la structure de dispositif (SVC), une explication en détail son principe de fonctionnement et son modélisation et simulation sous l'environnement MATLAB / SIMILINK, et puis nous avons fait une application sur leur l'avantage coté stabilité de la tension.
- Le troisième chapitre présente la description des harmoniques en courant et en tension qui peuvent intervenir dans un réseau électrique. Les origines, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations seront analysées et discutées.

- Dans le quatrième chapitre, nous avons fait une nouvelle application sur l'un de dispositifs FACTS (SVC) connecté en parallèle avec des différents charges (redresseurs de 6 et 12 et 24 pulsations avec et sans inductance et redresseur IGBT) dont le but recherché est la réduction des perturbations harmoniques.

Nous constatons une grande efficacité de l'utilisation de cet dispositif surtout cote minimisation des perturbations harmoniques.

A la fin de ce travail des conclusions sont tirées et des recommandations sont proposées.

I. Introduction:

L'augmentation de la demande en énergie électrique a eu pour résultat, un rapide développement des réseaux électriques. Il existe différents domaines d'analyse des réseaux électriques, tels que la stabilité, le contrôle de la tension et de l'écoulement de puissance.

La compensation de l'énergie réactive des lignes de transmissions modifie les caractéristiques électriques de manière à répondre à d'éventuelles demandes en charge. On trouve deux sortes de compensation : la compensation shunt et série. La compensation shunt est utilisée afin de contrôler la tension et la puissance transmise le long des lignes. La compensation série quand à elle, est utilisée dans le but de contrôler la transmise par la réduction ou l'augmentation de l'impédance de la ligne, cette compensation est employée dans le cas de longues lignes de transmissions.

Les méthodes traditionnelles de compensation réactive en régime permanent utilisent des capacités fixes ou des compensateurs synchrones. Ces méthodes de compensation ne sont pas très efficaces lors de l'apparition de sévère perturbation, ce qui affecte négativement le réseau.

II. Les systèmes FACTS :***II.1. Définition :***

les systèmes des dispositifs **FACTS** (Flexible Alternative Courent Transmission System) sont employés pour le contrôle dynamique de tension, impédance et angle de phase de la tension afin d'améliorer le comportement dynamique des réseaux électriques ainsi que la répartition et l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques.

II .2. Fonctionnement : [1]

Un FACTS agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive sur le réseau. Ceci a pour effet d'augmenter ou de diminuer l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible.

Les FACTS sont utilisés aussi pour le filtrage des courants harmoniques.

- Les condensateurs shunts fournissent de la puissance réactive, et augmentent localement la tension du réseau (utilisé en période de forte consommation ou dans les zones éloignées des centres de production).
- Les réactances shunts consomment de la puissance réactive, et diminuent la tension du réseau (utilisé en période de faible consommation, la nuit notamment).
- Les condensateurs série permettent de diminuer l'impédance des liaisons électriques et d'augmenter la puissance transmissible par ces liaisons (une liaison électrique haute-tension est en effet essentiellement inductive).
- Les réactances série augmentent l'impédance d'une liaison électrique, afin de mieux répartir les courants sur les différentes liaisons.

II.3. Classification :

Les FACTS peuvent se diviser en six familles distinctes :

- SVC : Compensateur statique d'énergie réactive.
- TCSC : Capacité en série commandée par thyristor.
- TCPAR : Régulateur de déphasage par thyristor.
- STATCOM: Compensateur statique.
- SSSC : Compensateur série statique synchrone.
- UPFC : Contrôleur de transit de puissance unifié.

III. Compensateurs shunts :

Les compensateurs shunts injectent du courant au réseau via le point de leur raccordement. Leur principe est basé sur une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, qui consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne. Les compensateurs shunts les plus utilisés sont les SVC et les STATCOM.

III.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors :

III.1.1. SVC (Static Var Compensator):

Compensateur statique de puissance réactive rapide peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différentes régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'installation d'un compensateur statique de puissance réactive en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et

réduire les pertes tout en maintenant un profile de tension régulière sous différents régimes. De surcroît, un compensateur statique sa puissance réactive peut atténuer les oscillations des amplitudes de tension. [2]

Pour avoir un temps de réponse plus rapide et pour éliminer les parties mécaniques, les RCT (Réactances commandés par thyristor) ont fait leur apparition vers la fin des années soixante. Elles sont constituées d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristors tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins demi-période de la pulsation du réseau. Le retard à l'amorçage « α » permet de régler l'énergie réactive absorbée par ce dispositif. [2]

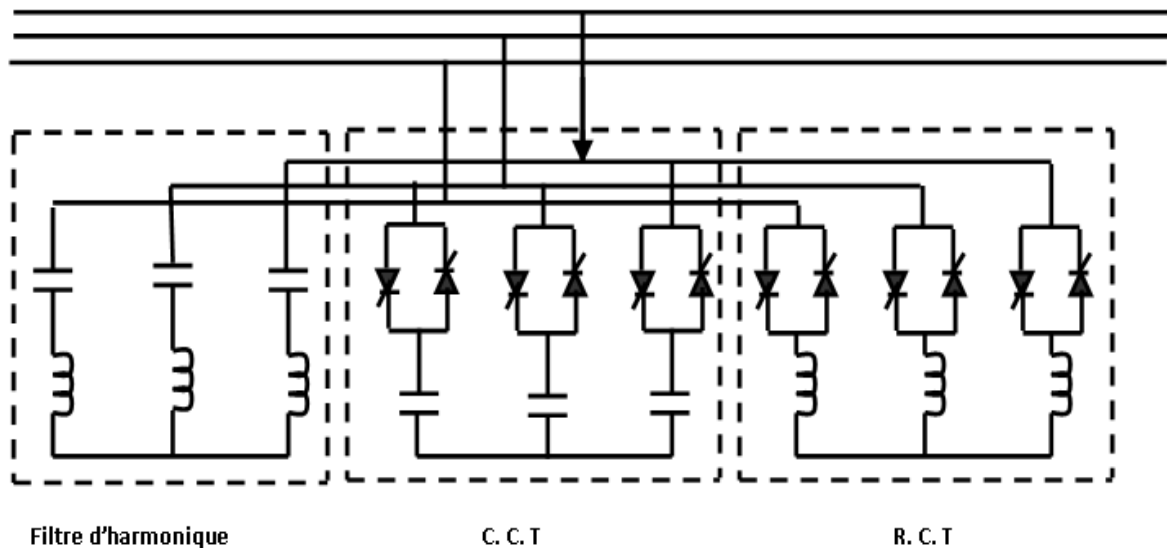


Figure (I.1) : Schéma du SVC

III.1.1.1.Principe de fonctionnement :

La figure (I.2) donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive X_C et d'une bobine d'inductance avec la réactance X_L .

Ce système utilise l'angle d'amorçage « α » des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continu.

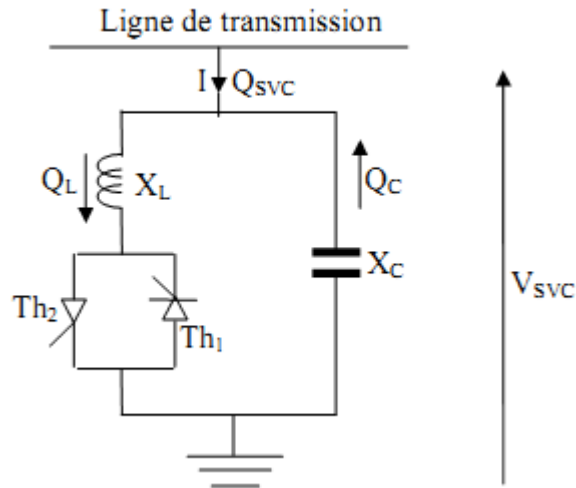


Figure (I.2) : Présentation d'un compensateur SVC

Le RCT ne peut absorber que de l'énergie réactive, puisque il est constitué d'élément inductif. C'est pour cela que l'on associe ses dispositifs avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (CCT) qui fournit de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnent cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau).[2]

Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés sur les harmoniques à éliminer l'association de ces dispositifs RCT, CCT, bancs des capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC dont le premier dispositif à été installé en 1979 en Afrique de Sud. [11]

La caractéristique statique de SVC est donnée par la figure (I.4) trois zones sont distinctes :

- Pour $V_{MIN} \leq V \leq V_{MAX}$: est une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des CCT et RCT.
- Pour $V > V_{MAX}$: est une zone où le RCT donne son énergie maximale (butée de réglage). Les condensateurs sont déconnectés.
- Pour $V < V_{MIN}$: est une zone où seule les capacités sont connectées au réseau.

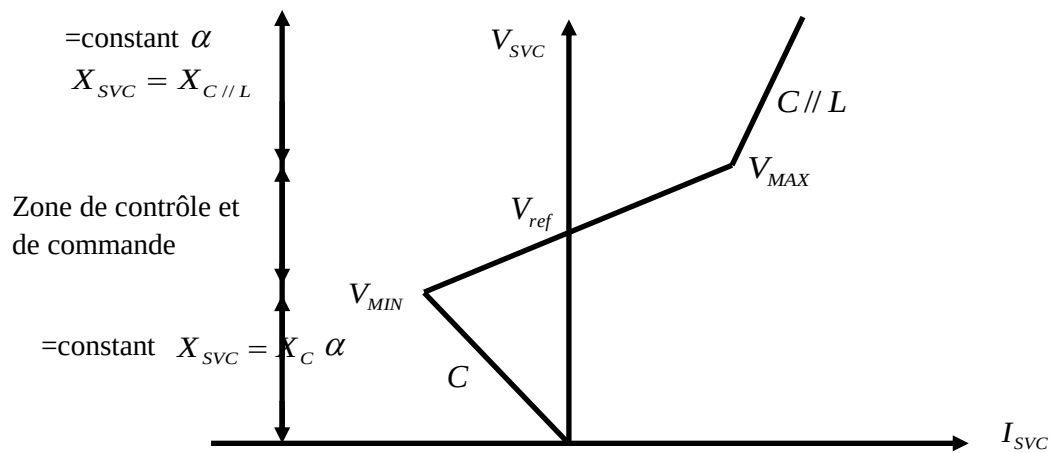


Figure (I.3) : Fonctionnement du compensateur statique

Exemple de SVC:

- 160 SVC utility inst. since 1975
- In service today > 32 000 MVA
- 500 MVA in manufacturing



Figure (I.4) : Schéma d'un compensateur synchrone statique SVC

III.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors :

III.2.1. (STATCOM) Compensateur synchrone statique :

Le compensateur synchrone statique STATCOM (Static Synchronous Compensator) est fondé sur une source de tension synchrone à semi-conducteurs, analogue à une machine synchrone qui fournit un ensemble équilibré de trois tensions sinusoïdales à la fréquence fondamentale, avec des amplitudes et des angles de phases réglables. Un tel dispositif est toutefois exempt d'inertie. [9]

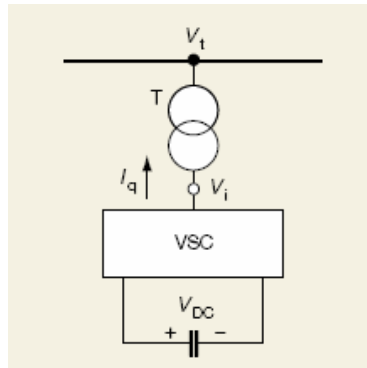


Figure (I.5) : Principe d'un compensateur synchrone statique

III.2.1.1.Principe de fonctionnement

Un compensateur synchrone statique est constitué d'un convertisseur à source de tension, d'un transformateur de couplage et de la commande. Dans cette application, la source d'énergie CC peut être remplacée par un condensateur CC, de sorte que l'échange d'énergie en régime permanent entre le compensateur statique et le système CA peut être uniquement réactif, comme illustré.

Il s'agit du STATCOM (Static Compensator) qui a connu jusqu'à présents différents appellations:[9]

- ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- STATCON (Static Condenser)
- SVG (Static Var Generator)
- SVC light
- SVC plus

Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70, mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte puissance.

Le STATCOM présente plusieurs avantages :

- Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- Bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.

Le STATCOM peut être conçu pour agir également en tant que filtre active pour absorber les harmoniques du système.

Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est-à-dire formées de GTO et de diodes en antiparallèle.

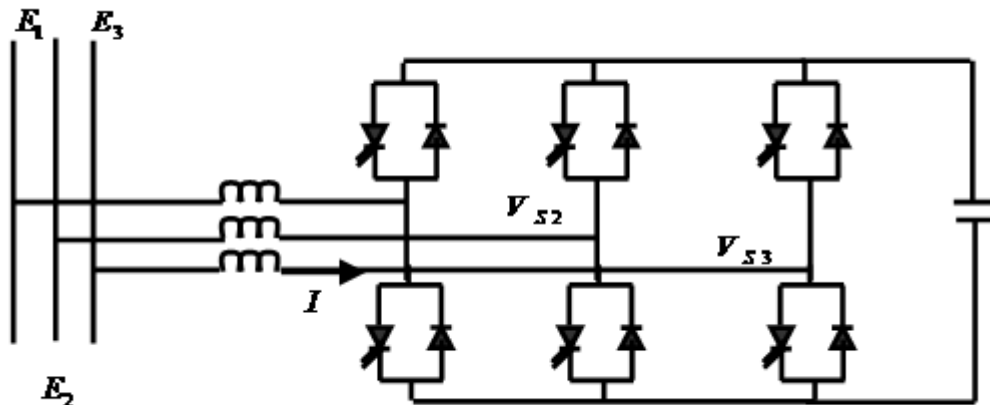


Figure (I.6): Structure de STATCOM

Le rôle de STATCOM est d'échanger d'énergie réactive avec le réseau.

Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance triphasée, celui-ci est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage.

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur V_s , laquelle est en phase avec la tension du réseau électrique.

Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante :

- Si $V_s < E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $+\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension E et le courant est capacitif (Figure I.7-a).

- Si $V_s > E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension E et le courant est capacitif (Figure I.7-b).
- Si $V_s = E$, le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie.

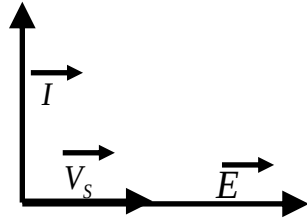


Figure (I.7a): Courant capacitif

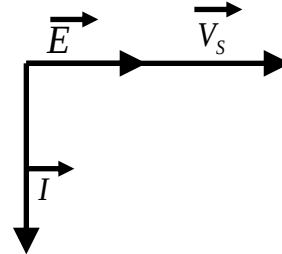


Figure (I.7b): Courant inductif

On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrées. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie V_s est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur.

L'avantage de ce dispositif est pouvoir échanger de l'énergie avec un comportement inductif et capacitif uniquement à l'aide d'une inductance, contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui peut entraîner des résonances avec les éléments inductifs. La caractéristique statique de ce convertisseur est donnée par la figure (I.8) [ce dispositif a l'avantage de pouvoir fournir un courant constant important même] lorsque la tension E diminue, contrairement au SVC.

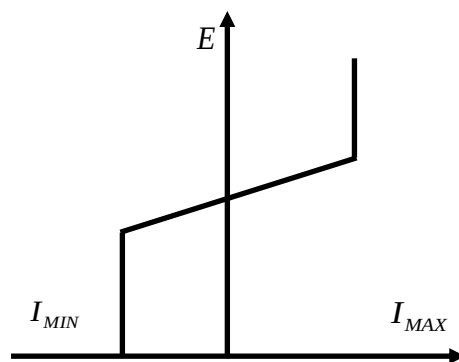


Figure (I.8): Caractéristique statique du STATCOM

Exemple de STATCOM:

- 19 SVCs installés depuis 1997
- le service en jour >1500 MV



Figure (I.9) : Schéma d'un compensateur statique STATCOM

IV. Compensation série :**IV.1. Compensateurs séries à base de thyristor :****IV.1.1. Condensateurs série commandés par thyristors (TCSC) : [3]**

Les configurations TCSC comprennent des inductances commandées par thyristors en parallèle avec des sections d'un banc de condensateurs. Cette combinaison permet la régulation douce sur une vaste gamme de la réactance capacitive à la fréquence fondamentale.

Le banc de condensateurs de chaque phase est monté sur une plate-forme pour assurer l'isolation complète contre la terre. La valve contient une chaîne de thyristors haute puissance branché en série. La bobine d'inductance est de type sans fer. Une varistance à oxyde métallique est brochée sur le condensateur pour éviter les surtensions.

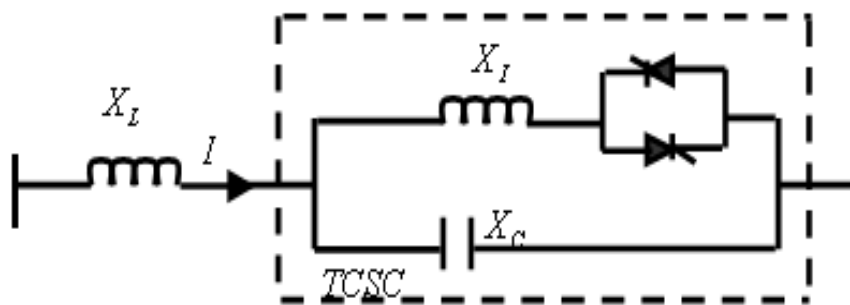


Figure (I.10) : Insertion d'un TCSC sur une ligne

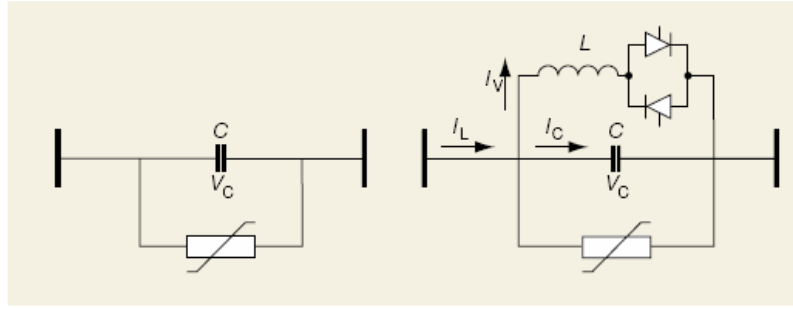


Figure (I.11) Deux schémas de compensations série typiques avec un condensateur série fixe et un TCSC

IV.2. Compensateurs séries à base de GTO thyristor :

IV.2.1. Compensateur série synchrone statique (SSSC) :

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (figure.I.12).

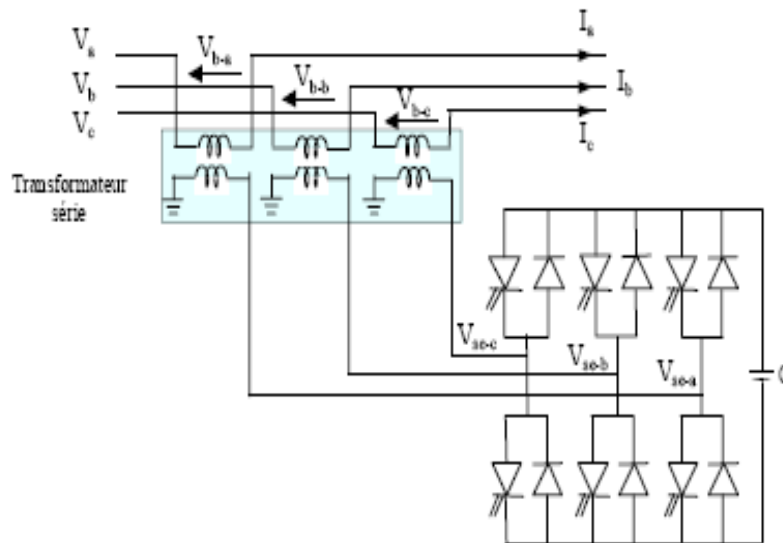


Figure (I.12) : Schéma de base du SSSC

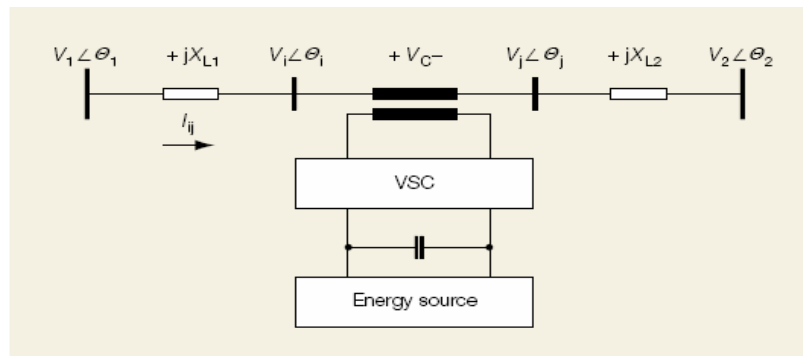
Un convertisseur à source de tension peut être utilisé dans un système de transport d'énergie. Un tel système porte la désignation compensateur série synchrone statique SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*). [12]

- Principe de fonctionnement :

Montre un convertisseur à source de tension branché en série sur une ligne de transport via transformateur. Une source d'énergie est nécessaire pour fournir la tension CC à travers le condensateur et pour compenser les pertes du VSC. En principe, un SSSC est capable d'échanger de la puissance active et de la puissance réactive avec le système de puissance.

Pourtant, si on ne désire que la compensation de puissance réactive, la source d'énergie peut être très petite. Si la source d'énergie est suffisamment puissante, la tension injectée peut être commandée en amplitude et en phase. En cas de compensation de puissance réactive, seule l'amplitude de la tension est commandable, puisque le vecteur de la tension injectée est perpendiculaire au courant de la ligne. Dans ce cas, la tension injectée en série peut faire avancer ou retarder le courant de la ligne de 90 degrés.

Cela signifie que le SSSC peut être commandé en douceur à une valeur d'avance ou de retard quelconque à l'intérieur de la plage de travail du VSC. Ce faisant, un SSSC peut se comporter de manière analogue à un condensateur série et à une inductance série réglables. La différence fondamentale réside dans le fait que la tension injectée par un SSSC n'est pas en relation avec le courant de la ligne et qu'elle peut être réglée indépendamment de celui-ci. Cette caractéristique importante signifie que le SSSC peut être utilisé efficacement, tant pour les petites charges que pour les charges élevées. [12]



Figure(I.13) Configuration de base d'un compensateur série synchrone statique (SSSC)

La caractéristique statique d'un Compensateur Synchrone Statique Série est donnée sur la figure suivante :

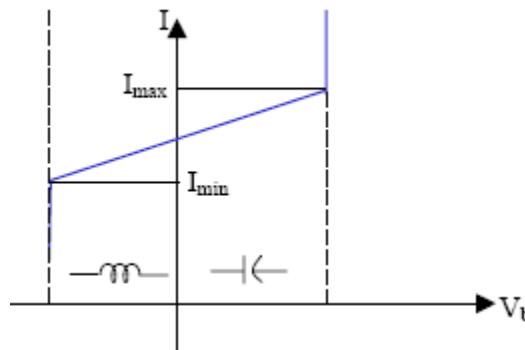


Figure (I.14) : Caractéristique statique du SSSC

V. Compensateurs hybrides série – parallèle :

V.1.UPFC (Contrôleur universelle de l'écoulement de puissance) :

Le contrôleur unifié d'écoulement de puissance (UPFC) est un dispositif FACTS qui combine à la fois les avantages de contrôle de la compensation série et shunt, par son ajustement simultané ou séparé des paramètres clés du réseau électrique. [10]

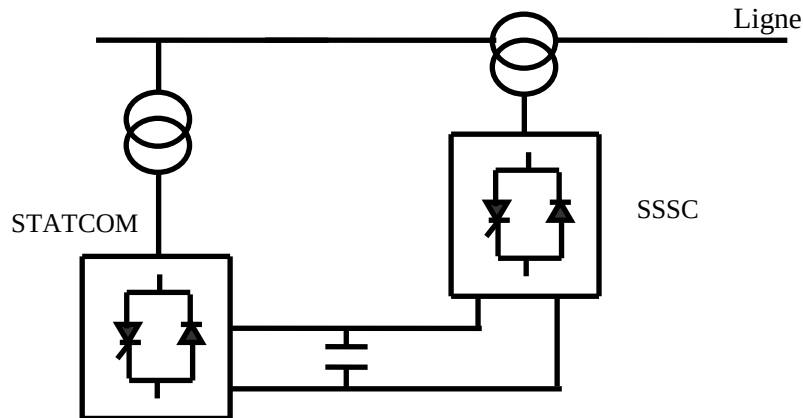


Figure (I.15) : Compensateur Unifié UPFC (Unified power flow controller)

Le contrôleur de transit de puissance unifié UPFC (Unified Power Flow Controller) est constitué de deux convertisseurs de commutation exploités avec une liaison CC commune.

V.1.1.Principe de fonctionnement :

Dans, le convertisseur 2 accomplit la fonction principale de l'UPFC, en injectant en série une tension CA avec une amplitude et un angle de phase réglable dans la ligne de transport à l'aide d'un transformateur série. La fonction fondamentale du convertisseur 1 réside dans la livraison ou l'absorption de puissance effective demandée par le convertisseur 2 à la liaison CC commune. Il peut aussi produire ou absorber de la puissance réactive selon la demande et fournir une compensation shunt réactive indépendante à la ligne de transport. Le convertisseur 2 produit ou absorbe la puissance réactive nécessaire localement et produit de la puissance active comme résultat de l'injection série de tension.[8]

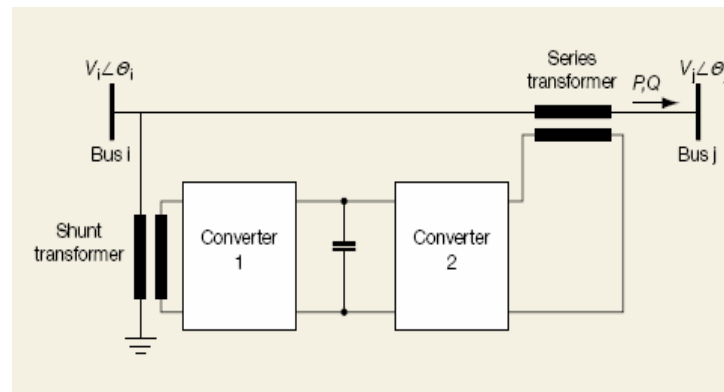


Figure (I.16) : Configuration de base du circuit d'un contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC)

V.1.2. Application :

Un UPFC peut régler simultanément la puissance active et la puissance réactive. En général, il possède trois variables de commande et peut s'exploiter en différents modes. Le convertisseur branché en dérivation règle la tension du bus i dans et le convertisseur branché en série règle les puissances active et réactive, ou la puissance active et la tension au nœud de branchement série. En principe, un UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS qui ont été décrits, à savoir le réglage de la tension, la répartition du flux d'énergie et l'amélioration de la stabilité.

- **IPFC (Interline Power Flow Controller):**

L'IPFC a été proposé par Gyugyi, Sen et Schuder en 1998 afin de compenser un certain nombre de lignes de transmission d'une sous-station. Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC .il peut être utilisé afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau.[9]

VI. Comparaison des FACTS les plus utilisés :

Le tableau suivant montre les performances qui guident l'utilisateur dans son choix pour chaque compensateur.

Tableau (I.1) : Avantages techniques des dispositifs FACTS [4]

FACTS Performance	SV	SVC	STATCOM	TCSC	SSSC	UPFC
Transit de puissance active	+	+	+	+++	+++	+++
Contrôle de la puissance reactive	+++	+++	+++	/	/	+++
Contrôle de la tension	+++	+++	+++	+	+	+++
Contrôle de l'angle de transport	/	/	/	+++	+++	+++
Contrôle dynamique de la tension	/	++	+++	/	/	+++
Stabilité	/	++	+++	++	+++	+++
Oscillation de puissance	/	++	+++	+++	+++	+++
Resonance hypo-synchrone	/	/	/	+++	+++	+++
Déséquilibre de phase	/	+++	+++	/	/	+++

VII. Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS :

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Augmente la sécurité des systèmes énergétiques (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...)
- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique.

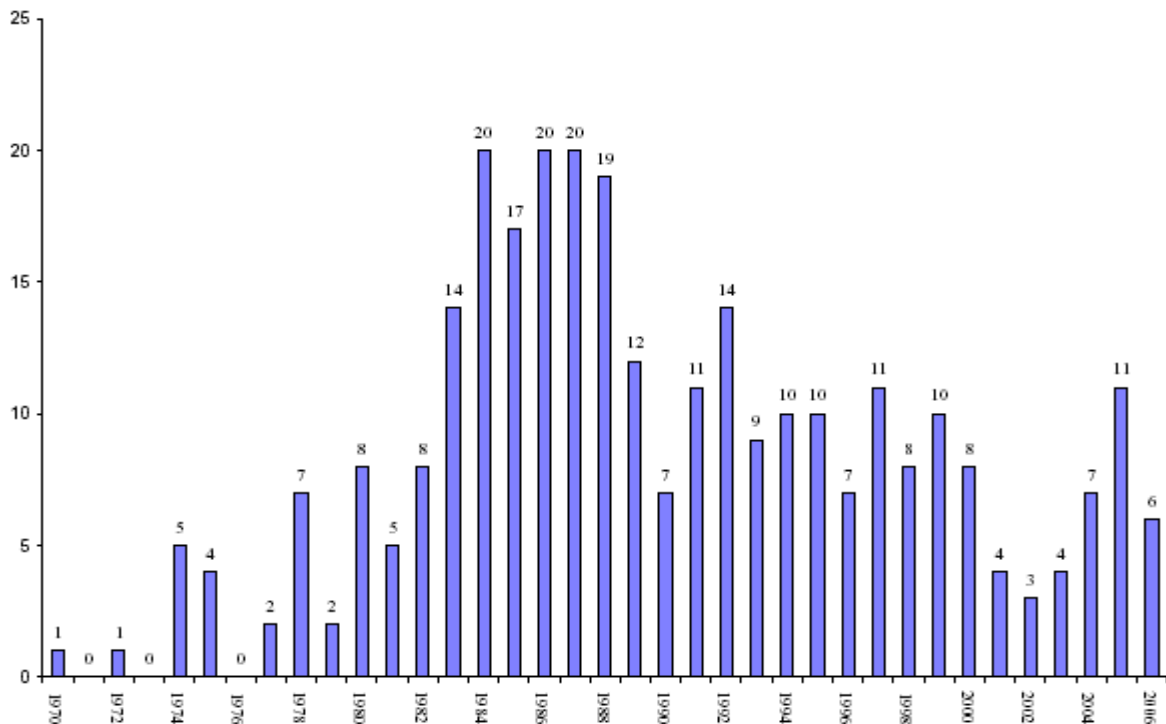
VIII. Conclusion :

Après l'étude et l'analyse des différents modèles des dispositifs FACTS, on peut conclure que chaque dispositif impose un modèle bien déterminé d'une part, d'autre part la modélisation de ces dispositifs dynamique (shunt, série, mixte) facilitent leur intégration dans les méthodes numériques.

I. Introduction :

Le compensateur statique de puissance réactive SVC (Static Var Compensator) est apparu dans les années soixante-dix, le premier SVC est installé dans l'ouest de Nebraska, en Amérique du Nord, pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes telles que les laminoirs ou thyristors classiques, les fours à arc. Les SVC sont des FACTS de la première génération, ils utilisent des commandes uniquement à l'amorçage. Plusieurs conceptions différentes ont été proposées. [5.13]

Toutefois, la plupart des SVC sont construits à partir des mêmes éléments de base permettant de fournir ou d'absorber de la puissance réactive. Depuis 1970 plus de 300 SVC est installé autour du monde, plus de 90 installés en Amérique du Nord. La figure (I.1) montre l'évolution d'installation du SVC dans le monde jusqu'à l'année 2006. [5]



Figure(II.1): Nombre approximatif d'installations du SVC de 1970 à 2006.

(Basé sur Liste compilée en 2006 par Groupe IEEE I4 travaillé sur SVC et autres données des fabricants)

II. Compensateur statique de puissance réactive (SVC) :

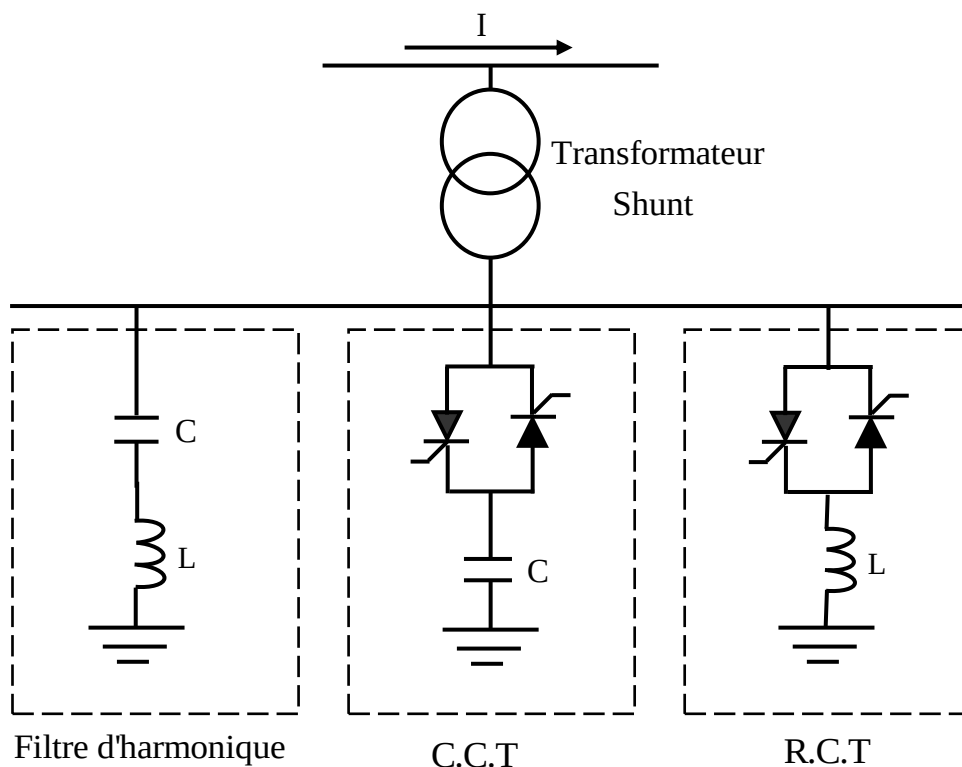
II.1. Définition :

Un compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif de compensation shunt de la famille flexible de systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS). Il peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. [6]

De surcroît, un compensateur statique sa puissance réactive peut atténuer les oscillations des amplitudes de tension. [6]

Les principales fonctions de SVC sont :

- Compensation de variation rapide de la charge réactive
- Amortissement de résonance subsynchrone
- Contrôle de tension
- Contrôle des oscillations de puissance

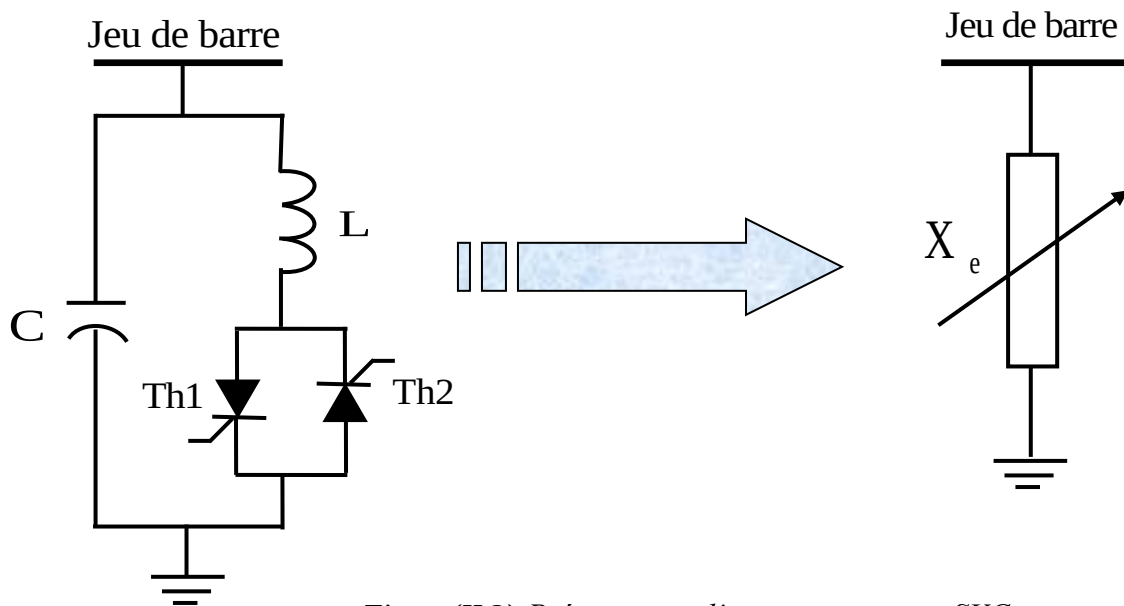


Figure(II.2) : Schéma du SVC

II. 2. Principe de fonctionnement :

La figure (II.3) donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive X_C et d'une bobine d'inductance avec la réactance X_L .

Ce système utilise l'angle d'amorçage « α » des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continu. [6]

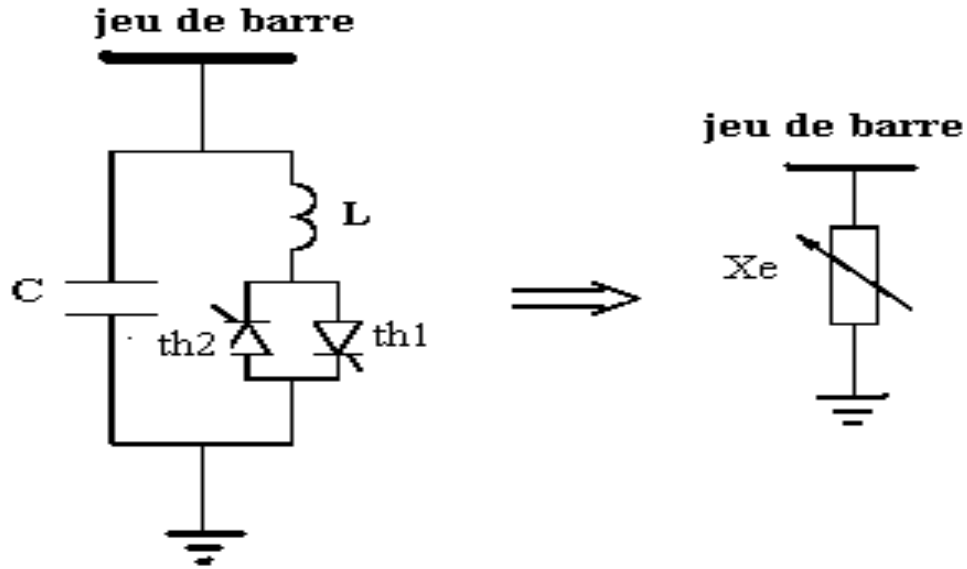


Figure(II.3):Présentation d'un compensateur SVC

Le SVC présente plusieurs avantages :

- ✓ Stabiliser la tension dans les systèmes faibles
- ✓ Réduire des pertes de transmission
- ✓ Augmenter la capacité de transmission, de ce fait retardant le besoin de nouvelles lignes
- ✓ Augmenter la limite passagère de stabilité
- ✓ Augmenter l'atténuation de petites perturbations
- ✓ Améliorer la commande et la stabilité de tension
- ✓ Atténuer des oscillations de puissance
- ✓ Améliorer la qualité d'énergie électrique

II.3. Modélisation de SVC : [14,15]



Figure(II.4): Modèle mathématique de SVC

On définit B_{SVC} la susceptance de SVC

$$B_{SVC} = \frac{1}{X_{SVC}} \quad (II.1)$$

$$B_{SVC}(\alpha) = \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})}{\pi X_L} \quad (II.2)$$

$$X_{SVC}(\alpha) = \frac{\pi X_L}{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})} \quad (II.3)$$

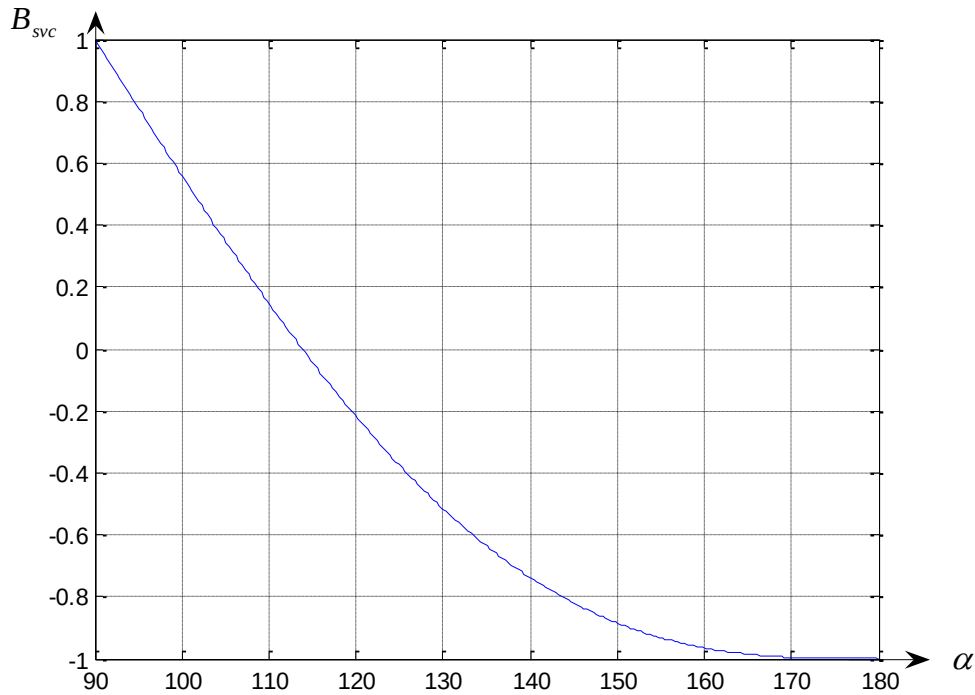
$$Q_{SVC} = V_K^2 B_{SVC} \quad (II.4)$$

Alors :

$$Q_{SVC}(\alpha) = V_K^2 \left(\frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})}{\pi X_L} \right) \quad (II.5)$$

Avec α représente la variation de l'angle d'amorçage des thyristors : α compris entre $[90 \text{ et } 180^\circ]$.

La réactance contrôlée par thyristors est en fonction de X_L, X_C, α . On peut tracer la courbe de $B_{SVC} = f(\alpha)$, si $X_C = 1(pu), X_L = 0.5(pu)$, (Figure (II-5)).



Figure(II.5): La variation de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage.

On remarque que B_{svc} change de signe lorsque α varie (Figure (II-6))

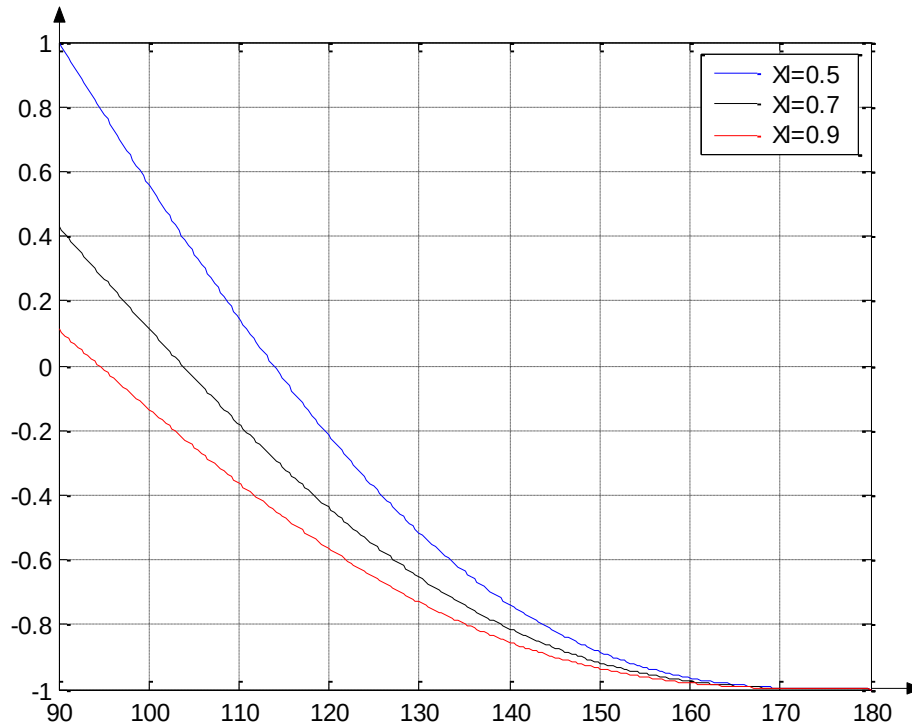
- Pour certains valeurs de α , B_{svc} est positif donc le montage fonctionne en mode inductif.
- Pour des autres valeurs, B_{svc} est négatif donc le montage fonctionne en mode capacitif.
- Pour $\alpha = \alpha_0$, B_{svc} est nulle donc le montage est représenté par une charge infinie.

Pour chaque valeur de X_L (X_C fixe), on obtient une caractéristique de B_{svc} et pour choisir la première valeur il faut tenir compte de la nature de la charge à compenser et le type de ligne.

➤ **Par exemple :**

Pour $X_L = 1(pu) \Rightarrow B_{svc} \leq 0$, donc le SVC est toujours en mode capacitive.

Par contre $X_L \leq 1(pu)$, le SVC fonctionne en mode capacitive ou inductive, d'après l'angle « α »



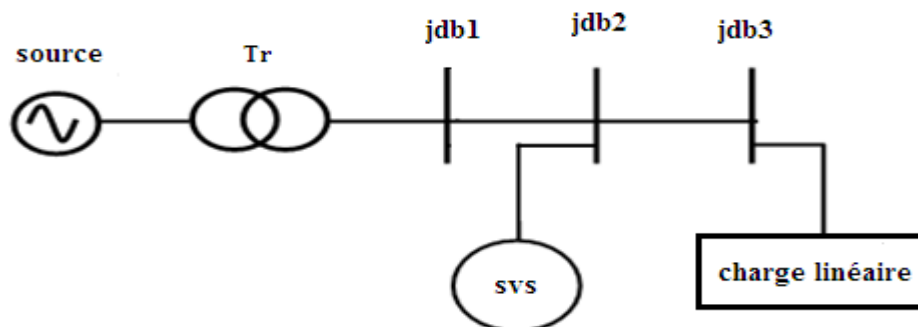
Figure(II.6) : La variation de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage pour différente valeur de X_L

III. Teste et simulation de fonctionnement du SVC :

Voilà un réseau simple de trois jeux des barres ;

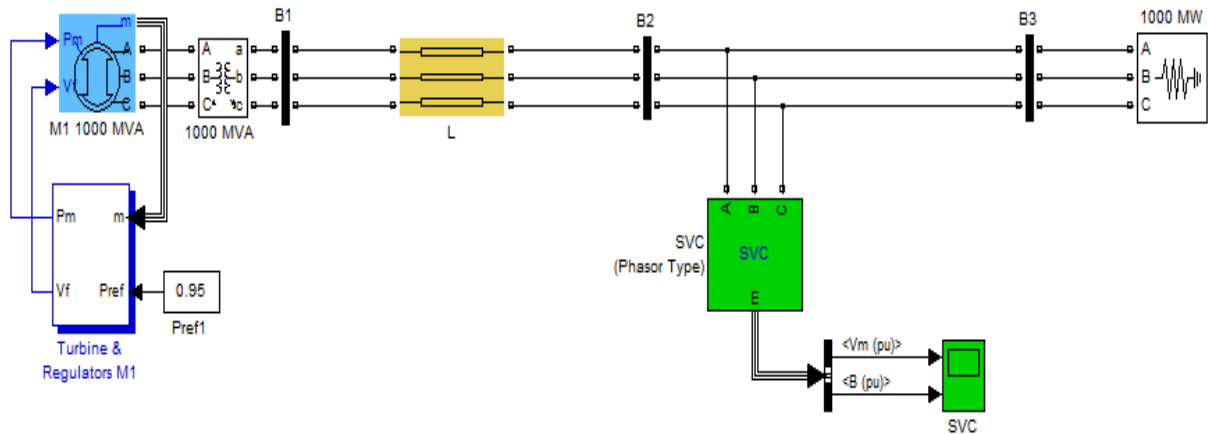
Sur le JdB N°03, une charge linéaire.

Sur le JdB N°02, on installe une SVC.



Figure(II.7) : Réseau électrique simple avec SVC

La figure (II.8) montre le bloc de simulation (en MATLAB /SIMILINK) du réseau étudié



Figure(II.8): Schéma de simulation [7]

Paramètre du réseau :

Alternateur :

- Puissance apparente nominale : 1000 MVA.
- Fréquence nominal : 50 Hz

Transformateur :

- Puissance apparente nominal : 1000 MVA.
- Fréquence nominal : 50 Hz

Ligne :

- La longueur de la ligne:100 km.

SVC :

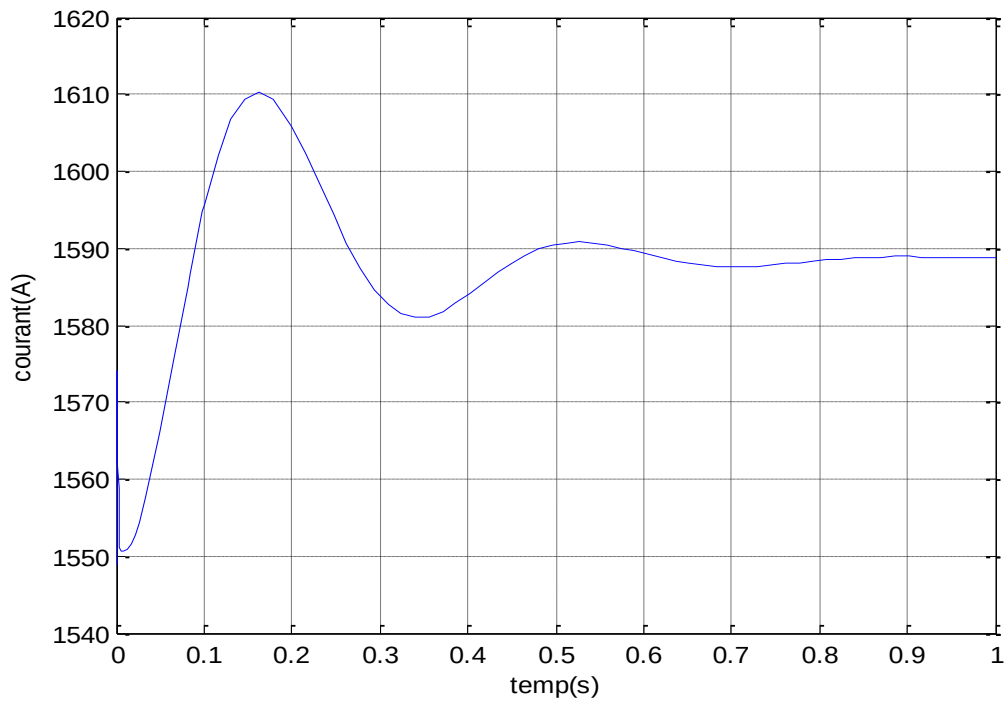
- La puissance réactive nominale : 200 MVar.
- La tension nominale : 500 Kv.
- La tension de référence : 1.009 (p.u).

La charge :

- La puissance active : 1000 MW.

IV. Résultats de simulations :

IV.1. Régime normale (sans compensation) :



Figure(II.9) : Caractéristique de courant (sans SVC)

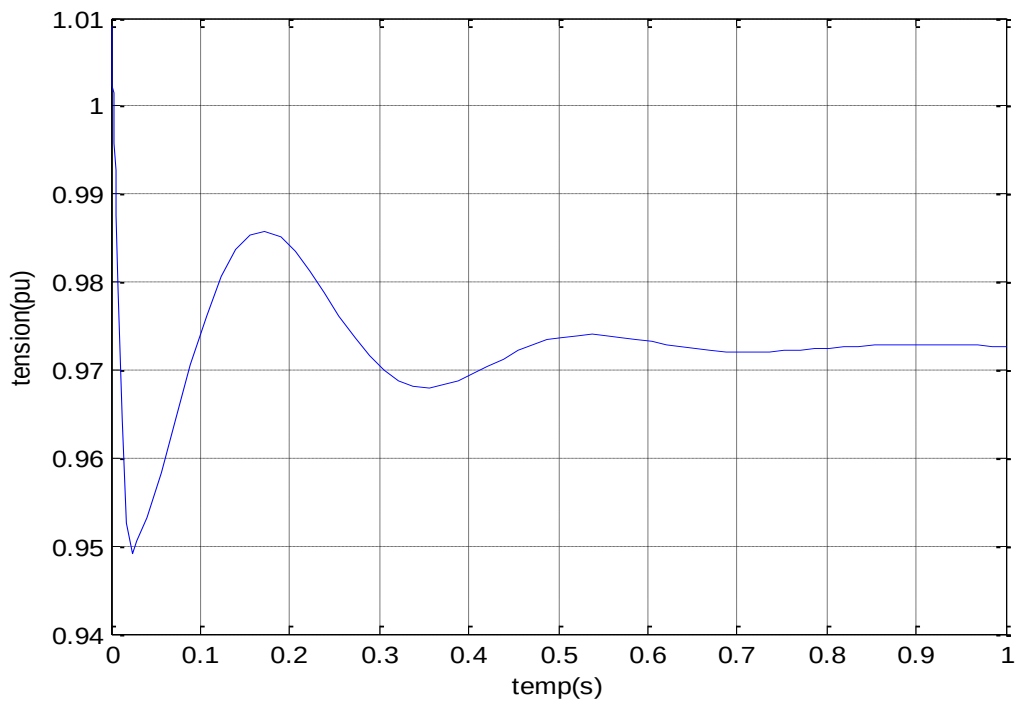


Figure (II.10): Caractéristique de la tension (sans SVC)

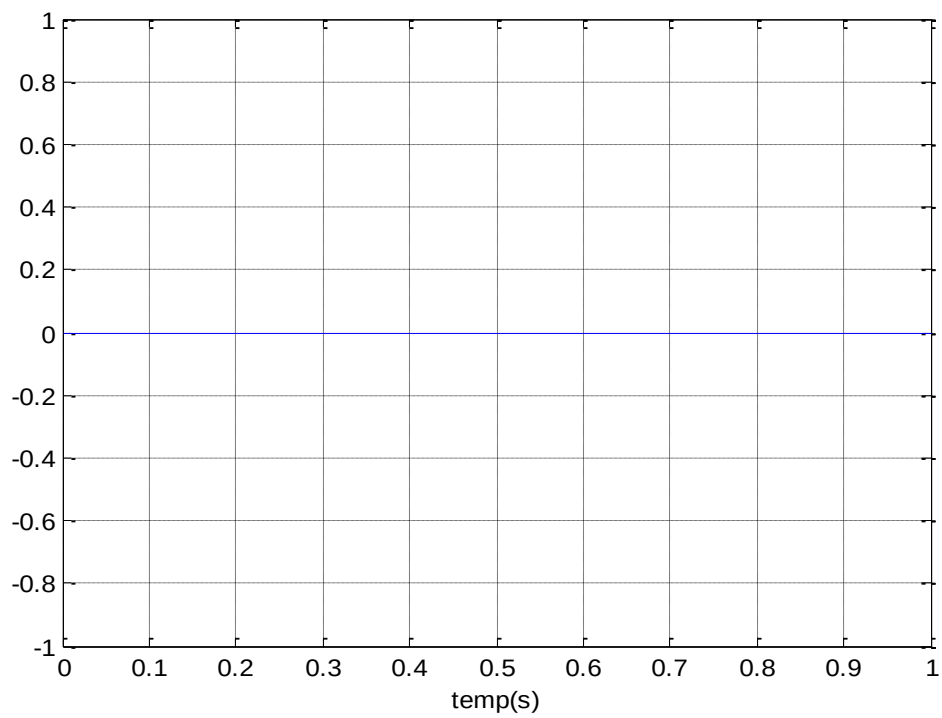


Figure (II.11): Variation de la susceptance (sans SVC)

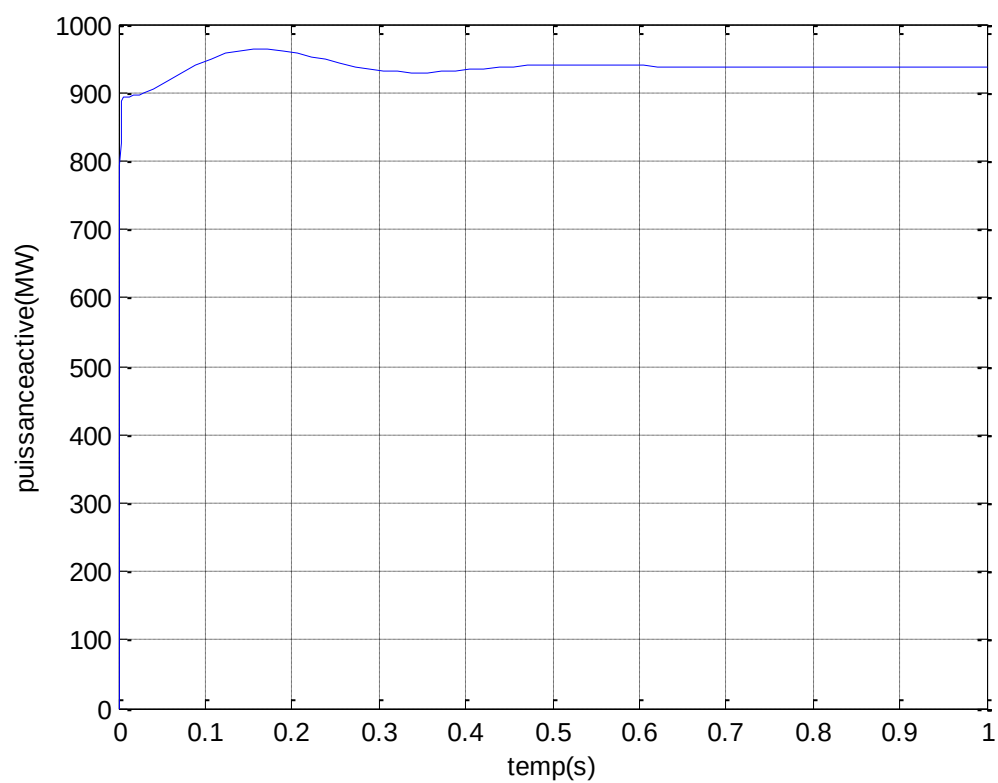


Figure (II.12): Caractéristique de la puissance active (sans SVC)

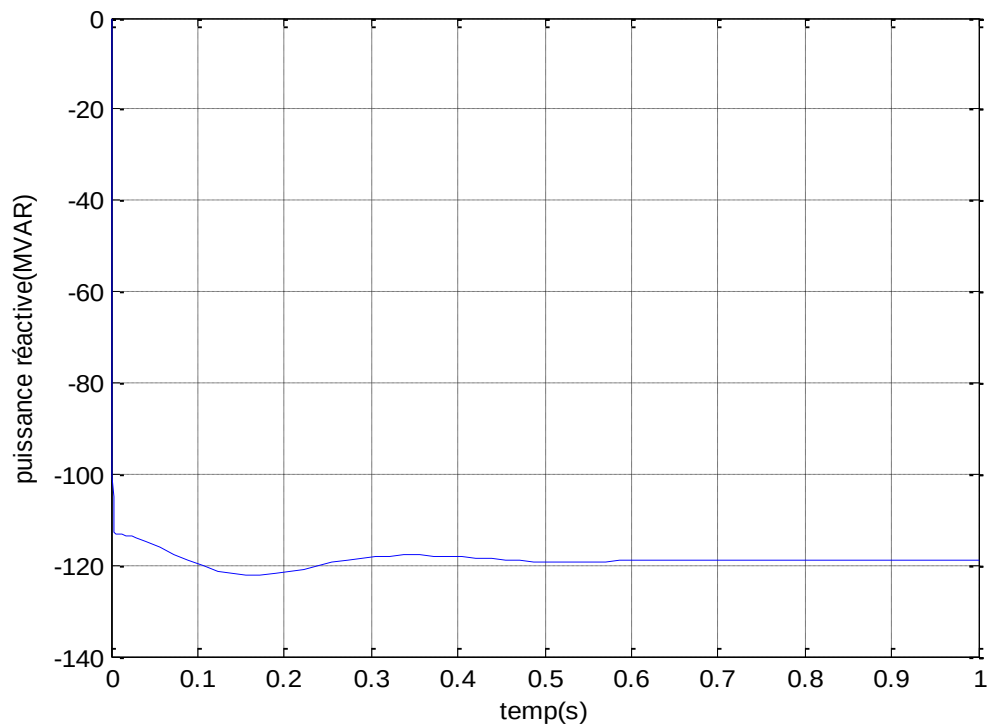


Figure (II.13): Caractéristique de la puissance réactive (sans SVC)

IV.2. Régime normale (avec compensation) :

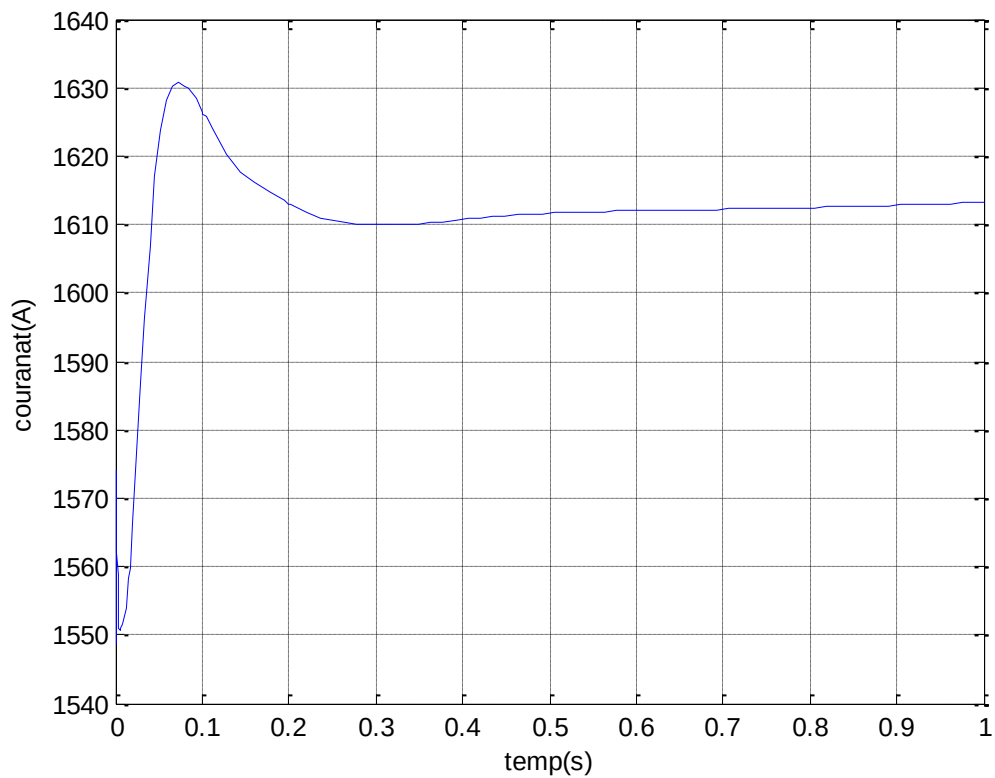
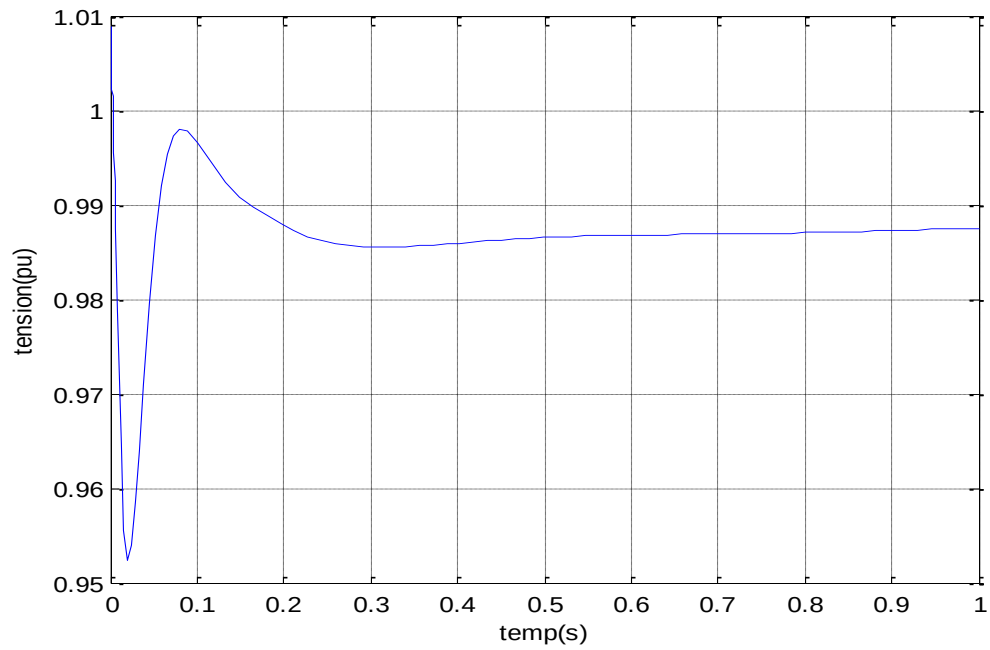
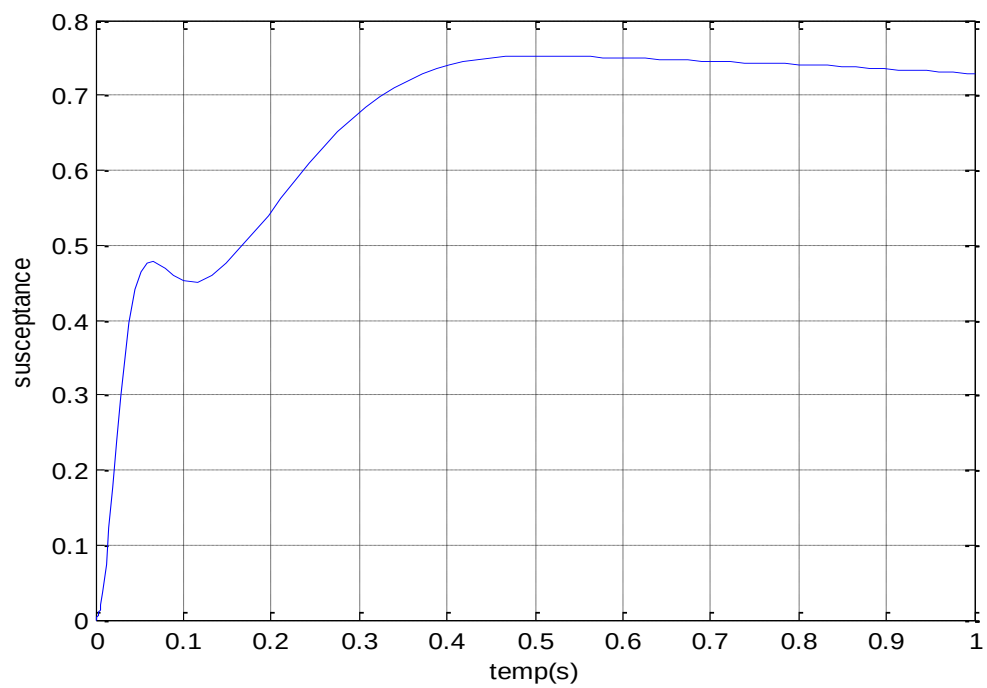


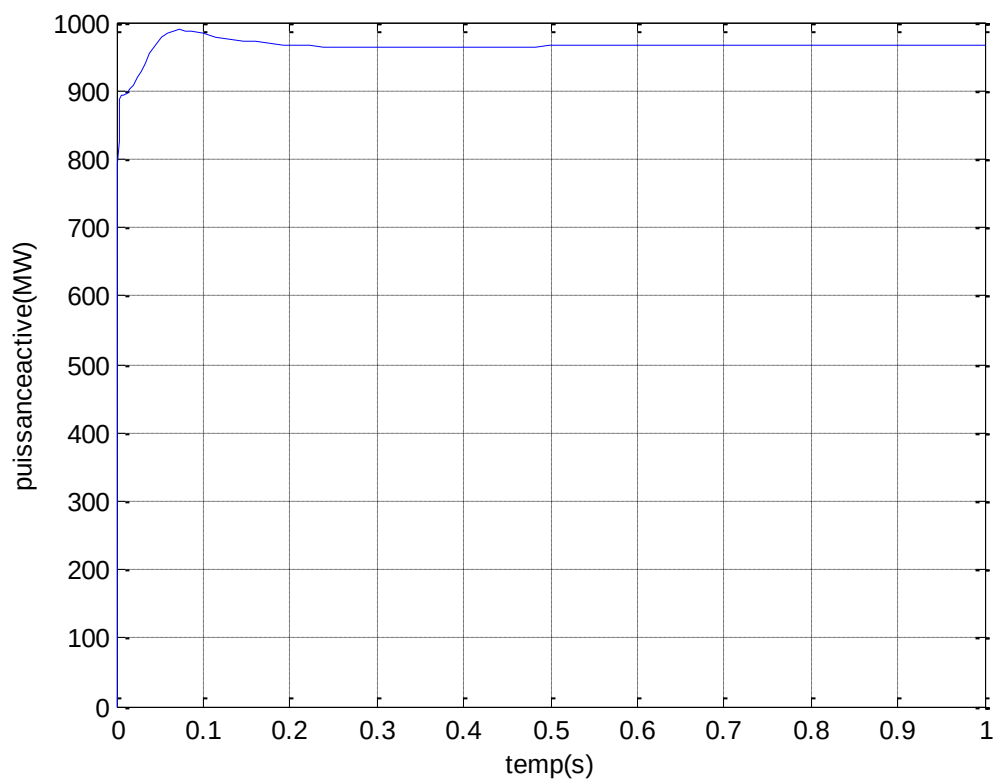
Figure (II.14): Caractéristique de courant (avec SVC)



Figure(II.15): Caractéristique de tension (avec SVC)



Figure(II.16): Variation de la susceptance (avec SVC)



Figure(II.17): caractéristique de la puissance active en Mw (avec SVC)

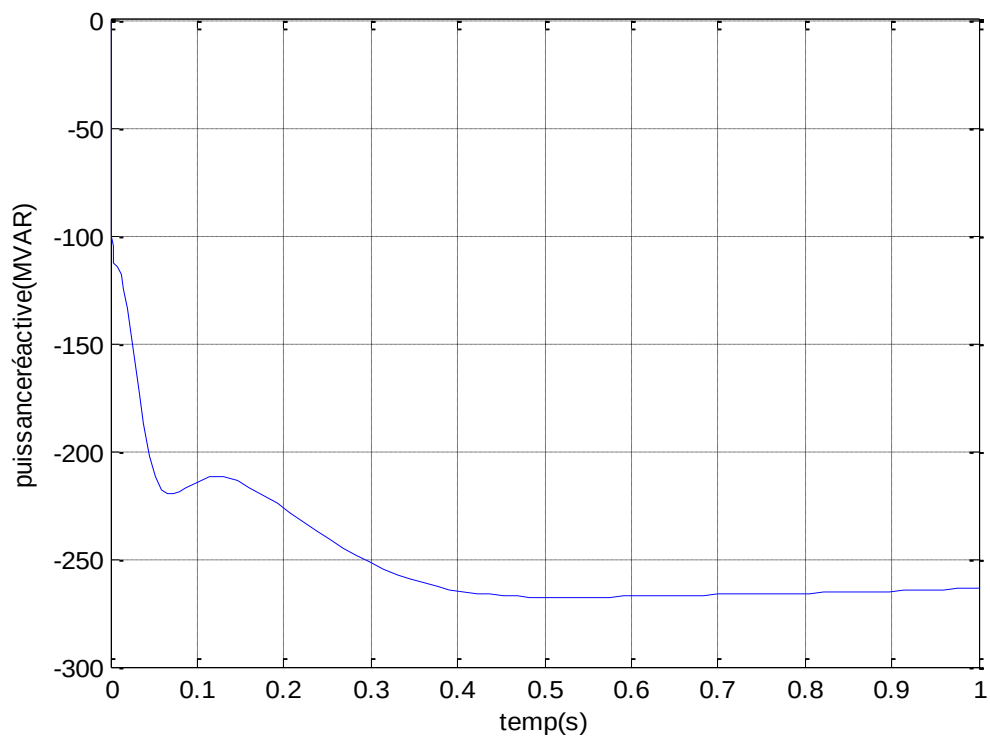


Figure (II.18): Caractéristique de la puissance réactive (avec SVC)

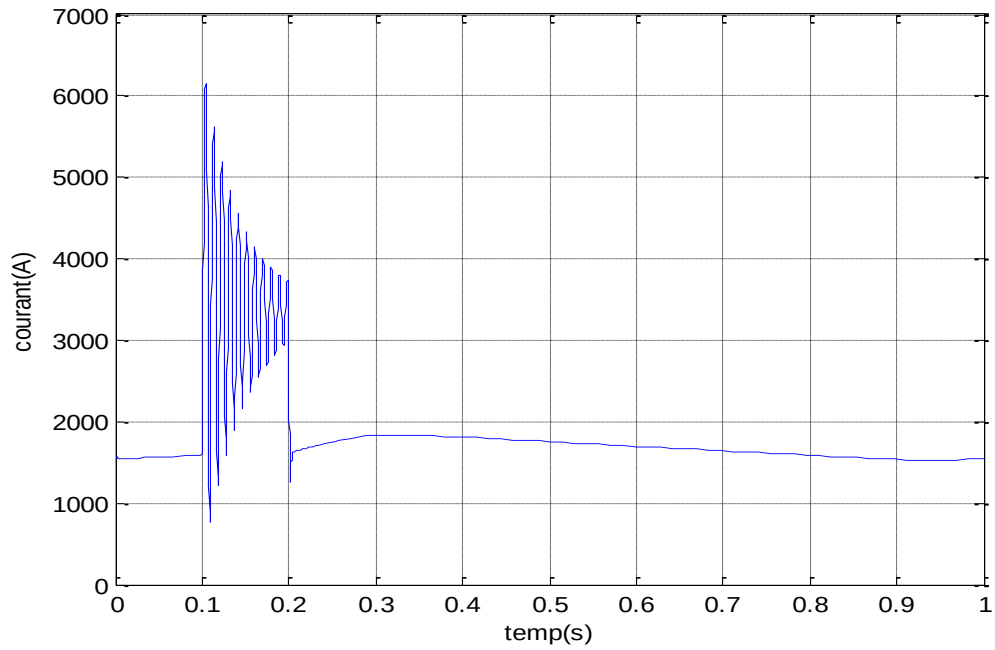
IV.3. Régime transitoire Court-circuit triphasé à la terre : (sans compensation):

Figure (II.19) : Caractéristique de courant de : Court-circuit triphasé à la terre (sans compensation)

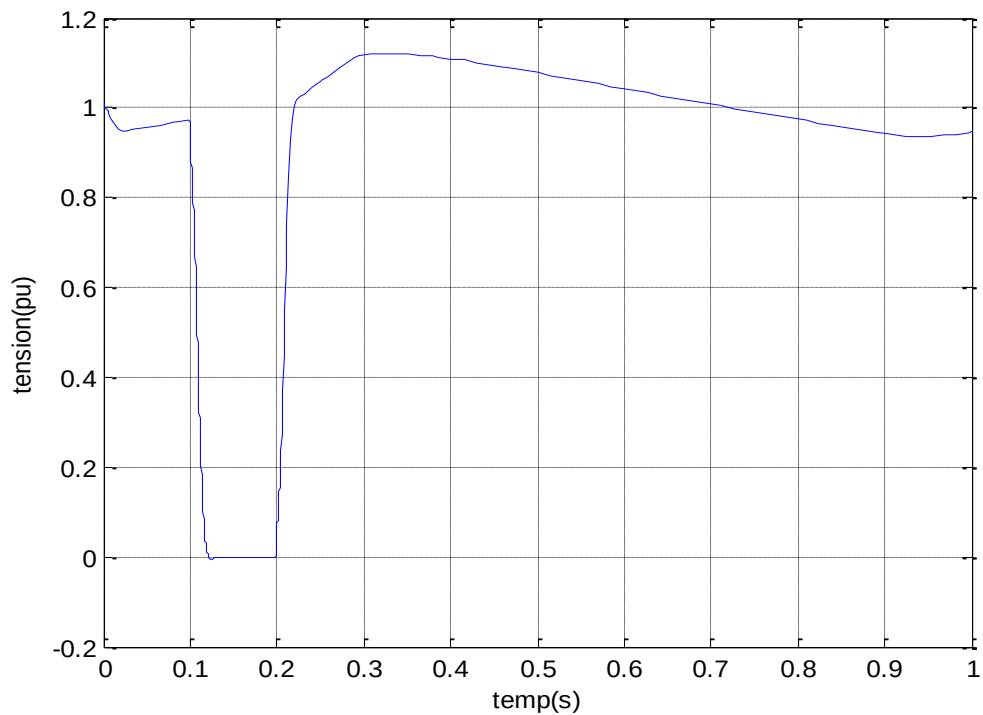
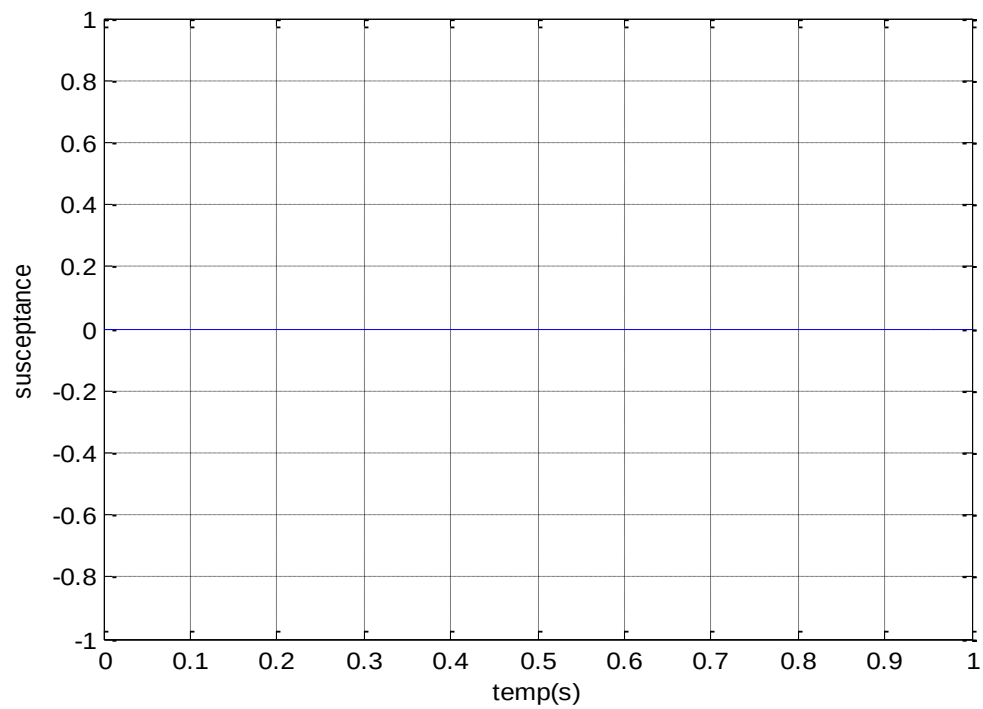
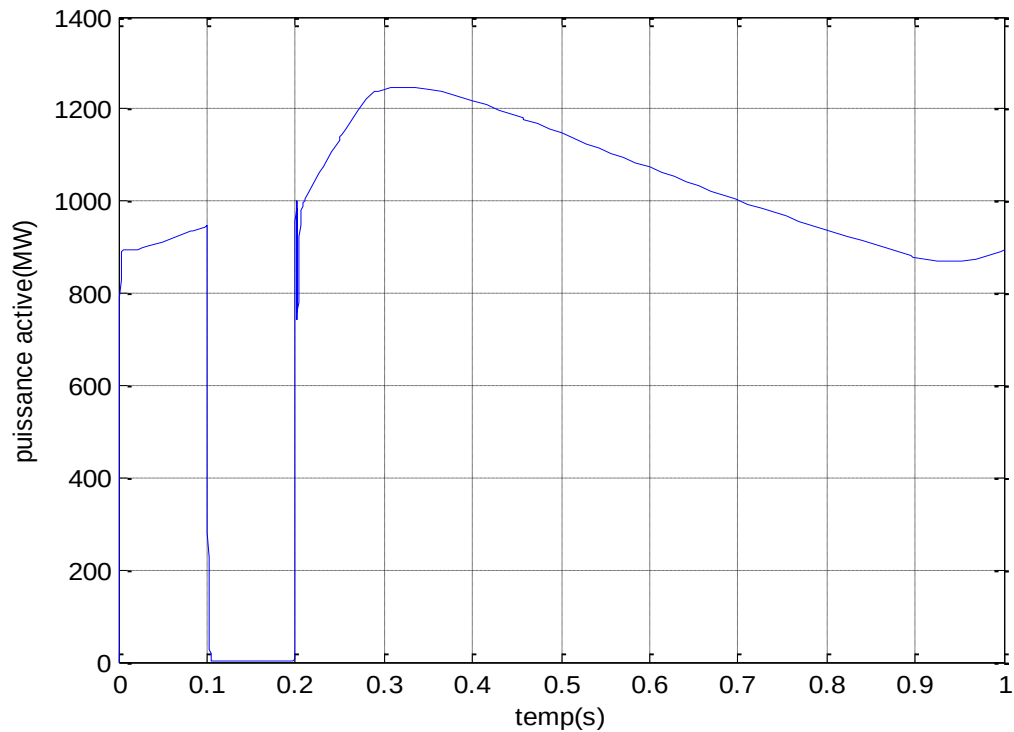


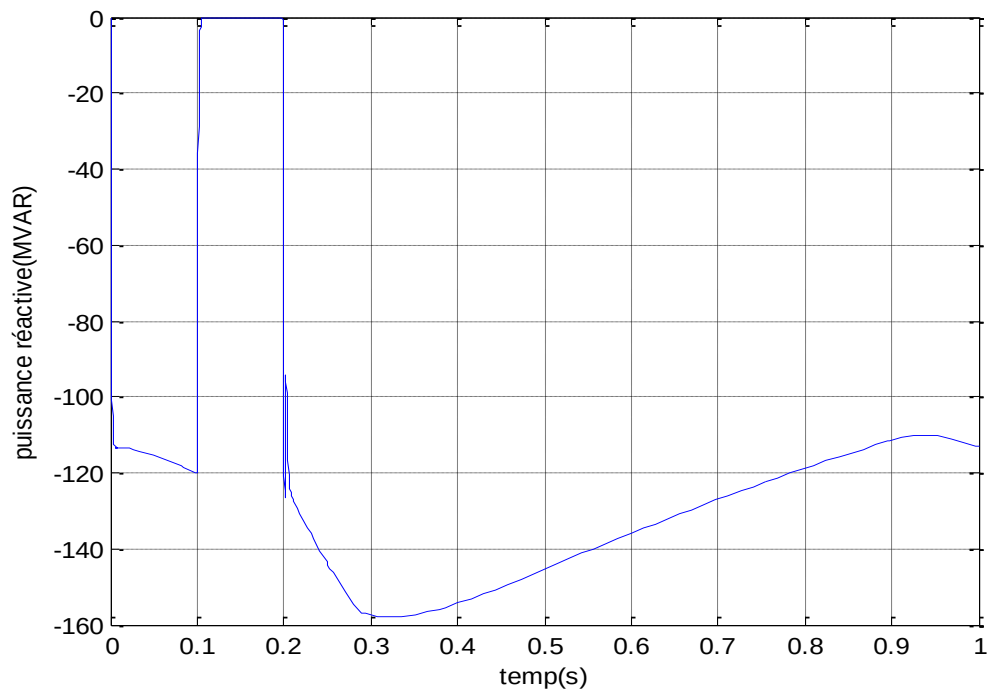
Figure (II.20): Caractéristique de la tension : Court-circuit triphasé à la terre (sans compensation)



Figure(II.21) : Variation de la susceptance : Court-circuit triphasé à la terre (sans compensation)



Figure(II.22) : Caractéristique de la puissance active : Court-circuit triphasé à la terre (sans compensation)



Figure(II.23): Caractéristique de la puissance réactive : Court-circuit triphasé à la terre (sans compensation)

IV.3.2.1.régime transitoire Court-circuit triphasé à la terre : (avec compensation):

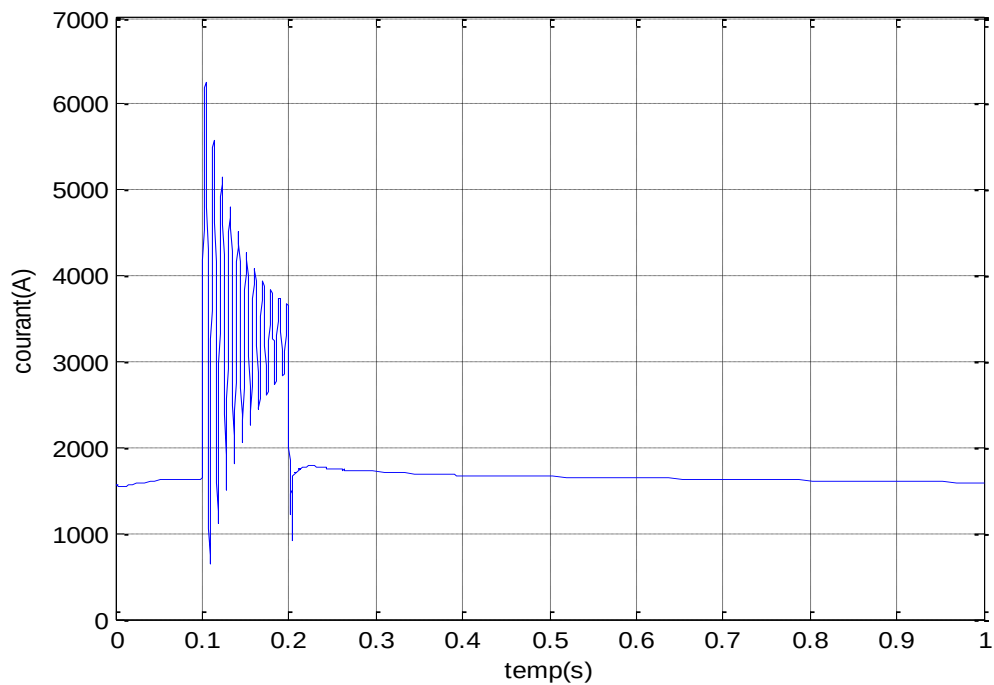


Figure (II.24): Caractéristique de courant : Court-circuit triphasé à la terre (avec compensation)

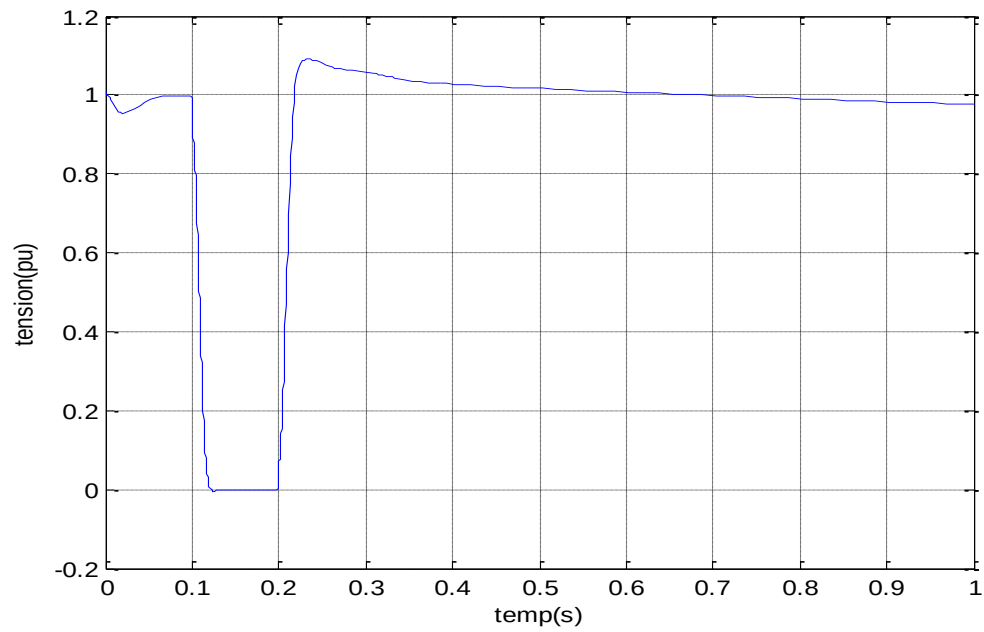


Figure (II.25) : Caractéristique de tension : Court-circuit triphasé à la terre (avec compensation)

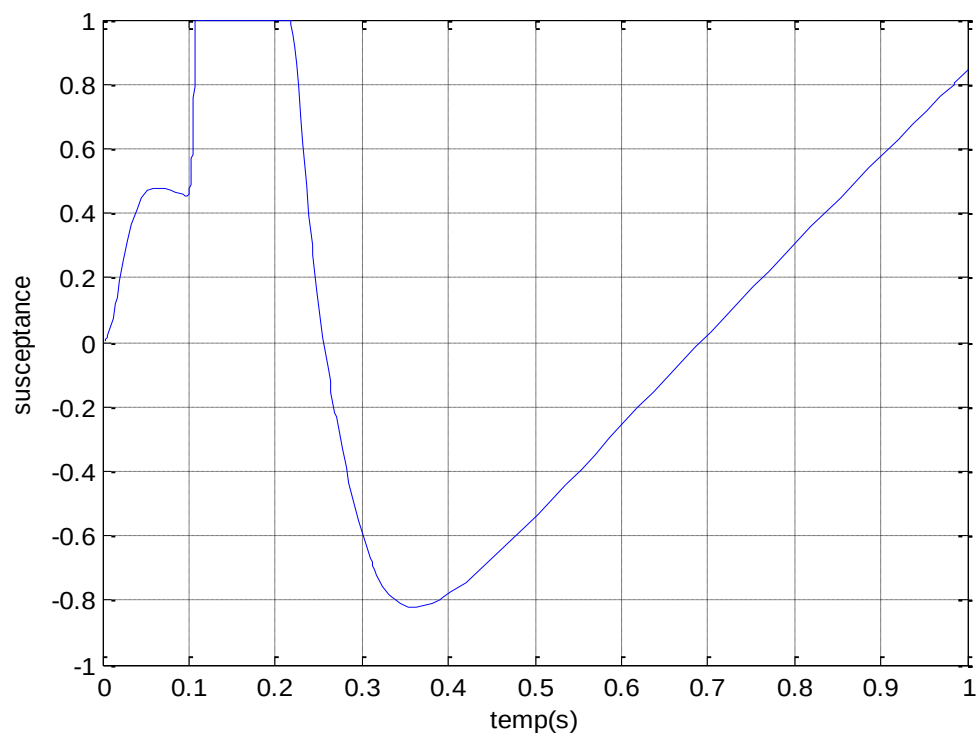


Figure (II.26) : Variation de la susceptance : Court-circuit triphasé à la terre (avec compensation)

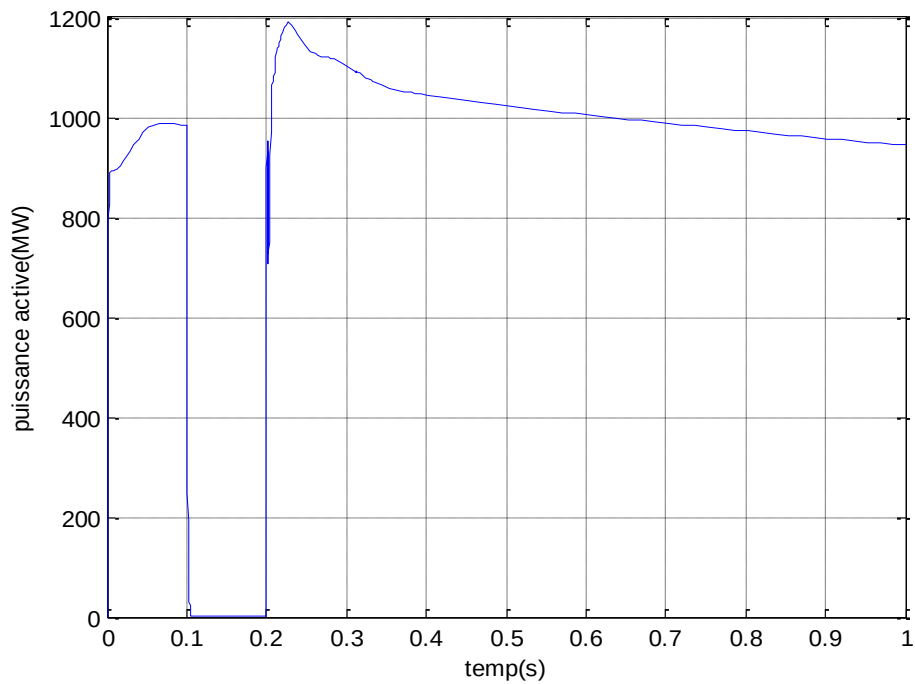
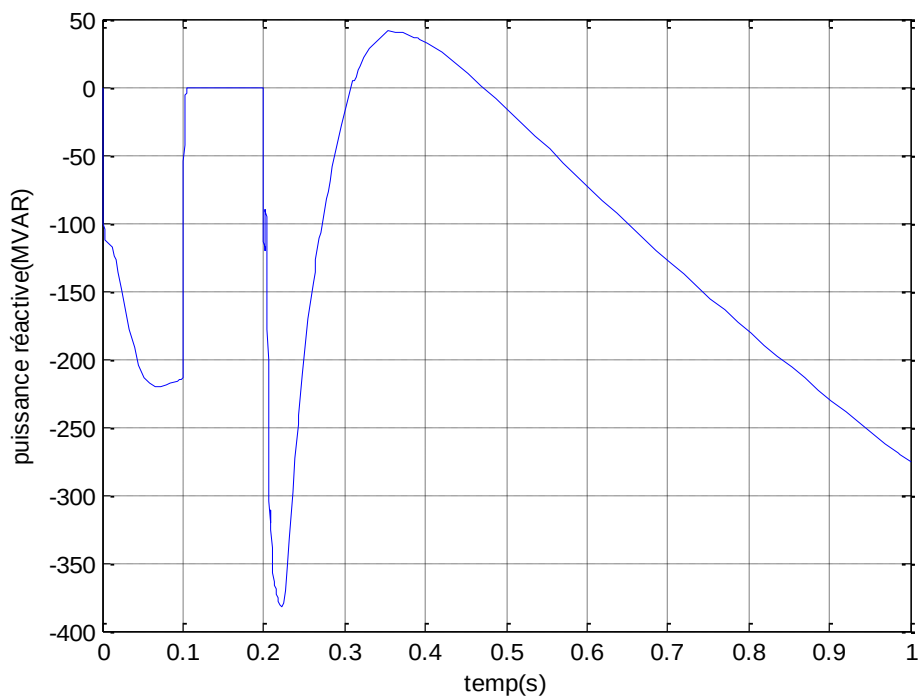


Figure (II.27): Caractéristique de la puissance active : Court-circuit triphasé à la terre (avec compensation)



Figure(II.28): Caractéristique de la puissance réactive : Court-circuit triphasé à la terre (avec compensation)

V. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié les compensateurs statiques variables « SVC ». En commençant par ces définitions, principe de fonctionnement, ces équations mathématiques pour leurs modélisations.

En fin de ce chapitre nous avons fait un teste de fonctionnement du SVC raccordé avec une charge linéaire, dont l'objectif est d'étudier leurs importances dans le domaine de stabilité de la tension et les régimes de court circuit.

I. Introduction :

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. [18]

Dans un réseau réel d'alimentation, la qualité de la tension fournie aux utilisateurs et plus au moins dégradée à cause de divers perturbations. Une de ces perturbations se matérialise par la distorsion de la forme d'onde causée par la présence **des harmoniques** de courant circulant à travers les impédances du réseau. [16]

Cependant, dans les réseaux il existe des charges à caractéristique courant- tension non-linéaire, ce qui donne lieu à une déformation des ondes de courant et de tension qu'on appelle perturbation harmonique ou distorsions harmoniques. [16,17]

II. Les harmoniques :**II.1.Définitions :**

La présence des charges non linéaires sur un réseau électrique va donner la naissance de courant (tension) dit déformé (d'ont l'aspect n'est plus sinusoïdale). Cette déformation est appelée perturbations harmoniques.

Les harmoniques donc sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition sur l'onde à 50 Hz ou 60 Hz (selon les pays) d'ondes également sinusoïdales, mais de fréquences multiples de celle du fondamentale.

Une harmonique peut aussi être définie comme étant une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité qui possédant une fréquence qu'est un multiple entier de la fréquence du fondamental. [17]

On définit les fréquences harmoniques « f_h » comme les fréquences multiples de la fréquence fondamentale.

Généralement les fréquences correspondant à l'étude des harmoniques sont compris entre 100 Hz et 2 KHz. (c à d : h entre [2 et 40]) [16,17].

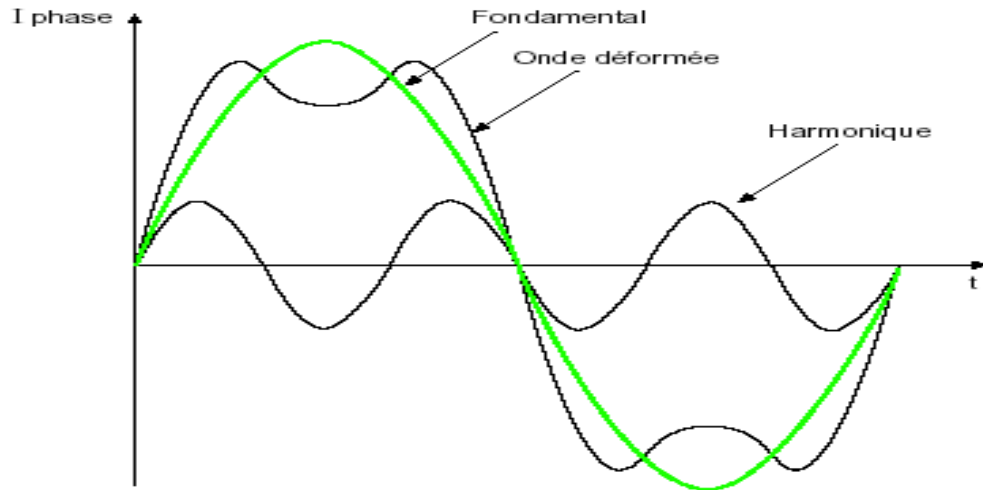


Figure (III.1) : Onde déformée

II. 2 .Analyses des harmoniques :

Pour faciliter l'étude des harmoniques il est nécessaire de décomposer le signal déformé en une somme d'ondes sinusoïdales et d'une composante continue éventuelle (théorème de Fourier).

Grâce à cette décomposition du signal, on simplifier beaucoup l'analyse des harmoniques ; on ramène le problème du domaine temporel au domaine fréquentiel. [19,20]

II.2.1.Décomposition en série de Fourier :

La composante alternative d'un signal périodique $v(t)$ peut se décomposer en une somme algébrique infinie de signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples de la fréquence du signal $v(t)$, et dont les amplitudes sont variables.

La méthode mathématique qui permet de calculer les amplitudes des différentes sinusoïdes ou cosinusoïdes, s'appelle décomposition en **série de Fourier**.

Le terme de rang 1 (même fréquence que $v(t)$) s'appelle le premier harmonique, ou aussi la **fondamentale**.

Les termes suivants s'appellent **harmoniques**, ..., harmonique de rang n .

Pour tout signal $v(t)$ réel où $v(t) = v(t+T_0)$, on peut écrire : [19,20]

$$v(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) \quad (\text{III.1})$$

n : nombre entier ;

$$\omega = \frac{2\pi}{T} : \text{Fréquence fondamentale} \quad (\text{III.2})$$

Les coefficients A_0 , A_n et B_n sont indépendants du temps et sont donnés par les intégrales suivantes

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t).dt \quad (\text{III.3})$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t). \cos(n\omega t).dt \quad (\text{III.4})$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t). \sin(n\omega t).dt \quad (\text{III.5})$$

Ou :

A_0 : est la valeur moyenne de la fonction $v(t)$.

A_0 est donc nul si la fonction $v(t)$ est alternative.

Quelques cas particuliers:

- ❖ Si la courbe représentative de la fonction $v(t)$ admet un centre de symétrie situé sur l'axe « Ox » alors, en choisissant ce point comme origine de temps : $v(-t)=-v(t)$,la fonction $v(t)$ est une fonction impaire ; son développement en séries de Fourier ne comportera que des termes en sinus (les coefficients A_n sont nuls).
- ❖ Si la courbe représentative de la fonction $v(t)$ admet l'axe des ordonnées comme axe de symétrie, alors $v(-t)=v(t)$ (fonction paire). Le développement en séries de Fourier ne contient alors que des termes en cosinus (les coefficients B_n sont nuls).
- ❖ Si $v(t)$ à des alternances positives et négatives identiques au signe près, c'est à dire $v(t+T/2)=-v(t)$, les termes harmoniques de rang paire seront nuls $A_{2n}=B_{2n}=0$; (symétrie de glissement avec $A_0=0$) [22]

II .2.2. Spectre en fréquence : [20]

Le terme général $A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)$, est appelé harmonique de rang n . Il peut être mis sous la forme

$$A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t) = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \left[\frac{A_n}{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}} \cos(n\omega t) + \frac{B_n}{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}} \sin(n\omega t) \right]$$

En posant :

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad ; \quad \varphi_n = \arctan \frac{B_n}{A_n}$$

Il vient : $A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t) = C_n \cos(n\omega t - \varphi_n)$

Et la fonction périodique $v(t)$ peut alors s'écrire :

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (\text{III.6})$$

III. Origines des harmoniques :

La principale cause de la génération des harmoniques c'est l'existence des charges déformantes (**non linéaires**). [18]

Une charge est dite linéaire lorsque son impédance est constante, le courant qu'elle absorbe est alors sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale (voir fig.III.2).

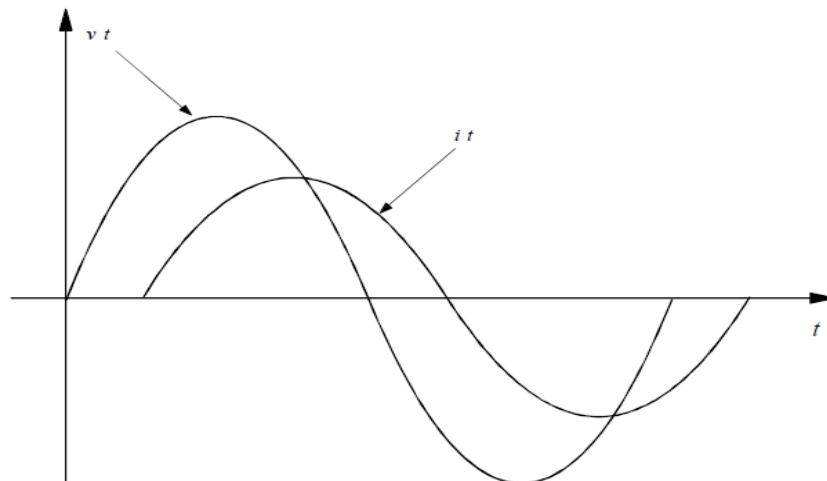


Figure (III.2) : charge linéaire

Une charge est dite non linéaire lorsque son impédance varie au cours d'une même période, le courant qu'elle absorbe n'est pas sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale (voir fig.III.2).

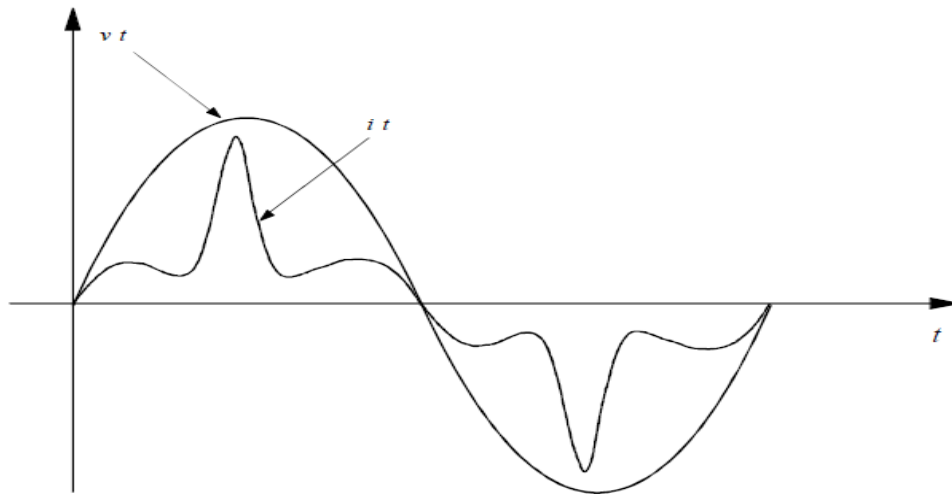


Figure (III.3) : Charge non linéaire

III.1. Génération de tension harmonique :

La génération des perturbations harmoniques sur le réseau d'alimentation est due à des nombreux types d'équipements dont on peut préciser : [23,24]

III.1.1. Alternateurs :

Les alternateurs des centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques.

Le contenu d'harmonique de la tension générée par les alternateurs est liée à la qualité de bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale d'onde.

Aussi un groupe électrogène génère des harmoniques de taux ($< 0.5\%$) à vide est inférieur à (1%) lorsqu'il est en plein charge sur une charge linéaire.

III.1.2. Transformateurs :

Les transformateurs peuvent être des générateurs de tension harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé (le taux de distorsion harmonique est $t < 1\%$).

III.2. Générateurs de courant harmonique :

III.2.1. Moteur asynchrone :

Les perturbations harmoniques dans ces machines sont dues aux : courant magnétisant, les fréquences de dentures et ainsi au glissement de la machine asynchrone.

III.2.2. Convertisseur électronique de puissance : [25]

Sont les principales sources de la pollution harmonique tels que : les redresseurs triphasés en thyristor, les redresseurs triphasés à diode, et filtre capacitif, le redresseur monophasé et les gradateurs monophasés ... et tous les dispositifs en électronique de puissance.

Voilà quelques exemples des convertisseurs statiques

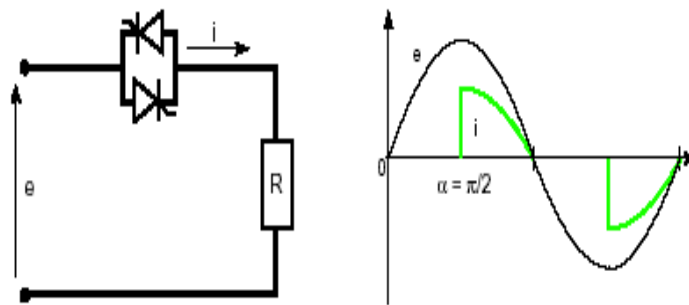


Figure (III.4) : Gradateur de lumière ou de chauffage

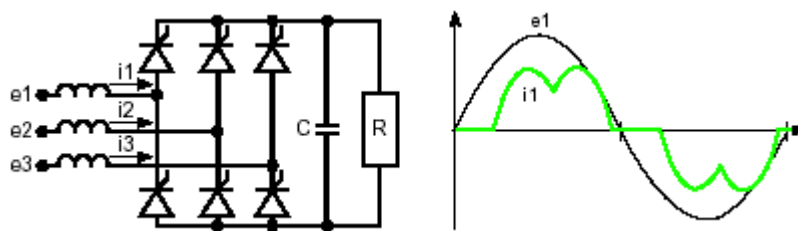


Figure (III.5) : Redresseur triphasé avec inductance de lissage en alternatif
(ASI de forte puissance)

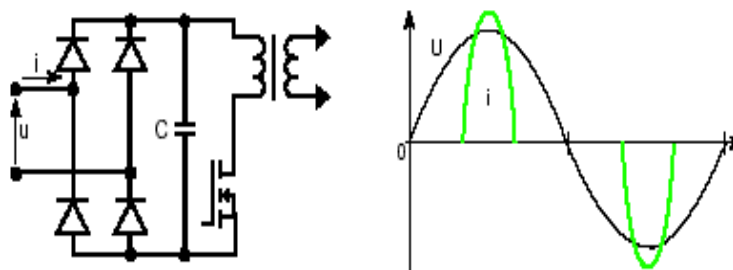


Figure (III.6) : Redresseur d'alimentation à découpage
(Ordinateur Electroménager)

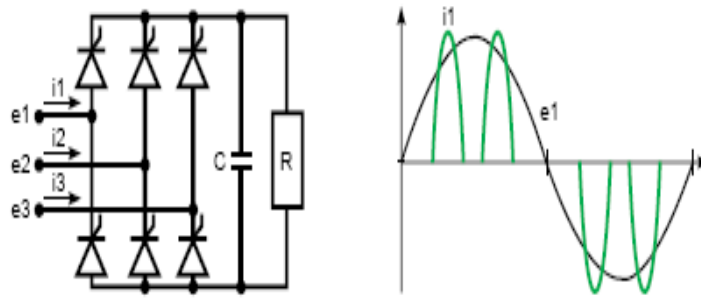


Figure (III.7) : Redresseur triphasé avec condensateur en tête par
(Variateur de vitesse pour moteur asynchrone)

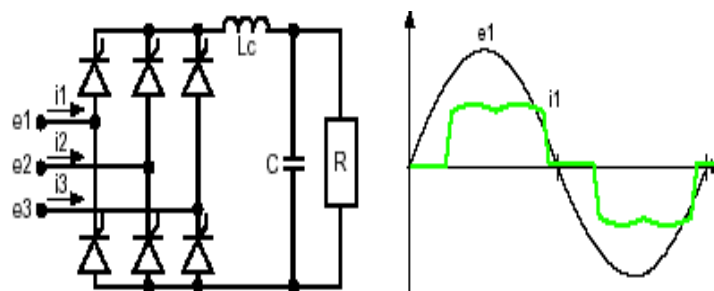


Figure (III.8) : Redresseur triphasé avec inductance de filtrage en continu
(Chargeur d batterie)

III.2.3. Eclairage :

On distingue deux types de lampes qui produisent les courants harmoniques :

Les lamps à fluorescence.

- Les lampes à vapeur haute pression.
- Les lamps fluo-compactes.

Donc la génération d'harmoniques dans ces lampes est liée à la nature fortement de la non linéaire du phénomène entraînant l'illumination ainsi que la présence d'un ballast.

III.2.4. Appareils à arc électrique :

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de « MW », et les machines de soudures à d'arc, à courant alternatif ou continu.

Le fait qu'on retrouve la non-linéarité d'une charge sur tout le réseau s'appelle la "propagation des harmoniques". On a même l'habitude de dire que les harmoniques "remontent" le réseau, c'est à dire se propagent des récepteurs vers les sources.

Certaines perturbations harmoniques dues essentiellement aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation des circuits magnétiques...).

IV. Caractéristique des perturbations harmonique :

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

IV.1. Le taux harmonique de rang h :

$$S_h = C_h / C_1$$

C_h : Représente la composante harmonique de rang h et

C_1 : Représente la composante fondamentale.

IV.2 Le taux global de distorsion harmonique :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{C_h^2}{C_1^2}}$$

En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz, ce qui correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes.

De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz, c'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend généralement de 100 à 2500 Hz, c'est-à-dire des rangs 2 à 50 [16].

IV.3. Le facteur de puissance :

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active “ P ” et la puissance apparente “ S ”. Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), donnée par la relation (III.8), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure (III.9).

$$D = 3.V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \quad (\text{III.4})$$

Le facteur de puissance (*F.P.*) devient :

$$F.P. = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cdot \cos \gamma$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

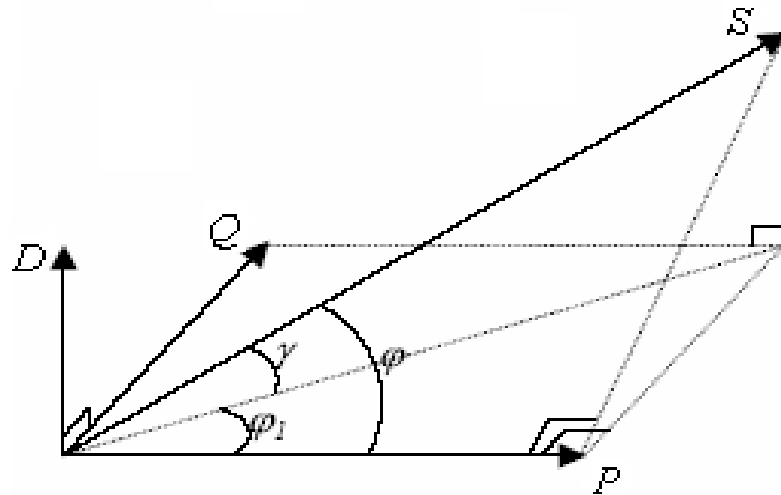


Figure (III.9) Facteur de puissance

φ_1 : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente.

γ : Le déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré linéaire S_1 et la puissance apparente dans le cas déséquilibré non linéaire S .

φ : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S_1 .

V. Conséquences des harmoniques :

Les courants harmoniques, qui se propage dans les réseaux électriques, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par les mêmes réseaux.

On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types [28,29] :

- ❖ Les effets instantanés.
- ❖ Les effets à terme.

V.1. Effets instantanés:

Ils apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

- Défauts de fonctionnements de certains équipements électriques: en présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans

une demi-période. Les appareils, dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électrique peuvent être affectés.

- Trouble fonctionnel des micro-ordinateur: les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteur d'entraînement de disque.
- Les perturbations et la dépollution dans les systèmes électrique : certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesures et des erreurs de lecteur supplémentaires en présence des harmoniques.
- Vibrations et bruits: les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques.

V.2. Effets à terme :

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet le plus important est de nature thermique, Il se traduit par un échauffement .Il conduit à une fatigue prématurée du matériel des lignes et amènent à un déclassement des équipements :

- Echauffement des câbles et des équipement: ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures)ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être , le siège du au sur échauffements du neutre et les éléments bobinées (transformateurs ,moteurect)
- Echauffement des condensateurs : l'échauffement est causé par les pertes due au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique, les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques .Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
- Echauffements des pertes supplémentaires des machines et des transformateurs :
- Echauffements causés par les pertes dans les stators des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétisants) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.
- Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courant de Foucault dans les circuits magnétiques.

VI. Propagation des courants harmoniques dans les réseaux électriques :

VI.1. Chemin normal emprunte par les courants harmoniques :

Les courants harmoniques nés dans un élément non linéaire et cherchent un chemin du retour en concordance avec les lois de KIRCHOFF.

Généralement le courant harmonique voyage de son point de naissance (charge non-Linéaire) vers la source de production d'énergie. Les impédances de charge existant dans le réseau vu de la source d'harmoniques sont en parallèle avec les impédances des centrales de production d'énergie.

Pratiquement l'impédance de la source de production d'énergie présente $\frac{1}{20}$ de la totalité des impédances des charges combinées en parallèle dans le réseau, cependant il est tout à fait normale qu'environ 90% ou 95% de courant harmonique se propage vers la source de production et trouve le passage de retour à travers les systèmes de génération du fait que le courant suit le chemin le plus facile qui présente la plus faible impédance[26].

VI.2. Propriété des harmoniques dans un système triphasé :

Dans les réseaux électriques triphasés, des simplifications importantes concernant les rangs des harmoniques sont souvent utilisées. Si un système est constitué exclusivement d'élément bilatéraux d'appareils produisant des tensions et des courants à symétries demi-onde, alors les harmoniques de tension et de courant de rang pairs (2,4,6, ...) ne sont pas présents.

Puisque les réseaux d'énergie et les charges sont linéaires tendent d'être bilatéraux, les harmoniques de rang pair sont pratiquement inexistantes [19,20].

Si le réseau triphasé et ses charges productrices d'harmoniques sont équilibrés, alors pour k désignant un entier quelconque positif on a :

- Les harmoniques de rang $h=3k+3$ sont entièrement homopolaires.
- Les harmoniques de rang $h=3k+2$ sont entièrement inverses.
- Les harmoniques de rang $h=3k+1$ sont entièrement directes.

Les harmoniques multiples de 3 qui sont homopolaires, comme cité plus haut sont des courants résiduels s'écoulant dans la terre et dans les fils neutres où ils peuvent causer plus de problèmes que les autres harmoniques de même amplitude.

En effet, l'impédance de chemin du courant résiduel est si élevée que les distorsions de tensions résultantes sont importantes, de plus le couplage de ce courant avec les circuits des télécommunications n'est pas négligeable. C'est pourquoi des mesures sont prises pour éviter la propagation de telles harmoniques dans les réseaux [16].

VII. Conclusion :

Les mesures effectuées ces dernières années montrent que la pollution harmonique s'accroît régulièrement sur l'ensemble des réseaux.

De nombreuses études ont été consacrées à l'analyse des perturbations provoquées par les convertisseurs statiques sur les réseaux électriques, ainsi que leurs effets sur la qualité de la tension délivrée aux différents usagés.

Comme nous avons pu le constater dans ce chapitre, les courants harmoniques ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller de l'échauffement et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

I. Introduction

Le nombre croissant des charges électriques non linéaires « éclairages fluorescents, ordinateurs, alimentations sans interruption (ASI), postes à souder, etc. » imposent leur présence à plus d'un titre. En effet, elles engendrent des harmoniques à l'origine de problèmes très importants et souvent difficiles à identifier pour les utilisateurs raccordés au même réseau. [27]

La correction de la forme d'onde est rendue nécessaire si la déformation dépasse certaines limites, souvent atteintes dans les réseaux possédant des sources de perturbations harmoniques tels que : fours à arc, convertisseurs statiques de puissance, ou encore certains types d'éclairage, etc. [21 ,27].

II. Réduction des perturbations harmoniques

A part la solution évidente qui consiste à choisir des matériels non polluants, il est possible de limiter les courants harmoniques de certains convertisseurs en intercalant entre leur point de raccordement et leur entrée une **inductance dite de lissage**. Cette disposition est utilisée en particulier avec les redresseurs avec condensateurs en tête ; l'inductance pouvant même être proposée en option par les constructeurs. Attention ! Cette solution diminue le taux global de distorsion en tension en amont de l'inductance mais l'augmente aux bornes du récepteur polluant [22]

Les solutions en question sont énumérées ci-après. [30]

1. Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique
 2. Choix du raccordement des charges polluantes au réseau :
 - Branchement de la charge non -linéaire polluante sur la source d'impédance la plus faible
 - Raccordement le plus en amont possible dans le réseau en des points où la puissance de court-circuit est élevée
 3. Transformateurs à couplage spécial (confinement des harmoniques)
 4. Inductance de la ligne
 5. Augmentation de l'indice de pulsation
 6. Appareils à prélèvement sinusoïdal
 7. Renforcement de la puissance de court-circuit
 8. Inductance anti-harmonique
-

9. Solution de Filtrage.

- Filtrage passif
 - Le shunt résonant
 - Les filtres amortis
- Filtrage actif
 - Le filtre actif parallèle (F.A.P)
 - Le filtre actif série (F.A.S)
 - La combinaison parallèle série actifs (UPQC)
 - Combinaison hybride actif et passif

10. Les systèmes FACTS « SVC »

On conclut d'après cette synthèse que :

- Il existe de nombreuses méthodes pour atténuer les harmoniques au sein même du système d'entraînement ou en externe.
- Elles présentent toutes des avantages et des inconvénients, et impliquent toutes un surcoût.
- La meilleure solution sera fonction de la charge totale, de l'alimentation du site et du niveau de distorsion autorisé.
- Le filtrage est une méthode de réduction des émissions harmoniques au sein d'un site industriel où la distorsion harmonique a graduellement augmenté ou comme solution globale pour un nouveau site.
- L'utilisation des dispositifs FACTS est nouvelle et à plusieurs avantages en parallèle de l'amélioration de la qualité d'énergie.

III. Quelques exemples sur les charges non linéaires

En utilisant l'environnement (*SIMILINK* / *MATLAB*) pour simuler quelques charges polluantes, dont l'objectif est de tirer l'allure du courant ainsi que le spectre d'harmoniques correspond, et le pourcentage du THD de chaque charge non linéaire :

III.1.Types convertisseurs [31] :

III.1.1. Redresseur 6 pulses sans inductance

Ce redresseur contient les harmoniques de courant

Tableau (IV.1): les harmoniques de courant (Redresseur 6 pulses sans inductance)

Rang(h)	5	7	11	13	17	19
I _h (%)	63%	54%	10%	6,1%	6,7%	4,8%

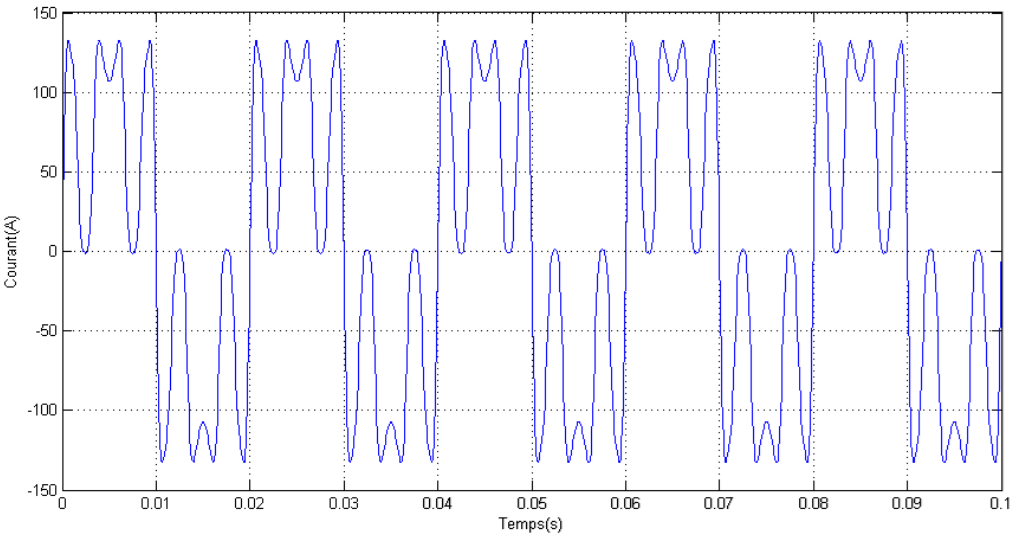


Figure (IV.1) : Allure du courant (Redresseur 6 pulses sans inductance)

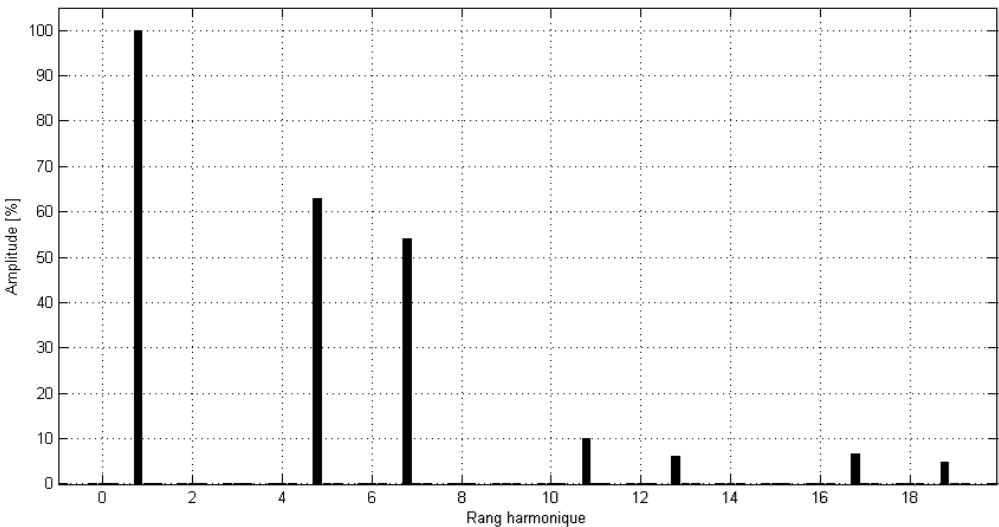


Figure (IV.2) : Spectre d'harmonique du courant (Redresseur 6 pulses sans inductance)

THD=84.22%

III.1. 2.Redresseur 6 pulses avec inductance

Ce redresseur contient les harmoniques de courant

Tableau (IV.2) les harmoniques de courant (Redresseur 6 pulses avec inductance)

Rang(h)	5	7	11	13	17	19
I _h (%)	30%	12%	8,9%	5,6%	4,4%	4,1%

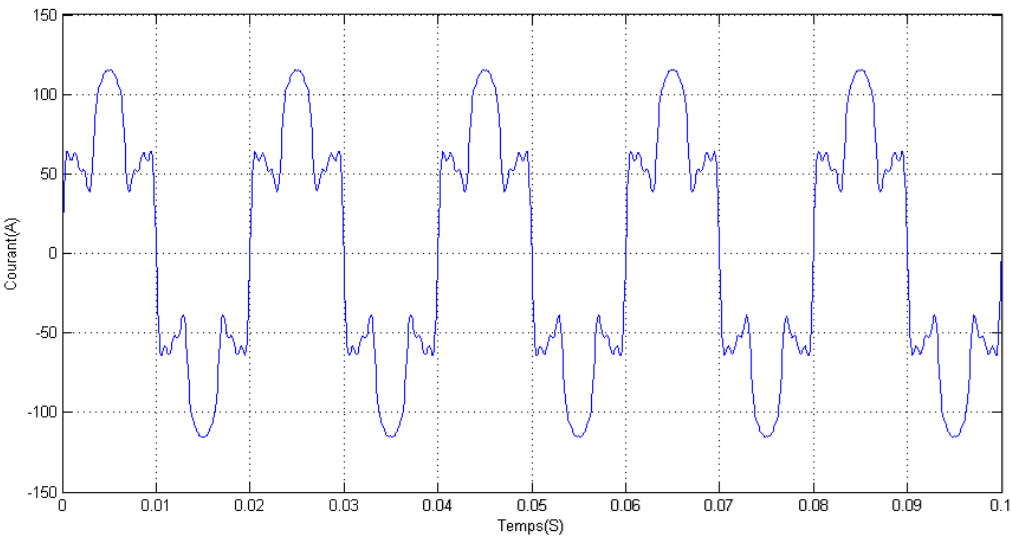


Figure (IV.3) : Allure du courant (Redresseur 6 pulses avec inductance)

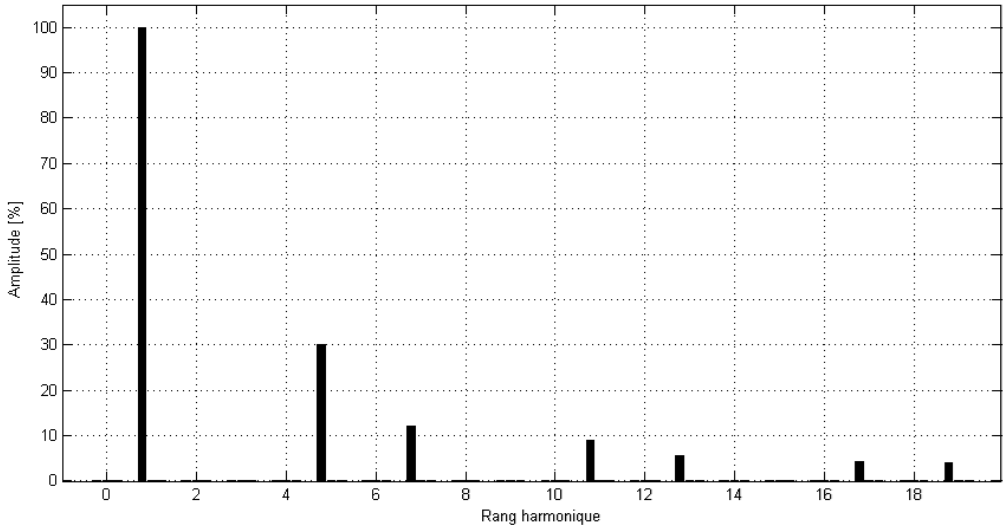


Figure (IV.4) : Spectre d'harmonique du courant (Redresseur 6 pulses avec inductance)

THD=34.51%

III.1.3. Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur

Ce redresseur contient les harmoniques de courant

Tableau (IV. 3) les harmoniques de courant (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur)

Rang(h)	5	7	11	13	17	19
$I_h(\%)$	11%	5,8%	6,2%	4,7%	1,7%	1,4%

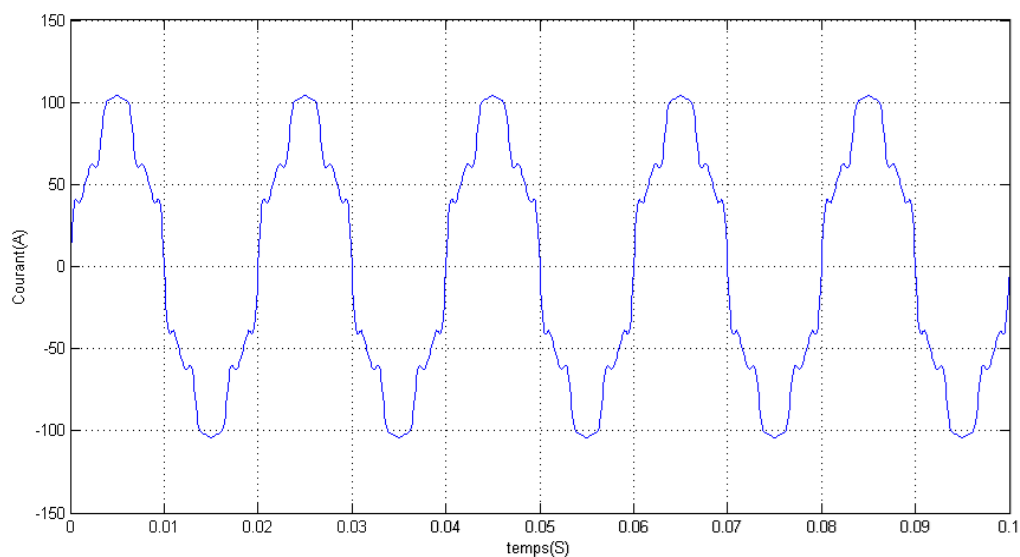


Figure (IV.5) : Allure du courant (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur)

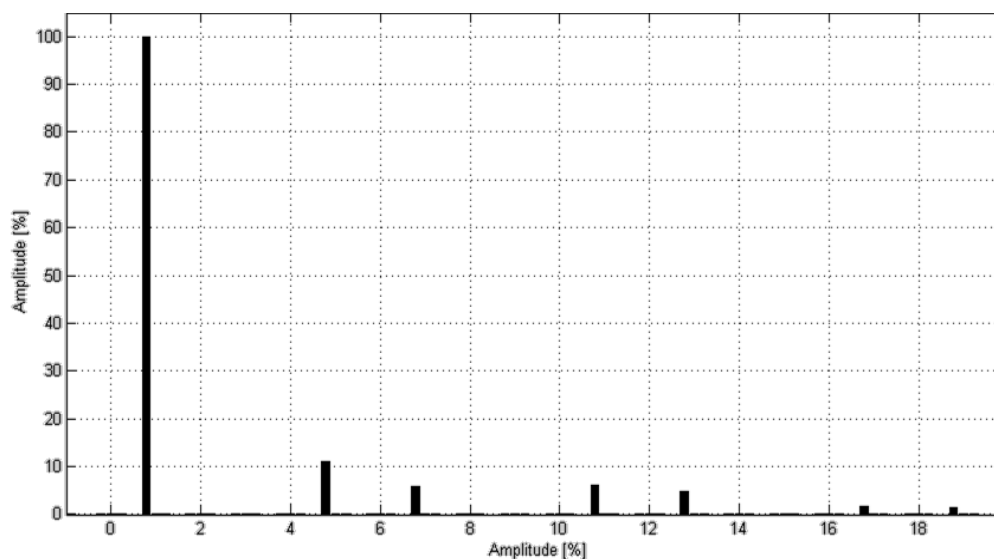


Figure (IV.6) : Spectre d'harmonique du courant (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur)

THD=10.3%

III.1.4. Redresseur 12 pulses avec transformateur à double enroulement

Ce redresseur contient les harmoniques de courant

Tableau (IV. 4) les harmoniques de courant (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur à double enroulement)

Rang(h)	5	7	11	13	17	19
I _h (%)	3,6%	2,6%	7,5%	5,2%	1,2%	1,3%

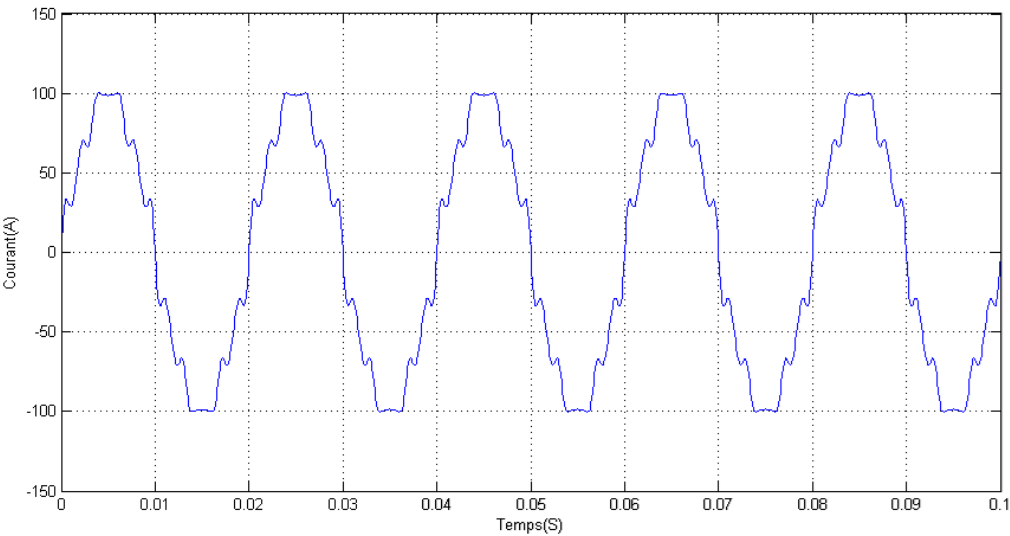


Figure (IV.7) : Allure du courant (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur à double enroulement)

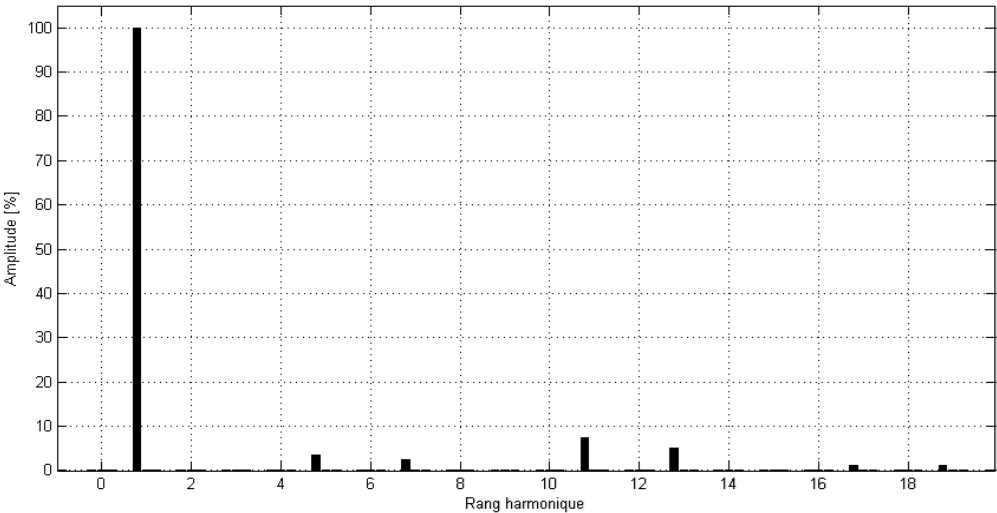


Figure (IV.8) : Spectre d'harmonique du courant (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur à double enroulement)

THD=14,83%

III.1. 5. Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements

Ce redresseur contient les harmoniques de courant

Tableau (IV. 5) les harmoniques de courant (Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements)

Rang(h)	5	7	11	13	17	19
I _h (%)	4,0%	2,7%	1,0%	0,7%	1,4%	1,4%

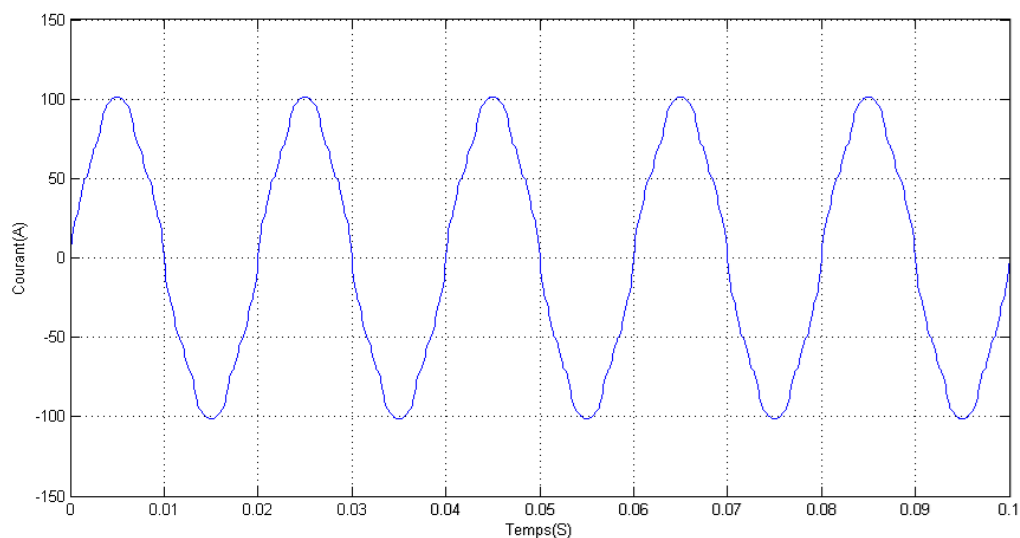


Figure (IV.9) : Allure du courant (Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements)

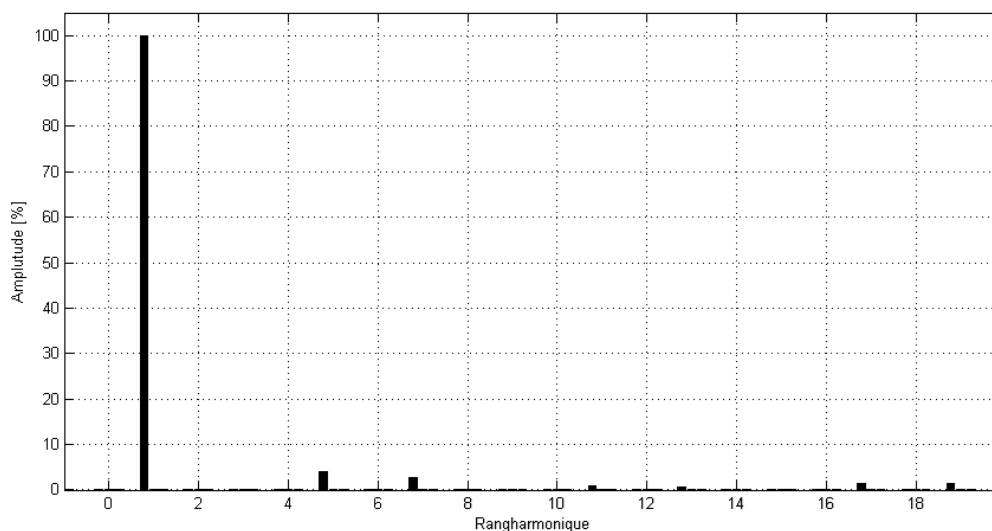


Figure (IV.10) : Spectre d'harmonique du courant (Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements)

THD=5,35%

III.1. 6. Redresseur actif à IGBT

Ce redresseur contient les harmoniques de courant

Tableau (IV. 6) les harmoniques de courant (Redresseur actif à IGBT)

Rang(h)	5	7	11	13	17	19
I _h (%)	2,6%	3,4%	3,0%	0,1%	2,1%	2,2%

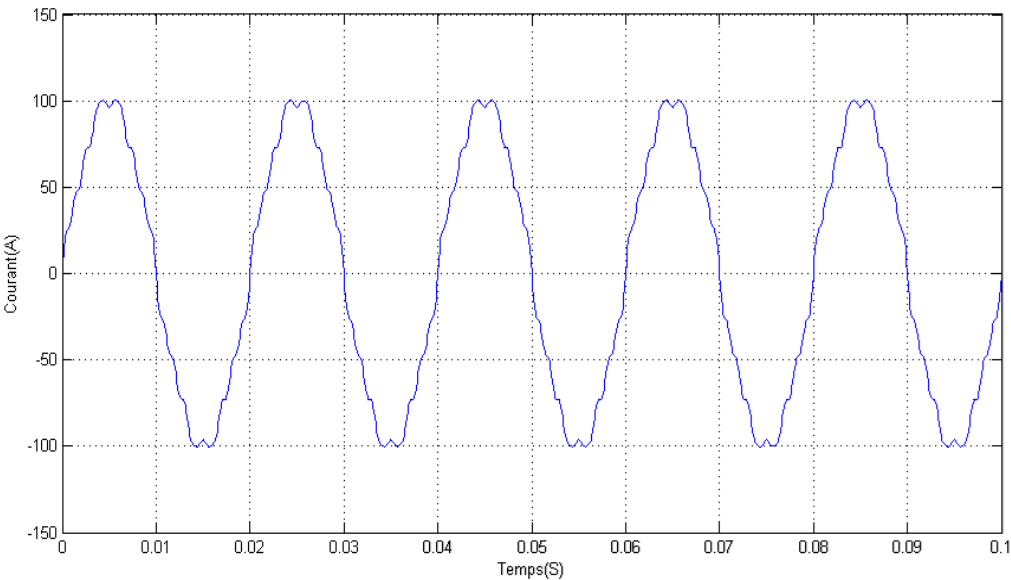


Figure (IV.11) : Allure du courant (Redresseur actif à IGBT)

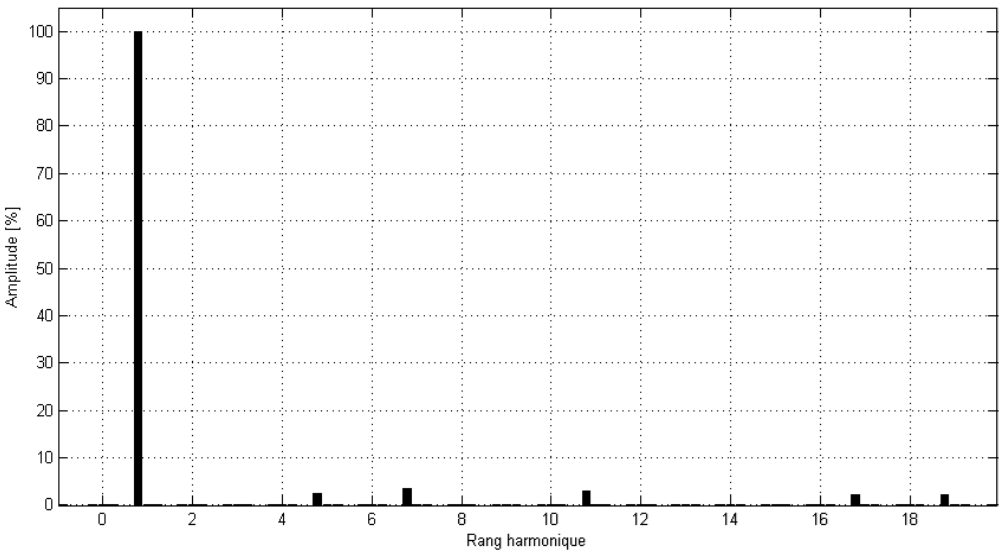


Figure (IV.12) : Spectre d'harmonique du courant (Redresseur actif à IGBT)

THD=6,48%

III.2. Alimentation à découpage de type informatique

Les courants harmoniques fournis par une alimentation à découpage sont plus ou moins importants en fonction de la charge et de l'impédance du réseau amont. [32]

Tableau (IV. 7) : les harmoniques de courant (Alimentation à découpage de type informatique)

Rang(h)	3	5	7	9	11
I _h (%)	65 %	35 %	25%	15%	5%

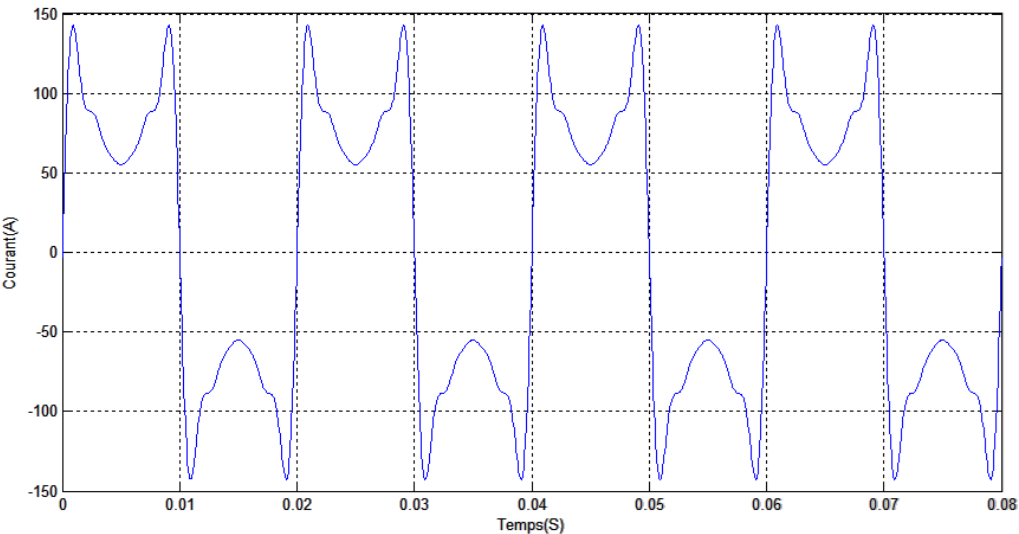


Figure (IV.13) : Allure du courant (Alimentation à découpage de type informatique)

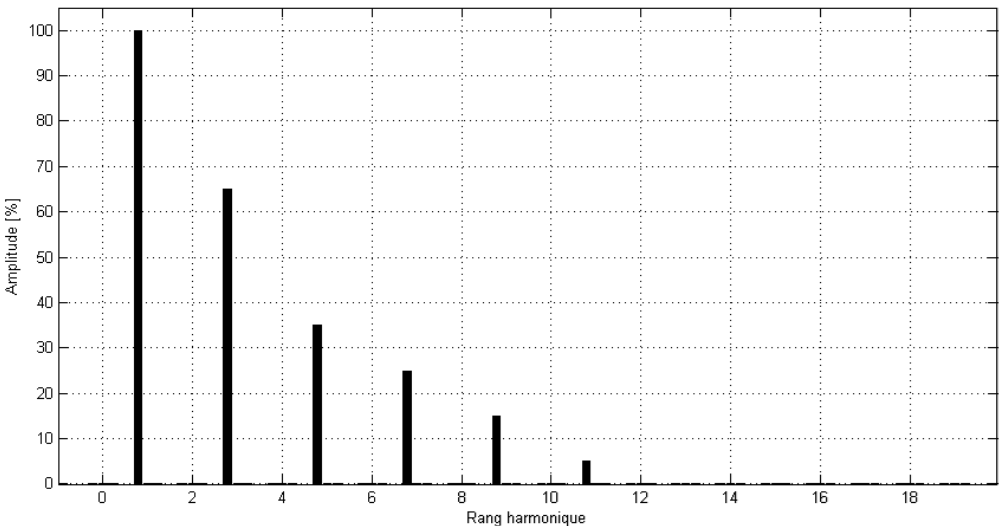


Figure (IV.14) : Spectre d'harmonique du courant (Alimentation à découpage de type informatique)

THD= 79,53%

III.3. Charges d'éclairage (tubes fluorescents, lampes à décharge)

Les lampes à décharge avec ballast électronique fournissent des courants harmoniques de valeur comparable à celle d'une alimentation à découpage de type informatique [32]

Tableau (IV. 8) : les harmoniques de courant (Charges d'éclairage)

Rang(h)	3	5	7	9	11	13	15
I _h (%)	35 %	27 %	10 %	2,5%	3,5%	1,5	1,5

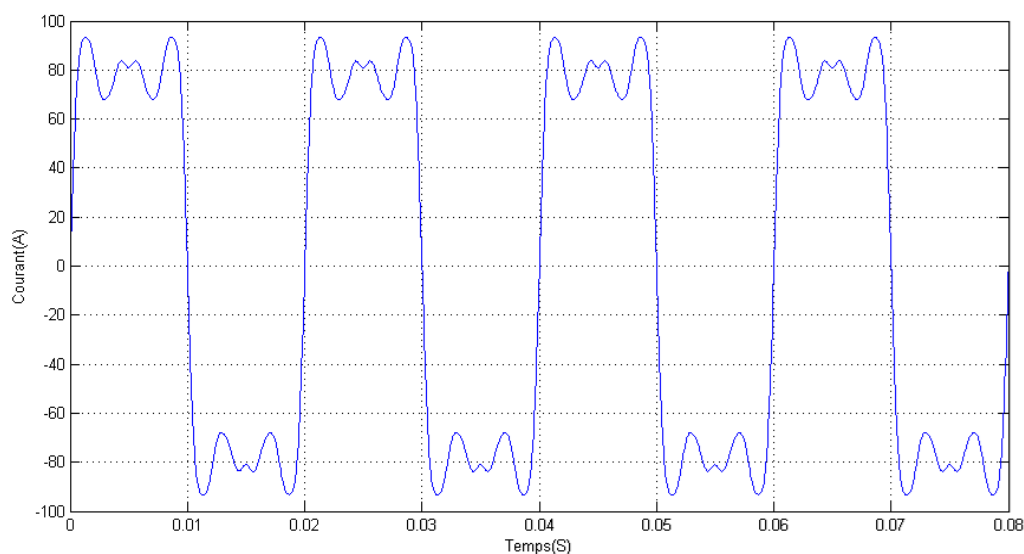


Figure (IV.15) : allure e du courant (Charges d'éclairage)

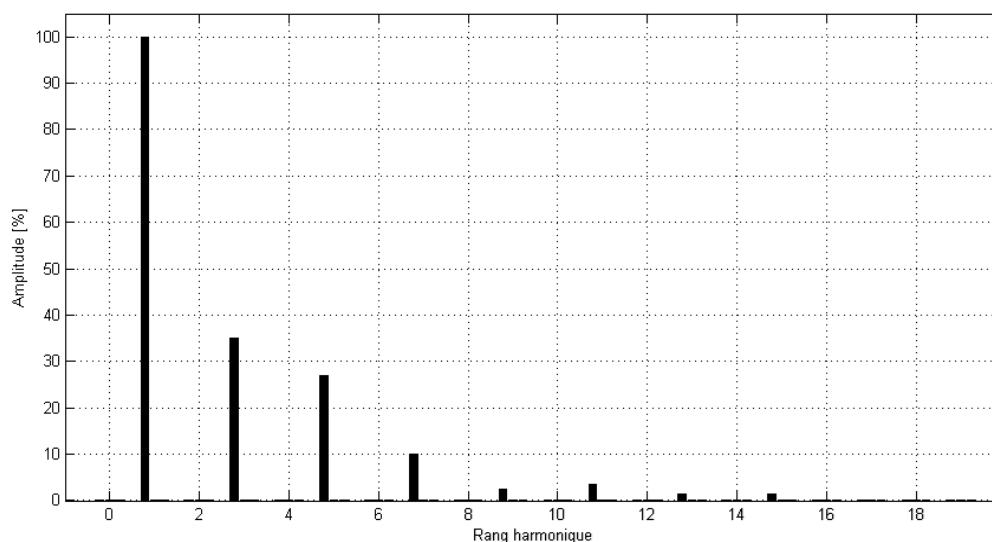


Figure (IV.16) : Spectre d'harmonique du courant (Charges d'éclairage)

THD= 45, 75 %

III.4. Alimentations sans interruption (ASI)

Tableau (IV. 9) : les harmoniques de courant (Alimentations sans interruption)

Rang(h)	5	7	11	13	17	19
$I_h(\%)$	33 %	2,5 %	6,1 %	2,4 %	2,5 %	1,6 %

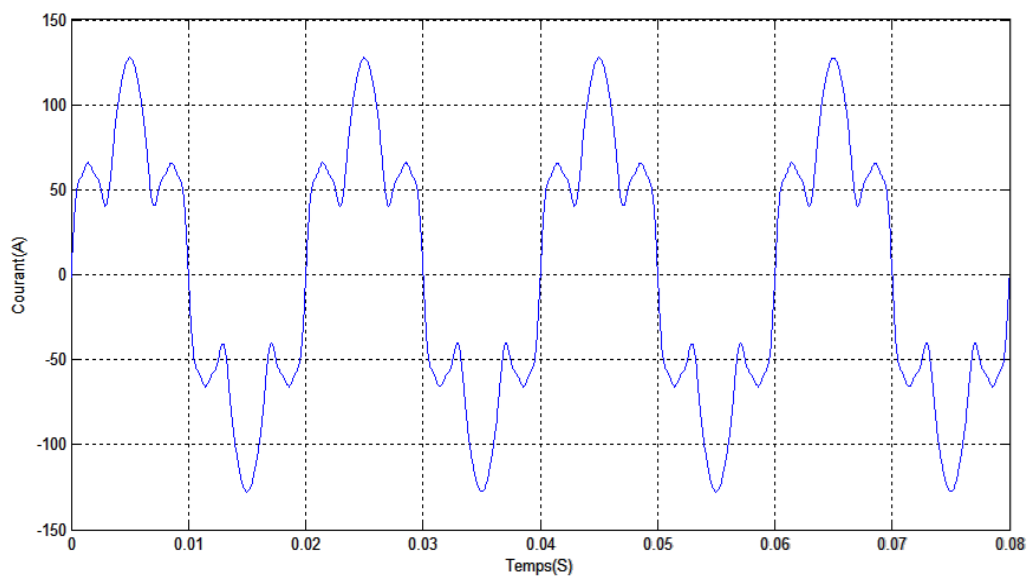


Figure (IV.17) : allure du courant (Alimentations sans interruption)

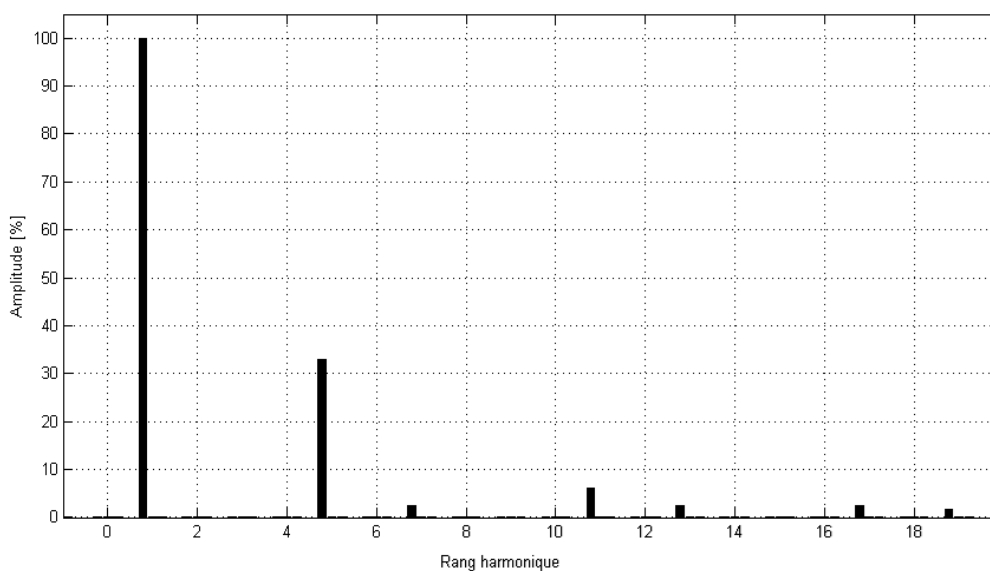


Figure (IV.18) : Spectre d'harmonique du courant (Alimentations sans interruption)

THD= 33,86 %

III.5. Variateurs de vitesse

Les courants harmoniques qu'ils fournissent dépendent notamment : du rapport entre la puissance de court-circuit du réseau S_{cc} et la puissance apparente du variateur S_n

Tableau (IV. 10) : les harmoniques de courant (variateurs de vitesse) [32]

Rang(h)	5	7	11	13	17	19
$I_h(\%)$	73 %	52 %	41 %	7 %	7 %	5 %

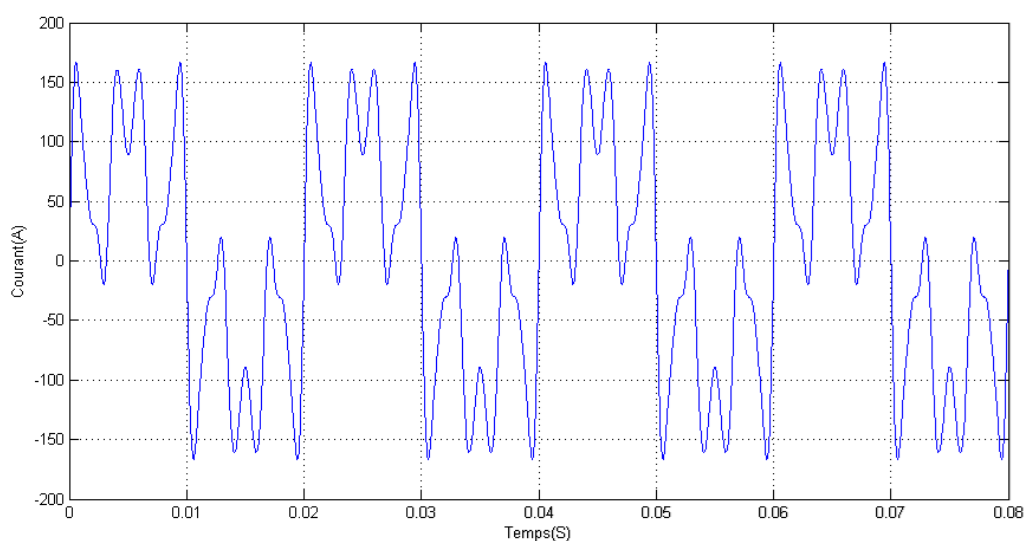


Figure (IV.19) : allure du courant (variateurs de vitesse)

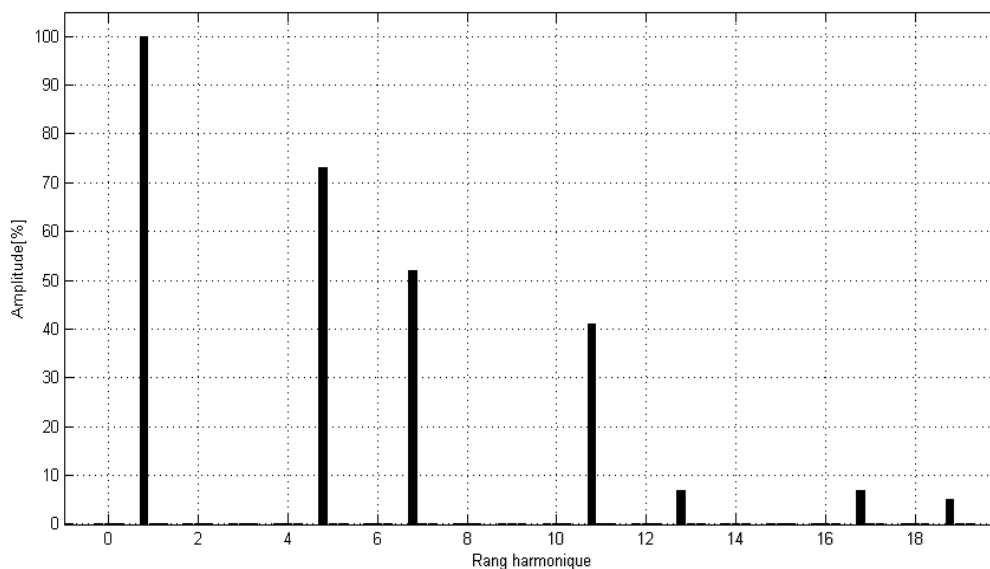


Figure (IV.20) : Spectre d'harmonique du courant (variateurs de vitesse)

$$THD = 99,16 \%$$

III.6. Les fours à arcs

III.6.1. Les fours à arc à courant alternatif (AC EAF)

Tableau (IV. 11) : les harmoniques de courant (AC EAF) [33]

Rang(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I _h (%)	100	14.45	32.62	5.1	10.04	6.56	3.59	2.22	3.19	1.69
Rang(h)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	/
I _h (%)	1.34	0.71	2.28	1.69	1.6					

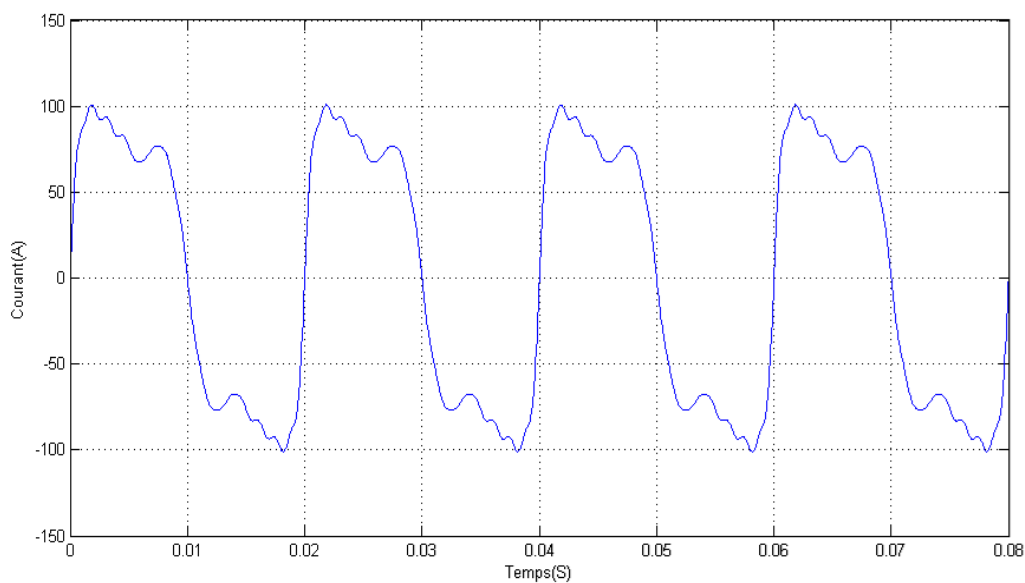


Figure (IV.21) : allure du courant (AC EAF)

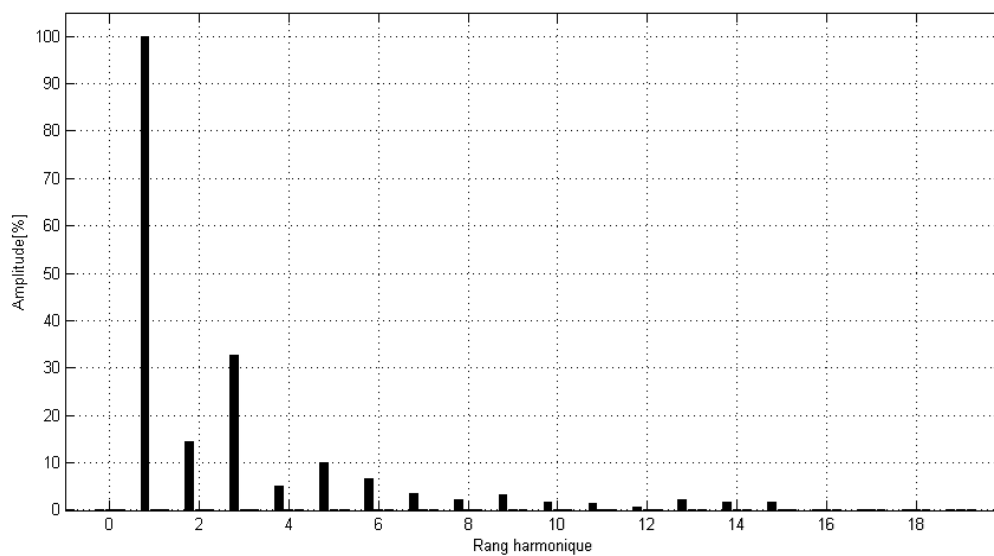


Figure (IV.22) : Spectre d'harmonique du courant (AC EAF)

THD=38,55%

III.6. 2. Les fours à arc à courant continu (DC EAF)

Tableau (IV. 12) : les harmoniques de courant (DC EAF) [33]

Rang(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I _h (%)	100	0.25	2.54	0.21	3.10	0.16	2.60	0.09	2.56	0.10
Rang(h)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	/
I _h (%)	9.84	0.05	6.08	0.11	3.50	0.06	4.48	0.05	2.41	/

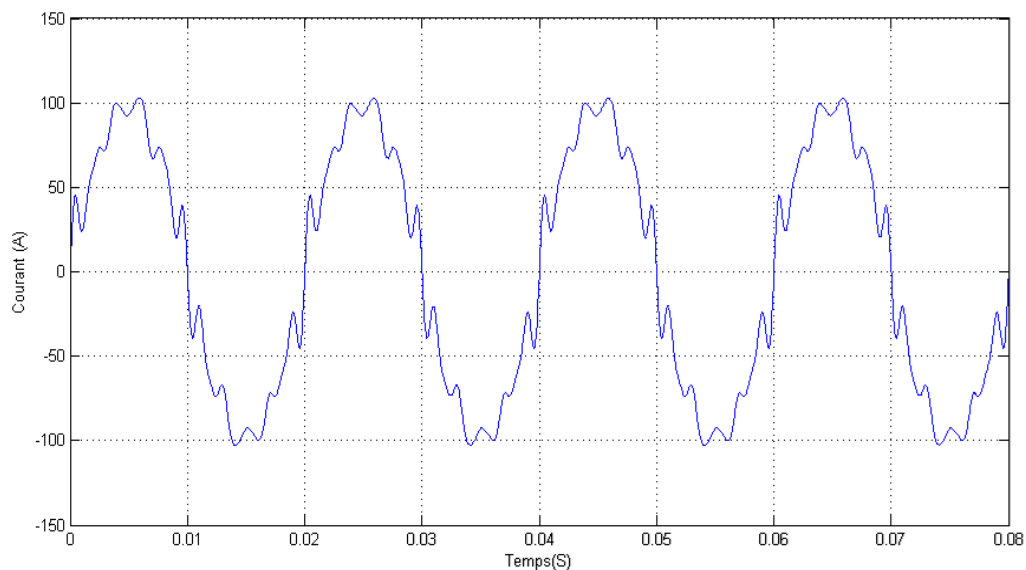


Figure (IV.23) : allure du courant (DC EAF)

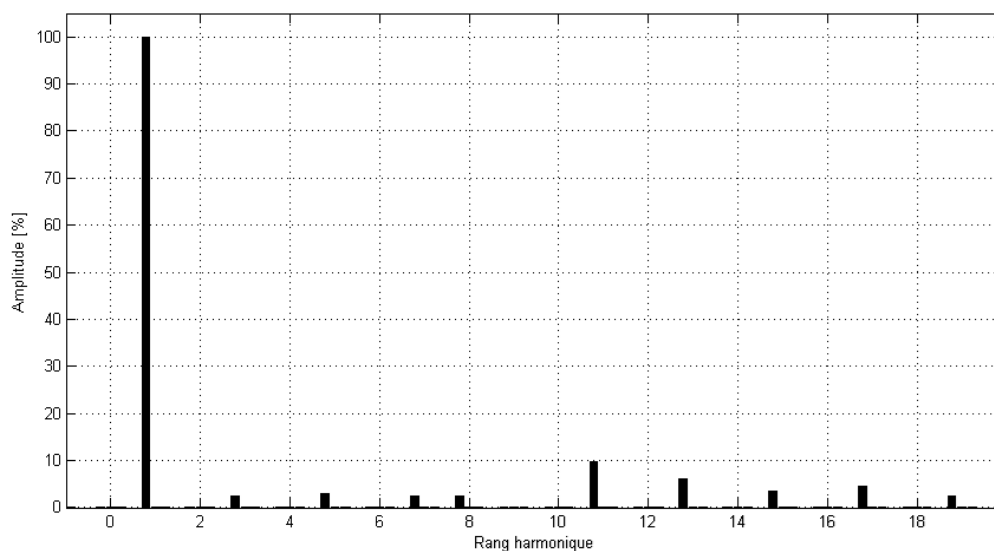


Figure (IV.24) : Spectre d'harmonique du courant (DC EAF)

THD= 14,2 %

IV. Commentaires :

D'après les résultats de simulation obtenus on dit que :

- Les courants harmoniques sont créés par des charges non linéaires raccordées au réseau de distribution essentiellement « les convertisseurs statiques »
- Les harmoniques les plus prépondérantes générées par les redresseurs sont les harmoniques caractéristiques, qui suit la relation $h=2*p\pm k$;
Avec p : indice de pulsation et $k = 0, 1, 2, \dots$ nombre entier.
- L'utilisation des convertisseurs à indice de pulsations supérieurs « 12, 18, 24 » fait un avantage du côté réseau, puisque certains harmoniques sont en opposition de phase et donc atténués.
- Pour les charges domestiques tel que l'éclairage et l'alimentation à découpage de type l'informatique, on remarque l'existence l'harmonique trois et multiple de trois ainsi que les impaires.
- On note une grande déformation de l'allure du courant (grand THD), pour les variateurs de vitesse et l'alimentation sans interruption.
- On remarque un spectre continu « tous les harmoniques existent » dans les fours à arc à courant alternatif, et sa revient à la dissymétrie et l'instabilité de l'arc électrique.
- Pour les fours à courant continu son spectre est presque similaire au redresseur qui l'alimente.

V. Application :

Dans ce travail, on utilise la dernière méthode pour atténuer les perturbations harmoniques, c'est l'utilisation des dispositif FACTS shunts spécialement le « SVC » placées à proximité de la charge polluante comme montrée sur la figure suivante :

Le modèle du SVC utilisé dans cette application est cela défini dans le chapitre II :

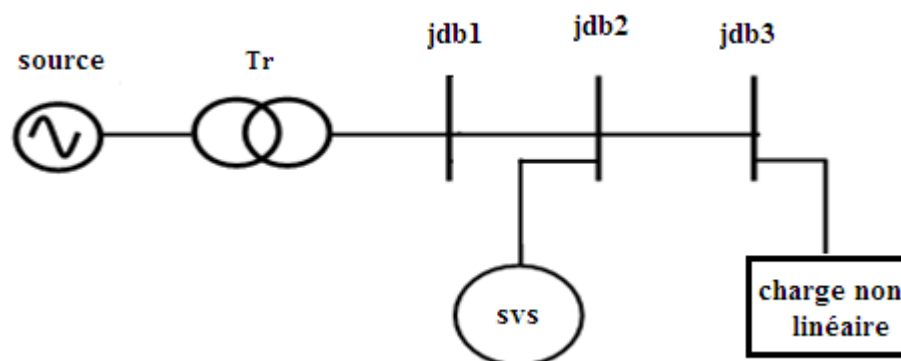


Figure (IV.25) : Emplacement du SVC avec charge polluante

Notre application à été appliquée sur les six types de redresseurs cités auparavant :

VI .Résultats de simulation avec SVC

VI .1. Le redresseur 6 pulses sans inductance avec SVC

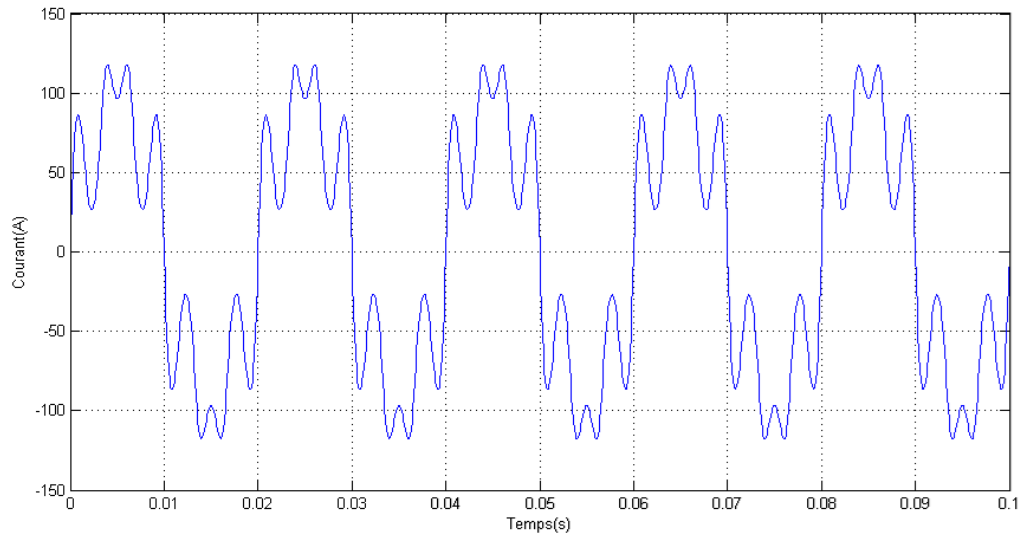


Figure (IV.26) : Allure du courant avec SVC (redresseur 6 pulses sans inductance)

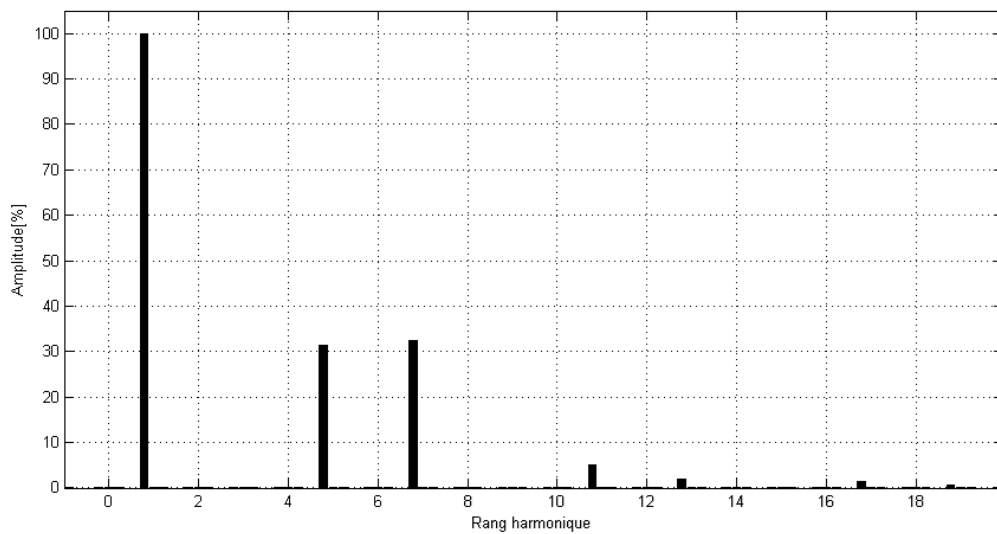


Figure (IV.27) : Spectre d'harmonique avec SVC (redresseur 6 pulses sans inductance)

THD =45,53%

VI.2. Le redresseur 6 pulses avec inductance avec SVC

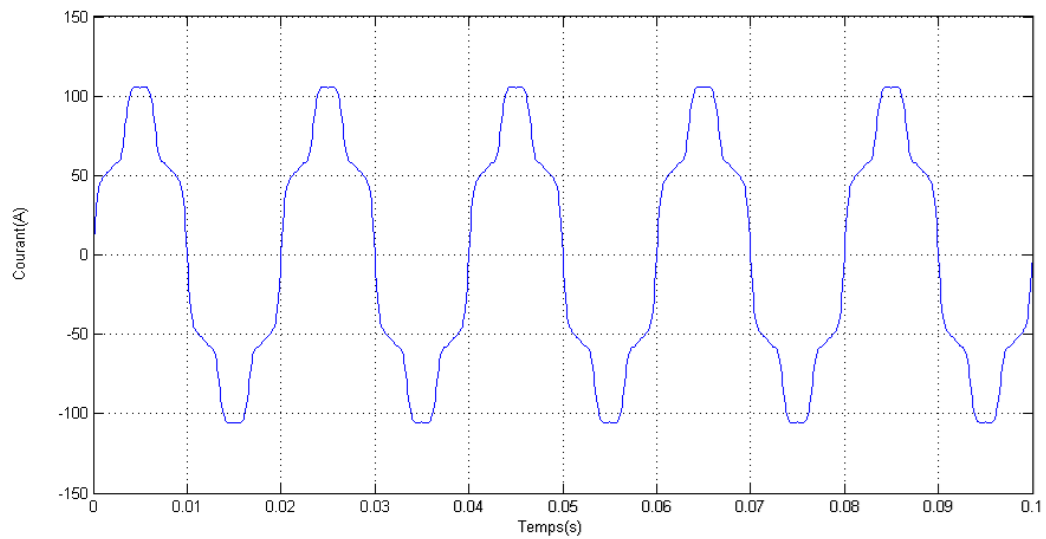


Figure (IV.28) : allure du courant avec SVC (redresseur 6 pulses avec inductance)

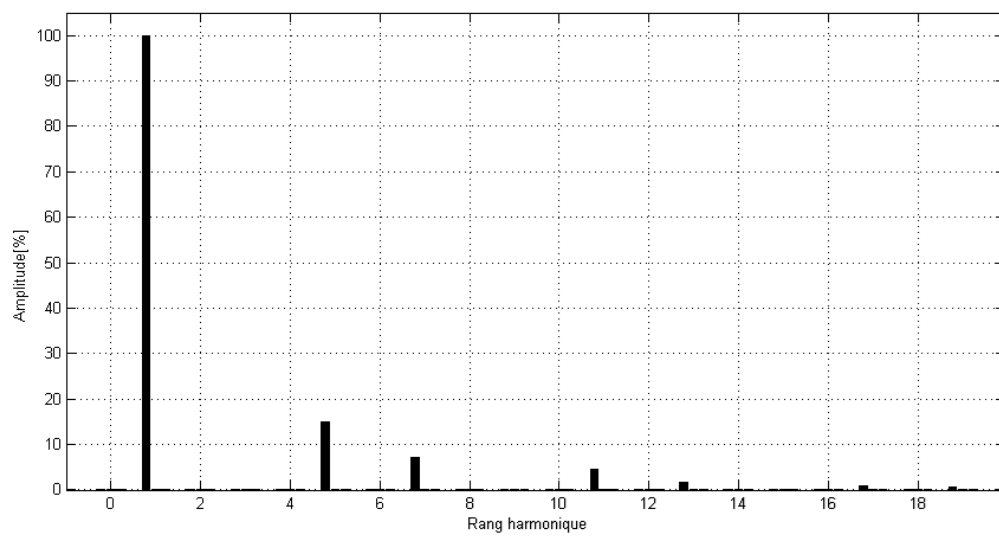


Figure (IV.29) : Spectre d'harmonique avec SVC (redresseur 6 pulses avec inductance)

THD=17,31%

VI.3. Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur avec SVC

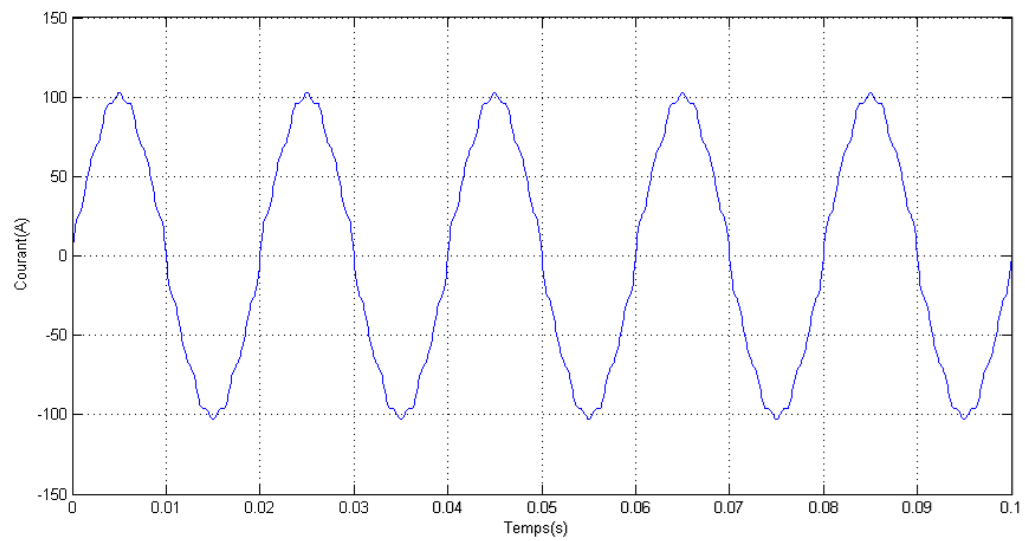


Figure (IV.30) : allure du courant avec SVC (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur)

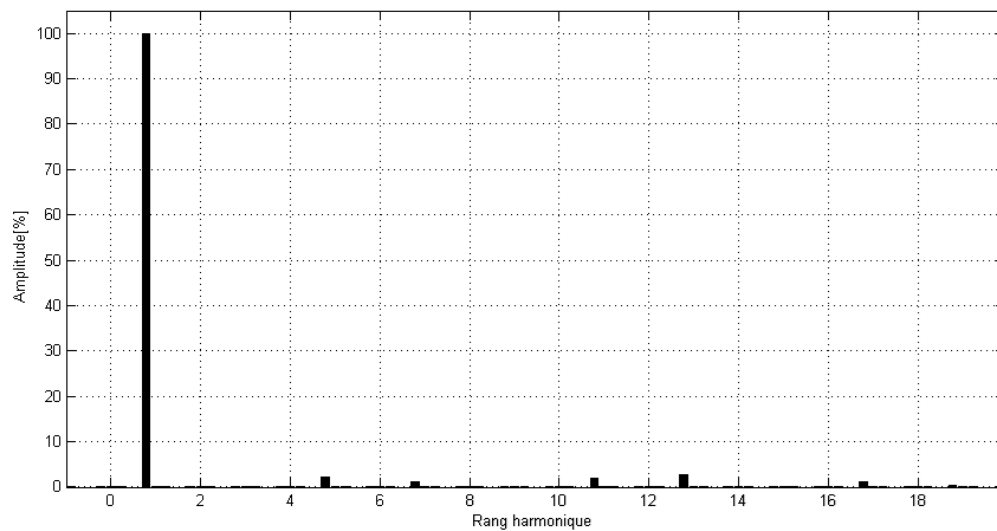


Figure (IV.31) : Spectre d'harmonique avec SVC (Redresseur 12 pulses avec Auto-transformateur)

THD=4,38%

VI.4. Redresseur 12 pulses avec transformateur à double enroulement avec SVC

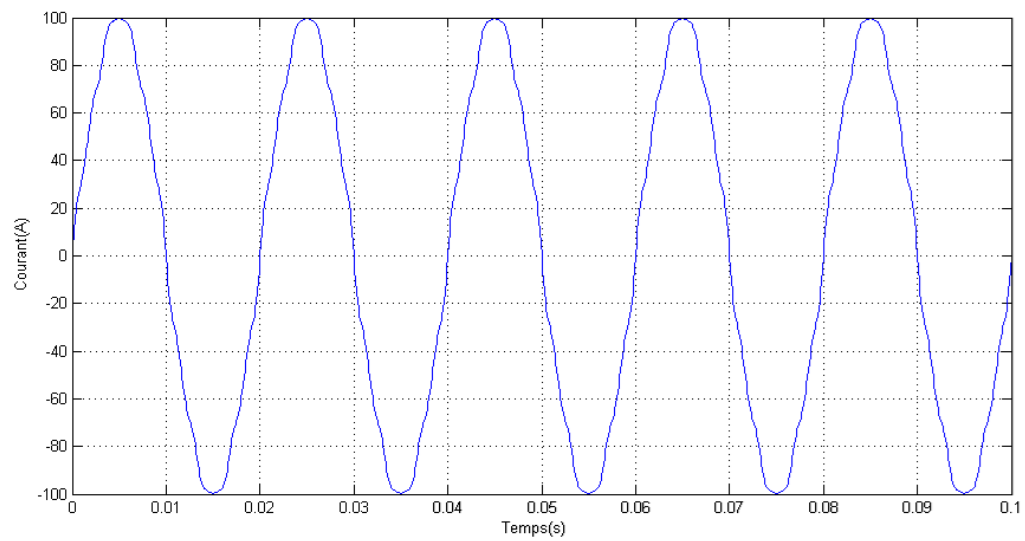


Figure (IV.32) : allure du courant avec SVC (Redresseur 12 pulses avec transformateur à double enroulement)

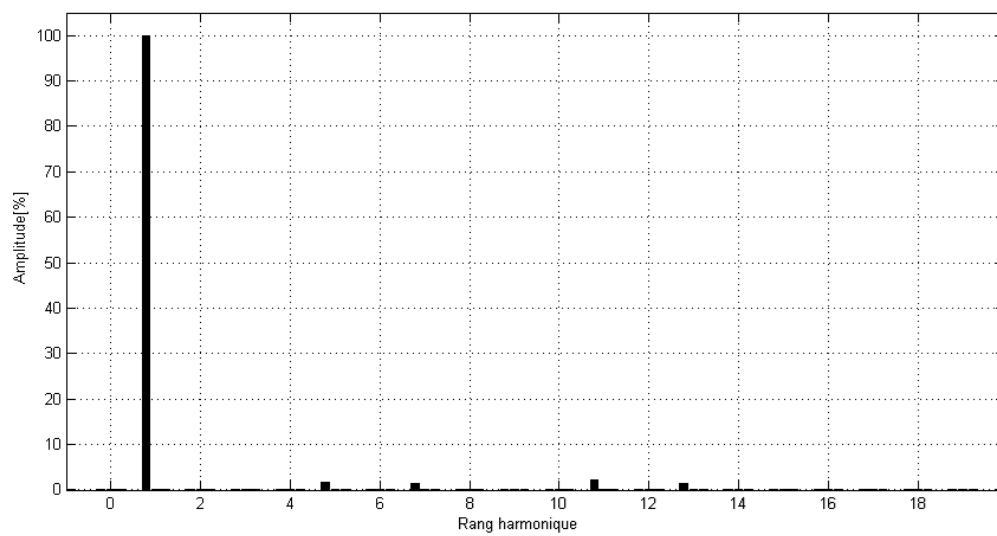


Figure (IV.33) : Spectre d'harmonique avec SVC (Redresseur 12 pulses avec transformateur à double enroulement)

THD=3, 84%

VI.5. Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements avec SVC

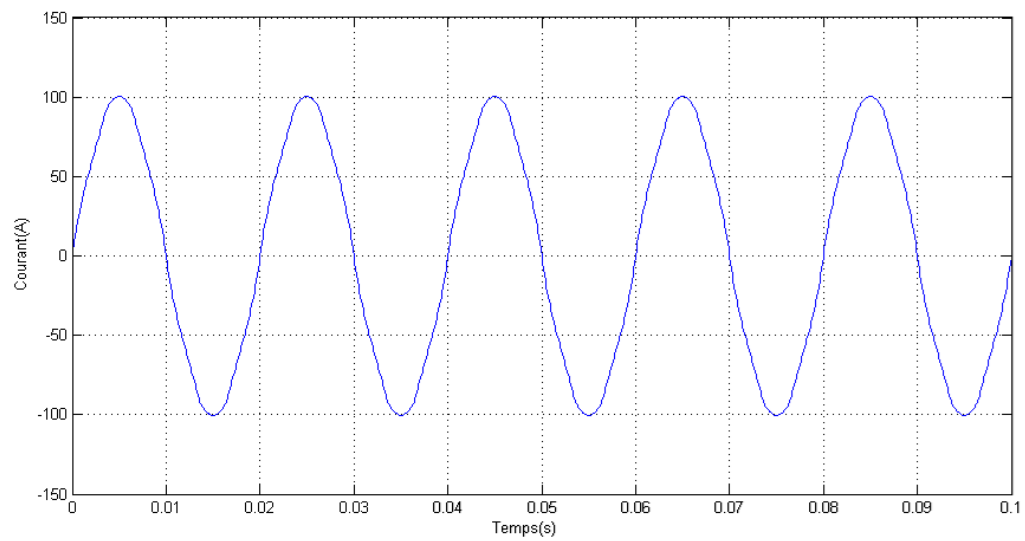


Figure (IV.34) : allure du courant avec SVC (Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements)

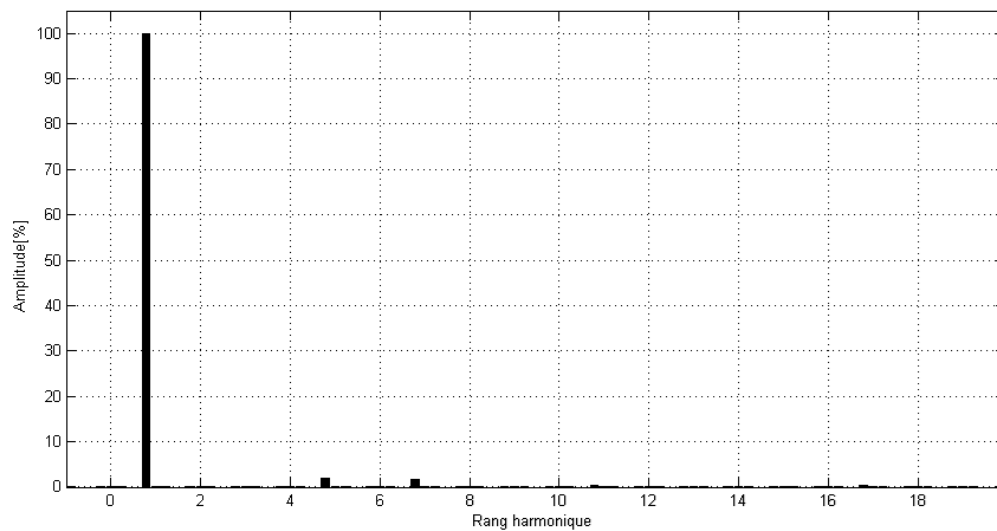


Figure (IV.35) : Spectre d'harmonique avec SVC (Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements)

THD=2.6 2%

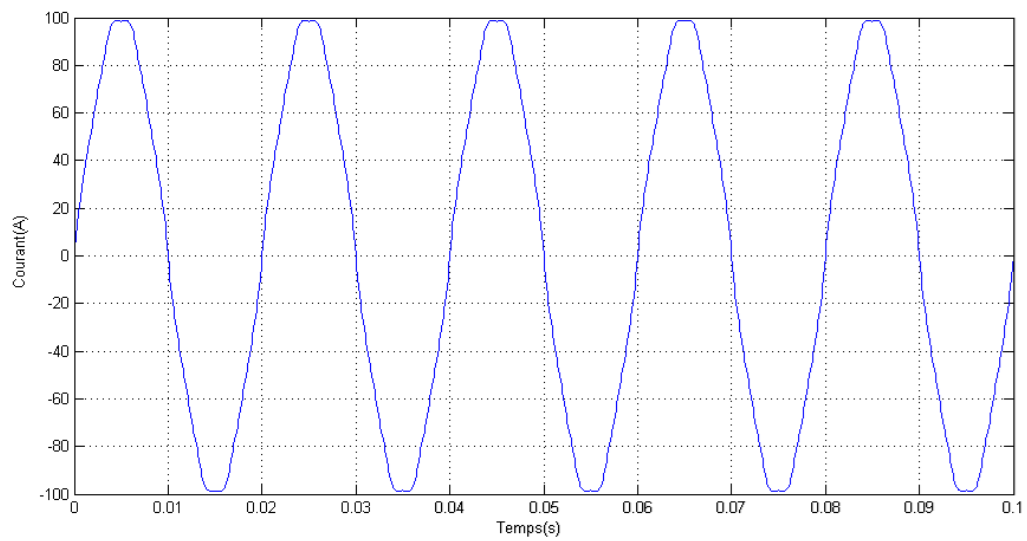
IV. 6. Redresseur actif à IGBT avec SVC

Figure (IV.36) Allure du courant avec SVC (Redresseur actif à IGBT)

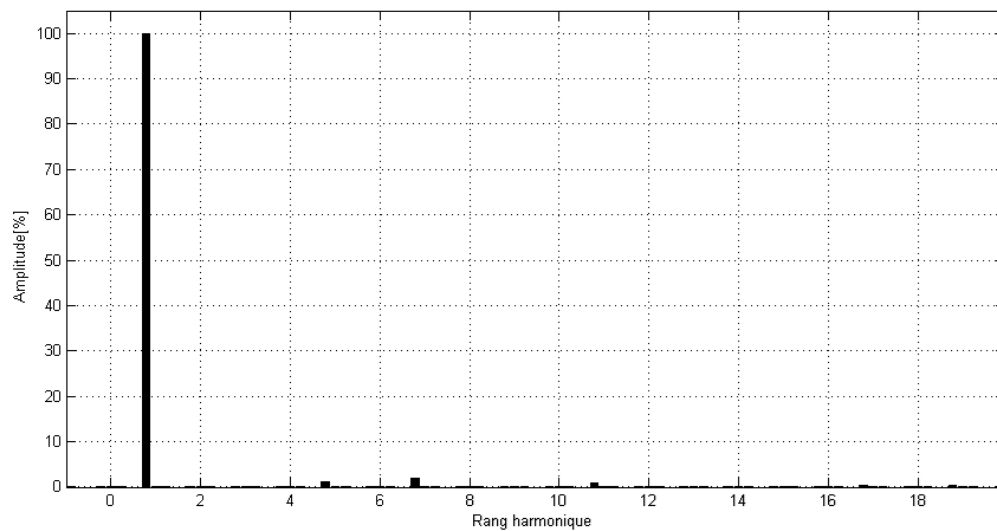


Figure (IV.37) : Spectre d'harmonique avec SVC (Redresseur actif à IGBT)

THD=2.6 4%

VII. Tableaux récapitulatif

➤ *Tableau IV. Résultats sans SVC*

Tableau (IV. 13) : Tableaux récapitulatif (sans SVC)

Type de la charge polluante	Les harmoniques [%]						THD [%]
	5	7	11	13	17	19	
<i>Redresseur 6 pulses sans Inductance</i>	63	54	10	6.1	6.7	4.8	84.22
<i>Redresseur 6 pulses avec Inductance</i>	30	12	8.9	5.6	4.4	4.1	34.51
<i>Redresseur 12 pulses avec Autotransformateur</i>	11	5.8	6.2	4.7	1.7	1.4	14.83
<i>Redresseur 12 pulses avec transformateur à double enroulement</i>	3.6	2.6	7.5	5.2	1.2	1.3	10.3
<i>Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements</i>	4	2.7	1	0.7	1.4	1.4	5.35
<i>Redresseur actif à IGBT</i>	2.6	3.4	3	0.1	2.1	2.2	6.48
La norme IEE-519-1992	4	4	4	2	2	1.5	5

VII.1. Commentaires de Résultats sans SVC

D'après les résultats numériques présentés dans le tableau ci-dessus on remarque que :

- La distorsion harmonique est très grande pour les deux premiers redresseurs surtout le redresseur sans inductance.
- Avec l'augmentation de l'indice de pulsation, le THD diminue, puisque certaines harmoniques sont presque éliminées.
- Les harmoniques caractéristiques sont toujours les harmoniques les plus prépondérantes, puisque elles suivent l'indice de pulsation.
- Pour les redresseurs (les trois premiers) , leurs harmoniques générées et les THD sont supérieurs aux norme utilisée (**la norme IEE-519-1992**)
- Les harmoniques caractéristiques générées par le redresseur 12 pulses avec transformateur à double enroulement, sont hors la norme, par contre les autres sont dans les normes.
- Les deux derniers redresseurs (P24 et IGBT) sont les moins pollués ; leurs harmoniques sont dans les norme sans aucuns dispositifs de compensation

➤ **Tableau IV. Résultats avec SVC**

Tableau (IV. 14) : Tableaux récapitulatif (avec SVC)

Type de la charge polluante	Les harmoniques [%]						THD [%]
	5	7	11	13	17	19	
<i>Redresseur 6 pulses sans Inductance</i>	31.5	32.4	4	1.83	1.34	0.72	45.53
<i>Redresseur 6 pulses avec Inductance</i>	15	7.2	3.56	1.68	0.88	0.615	17.31
<i>Redresseur 12 pulses avec autotransformateur</i>	2.2	1.17	1.86	2.82	1.19	0.21	4.84
<i>Redresseur 12 pulses avec transformateur à double enroulement</i>	1.8	1.56	3	1.56	0.24	0.195	3.84
<i>Redresseur 24 pulses avec deux transformateurs à trois enroulements</i>	2	1.62	0.4	0.21	0.28	0.22	2.62
<i>Redresseur actif à IGBT</i>	1.3	2.4	1.2	0.03	0.42	0.264	2.64
La norme IEE-519-1992	4	4	4	2	2	1.5	5

VII.2. Commentaires et discussions Résultats avec SVC

D'après les résultats numériques présentés dans les tableaux

- L'implantation du SVC fait un avantage coté qualité d'énergie électrique (réductions des harmoniques, THD, et amélioration de la forme d'onde).
- Le dispositif SVC minimise tous rangs harmoniques sans risque de l'apparition de risque de résonance au contraire de compensation classique.
- Il y a une bonne atténuation du THD dans le régime avec SVC, et on voit que le THD est dans les normes pour toutes les charges non linéaires (sauf les deux premiers).

VIII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes utilisées pour remédier les perturbations harmoniques générées par les charges non linéaires.

A la fin de ce chapitre on conclut que les dispositifs FACTS et surtout les compensateurs statiques variables (SVC) ont des rôles polyvalents c'est-à-dire en plus de leurs avantages pour la compensation de la puissance réactive, et le contrôle de l'écoulement de puissance, et la stabilité transitoire, nous avons obtenu un avantage sur le plan de la qualité d'énergie électrique.

Conclusion générale

Les perturbations électriques peuvent prendre naissance dans le réseau du fournisseur, l'installation de l'utilisateur perturbé ou dans l'installation d'un utilisateur voisin.

Ces perturbations ont des conséquences différentes selon le contexte économique et le domaine d'application de l'inconfort à la perte de l'outil de production, voire même à la mise en danger des personnes.

Ce mémoire présente et explique les différents dispositifs FACTS en premier chapitre, puis une explication spécialisée de l'élément shunte SVC industriels qui sont souvent associés à des charges déséquilibrées qui peuvent varier très rapidement telles que les laminoirs ou les fours à arcs pour lesquels les fluctuations rapides de puissance réactive limitent les capacités de production et provoquent du flicker (scintillement des lampes). Ils sont aussi très utiles pour réduire les perturbations harmoniques ; ensuite nous avons fait un survol sur le problème de la pollution harmonique ; en fin nous avons proposé les moyens utilisés pour minimiser ces perturbations.

L'objectif de ce travail de recherche a été consacré aux améliorations des performances de la qualité de l'énergie électrique en utilisant les compensateurs statiques variables de l'énergie réactive « SVC » comme solution qui a pour objectif de compenser les perturbations harmoniques générées par les charges polluantes « notre cas les redresseurs statiques ».

Des simulations, ont été effectuées dans l'environnement MATLAB / SIMULINK pour les six cas (chaque redresseur seul), ont permis de valider la bonne tenue en compensation des perturbations harmoniques, amélioration de la forme d'onde du courant absorbé, ainsi que la minimisation de la valeur de THD.

ANNEXE N°1 : Phénomènes perturbateurs :

1- Introduction

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de :

- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients : court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc., ces défauts pouvant résulter de causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...), matérielles (vieillesse d'isolants...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...) ;
- Installations perturbatrices : fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, ...

Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de la tension - lorsque celle -ci est présente – sont brièvement décrits ci-après.

2- Variations de fréquence :

Les variations de fréquence sont très faibles (moins de 1 %) au sein du réseau synchrone européen et ne causent généralement pas de préjudice aux équipements électriques ou électroniques. La situation peut être différente dans un petit réseau isolé. Certains processus industriels nécessitent un réglage très précis de la vitesse des moteurs et peuvent subir des dysfonctionnements en cas d'alimentation par un groupe de secours improprement conçu.

3- Composante lente des variations de tension :

La valeur efficace de la tension varie continuellement, en raison de modifications des charges alimentées par le réseau. Les gestionnaires de réseau conçoivent et exploitent le système de manière telle que l'enveloppe des variations reste confinée dans les limites contractuelles. Les appareils usuels peuvent supporter sans inconvénient des variations lentes de tension dans une plage d'au moins $\pm 10\%$ de la tension nominale.

4- Fluctuation de la tension « FLICKER »

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires, sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc.

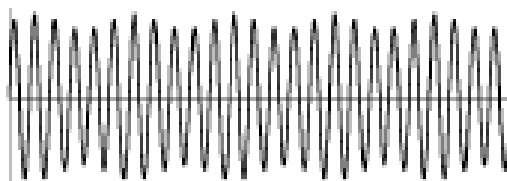


Figure 1 : Fluctuation de tension

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10 %.

5- Creux de la tension :

Les creux de tension sont dus aux courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle. Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des "fluctuations de tension"). Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1-0.2 s en HT, 0.2 s à quelques secondes en MT). Les courts-circuits sont des événements aléatoires : ils peuvent résulter de phénomènes atmosphériques (foudre, givre, tempête...), de défaillances d'appareils ou d'accidents.

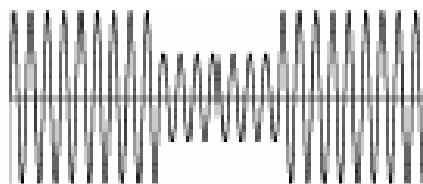


Figure 2 : Creux de tension

Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...).

6- Transitoires :

Les surtensions les plus fortes pour la clientèle - mais heureusement les moins fréquentes - sont dues à la foudre. Leur amplitude peut atteindre plusieurs kV dans les réseaux BT aériens. En outre, de tels transitoires peuvent se propager jusque dans les réseaux BT souterrains.

Des surtensions transitoires plus fréquentes se produisent dans les installations des clients, par exemple lors du déclenchement d'appareils BT. Leur contenu énergétique est moindre que pour les surtensions de foudre, mais leur amplitude peut dépasser 1 kV en BT, avec des fronts très raides (temps de montée de l'ordre de 1 ns, c-à-d 10^{-9} s) ce qui présente un danger pour les circuits électroniques. Les surtensions risquent de provoquer des dégâts importants, vis-à-vis desquels on peut se prémunir au moyen de parasurtenseurs. Par ailleurs, d'autres phénomènes transitoires peuvent provoquer des dysfonctionnements gênants, sans impliquer de surtension d'amplitude très élevée. Quelques exemples de transitoires provenant de sources diverses sont illustrés ci-après.

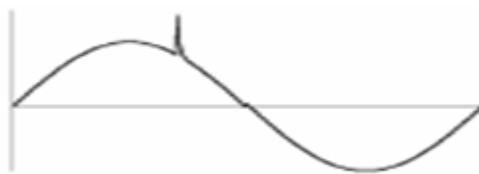


Figure 3 : Surtension transitoire due au déclenchement d'un appareil BT

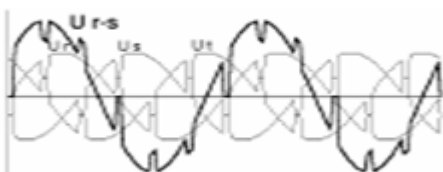


Figure 4 : Encoches de commutation dues à un redresseur triphasé (leur répétition provoque en outre une distorsion permanente)

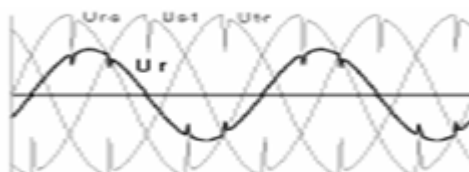


Figure 5 : Encoches de commutation dues à un gradateur triphasé (leur répétition provoque en outre une distorsion permanente)

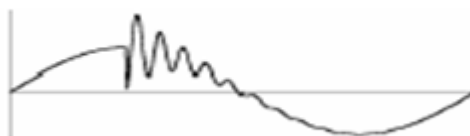


Figure 6 : Oscillation transitoire amortie due à l'enclenchement d'une batterie de condensateurs

Significativement augmenté avec le développement de la sensibilité aux transitoires à l'électronique de contrôle-commande et de puissance. Par exemple, dans le passé, l'enclenchement direct de batteries de condensateurs MT était fréquent et ne posait pas de problème ; actuellement, la grande sensibilité des variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones oblige à prendre des précautions particulières (réactance série, résistance de pré-insertion, enclenchement synchronisé, ...)

7- Déséquilibre :

Les dissymétries du réseau ne provoquent que de faibles niveaux de déséquilibre de la tension (généralement limités à quelques dixièmes de pour-cent). Par contre, certaines charges monophasées (en particulier la traction ferroviaire en courant alternatif) sont la cause de courants déséquilibrés importants et dès lors d'un déséquilibre significatif de la tension.

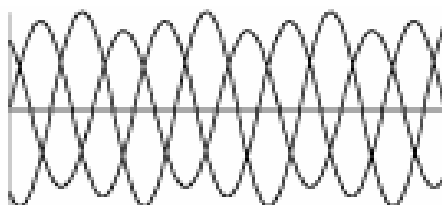


Figure 9 : Déséquilibre de tension

Le problème principal engendré par le déséquilibre est l'échauffement supplémentaire des machines tournantes triphasées.

1- VALEURS CIBLES :

Dans le cas des tensions harmoniques, le taux d'harmoniques (D) égale 8% et les différents taux d'harmoniques individuelles devraient être inférieurs aux valeurs du tableau ci-dessous pendant 95 % du temps sur une période de mesure d'une semaine dans les conditions habituelles d'exploitation.

VALEURS CIBLES DES HARMONIQUES INDIVIDUELLES POUR LES RÉSEAUX « MOYENNE ET BASSE TENSION »

HARMONIQUES IMPAIRS		HARMONIQUES PAIRS	
Rang harmonique (n)	Tension harmonique (%)	Rang harmonique (n)	Tension harmonique (%)
3	6	2	2,0
5	6	4	1,5
7	5	6	0,75
9	3,5	8	0,6
11	3,5	10	0,6
13	3	12 à 24	0,5
15	2		
17	2		
19 à 25†	1,5		

2- LES INTER ET INFRA HARMONIQUES :

2-1- Interharmoniques :

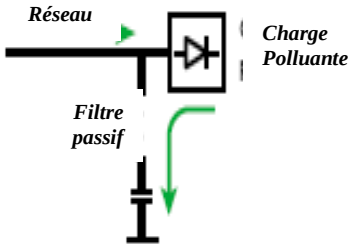
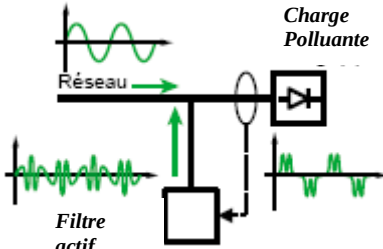
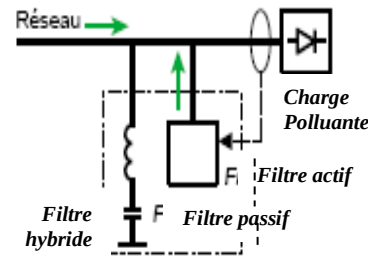
Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui ne sont pas des fréquences multiples entières de celle du fondamental.

2-2- Infra harmonique :

Ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental

Ces deux catégories de perturbations sont dues à des variations périodiques et aléatoires de la puissance absorbée par certaines machines (commande par train d'ondes, ...).

Principes et caractéristiques du filtrage « passif », « actif » et « hybride ». [25]

<i>FILTRE</i>	<i>PRINCIPE</i>	<i>CARACTERISTIQUES</i>
Passif	Dérivation par un circuit LC accordé sur chaque fréquence harmonique à éliminer 	- Pas de limites en courant harmonique. - Compensation d'énergie réactive assurée. - Élimination 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. - Filtre « réseau » (global). - Étude au cas par cas
Actif	Génération d'un courant annulant tous les harmoniques créés par la charge 	- Solution bien adaptée au filtrage « machine ». (local) - Filtrage sur un large bande de fréquence (élimination des harmoniques des rangs 2 à 25). - Auto-adaptatif : - 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. - Étude simplifiée.
Hybride		Cumule les avantages des solutions filtrage passif et actif et couvre un large domaine de puissance et de performances : - Filtrage sur un large bande de fréquences (élimination des harmoniques de rangs 2 à 25). - Compensation d'énergie réactive. - Grande capacité de filtrage en courant. - Bonne solution technico-économique pour un filtrage « réseau ».

Biobibliographie

- [1] **Philip Moore, Peter Ashmole** « Flexible AC transmission systems part 2 Methods of transmission line compensation », Power engineering journal Decembre 1996.
- [2] **Richard Gagnon** « Étude de la Ferro résonance dans les réseaux compensées séries et Shunt » thèse doctorat université de LAVAL, QUEBEC. Canada Mai 1997.
- [3] **Delendi Louardi** « Contrôle de l'Ecoulement de Puissance Active par Système FACTS, Thèse de Magister », Université de Batna, 2009.
- [4] **FlowDemo.net, Interactive**, « Internet based application to visualize power flow in an electric transmission system », EEH – Power Systems Laboratory, ETH Zurich, 2000. Available from www.flowdemo.net.
- [5] **Henri Persoz, Gérard Santucci, Jean-Claude Lemoine, Paul Sapet** «La planification des réseaux électriques » Editions EYROLLES 1984.
- [6] **Hanene Kouara** « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006.
- [7] **The Power System Toolbox**, Environment MATLAB 7.9.
- [9] **Haimour Rachida** « Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique » mémoire pour l'obtention de magister en électrotechnique Oran 2009.
- [8] **E. G. Shahraki**, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2003.
- [10] **Lakdja Fatiha** « Contrôle des transits de puissance par dispositif FACTS » Mémoire de magister en Commande des processus Oran 2005.
- [11] **Kabossa Saddik, Dab Mohamed Lakhder**, « L'impact des dispositifs de compensation dynamique FACT sur l'échange économique de l'énergie électrique », Mémoire de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université Biskra, Promotion 2006.
- [12] **Haibaoui Taybi** « Etude Modélisation et Application des dispositifs –FACTS- dans les réseaux d'énergie électriques » Mémoire de fin d'étude 2006/2007.
- [13] **Hanene Kouara** « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006.
- [14] **A Kazemi, B Baderzadeh** « modelling and simulation of svc to study their effect on maximum loadability point ».

- [15] **M Geidl** « Implementation of FACTS in an Interactive Power Flow Simulation Platform».
- [16] **T. Deflandre et Phi Maurs** « Les harmoniques sur les réseaux électriques » Direction des Etude et Recherche en France -Edition EYROLLES -1998.
- [17] **T. Gouraud** « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique »Thèse de doctorat école doctorale sciences pour l'ingénieur de Nantes.
- [18] **M. Alali** « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension » Thèse de doctorat L'Université Louis Pasteur Strasbourg Génie électrique:2002.
- [19] **T. Wildi** : « Electrotechnique » 2^{ème} édition, Presses de l'université de Laval.
- [20] **R.P.Bouchard et G. Olivier**« Electrotechnique » 2^{ème} édition, presses internationales polytechniques (Québec).
- [21] **Technique de l'ingénieur**. Qualité de la tension : « harmonique », D4 264
- [22] **Guy Segulier** : « Les convertisseurs de l'électronique de puissance volume 1 : La conversion alternatif - continu » Lavoisier Tec et Doc : ISBN 2-85206-247-X
- [23] **J.-N. Fiorina**, Cahier Technique n°160« Harmoniques en amont des redresseurs des ASI ».
- [24] **S. Bernard - J.N. Fiorina - B. Gros - G. Trochain** « Filtrage THM et maîtrise des harmoniques en amont des ASI »
- [25] **E. Bettega, J.-N. Fiorina**, Cahier Technique n° 183« Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs ».
- [26] **C. Collombet, J.-M. Lupin et J. Schonek**, Cahier Technique n° 152. « Perturbations harmoniques dans les réseaux et leur traitement ».
- [27] **J.-N. Fiorina**, Cahier Technique n° 159. « Onduleurs et harmoniques (cas des charges non linéaires) »
- [28] **Philippe Ferracci**, Cahier technique n° 199 « La qualité de l'énergie électrique »
- [29] **Technique de l'ingénieur**. Qualité de la tension : « harmonique », D4 264
- [30] **Y. Djeghader** « *Étude de la propagation des harmoniques dans les réseaux électriques et amélioration de la qualité de l'énergie électriques par le filtrage passif et actif* » Mémoire de Magister, université d'Annaba 2006.
- [31] **Guide technique de ABB n° 6** : « Harmoniques et convertisseurs de fréquence »
- [32] **G. Thomasset**, Cahier Technique n°169. « La conception des réseaux industriels HT »
- [33] **Y. Djeghader** *Étude de la propagation et caractéristiques des harmoniques stochastiques générées par un four à arc*, Thèse de Doctorat, université d'Annaba 2011.