

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par : DEHMECHE Ibrahim Abderrahmane

LAMRAOUI Mansour

Intitulé

***COMMANDE D'UN CONVERTISSEUR
MULTI NIVEAUX DE TYPE PUC:
APPLICATION AU FILTRAGE ACTIF
SERIE***

Soutenu devant le jury composé de :

BARKATI said

Université M'sila

Président

GHADBANE Ismail

Université M'sila

Encadreur

BADBOUDI

Université M'sila

Examineur

Année universitaire : 2018/2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER EN GENIE
ELECTROTECHNIQUE

OPTION: ELECTROMECHANIQUE

THEME

COMMANDE D'UN CONVERTISSEUR MULTI NIVEAUX DE
TYPE PUC: APPLICATION AU FILTRAGE ACTIF SERIE

Proposé et dirigé par :

- Dr GHADBANE Ismail.

Présenté par :

- DEHMECHE Ibrahim Abderrahmane

- LAMRAOUI Mansour

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2018/2019



Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à nos très chers parents pour leurs soutient morale pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés dans les moments les plus ardu.

A nos frères

A nos sœurs

A l'esprit de mon pare «ammar et abd madjid» a toute la famille Dehmeche et lamraoui.

A nos chers amis :

Ahmed, Ismail, Hamza,

A tous les amis (es) d'études surtout ceux d'électrotechnique promotion 2019.

Tous ceux, qui ont contribué à nos formations, de près et de loin.

Aux habitants de M'SIL'A (« cité 700», « busaada»).

Abrahim @ lamraoui

Remerciement

Avant tout, nous remercions le dieu de tout puissant qui nous donne la foi, du courage et de patience afin d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr. GHADBANE Ismail d'avoir accepté de nous encadrer et pour les efforts qu'ils ont déployé, pour nous aider, conseiller, encourager et corriger avec une grande gentillesse durant toute cette période.

Nous remercions les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

Nous n'oublions pas de remercier tous les enseignants qui ont contribué durant notre formation.

Et enfin nous remercions l'ensemble des collègues de notre promotion, et surtout mon binôme qui m'a aidé à réaliser ce travail.

Mansour @ Ibrahim

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE
OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Proposé et dirigé par :

Dr :GHADBANE Ismail

Présenté par :

*DEHMECHE Ibrahim Abdurrahman
LAMRAOUI Mansour*

Thème :

***COMMANDE D'UN CONVERTISSEUR MULTI NIVEAUX DE TYPE
PUC : APPLICATION AU FILTRAGE ACTIF***

Résumé :

Dans un réseau électrique basse tension, les harmoniques ont des effets désagréables sur les équipements électriques. L'objectif de ce travail est d'étudier la Commande d'un convertisseur multi niveaux de type PUC application filtre actif série dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie électrique, particulièrement la tension électrique perturbé. Ce filtre est basé sur un onduleur de tension type PUC commandé à MLI, emploie deux méthodes d'identification des tensions perturbatrices. Les modèles de simulations sont développés en utilisant le logiciel MATLAB-Simulink. Les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif série en particulier ceux à base sur la méthode des puissances instantanées P-Q pour la compensation des harmoniques et perturbations liés à la tension et la méthode SRF.

Mots clés :

- * Filtre actif série, Charge polluante, Onduleur multi-niveaux PUC.
- * Commande par MLI.
- * harmonique.

SOMMAIRE

Table des notations	
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I
PERTURBATION DES RESEAUX ELECTRIQUES
ET PRINCIPES DE COMPENSATION

I.1 Introduction.....	3
I.2 Perturbation.....	3
I.3 Caractéristiques des perturbations électriques.....	4
I.4 Les harmoniques.....	5
I.4.1 Définition.....	5
I.4.2 Source d'harmoniques.....	6
I.5 Grandeurs caractéristiques.....	6
I.5.1 Grandeur harmonique.....	6
I.5.2 Rang de l'harmonique.....	7
I.5.3 Série de Fourier.....	7
I.5.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative.....	7
I.5.5 Taux de distorsion.....	7
I.5.6 Spectre (de fréquence).....	8
I.5.7 Charges linéaires et non linéaires.....	8
I.6 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance F_p	8
I.7 Réglementation des perturbations.....	10
I.8 Principales perturbations provoquées par les courants et tensions harmoniques.....	10
I.8.1 Effets instantanés.....	10
I.8.2 Effets à terme.....	11
I.9 Les solutions traditionnelles.....	12
I.9.1 Pont dodécphasé.....	12
I.9.2 Surdimensionnement des installations électriques.....	13
I.9.3 Agir sur la structure de l'installation.....	13
I.9.4 Utilisation d'inductances anti-harmoniques.....	13
I.9.5 Filtres passifs d'harmoniques.....	14
I.9.5.1 Modèles des filtres passifs.....	14
I.10 Solutions modernes.....	15
I.10.1 Filtrage actif.....	16
I.10.1.1 Filtrage actif série.....	16
I.10.1.2 Filtrage actif parallèle.....	17
I.10.1.3 Filtrage actif série -parallèle.....	17
I.10.1.4 Filtrage hybride.....	17
I.10.2 Les redresseur MLI.....	19
I.10.2.1 Redresseur de tension.....	19
I.10.2.2 Redresseur de courant.....	19
I.11 Conclusion.....	20



CHAPITRE II

MODELISATION ONDULEUR TRIPHASE PUC

Introduction.....	21
II.1 Topologies de convertisseurs de puissance multi niveaux.....	22
II.1.1 Convertisseurs à point neutre calé par des diodes.....	22
II.1.2 Convertisseur à capacités flottantes.....	24
II.1.3 Onduleur en pont H en Cascade.....	25
II.2 convertisseur Mono phase.....	29
II.2.1 Fonctionnement en onduleur	31
II.2.2 Topologie.....	31
II.2.3 Commande utilisée.....	31
II.2.4 Résultats de la simulation.....	32
II.2.5 Conclusion.....	33
II.3 convertisseur PUC triphasée.....	
II.3.1 Introduction	33
II.3.2 Fonctionnement en mode onduleur.....	33
II.3.2.1 Présentation de la topologie.....	34
II.3.2.2 Commande utilisée.....	36
II.3.2.3 Résultats.....	37
II.4 Conclusion.....	39



CHAPITRE III
COMMANDE LINEAIRE D'UN FILTRE ACTIF SERIE

Introduction.....	40
III.1 Mise en œuvre.....	40
III.2 Principe de fonctionnement.....	40
III.3 Topologie générale d'un filtre actif série.....	41
III.4 Etude de la partie puissance	42
III.4.1 Modélisation de réseaux électrique.....	42
III.4.2 Modélisation de la charge polluante.....	43
III.4.3 Transformateur d'injection.....	45
III.5 Etude de la partie commande	45
III.5.1 Identification des harmoniques.....	45
III.5.2 Identification des tensions harmoniques du FAS	46
III.5.2.1 Méthode des puissances active et réactive instantanées (PQ).....	46
III.5.2.2 Méthode du repère synchrone (SRF).....	49
III.5.3 Système à base de PLL	50
III.6 Modélisation du filtre active série.....	51
III.6.1 Commande d'onduleur par MLI.....	53
III.6.2 Réglage des tensions :.....	53
III.7 méthode de Commande du FAS basé sur la méthode PQ	54
III.7.1 Résultats de simulation	54
a) Compensation des harmoniques de tension	54
b) Compensation des creux de tension	56
c) Compensation des coupures de tension	57
d) Compensation des surtensions de tension	58
III.7.2 Interprétations des résultats	60
III.8 méthode de Commande du FAS basé sur la méthode SRF.....	60
III.8.1 Résultats de simulation.....	61
a) Compensation des harmoniques de tension.....	61
b) Compensation des creux de tension.....	62
c) Compensation des coupures de tension.....	63
d) Compensation des surtensions de tension.....	64
III.8.2 Interprétations des résultats.....	66
III.9 Interprétations des résultats méthode SRF et PQ.....	66
III.10 Conclusion.....	67



Conclusion générale.....	68
Annexe	
Bibliographie.....	



TABLE DE NOTATION

TABLE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

- THD : Total Harmonic Distorsion (Taux de distorsion harmonique).
F.P : Facteur de puissance.
THDv : Voltage Total Harmonics Distorsion (Taux de distorsion harmonique en tension).
THDi : Current Total Harmonics Distorsion (Taux de distorsion harmonique en courant).
FAP : Filtre actif parallèle.
FAS : Filtre actif série.
UPQC : Unified Power Quality Conditionner (Conditionneur universel d'énergie électrique)
SRF : (Méthode du référentiel lié au synchronisme).
PQ: Méthode des puissances active et réactive instantanées(PQ).
PLL : Phase Locked Loop (Boucle à verrouillage de phase).
MLI : Modulation de largeurs d'impulsions.
PI : Régulateur proportionnel intégral.
PID : Régulateur proportionnel intégral dérivé.
BT: Basse tension.
D: Puissance Déformante.
S: Puissance apparente.
P: Puissance active.
Q : Puissance réactive.
GTO: Gate turn off.
IGBT: Insolated Gate Bipolar Transistor.
d,q: Axe direct, axe en quadrature du plan tournant synchrone (dq).
 \bar{P} : Puissance continue liée à la composante fondamentale active.
 \bar{q} : Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive.
 \tilde{P} : Puissance harmonique active.
 \tilde{q} : Puissance harmonique réactive.
vs : Tension simple efficace de la source.
vc: les tensions harmoniques.
vch: les tensions de la charge sinusoïdale.
Zs123 : Impédance du réseau.
Is : Valeur efficace du courant de la source.



R_s : Résistance du réseau coté source.

L_s : l'inductance du réseau.

L_c : Inductance du réseau coté charge.

R_c : Résistance du réseau coté charge.

T_i : Etat de l'interrupteur i (ouvert ou fermé).

$V_{ldés}$: Tension désirée.

L_{fs}, C_{fs}, R_{fs} : L'inductance, capacité et la résistance du filtre actif série.

V_{max} : Tension max du réseau.

V_{eff} : La valeur efficace du réseau.

ω_s : Pulsation du réseau.

θ_s : Angle de déphasage



Introduction Générale

Introduction générale

L'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique et de déséquilibre des courants, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive[1].

La circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont s'associer à la tension nominale du réseau électrique.

D'autre côté les fournisseurs de l'énergie électrique ont pour but d'alimenter leurs consommateurs avec une tension sinusoïdale d'amplitude constante. Mais en réalité, dans les réseaux électriques on trouve souvent, des convertisseurs connectés aux réseaux (notamment des redresseurs). Ces convertisseurs constituent des charges non linéaires génératrices d'harmoniques [1].

Les courants injectés par ces convertisseurs sont non sinusoïdaux et produisent sur les impédances du réseau des tensions harmoniques qui se superposent à la tension fondamentale.

Progressivement, et de manière à limiter l'augmentation des problèmes de perturbation sur les réseaux électriques, des normes de qualité électrique de plus en plus contraignantes seront imposées aux fournisseurs et aux consommateurs industriels[1].



Dans ce mémoire nous allons essayer d'identifier les tensions harmoniques injectés dans le réseau par une charge polluante consistant d'un pont redresseur triphasé à diodes et les compensés en utilisant le filtrage actif sérié.

Ce travail sera divisé en trois chapitres[1]. :

- Le premier chapitre sera consacré à la description des perturbations pouvant intervenir dans un réseau électrique, leurs origines, et leurs conséquences. Dans ce chapitre aussi, nous présenterons également les solutions traditionnelles et modernes de dépollution pour la compensation des harmoniques.

- Le deuxième chapitre porte sur la modélisation du filtre actif série (FAS) à structure PUC de convertisseur de tension a cet niveau et leur commande

-Au dernier chapitre, on a traité les stratégies d'identification des tensions de références et on a appliqué la commande de l'onduleur triphasé 7 niveaux PUC sur filtre actif série, la Commande par modulation de largeur d'impulsion(MLI), avec deux méthodes d'identifications (PQ) et (SRF), dans le but d'améliorer les performances du filtre[1].



Chapitre I

**PERTURBATION DES RESEAUX
ELECTRIQUE ET PRINCIPES
DE COMPENSATION**

1.1 Introduction

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes.

Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes :

- _ Les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs,
- _ Les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques et déséquilibrées.

Dans la première partie de ce chapitre, nous étudierons les caractéristiques générales des perturbations électriques. Ainsi, nous détaillerons les origines, les conséquences matérielles et les limites tolérées et imposées par les causes de ces perturbations.

Dans une deuxième partie, nous présenterons et comparerons des solutions de compensation de ces perturbations généralement proposées dans la littérature. Nous pourrions ainsi adopter la compensation active la plus adéquate.

La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation des différents montages des filtres actifs. Nous évoquerons ainsi les principes et la mise en oeuvre de ces structures modernes de compensation [5].

1.2 Perturbation

L'énergie électrique est délivrée sous la forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde [4].

Afin de bien analyser les pollutions des réseaux électriques et, par conséquent, de trouver les meilleures méthodes de dépollution, on va distinguer deux types de perturbations, à savoir les perturbations de courant et celles de tension.

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, et/ou déséquilibrées. La puissance réactive



peut être aussi consommée par des charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présents dans les sites industriels.

Les perturbations de tension comme les creux, les déséquilibres et les harmoniques de tension trouvent généralement leurs origines dans le réseau électrique lui-même mais parfois également dans les charges.

Ces types de perturbation ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent provoquer des échauffements jusqu'à la destruction totale des équipements [5].

1.3 Caractéristiques des perturbations électriques

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50 Hz ou 60 Hz. Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont les suivants :

1. La fréquence.
2. L'amplitude.
3. La forme d'onde qui doit être la plus possible d'une sinusoïdale.
4. La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif [7].

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations :

1. *Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz* : elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport.

2. *Les variations de l'amplitude* : il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non.



3. *La modification de la forme d'onde* : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.

4. *La dissymétrie du système triphasé* : que l'on appelle déséquilibre [6].

I.4 Les harmoniques

L'expansion de l'emploi des charges électroniques non linéaires durant les 30 dernières années a significativement contribué à la propagation des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance.

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance. Cependant, les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension. Ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part [3].

I.4.1 Définition

La variation en fonction du temps, des grandeurs électriques courants et tensions des réseaux industriels alternatifs, s'éloigne significativement de la sinusoïde pure (figure (I.1)).

La variation est en fait composée d'un certain nombre de sinusoïdes de fréquences différentes, comprenant entre autres, une sinusoïde à fréquence industrielle dite sinusoïde fondamentale ou plus simplement : le fondamental [4].

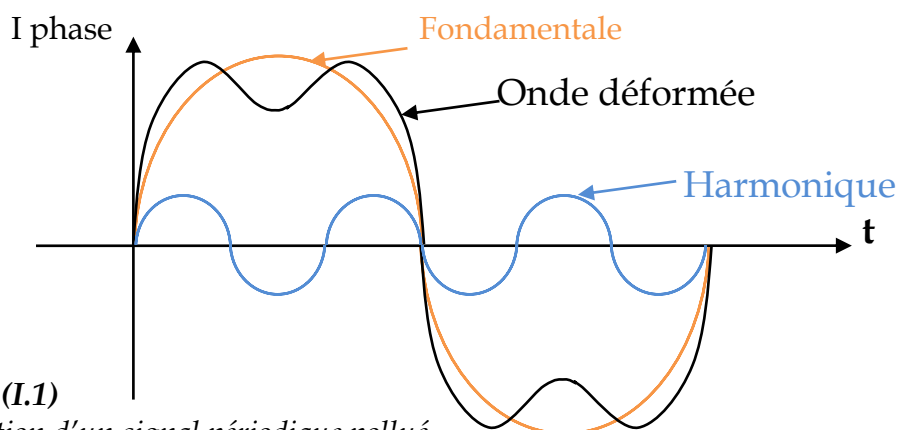


Fig (I.1)

Décomposition d'un signal périodique pollué



1.4.2 Source d'harmoniques

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. Le tableau (I.1) montre quelques sources d'harmoniques [7].

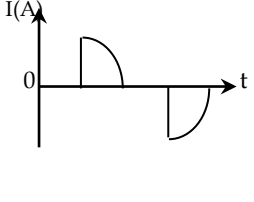
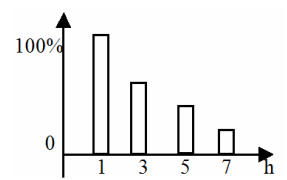
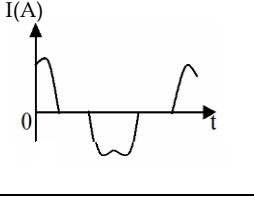
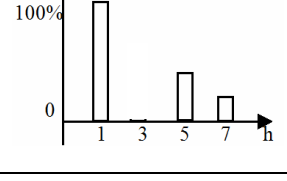
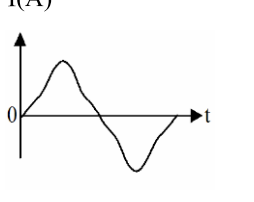
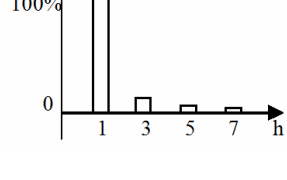
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Gradateur monophasé	-Régulation de puissance de fours à résistance. -Modulation de puissance des lampes halogènes		
Redresseur triphasé à thyristor	-Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		
Moteur asynchrone	-Machines-outils -Appareils électroménagers -Ascenseurs		

Tableau (I.1)
Principales charges polluantes

1.5 Grandeurs caractéristiques

1.5.1 Grandeur harmonique

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental [4].



1.5.2 Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :

$$n = f_n / f_1 \quad (I.1)$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang un [4].

1.5.3 Série de Fourier

Ceci revient à dire que : « tout signal s , périodique de période $T=1/f$, peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f .

Mathématiquement, cela s'écrit :

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_0^{\infty} (a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)) \quad (I.2)$$

La valeur a_0 représente la valeur moyenne de $s(t)$.

On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{Et} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (I.3)$$

De plus, il existe quelques pré-requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls,
- si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls,
- si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi périodes, les termes d'indice pairs sont nuls [1].

1.5.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle de la grandeur alternative ($y(t)$) et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique :

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T Y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} y_n^2} \quad (I.4)$$

Notons qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée (> 1 kHz) [1].

1.5.5 Taux de distorsion

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative :

$$THD(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1} \quad (I.5)$$



Il existe aussi une autre définition qui remplace le fondamental Y_1 par la valeur efficace totale Y_{eff} . Certains appareils de mesure l'utilisent.

I.5.6 Spectre (de fréquence)

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme (figure (I.2)) [2].

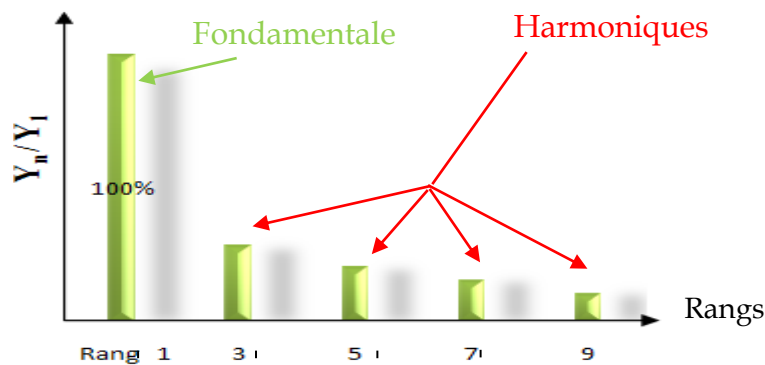


Fig (I.2)-Spectre d'harmonique.

I.5.7 Charges linéaires et non linéaires

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- les récepteurs linéaires (ou charges linéaires),
- les récepteurs non linéaires (ou charges non linéaires).

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

Une charge est dite non linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non sinusoïdal.

Cette classe de charges englobe les convertisseurs statiques (gradateurs, redresseurs), les circuits magnétiques saturés, les lampes à décharges...

Le courant consommé étant périodique, il est décomposé en une série de Fourier. En outre, sa période étant identique à celle de la tension, seules les fréquences multiples de celle de la tension sont présentes [3].

I.6 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance F_P

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par un rapport entre la puissance P et puissance apparente S .

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive Q et déformante D , cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, tel que $I = I_f + I_h$.

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \quad (I.6)$$

L'expression de puissance apparente S est donnée par l'équation suivante [9]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.7)$$

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant (avec $S = 3V \sqrt{I_c^2 - I_{c1}^2}$, ou I_c est la valeur efficace du courant de la charge).

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance F_P est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S [8]:

$$F_P = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.8)$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1. En posant :

$$P = 3V \cdot I_{c1} \cdot \cos \varphi \quad (I.9)$$

On aura

$$F_P = \frac{I_{c1}}{I_c} \cdot \cos \varphi = F_{dis} \cdot \cos \varphi \quad (I.10)$$

Où F_{dis} représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît.

φ représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension [8].

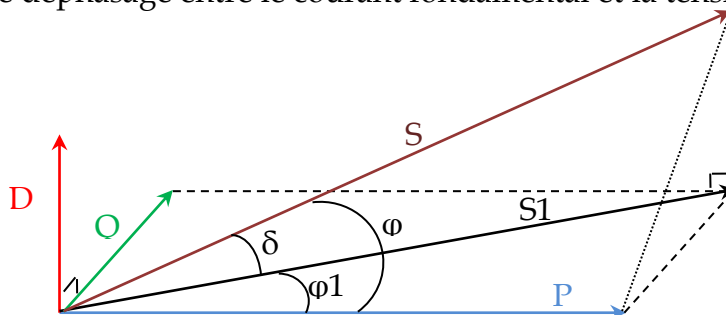


Fig (I.3) Diagramme de Fresnel des puissances

1.7 Réglementation des perturbations

Les générateurs de courants harmoniques sont responsables de l'apparition d'harmonique de tension aux bornes du réseau. Ces harmoniques provoquent des pertes supplémentaires dans les lignes, les machines et les transformateurs de plus ils perturbent fortement l'appareillage électronique (problèmes de synchronisation) et créent principalement des interférences avec les équipements de télécommunication.

Une onde de tension trop déformée entraîne un certain nombre d'inconvénients, en particulier pour les convertisseurs eux mêmes dont l'angle d'allumage serait alors décalé. Les distributeurs d'énergie fixent un taux admissible au point de raccordement de leurs réseaux. En particulier, en France, EDF impose les limites suivantes [7]:

$$\frac{v_h}{v_1} \leq 0,6\% \quad \text{Si } h \text{ est impaire} \quad (\text{I.11})$$

$$\frac{v_h}{v_1} \leq 1\% \quad \text{Si } h \text{ est paire} \quad (\text{I.12})$$

$$THDV \leq 1,6\% \quad (\text{I.13})$$

Au-delà de ces valeurs, il est nécessaire d'installer des dispositifs de filtrage ou dans la mesure du possible d'augmentera la puissance de court-circuit du réseau.

En ce qui concerne le facteur de puissance, EDF impose une valeur minimale de 0.928 ($\text{tg}\varphi < 0,4$), tout dépassement est facturé [7].

1.8 Principales perturbations provoquées par les courants et tensions harmoniques

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés.

Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés :

- 1 soit des effets instantanés.
- 2 soit des effets à terme dus aux échauffements.

1.8.1 Effets instantanés

Sur les systèmes électroniques, les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation. Elles peuvent influencer les conditions de commutation des thyristors lorsqu'elles déplacent le passage à zéro de la tension.

- a) Vibrations, bruit Par les efforts électrodynamiques.
- b) Des couples mécaniques pulsatoires, dûs aux champs tournants harmoniques.
- c) Perturbations induites sur les lignes à courants faibles (téléphone) [4].



1.8.2 Effets à terme

- a) Echauffement des condensateurs : les condensateurs sont sensibles aux surcharges.
- b) Echauffement dû aux pertes supplémentaires.
 - Pertes supplémentaires dans les machines.
 - Pertes supplémentaires des transformateurs dues : à l'effet de peau, l'hystérésis et aux courants de Foucault (dans le circuit magnétique). $P_{\text{joule}} = R \cdot I^2$.

Ces pertes supplémentaires occasionnées par la présence des courants harmoniques réduisent le rendement des équipements tels que les moteurs, les transformateurs [3] [4].

- c) Echauffement des câbles et des équipements [4].

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique. [11]

Nature du matériel électrique	Effet de la pollution harmonique
-Machines tournantes. -Moteurs triphasés. -Alternateurs.	-Echauffement supplémentaire (effet Joule) dans les enroulements statoriques, couples oscillatoires. augmentation du bruit
Transformateurs	-Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques paires.
Câbles	-Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiple de 6 Pertes diélectriques supplémentaires
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristors, transistor, ...etc.)	-Troubles fonctionnels liés à la forme d'onde (commutation synchronisation)
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillessement prématuré des condensateurs
Ordinateurs.	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques.
Dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs magnétothermiques.)	Fonctionnement intempestif.
Compteur d'énergie.	Erreur de mesure.
Téléviseurs.	Déformation d'image.
Lampes à décharge.	Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2.

Tableau (I.2) Effets des harmoniques sur quelques matériels



1.9 Les solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [8].

1.9.1 Pont dodécaphasé

La structure dodécaphasé présente des caractéristiques très intéressantes par rapport à celle hexaphasée. Cependant, le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution onéreuse

Un convertisseur composé de (m_C) convertisseur triphasé élémentaire à indice de pulsation p , sera à indice de pulsation n tel que $n = m_C \cdot p$, si les convertisseurs élémentaires sont alimentés par des tensions dont les déphasages sont en progression arithmétique de $\frac{2\pi}{m_C p}$.

La figure (I.4) illustre un exemple pour $p = 6$ (pont de graëtz) et $m_C = 2$, soit un convertisseur à indice de pulsation égale à 12. Ce convertisseur appelé dodécaphsé, est le plus utilisé (cas des puissances importantes) dans la mesure où le déphasage de $\frac{\pi}{6}$ est facilement obtenu par un couplage étoile-triangle et étoile-étoile d'un transformateur à double enroulement au secondaire [3].

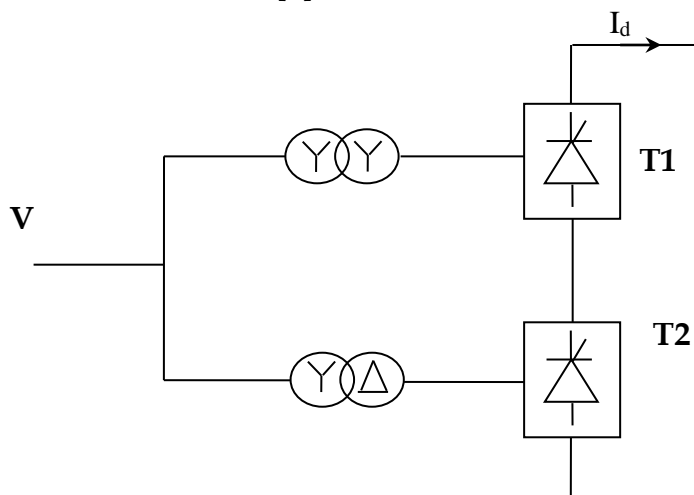


Fig (I.4)
Structure du pont dodécaphasé

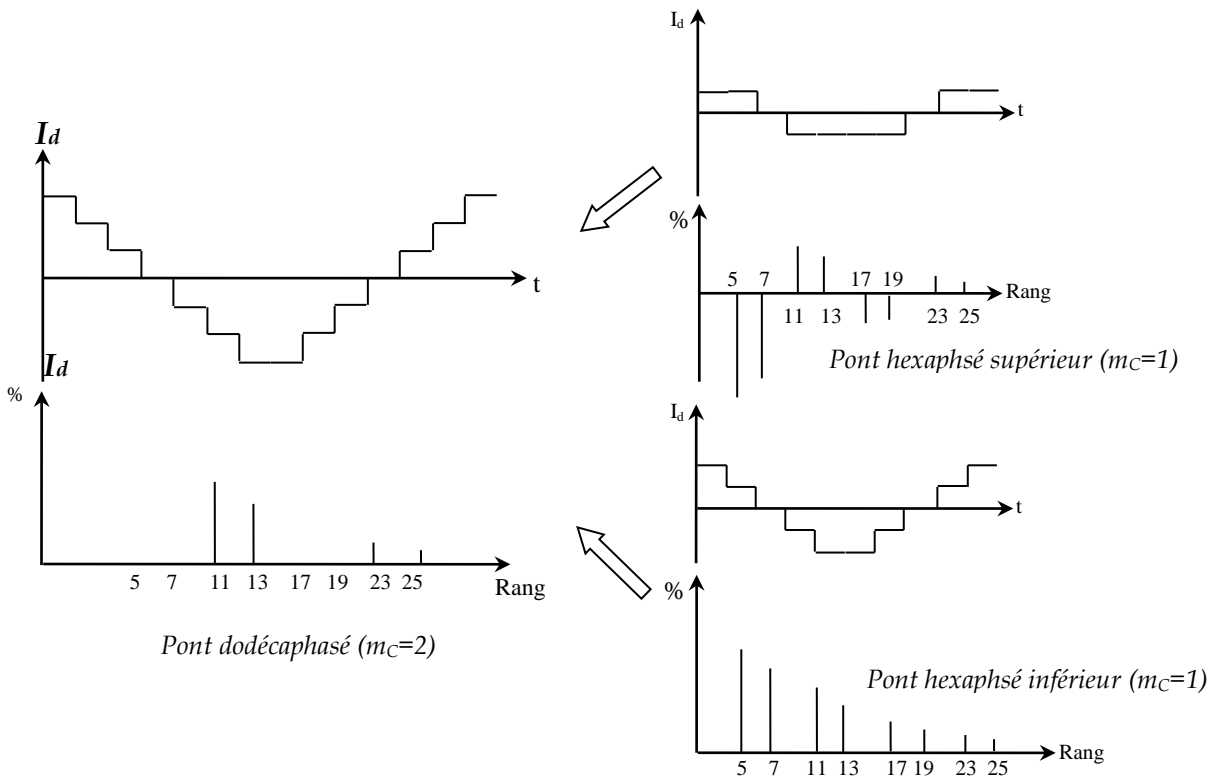


Fig (I.5)
Forme de courant et rang d'harmonique

Cette solution provoque un encombrement lors de la commande ce qui limite son utilisation [10].

I.9.2 Surdimensionnement des installations électriques

Cette stratégie consiste à surdimensionner les équipements du réseau de telle sorte à supporter les surtensions produites par les harmoniques [7].

I.9.3 Agir sur la structure de l'installation

Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur (figure (I.6)). Une alimentation par câble distinct est préférable [2].

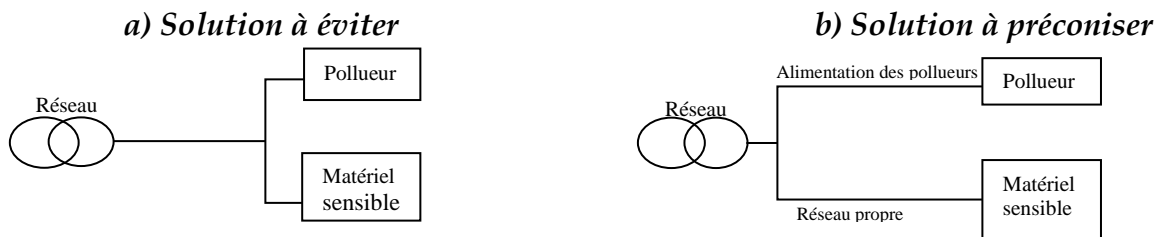


Fig (I.6)

Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles

I.9.4 Utilisation d'inductances anti-harmoniques

Cette disposition consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le facteur de puissance, en plaçant une inductance en série. Cette inductance est calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents [2].



I.9.5 Filtres passifs d'harmoniques

Le principe est de « piéger » les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer, donc il se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré. Un filtre comprend donc une série de « gradins » qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés.

On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges.

Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie [6].

Cette solution est la plus simple et la moins chère mais sans doute, elle n'est pas la plus efficace. L'efficacité de ces filtres se trouve dégradée par la présence de certains facteurs :

- Insuffisante habilité à couvrir une large bande de fréquence qui nécessite l'installation de plusieurs filtres.
- Naissance de résonances séries et parallèles avec le réseau qui conduit à l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle de la résonance.
- La forte dépendance de l'impédance et de la fréquence du réseau.
- Equipements volumineux [8].

I.9.5.1 Modèles des filtres passifs

-Filtre résonant : Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur la figure (I.7-a) et la figure (I.7-b) montre clairement le montage de ce dernier ainsi que leurs impédances en fonction de la fréquence [10].

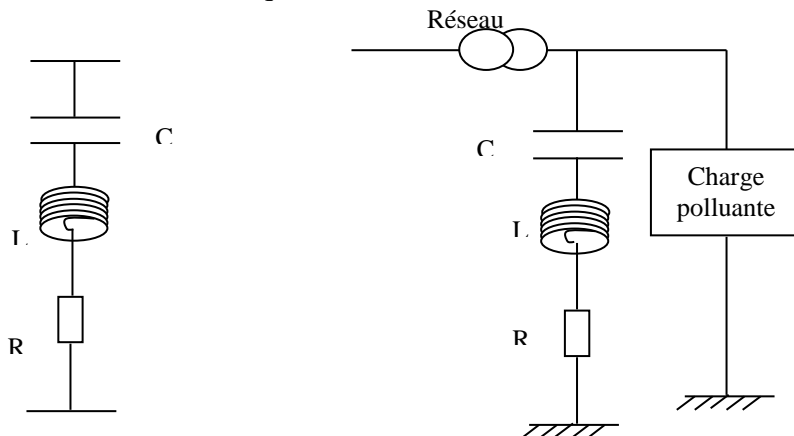


Fig (I.7.a)

Structure du filtre résonant



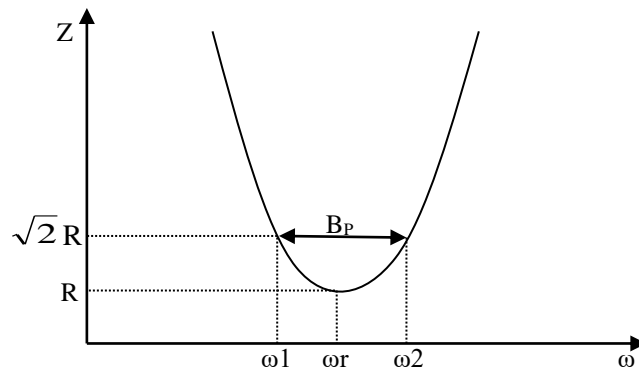


Fig (I.7.b)

Caractéristique du filtre résonant

Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques d'ordre supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de 11^{ème} [10].

➤ Filtre amorti :

La figure (I.7.c) montre le montage de ce type de filtre. En plus de difficulté de dimensionnement des filtres et à coût global donné, ce type n'est efficace que si le rang d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé (à partir de $h=13$) [11].

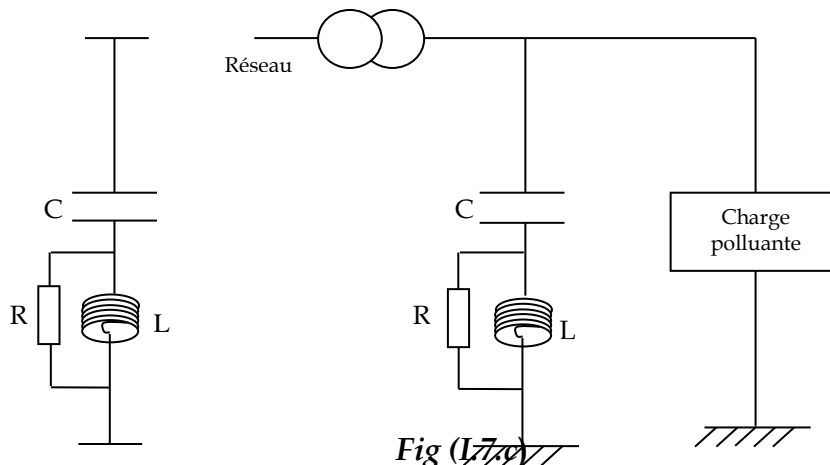


Fig (I.7.c)

Montage du filtre amorti**I.10 Solutions modernes**

Suite aux effets néfastes, les recherches se sont ré-axées vers d'autres solutions présentant de moindres inconvénients. Alors, grâce au développement qu'a connu la technologie des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables (GTO, IGBT,

MOSFET ...), ont apparus les convertisseurs AC-DC (redresseur MLI) d'une part, permettant un meilleur contrôle du facteur de puissance et l'atténuation de certains harmoniques basses fréquences

De plus, ce progrès dans le domaine des semis conducteurs de puissance a permis de concevoir des dispositifs d'élimination des harmoniques plus efficace dont l'objectif est l'élimination des problèmes intrinsèques des filtres passifs. Ces derniers se caractérisent par leurs adaptations aux variations de la fréquence du réseau ou autre paramètres. L'association des filtres actifs et passifs peut aussi conduire à des solutions qui augmentent leurs performances et leurs potentialités d'application [12].

1.10.1 Filtrage actif

Il y a deux types de filtrage actif :

- Filtrage actif série et parallèle ou encore filtrage combiné actif série
- Filtrage actif parallèle – passif série.

Ils sont construits autour d'un ou plusieurs composants actifs associés à des résistances condensateurs, et selfs.

Les composants actifs sont des transistors bipolaires [9] [12].

Le filtrage actif comprend des convertisseurs de puissance. Ce sont des sources de courant ou de tension qui éliminent les harmoniques en injectant en série ou en parallèle sur le réseau des courants ou des tension ou les deux à la fois, en opposition par rapport aux perturbations existants.

Vu le développement de l'électronique de puissance seulement au niveau de la commutation et les lois de commandes (MLI et Hystérésis) les recherches actuellement sont orientées vers les filtres actifs.

Dans ce travail nous proposons le filtre actif parallèle comme méthode de réduction des harmoniques de courant parce qu'il présente les avantages suivants :

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- Le risque de résonance entre filtre et impédance du réseau qui existe avec le filtre passif est éliminé [13]. Les différents types de Filtrage actif sont :

1.10.1.1 Filtrage actif série

Le filtre actif série engendre des tensions harmoniques V_h dont la somme avec la tension réseau V_s est une onde sinusoïdale (figure (1.8.a)). Il est destiné à protéger les installations



sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions.

En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [3].

1.10.1.2 Filtrage actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (I.8.b), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [5].

1.10.1.3 Filtrage actif série-parallèle

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure (I.8.e). Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actifs ou United Power Quality Conditioner. Il possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série.

Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée [8].

1.10.1.4 Filtrage hybride

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif.

L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques ; le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc d'optimiser le rapport performance / coût et d'avoir une meilleure tenue en tension [11].

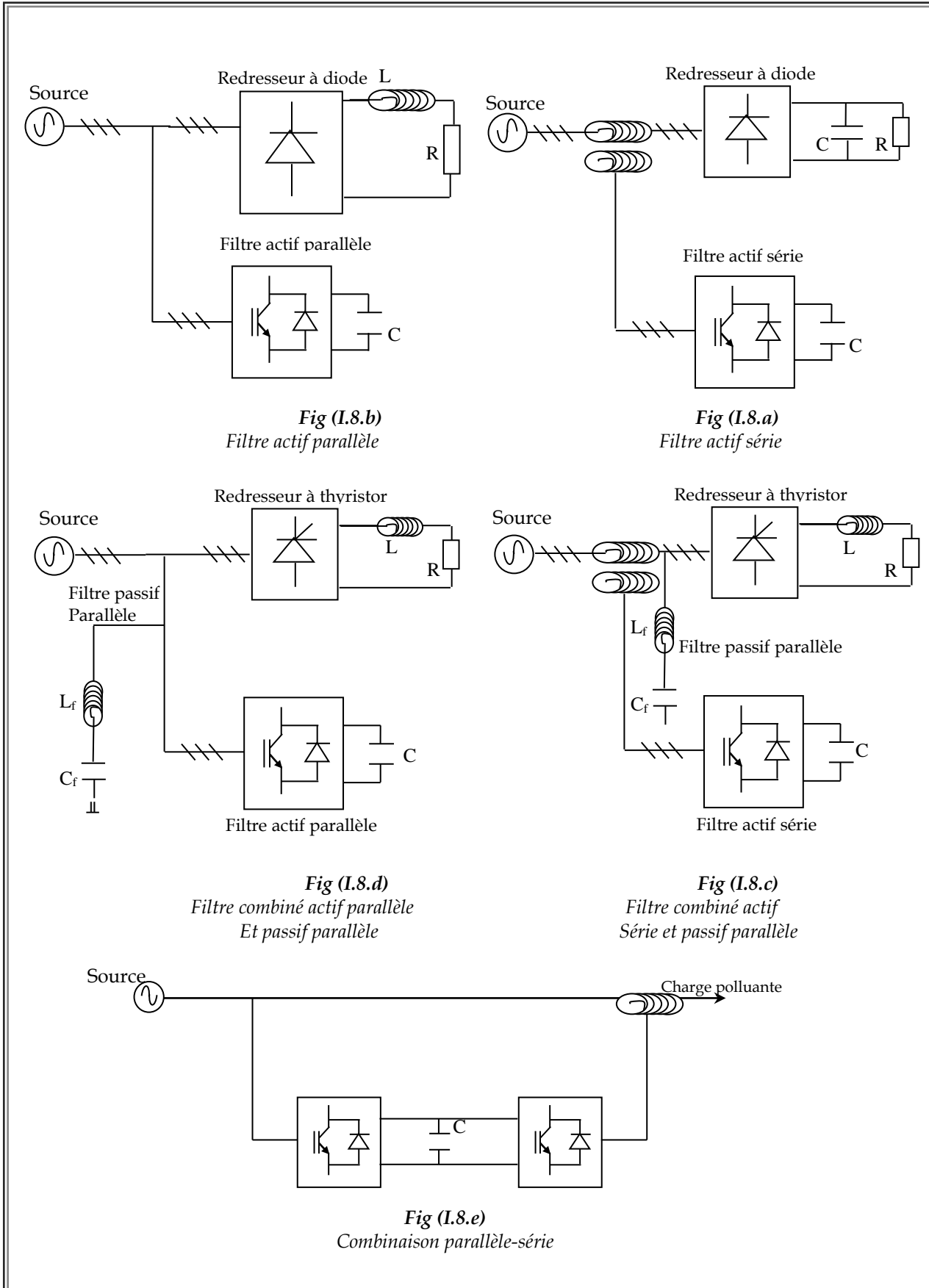
On a plusieurs structures de filtre actif par exemple :

- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif Combiner parallèle-série



- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

La figure suivante présente quelques différents types de filtrages actifs :



I.10.2 Les redresseurs MLI

Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions, utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT ou les thyristors GTO. L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique en prélevant des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives [14].

On distingue deux structures, la structure courant et la structure tension. Elles sont développées dans les paragraphes ci-après.

I.10.2.1. Redresseur de tension

Son schéma de principe est présenté sur la figure (I.9). Les composants de puissance disponibles (IGBT, GTO) étant unidirectionnels en courant, le courant I_d le sera également. La réversibilité en puissance s'effectue par l'inversion de la tension redressée U_d . Le contrôle de la puissance réactive est obtenu par action sur la phase du courant réseau par rapport à la tension [14]. Son schéma de principe est présenté sur la figure (I.9).

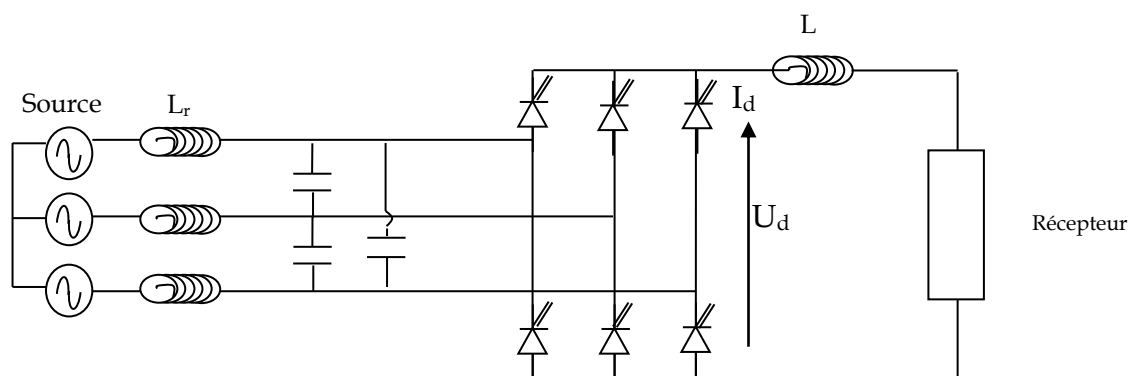


Fig (I.9)
Redresseur de tension

I.10.2.2. Redresseur de courant

La tension U_d étant unidirectionnelle, la réversibilité de la puissance active est assurée par le courant I_d , qui est bidirectionnel. Le contrôle de la puissance réactive est réalisé par action indirecte sur la phase du fondamental de courant du réseau.

Les inductances L_r servent dans la figure (I.10) à découpler le convertisseur de réseau car les deux réseaux alternatifs et continus sont tous deux sources de tension [14].

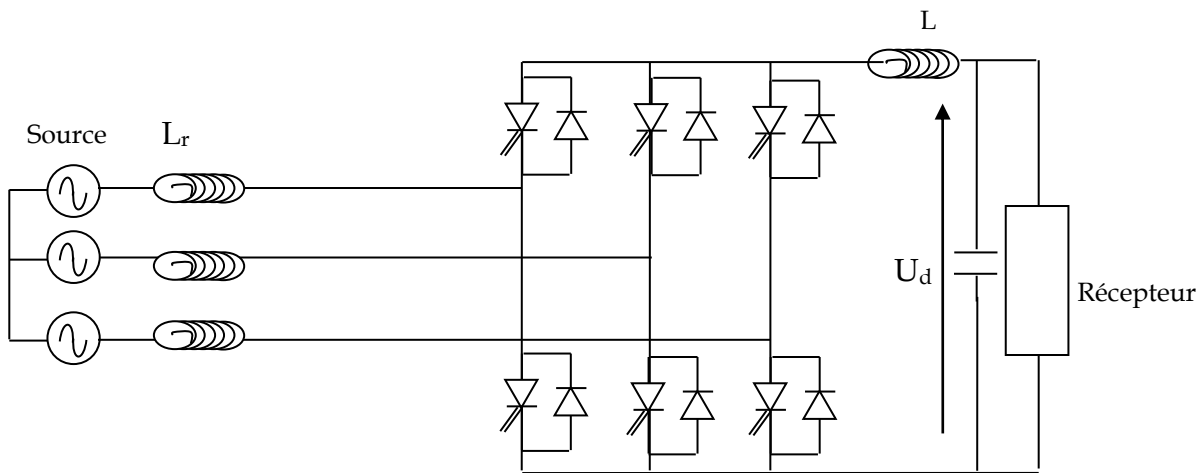


Fig (I.10)
Redresseur de courant

I.11 Conclusion

Nous avons vu qu'actuellement Les charges non linéaires sont de plus en plus présentes comme récepteurs consommateurs dans les réseaux de distribution industrielle, Elles produisent une pollution électrique harmonique qui nécessite généralement un dispositif d'élimination de ces perturbations et compensation de l'énergie réactive qu'elles consomment. Puis on a présenté les principales perturbations harmoniques et les moyens techniques permettant de les limiter dont il existe plusieurs, les solutions classiques présentent de nombreuses contraintes pour répondre à un besoin actif de dépollution, elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement, de résonance et d'une mauvaise adaptation face à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Chapitre II

MODELISATION DE L'ONDULEUR

TRIPHASE PUC

INTRODUCTION

De nos jours l'électronique de puissance est une discipline vitale dans plusieurs domaines touchant directement les activités humaines tels que le transport, les réseaux d'alimentation électrique, ou encore tout type d'activité industrielle. Dans cette époque et dans ce contexte mondial, où l'énergie est devenue indispensable pour la vie humaine, et où la planète commence à donner des signaux de surexploitation, l'amélioration des dispositifs de l'électronique de puissance peut contribuer à améliorer les performances des installations électriques et énergétiques actuelles, et ainsi réduire la pression sur les ressources énergétiques mondiales.

Les convertisseurs de puissance sont des dispositifs électroniques comprenant des éléments semi-conducteurs tels que des interrupteurs et des diodes, ainsi que les éléments passifs d'électroniques comme les résistances, les capacités et les inductances. Ces convertisseurs sont des structures qui permettent de convertir le courant électrique d'une forme à une autre. Deux formes du courant sont utilisées dans les applications électroniques actuelles : le courant sous sa forme continue et le courant sous sa forme alternative, ce qui nous donne quatre types de conversion, soit :

- DC/AC ou onduleur qui a pour but de transformer le courant continu en alternatif;
- AC/DC ou redresseur qui a pour but de redresser le courant alternatif et de le rendre continu;
- DC/DC dont le but est de changer l'amplitude d'un courant continu, le hacheur est l'application la plus répandue;
- AC/AC dont le but est de changer la fréquence et l'amplitude du courant alternatif, elle est souvent réalisée par deux transformations AC/DC et DC/AC consécutives, mais elle peut aussi être faite directement avec un convertisseur matriciel

Une autre solution consiste à utiliser des convertisseurs multi niveaux qui ont l'avantage d'effectuer la conversion en évitant un taux de distorsion harmonique élevé[1].

La topologie PUC, sujet de ce mémoire, est une topologie multi niveaux. Elle a été mise au point en 2010 par Ounejjar et Al-Haddad. Elle a l'avantage de fournir un nombre de niveaux élevé pour un nombre de composants réduit, ce qui la privilégie par rapport à ses concurrentes comme la topologie à point neutre calé (NPC), la topologie à capacités flottantes ou encore le convertisseur de Vienna.

Afin de contrer l'effet pollueur des convertisseurs statiques, les spécialistes du domaine ont suivi deux pistes : la dépollution à l'aide des filtres ou l'utilisation des convertisseurs multi niveaux qui ont l'avantage de réduire les harmoniques. Il existe plusieurs types de convertisseurs multi niveaux et de filtres, dans ce chapitre nous allons présenter les topologies principales et les plus répandues. Nous allons aussi survoler les différentes méthodes de régulation et de modulation[1].



II.1 Topologies de convertisseurs de puissance multi niveaux

II.1.1 Convertisseurs à point neutre calé par des diodes

Cette topologie a été présentée la première fois par Nabae et Akagi (1981). Elle avait pour but d'ajouter un niveau de tension intermédiaire à la tension de sortie d'un onduleur afin de réduire les harmoniques. La figure (II.1) montre un convertisseur NPC trois niveaux ainsi que les séquences de fonctionnement du convertisseur.

Dans le cas d'un seul bras, le point milieu entre les deux capacités permet de diviser la tension d'entrée E en deux niveaux, ainsi, à l'aide des interrupteurs, la tension de sortie pourrait être E , $E/2$ ou 0 .

- Quand T_{a2} est fermé, la tension de sortie V_s est égale à $E/2$;
- Quand T_{a1} et T_{a2} sont fermés, V_s est égale à E ;
- Quand T_{a1} et T_{a2} sont ouverts, la tension de sortie V_s est nulle.

Ce qui nous donne 3 différents niveaux de tensions positifs aux bornes de la charge. Il faut noter que les interrupteurs T_{a3} et T_{a4} sont respectivement complémentaires à T_{a1} et T_{a2} . Les différentes combinaisons de fonctionnement sont présentées dans le tableau 1.

T_{a1}	T_{a2}	T_{a3}	T_{a4}	V_s
0	0	1	1	0
0	1	1	0	$E/2$
1	1	0	0	E

Tableau (II.1) : Table de commutation du convertisseur NPC 3 niveaux

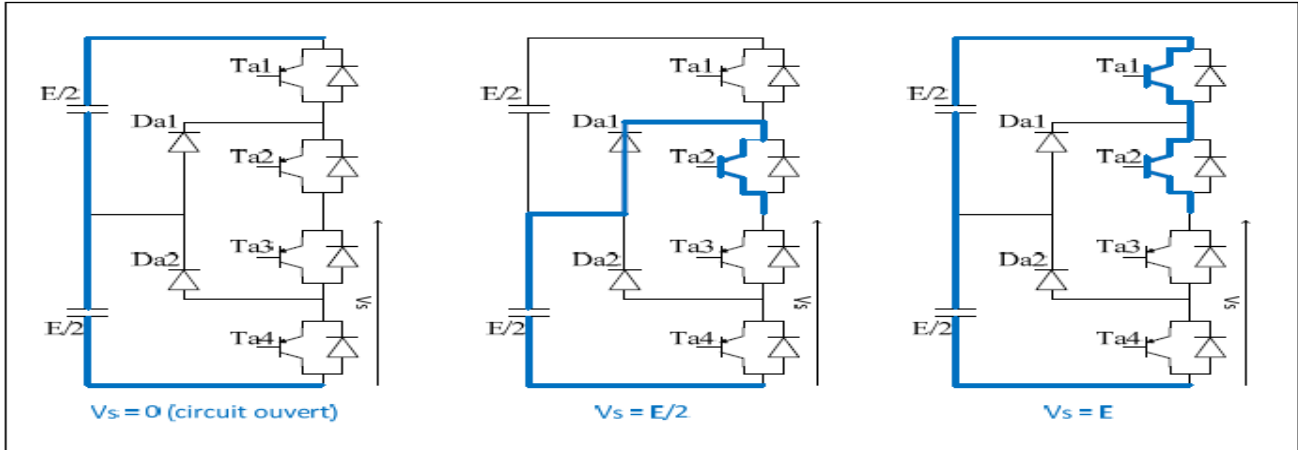


Figure (II.1) : Tensions positives produites par le convertisseur NPC 3 niveaux

Tableau(II.2) : Table de commutation du convertisseur NPC 5 niveaux

T_{a1}	T_{a2}	T_{a3}	T_{a4}	V_s
1	1	0	0	E
0	1	0	0	$E/2$
0	0	0	0	0
0	0	0	1	$-E/2$
0	0	1	1	$-E$

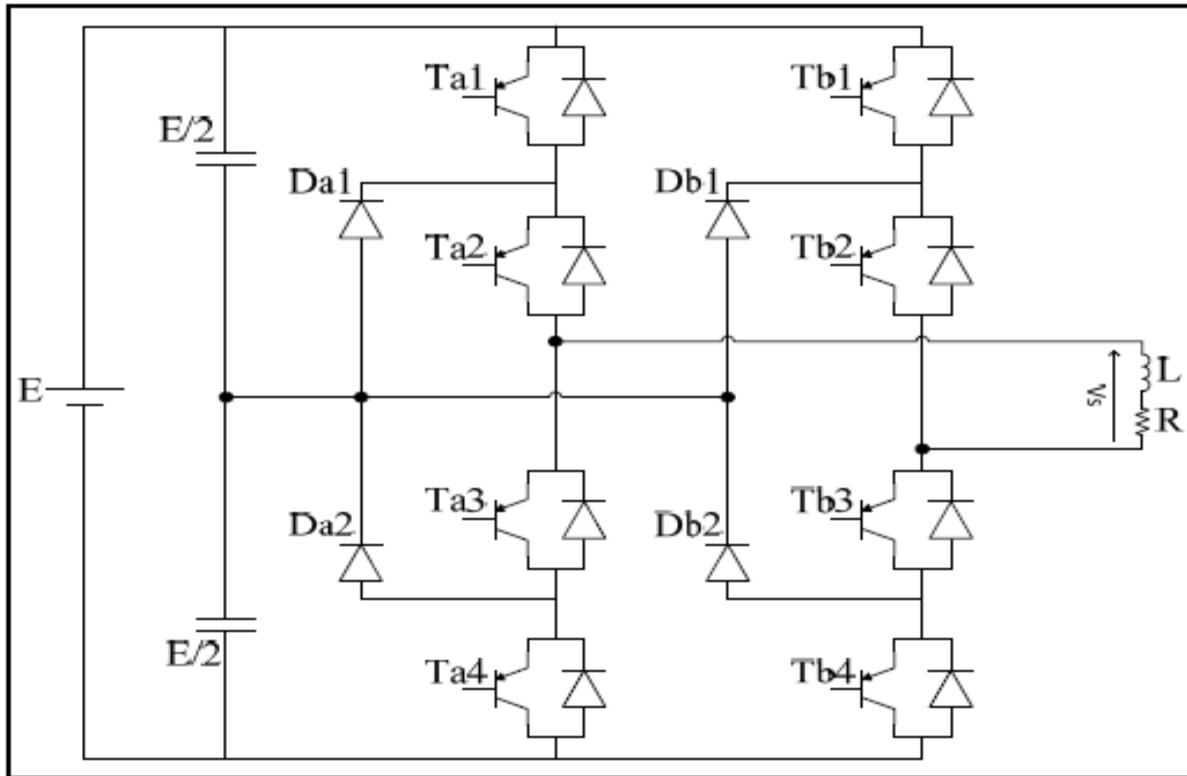


Figure (II.2) : Convertisseur NPC 3 niveaux

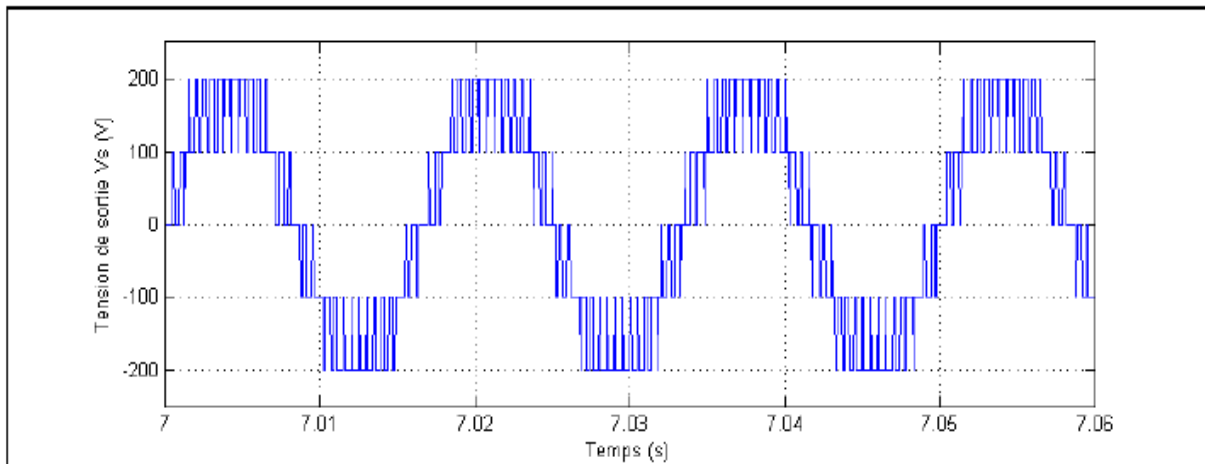


Figure (II.3) : Tension de sortie d'un convertisseur 3 niveaux

La figure précédente montre les formes d'ondes de la tension de sortie aux bornes de la charge, cette tension est composée de 5 niveaux grâce aux deux bras du convertisseur[1].

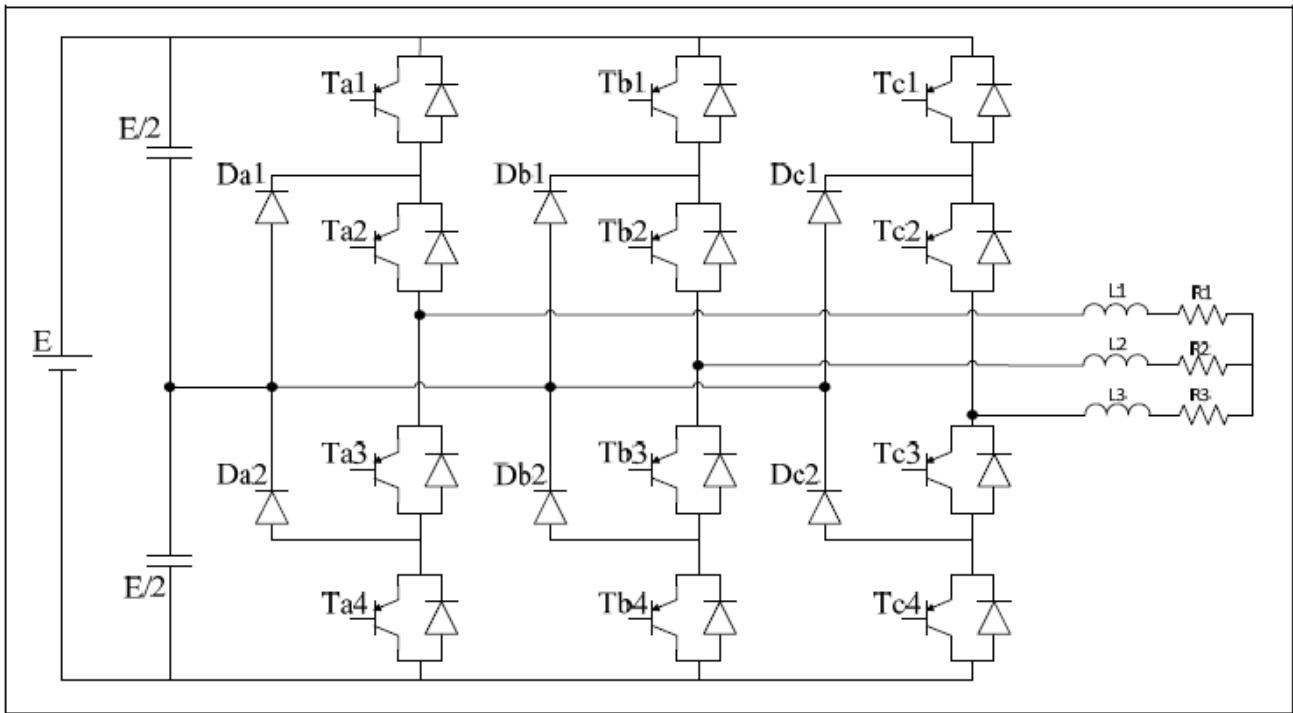


Figure (II.4) : Convertisseur NPC triphasé 3 niveaux

II.1.2 Convertisseur à capacités flottantes

Cette architecture a été introduite par Meynard et Foch (1992). Dans cette topologie les deux diodes de calage du convertisseur NPC ont été remplacées par une capacité, d'où le nom de convertisseur à capacités flottantes. Les combinaisons de fonctionnement sont les mêmes que pour la topologie NPC[1] [2].

Chaque bras d'un convertisseur monophasé 5 niveaux contient 4 interrupteurs, 4 diodes et une capacité. Pour un convertisseur à capacité flottantes de n niveaux, chaque bras doit contenir (2n-2) interrupteurs et (n-2) capacités. Cette topologie élimine quelques inconvénients de la NPC comme l'équilibre des tensions supportées par les interrupteurs

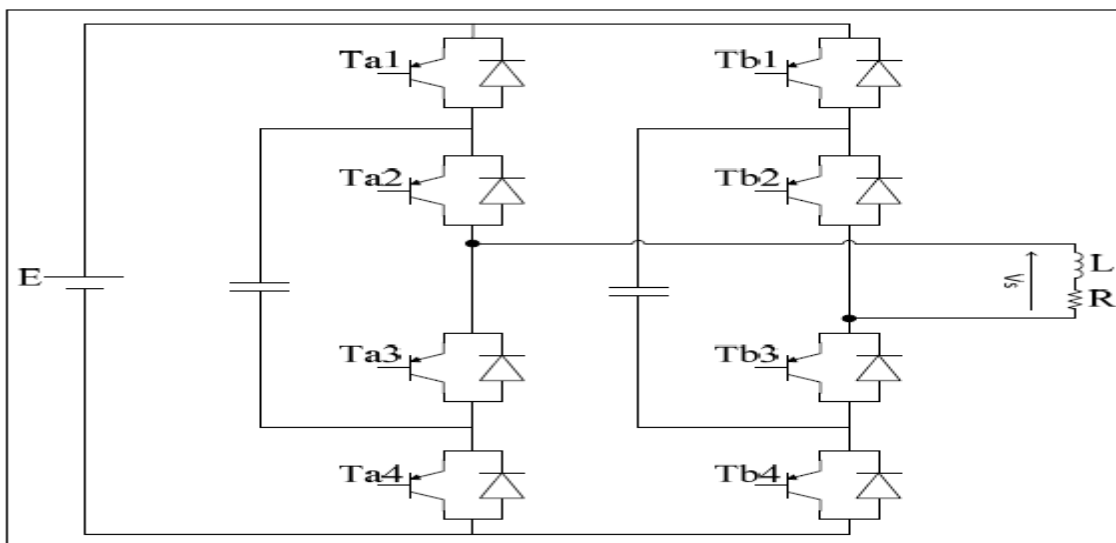


Figure (II.5) : Convertisseur monophasé 3 niveaux à capacités flottantes

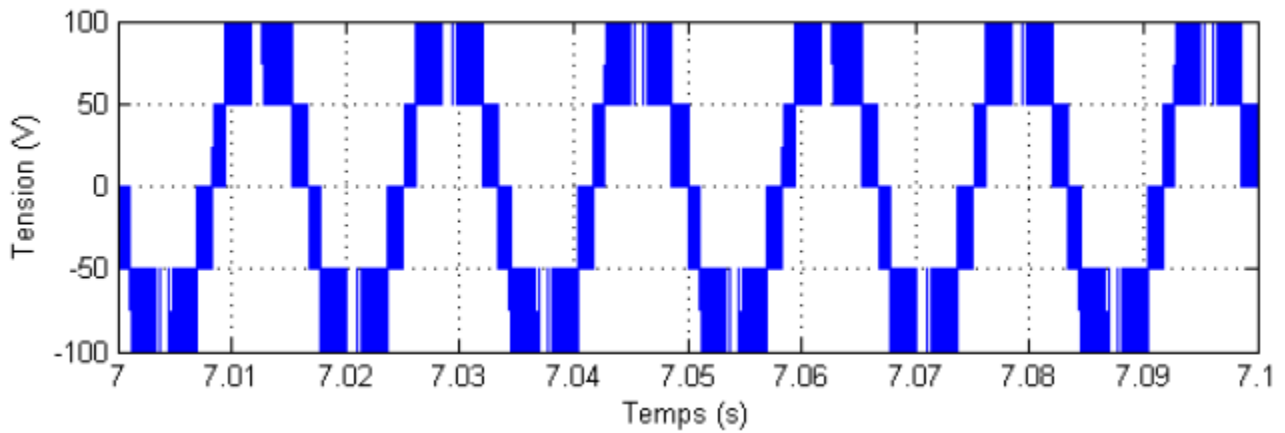


Figure (II.6) : Formes des signaux obtenus avec un convertisseur à capacités flottantes 3 niveaux

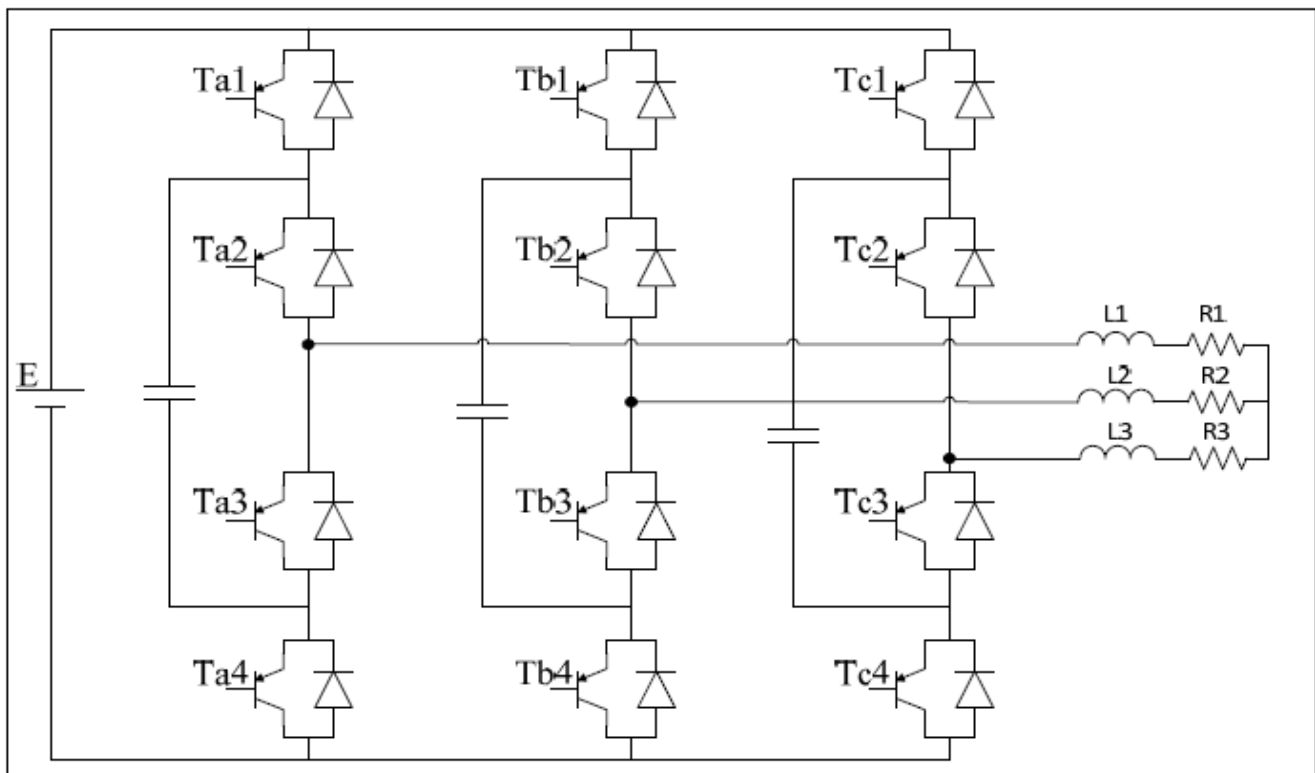


Figure (II.7) : Convertisseur triphasé 3 niveaux à capacités flottantes

II.1.3 Onduleur en pont H en Cascade

Cette topologie (Peng et al; 1996) consiste à mettre en cascade plusieurs onduleurs en pont H monophasés de trois niveaux. Chaque pont est alimenté par une source de tension continue distincte. Ce qui fait que pour n onduleurs en cascade, la tension de sortie peut être constituée de $(2n+1)$ niveaux. En comparaison avec les deux topologies précédentes, nous remarquons que nous pouvons obtenir le même nombre de niveaux avec le même nombre d'interrupteurs et sans diodes de calage ni de capacités flottantes. Néanmoins, pour chaque

paire de niveaux additionnelle il faut une source de tension supplémentaire, ce qui représente un inconvénient majeur pour cette topologie[5].

T_{a1}	T_{a2}	T_{a3}	T_{a4}	V_s
0	1	1	0	-E
0	1	0	1	0
1	0	0	1	E

Tableau (II.3) : Tableau de commutations du convertisseur en H

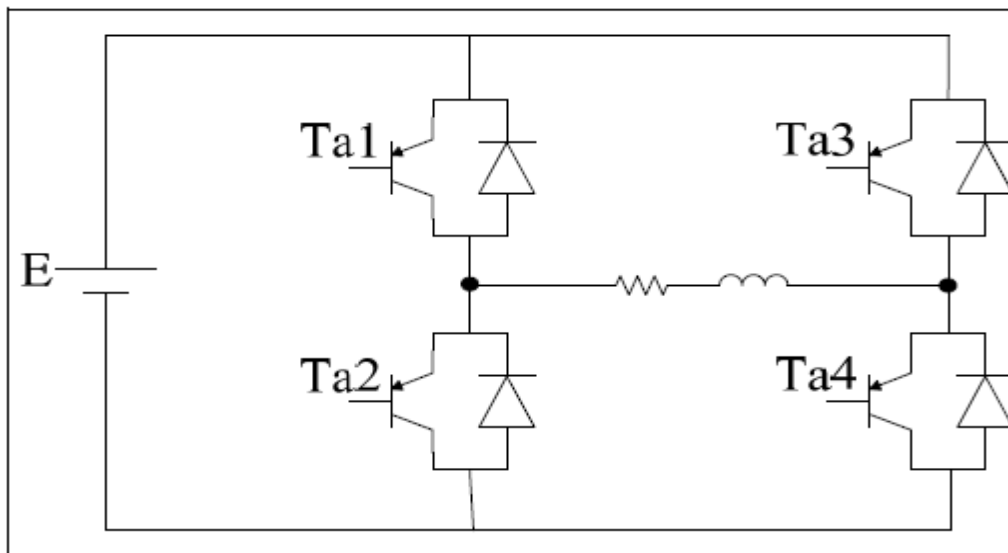


Figure (II.8) : Convertisseur en H 3 niveaux

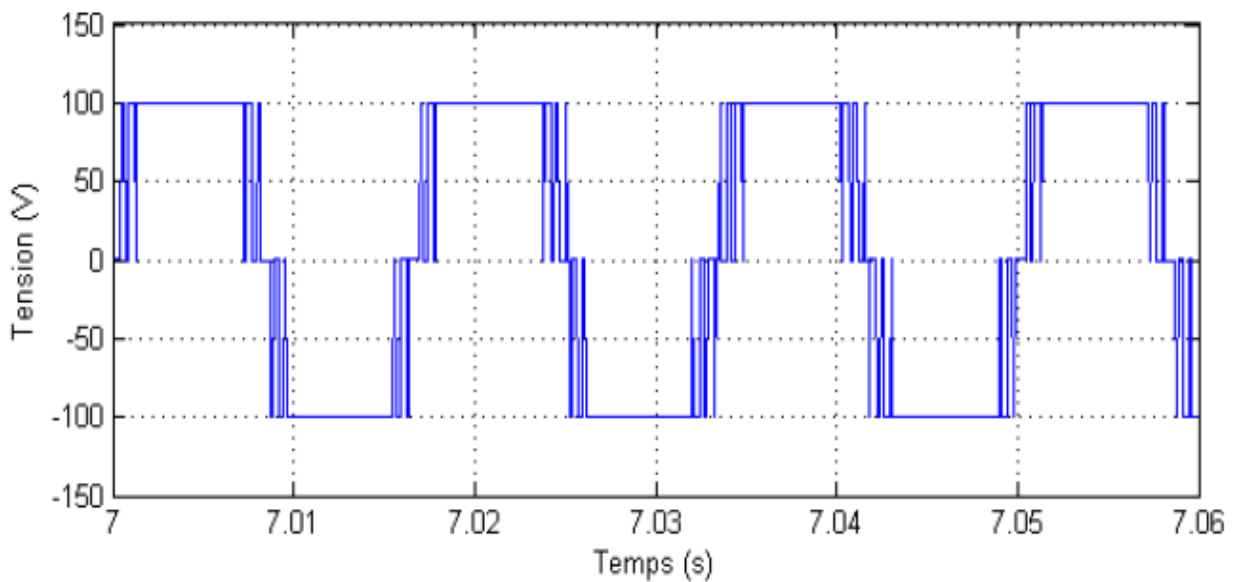


Figure (II.9) : Formes des signaux obtenus avec un convertisseur pont H 3 niveaux

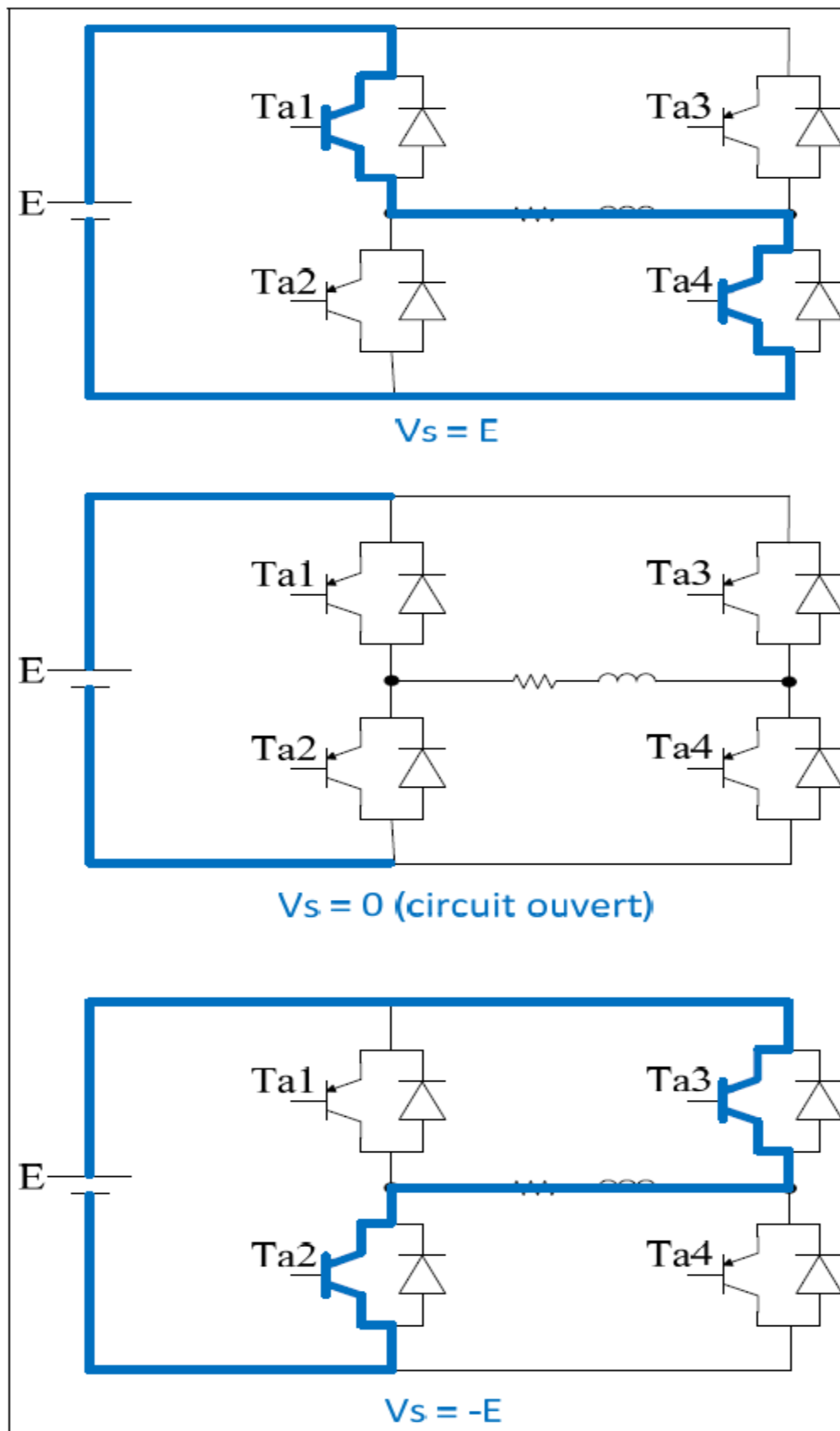


Figure (II.10) : Séquences de fonctionnement du convertisseur en H

T_{a1}	T_{a3}	T_{b1}	T_{b3}	V_s
0	1	0	1	-2E
0	1	0	0	-E
0	0	0	0	0
1	0	0	0	E
1	0	1	0	2E

Tableau (II.4) : Tableau de commutation du convertisseur en pont H en cascade

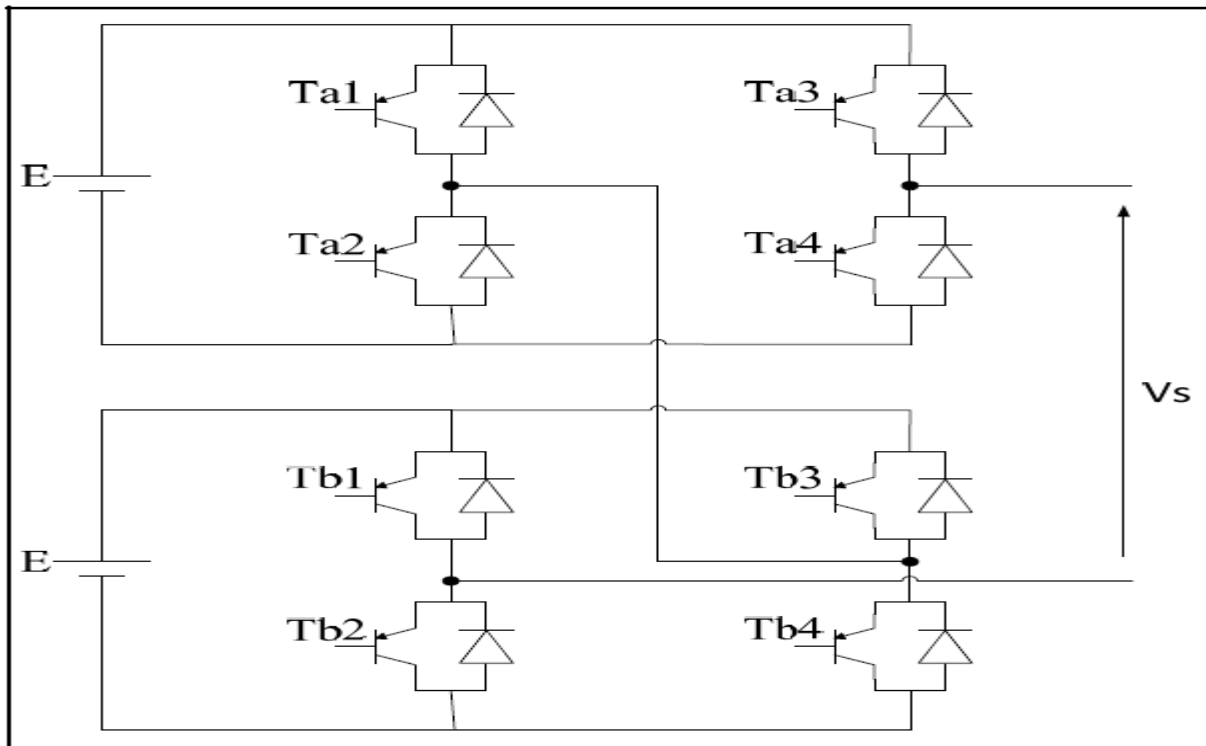


Figure (II.11) : Onduleur en pont H en cascade 3 niveaux

II.2 CONVERTISSEUR PUC MONOPHASÉ

Le convertisseur à cellules en U empilées PUC (Packed U Cells) est un convertisseur multi niveaux conçu en 2008 par Ounejjar et Al-Haddad (2008 et 2010). Il est constitué par des cellules dont chacune est composée de deux interrupteurs (avec leurs diodes en antiparallèle) ainsi que d'un condensateur (Figure (II.3)). En considérant n cellules, un convertisseur sera constitué de 2n interrupteurs et de n-1 condensateurs, ce convertisseur donnera $2^n - 1$ niveaux (car les deux interrupteurs d'une même cellule doivent être complémentaires ce qui donnera 2^n combinaisons et car le niveau 0 sera toujours répété 2 fois ce qui permettra d'avoir $2^n - 1$ niveaux différents). Ainsi, un convertisseur de 7 niveaux est constitué de 6 interrupteurs et de deux condensateurs (Figure (II.14)). Le tableau II.6 présente les différentes combinaisons que peut donner ce convertisseur. Pour avoir 7 niveaux équidistants il faut réguler la tension aux bornes du condensateur V_{aux} de manière à ce qu'elle soit égale au tiers de la tension aux bornes du condensateur V_{bus} [6].

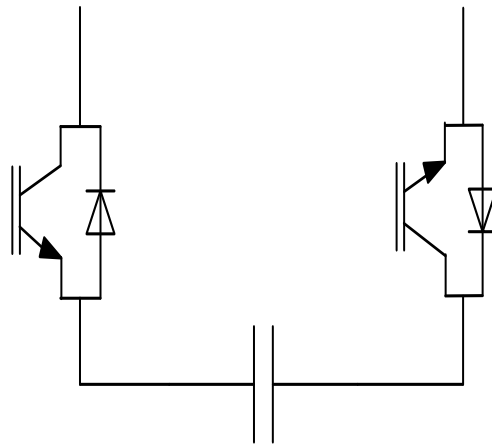


Figure (II.13) : Cellule d'un convertisseur PUC

Etat	T1	T2	T3	Vs	Vs (avec $V_{aux} = 1/3V_{bus}$)
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	V_{aux}	$1/3V_{bus}$
2	0	1	0	$V_{bus} - V_{aux}$	$2/3V_{bus}$
3	0	1	1	V_{bus}	V_{bus}
-3	1	0	0	$-V_{bus}$	$-V_{bus}$
-2	1	0	1	$-(V_{bus} - V_{aux})$	$-2/3V_{bus}$
-1	1	1	0	$-V_{aux}$	$-1/3V_{bus}$
0	1	1	1	0	0

Tableau (II.6) : Tableau de commutation du convertisseur PUC

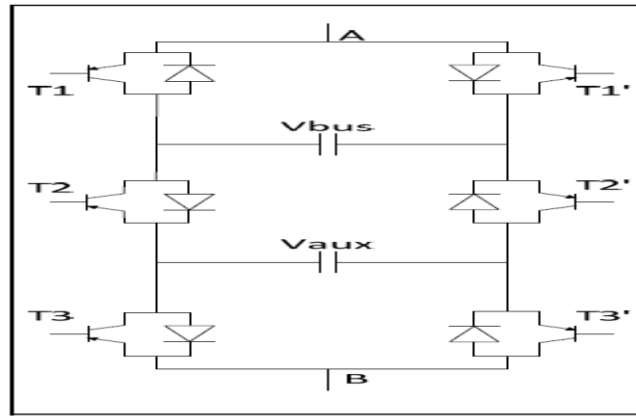


Figure (II.14) : Convertisseur PUC 7 niveaux

Les fonctions de commutation de l'onduleur PUC illustrées à la figure (II.14) sont définies comme suit:

$$S_i = \begin{cases} 0 & \text{si } S_i \text{ est fermé} \\ 1 & \text{si } S_i \text{ est ouvert} \end{cases} \quad i=1,2,3 \quad (II.1)$$

La tension de sortie de l'onduleur peut être formulée comme suit:

$$v_{ad} = v_{ab} + v_{bc} + v_{cd} \quad (II.2)$$

Lorsque les points a, b, c et d sont illustrés dans la figure ci-dessus et que chaque tension peut être calculé en fonction de la fonction de commutation:

$$\begin{cases} v_{ab} = (S_1 - 1)V_1 \\ v_{bc} = (1 - S_1)(V_1 - V_2) \\ v_{cd} = (1 - S_3)V_2 \end{cases} \quad (II.3)$$

En remplaçant (2.3) par (2.2),

$$\begin{aligned} v_{ad} &= (S_1 - 1)V_1 + (1 - S_2)(V_1 - V_2) + (1 - S_3)V_2 \\ &= (S_1 - S_2)V_1 + (S_2 - S_3)V_2 \end{aligned} \quad (II.4)$$

Similaire aux relations de tension, puisqu'un des commutateurs dans chaque paire de S1 et S4, S2 et S5 et S3 et S6 sont activés, les courants des commutateurs peuvent être affichés en fonction du courant de charge et fonction de commutation.

$$\begin{cases} i_1 = S_1 i_0 \\ i_2 = S_2 i_0 \\ i_3 = S_3 i_0 \end{cases} \quad (II.5)$$

$$\text{Où,} \quad (II.6)$$

$$i_3 = i_c + i_2 \quad (II.7)$$

$$i_c = (S_3 - S_2)i_0$$

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{(S_3 - S_2) i_0}{C} \quad (II.8)$$

De même, pour la tension et le courant de charge, la loi KVL est écrite comme suit:

$$v_0 = v_{ad} - r i_0 - L \frac{di_0}{dt} \quad (II.9)$$

En substituant Eq. (II.4) à (II.9), la relation suivante pour le courant de sortie serait: dérivé:

$$\begin{aligned} \frac{di_0}{dt} &= \frac{((S_1 - S_2)V_1 + (S_2 - S_3)V_2) - r i_0}{L} \\ &= (S_1 - S_2) \frac{V_1}{L} + (S_2 - S_3) \frac{V_2}{L} - \frac{r}{L} i_0 \end{aligned} \quad (II.10)$$

II.2 Fonctionnement en onduleur

II.2.1 Topologie

Dans le fonctionnement en mode onduleur, le convertisseur PUC comporte une source de tension continue V_{bus} et un condensateur V_{aux} . La charge est connectée aux bornes des points A et B. Comme indiqué précédemment, la tension aux bornes du condensateur V_{aux} doit être réglée au tiers de la tension V_{bus} . Si on suppose que la tension d'alimentation V_{bus} est égale à 300 V et que la tension aux bornes du condensateur V_{aux} est égale à 100 V alors les différentes séquences de fonctionnement donneront les tensions suivantes aux bornes de la charge : [300V, 200V, 100V, 0, -100V, -200V, -300V] figure (II.15)[1].

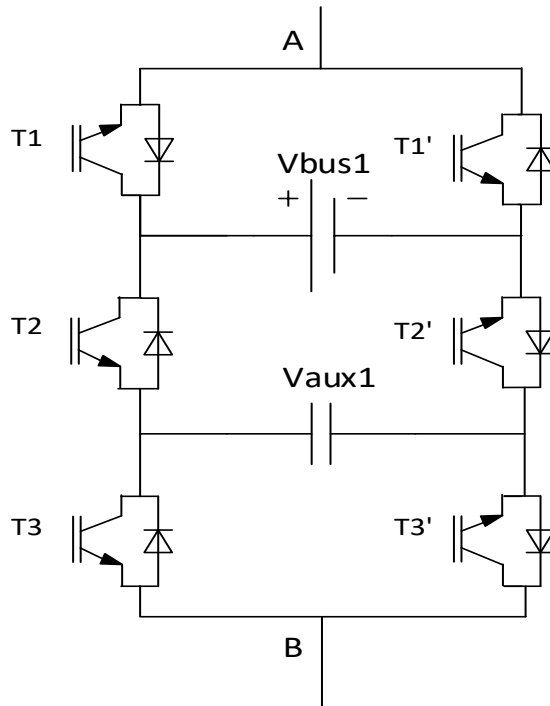


Figure (II.15) : Schéma de l'onduleur PUC 7 niveaux

II.2.2 Commande utilisée

Pour mieux expliquer cette commande nous allons la diviser en trois parties. La première partie consiste en la régulation de la tension aux bornes du condensateur. Cette régulation est effectuée à l'aide d'un contrôleur PI qui donne le signal de référence pour la régulation du courant de charge (à l'aide d'un contrôleur proportionnel). La deuxième phase de la commande est la modulation du signal obtenu, il sera comparé à six signaux triangulaires d'amplitude unitaire repartis entre -3 et 3. L'astuce consiste à créer un décalage dans les signaux triangulaires de la MLI (6 porteuses qui permettront de produire 7 niveaux de tension comme le montre la figure 17). Ce décalage permettra de charger et de décharger le condensateur de telle manière à garder sa tension autour de la valeur désirée, ce qui nous donnera un signal modulé sur sept niveaux. La troisième partie de la commande consiste à récupérer ce dernier signal (signal sur 7niveaux de la figure 17) et d'attribuer les signaux des interrupteurs afin d'obtenir une tension semblable sur sept niveaux. La figure suivante (16) montre le fonctionnement de cette commande. (Grégoire et al, 2009)[1][8]

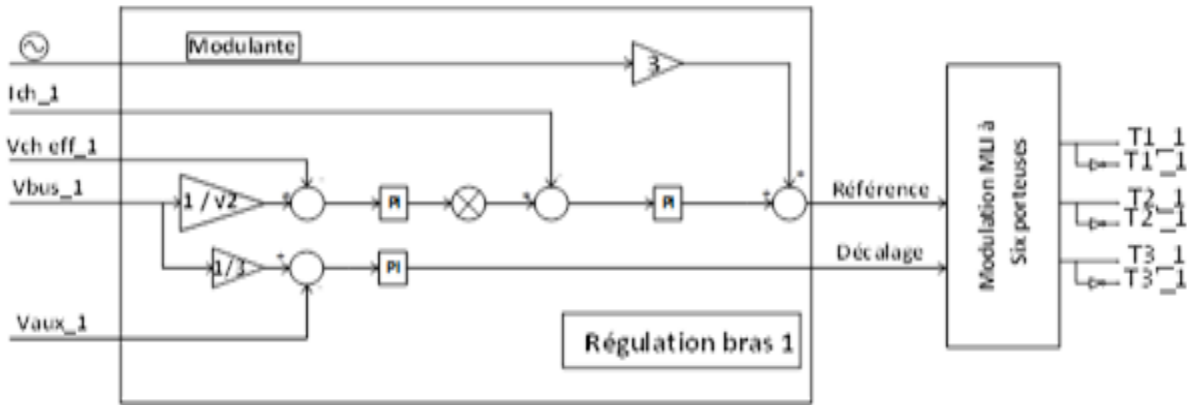


Figure (II.16) : Commande MLI

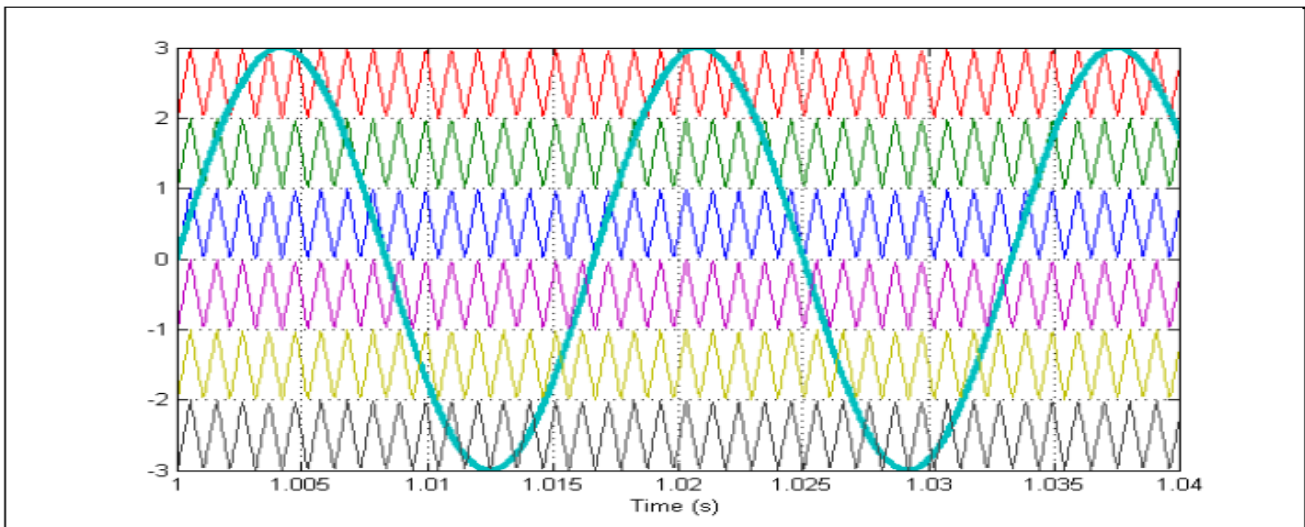


Figure (II.17) : comparaison entre Le signal de référence et les six porteuses

II.2.3 Résultats de la simulation

Le circuit de puissance est composé des éléments suivants : une source de tension continue V_{bus} de 300V, un condensateur de 4000uF qui doit être réglé à 100V (soit 1/3 de V_{bus}), les 6 interrupteurs (IGBT avec des diodes en antiparallèle) et enfin une charge composée d'une résistance et d'une inductance ($R = 40 \text{ Ohm}$, $L = 20\text{mH}$).

Tension de source (par phase)	300 V
Résistance de la charge	40 Ohm
Inductance de la charge	20 mH
Condensateur Bus	4000 uF
Fréquence de commutation	10 kHz

Tableau (II.7) : Paramètres de simulation de l'onduleur monophasé PUC

La figure suivante (II.18) montre les formes de signaux obtenus. La tension aux bornes de la charge et la valeur de la tension aux bornes du condensateur est de 100V ce qui



correspond à la bonne valeur figure (II.19). En vue des valeurs et des signaux obtenus, nous pouvons considérer que cet onduleur fonctionne selon les principes développés précédemment.

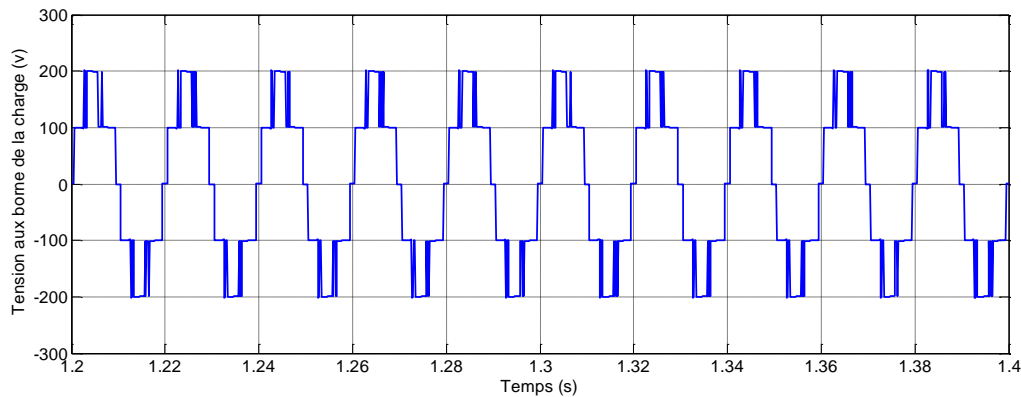


Figure (II.18) : Formes d'ondes de la tension aux bornes de la charge

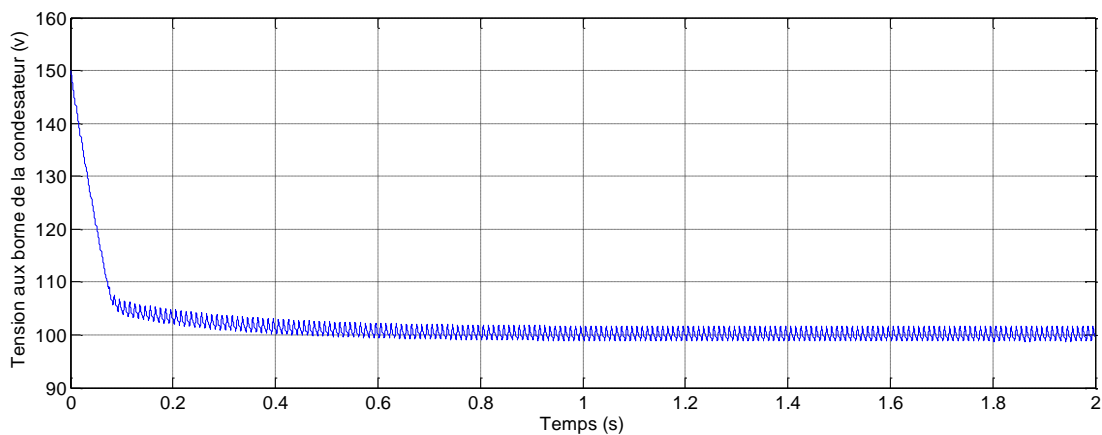


Figure (II.19) : Formes d'ondes de la tension aux bornes condensateur

II.3 CONVERTISSEUR PUC TRIPHASÉ

II.3.1 Introduction

L'utilisation du convertisseur en triphasé est beaucoup plus intéressante que le système monophasé vu les applications industrielles qui demandent une quantité d'énergie importante. Cependant, la structure non bidirectionnelle de cette topologie rend la réalisation du convertisseur pas très conventionnelle [1].

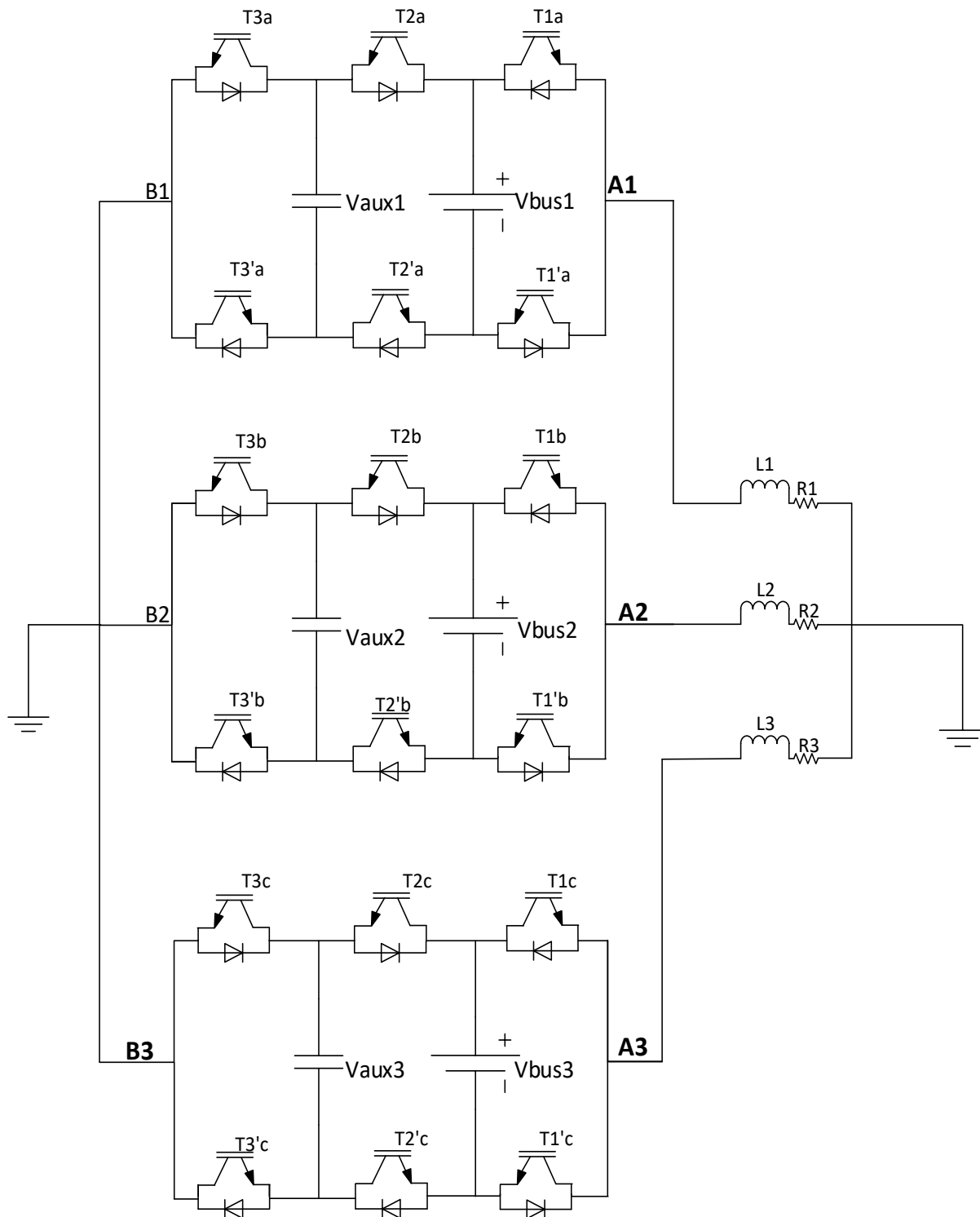
II.3.2 Fonctionnement en mode onduleur

Trois bras d'un onduleur monophasé permettent d'assembler un onduleur triphasé. Toutefois, la régulation proposée oblige à utiliser trois sources distinctes de tension continue, ce qui constitue un inconvénient [1].

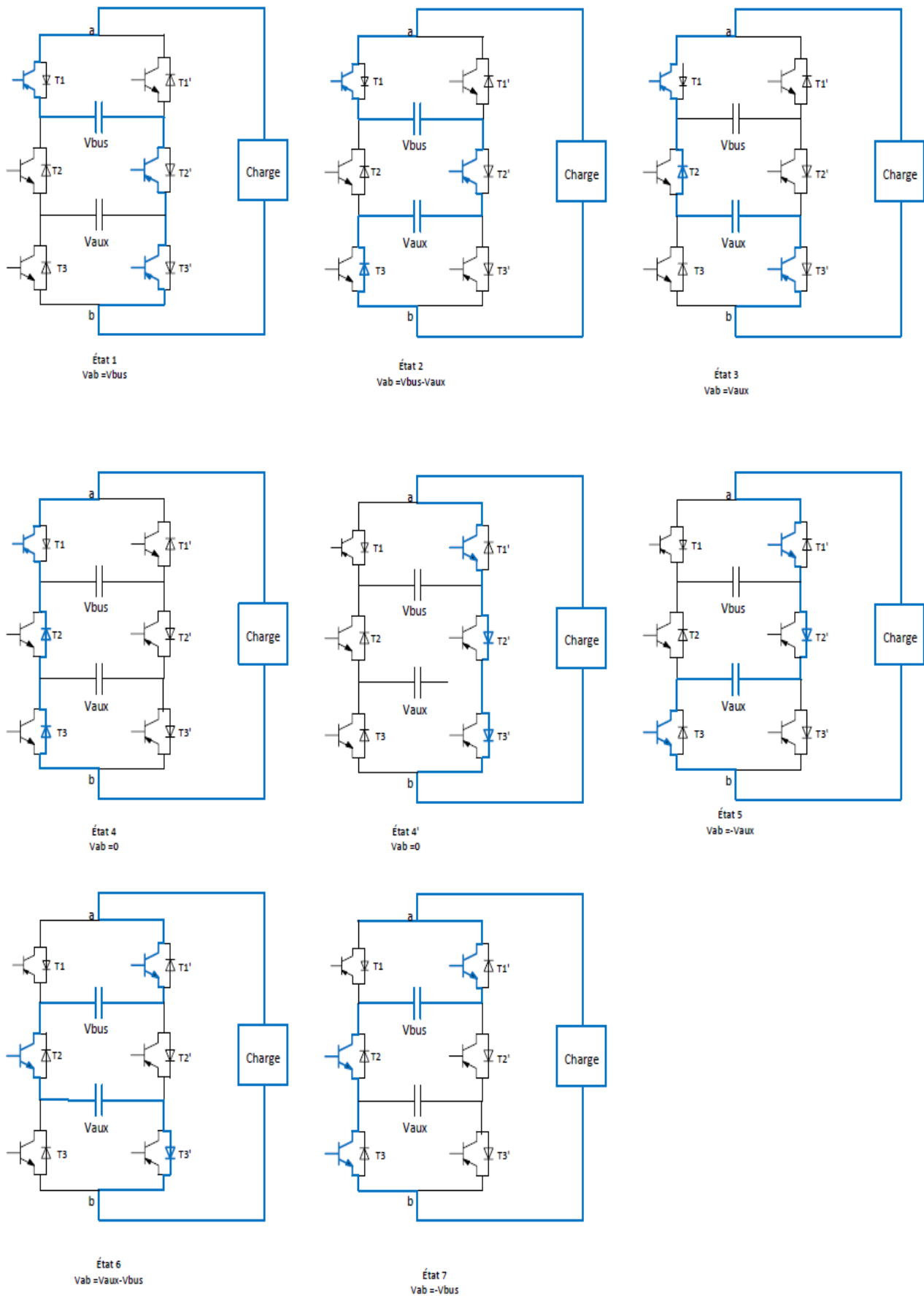
II.3.2.1 Présentation de la topologie

L'onduleur triphasé consiste à utiliser trois bras en parallèle Figure20, les sources de tension continue doivent être indépendantes. Chaque bras est régulé indépendamment avec la régulation et la modulation de l'onduleur MLI monophasé, la seule différence est le

déphasage de $2\pi/3$ entre les trois bras. Les valeurs des résistances et des condensateurs de la charge triphasée utilisés dans cette simulation sont : $R=15$ Ohm et $L= 8$ mH. Les autres valeurs des composants utilisés seront détaillées dans le tableau 07.



Figure(II.20) : Onduleur PUC triphasé



Figure(II.21) : Séquences de fonctionnement d'un bras du convertisseur PUC

II.3.2.2 Commande utilisée

La commande consiste à utiliser la commande MLI pour un bras monophasé Figure(II.22). Cette méthode de commande permet de contrôler séparément les trois bras de l'onduleur. L'inconvénient majeur est la nécessité de l'utilisation de trois sources de tension distinctes. Un autre inconvénient important est que cette commande ne permet pas de corriger parfaitement le déséquilibre de la charge.

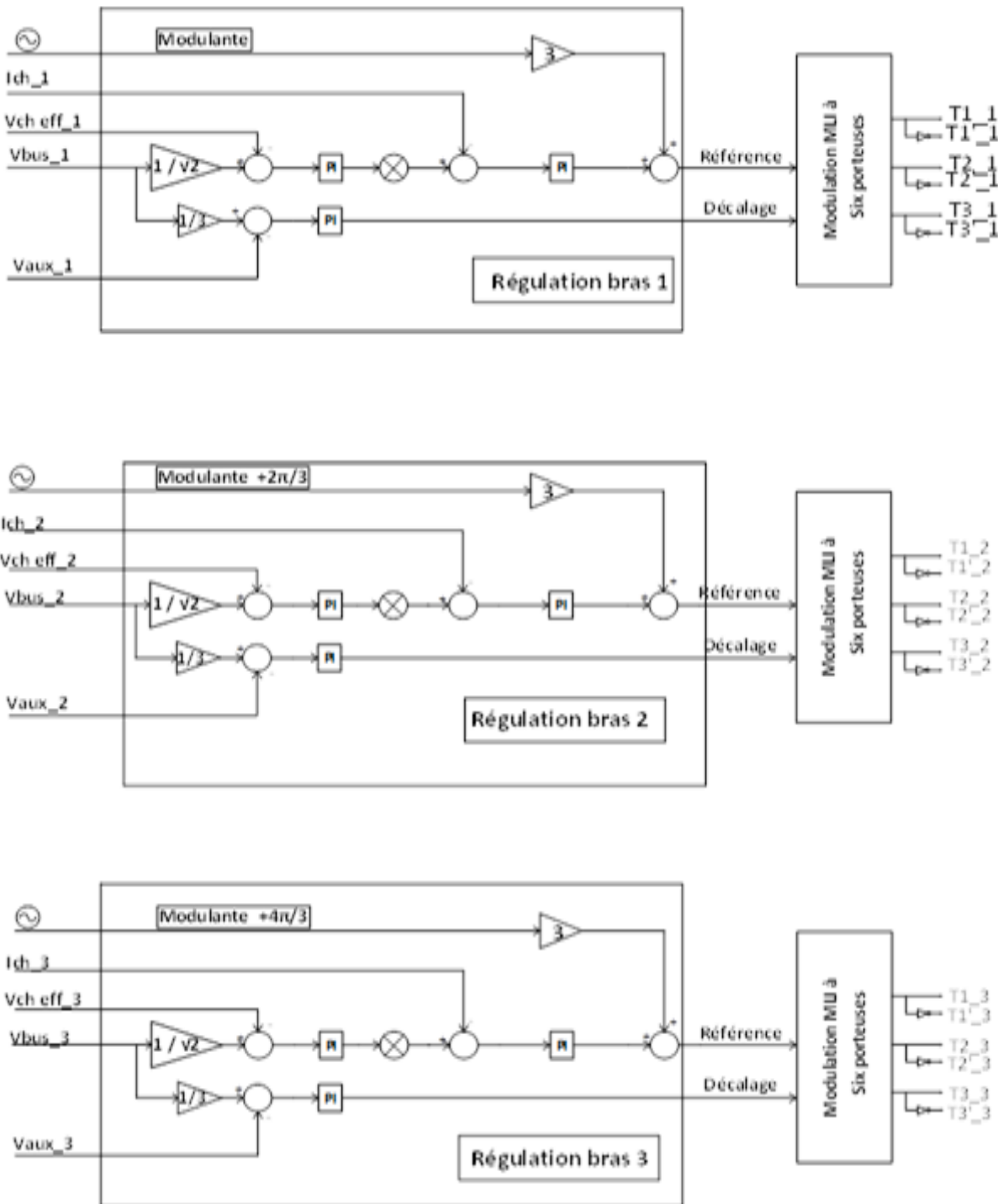


Figure (II.22) : Commande MLI de l'onduleur PUC triphasé

II.3.2.3 Résultats

Les résultats obtenus montrent qu'en régime permanent (avec charge fixe non déséquilibrée), les formes des courants et des tensions coté réseau sont sinusoïdaux, les taux de distorsion harmonique sont de 12% pour la tension et de 7% pour le courant. Les tensions aux bornes des condensateurs sont régulées autour des valeurs souhaitées (figure II.25). Le signal de la tension (Phase-neutre) est réparti sur 7 niveaux, mais il est remarquable que le niveau supérieur contient moins de commutations que le niveau inférieur du signal. Le signal (Phase-phase) est reparti sur 13 niveaux comme le montre le graphe de la figure 24

Tableau (II.9): Paramètres de simulation de l'onduleur PUC triphasé

Tension de source (par phase)	120 V
Résistance de la charge	15 Ohm
Inductance de la charge	8 mH
Condensateur Bus	4000 uF
Fréquence de commutation	10 kHz

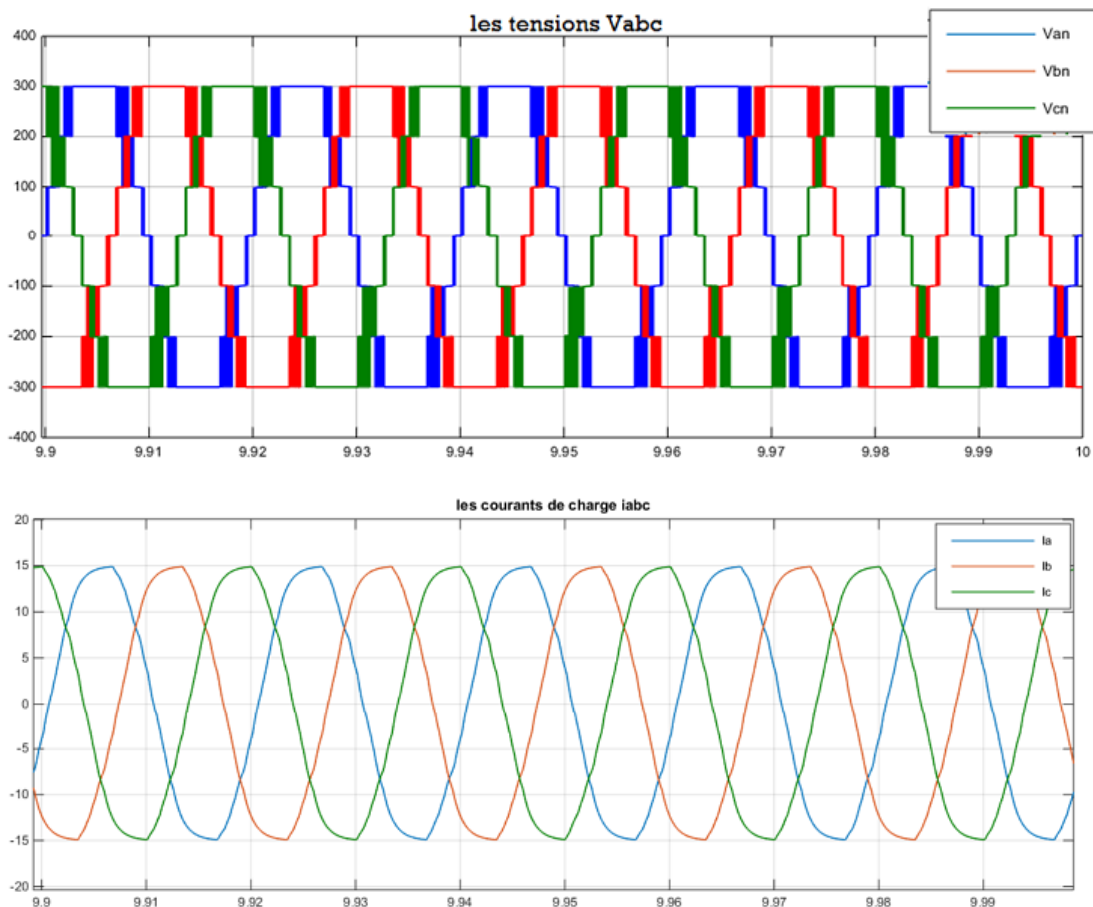


Figure (II.23) : Tensions et courants de la charge

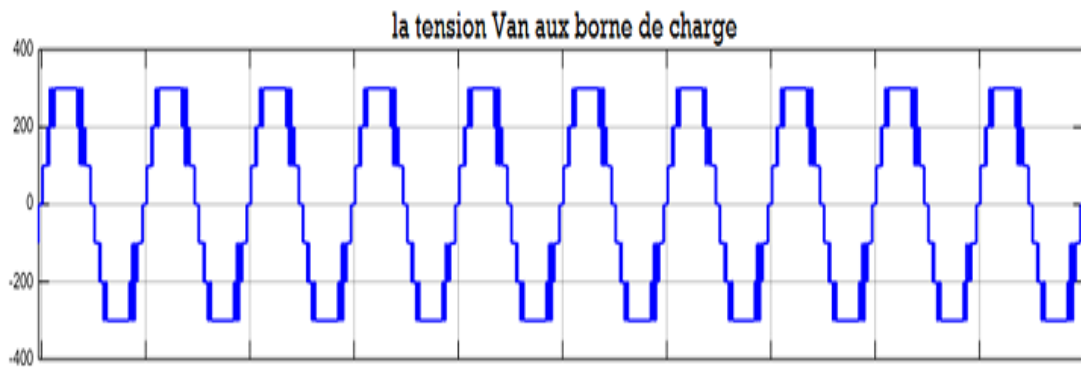


Figure (II.24) : Tension phase-phase

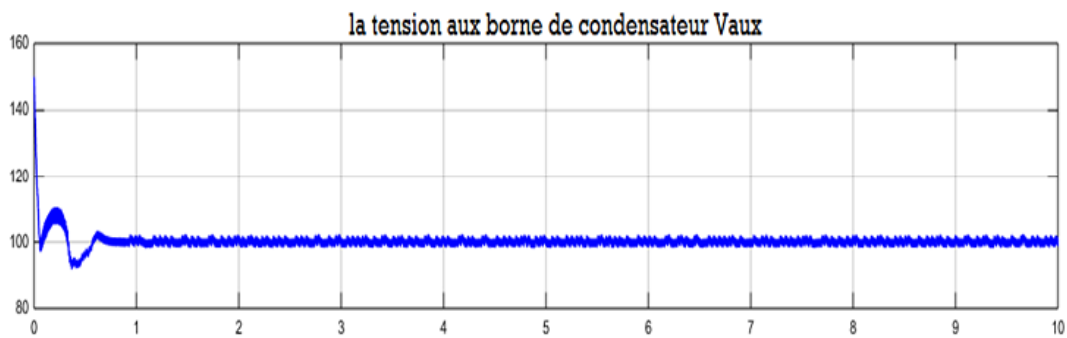


Figure (II.25) : Tension aux bornes du condensateur C1

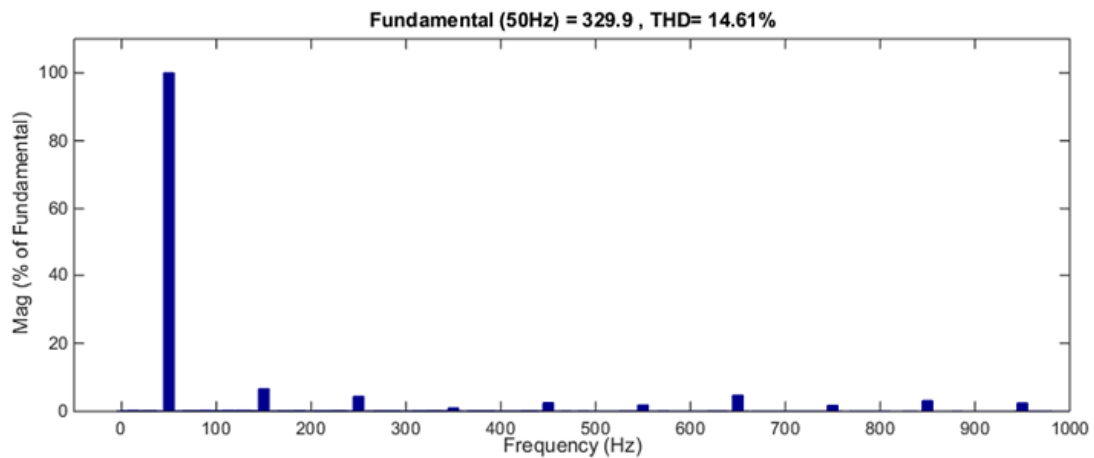


Figure (II.26): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge

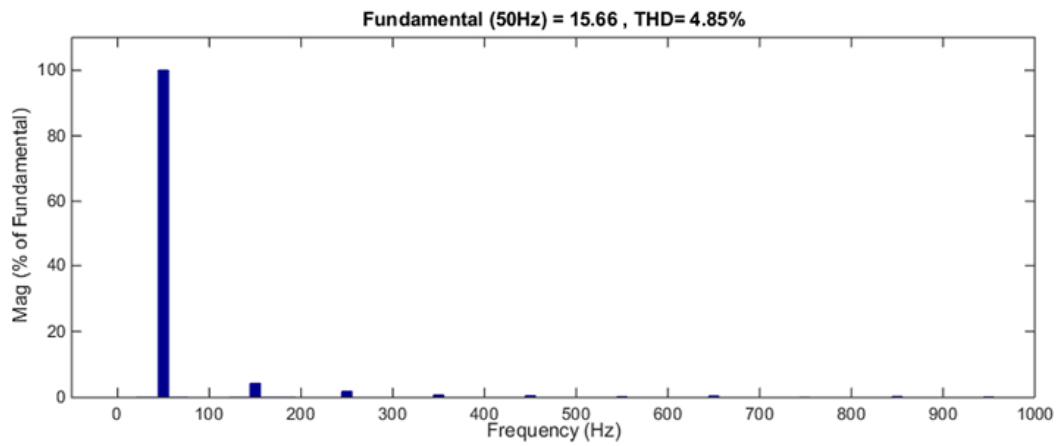


Figure (II.27) : Taux de distorsion harmonique du courant de charge

II.4 Conclusion

L'utilisation de ce convertisseur en triphasé est beaucoup plus compliqué que son utilisation en monophasé. Cela est dû principalement à la non-bidirectionnalité de ce convertisseur, ce qui fait que les commandes de contrôle pour ces topologies doivent être précises, robustes et complexes.

Chapitre III

COMMANDE LINEAIRE D'UN FILTRE ACTIF SERIE

Introduction

La qualité d'énergie dépend des charges et de leurs sensibilités aux variations de la tension, les charges étant de plus en plus sophistiquées, les perturbations de tension deviennent très coûteuses pour les industriels en termes de perte de production, de frais de mains d'œuvres, de pertes en matières premières et d'avarie de matériels. Ce chapitre est consacré à l'étude détaillée du filtre actif de puissance série à structure tension connecte en série avec le réseau électrique. Ce chapitre est composé de trois parties : La première partie du chapitre décrit le principe de fonctionnement d'un FAS et leur Topologie, la deuxième partie décrit les principaux éléments qui constituent notre système ou structure électrotechnique et leurs caractéristiques. La troisième partie traite deux méthodes d'identification des tensions de références[5].

III.1 Mise en œuvre

Le filtre active série (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, des équilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes.

En 1976, une famille de filtres actifs séries avec onduleurs à transistors contrôlés en MLI a été présentée. Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985. La génération, par l'onduleur à thyristors, des composantes non désirées, ayant une faible fréquence de commutation, a découragé l'avancement pratique de cette solution.

En 1990, un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension du réseau électrique. Depuis, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation du déséquilibre de la tension du réseau. D'autres articles ont introduit le problème des creux de tension et la solution de compensation par le compensateur actif série[5].

III.2 Topologie générale d'un filtre actif série

La Figure (III.1) donne la structure générale du filtre actif série, laquelle se présente sous la forme de deux blocs : et la partie puissance partie contrôle-commande. La partie puissance est constituée d'un :

· Onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle[5],

- Filtre de sortie.
- Alimentation à courant continu.

La partie contrôle-commande est constituée par :

- la méthode d'identification des tensions perturbées,
- système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification,
- la régulation de la tension injectée sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- la commande de l'onduleur de tension.



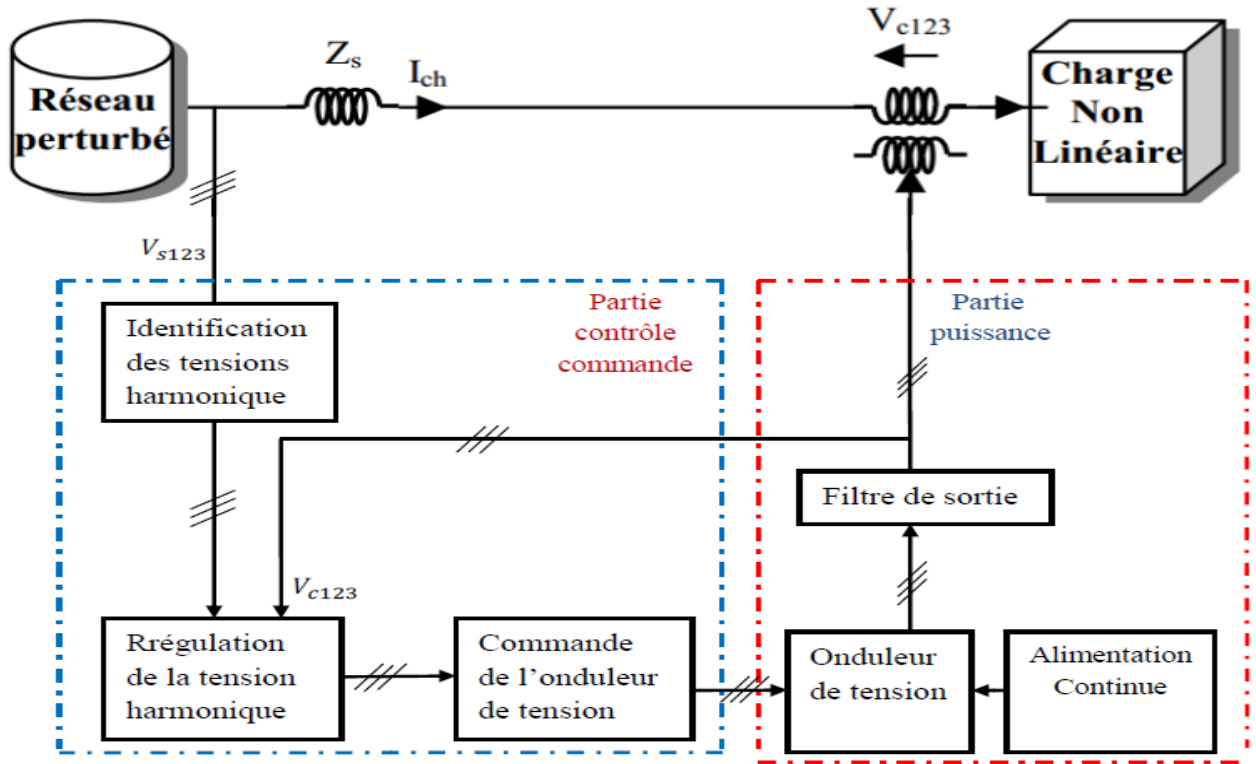


Figure III.1 Structure générale du filtre actif série.

III.3 Principe de fonctionnement

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la Figure (III.2), comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale. Pour ce faire, il faut premièrement identifier les tensions de source (v_{s1} , v_{s2} , v_{s3}) pour pouvoir connaître les tensions harmoniques (v_{c1} , v_{c2} , v_{c3}) qu'il faut ajouter pour avoir la tension de la charge sinusoïdale (v_{ch1} , v_{ch2} , v_{ch3})[11].

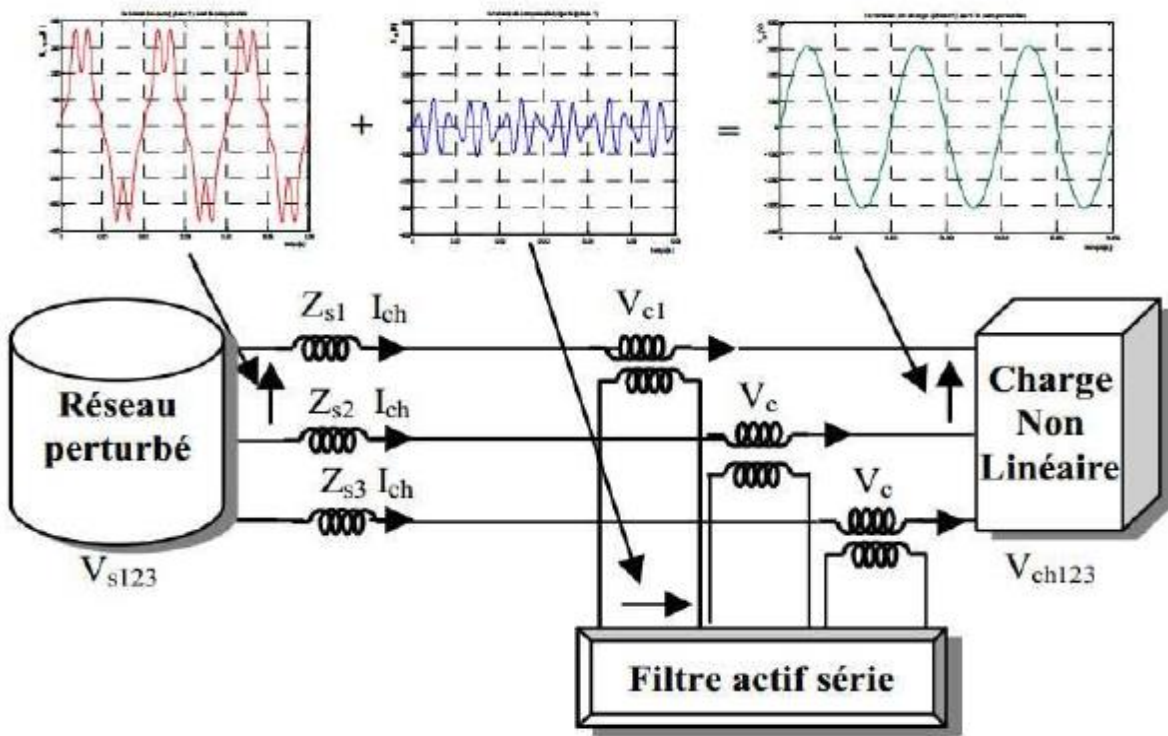


Figure III.2 Principe du filtrage actif série de puissance

III.4 Etude de la partie puissance

III.4.1 Modélisation de réseaux électrique

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court-circuit. D’où la représentation du réseau par un système de tensions triphasées équilibrées en série avec une impédance, figure (III.3).

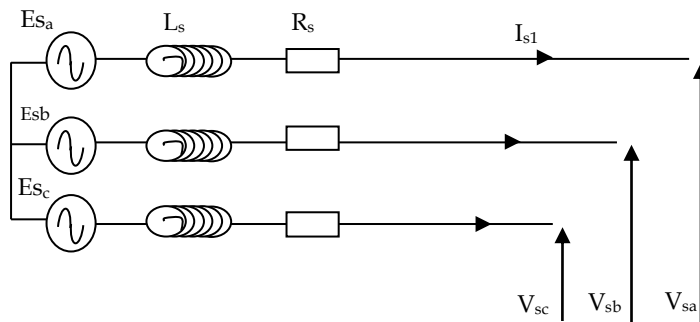


Figure III.3 réseau électrique triphasé

Les tensions du réseau électrique sont données par :

$$E_{sa} = V_{\max} \sin (\omega t)$$

$$E_{sa} = V_{\max} \sin (\omega t - 2\pi/3) \tag{III.1}$$

$$E_{sa} = V_{\max} \sin (\omega t + 2\pi/3)$$

et $\omega t = 2\pi f$, $V_{max} = \sqrt{2}V_{eff}$

Avec : V_{max} : Tension max du réseau
 V_{eff} : La valeur efficace du réseau
 ω : Pulsation du réseau

III.4.2 Modélisation de la charge polluante

La charge polluante est un redresseur de tension triphasé a diodes, connectée au réseau par l'intermédiaire d'une impédance de ligne (L,Rl), et alimentant une charge inductive (Ld,Rd) cote continu, figure (III.4)[3].

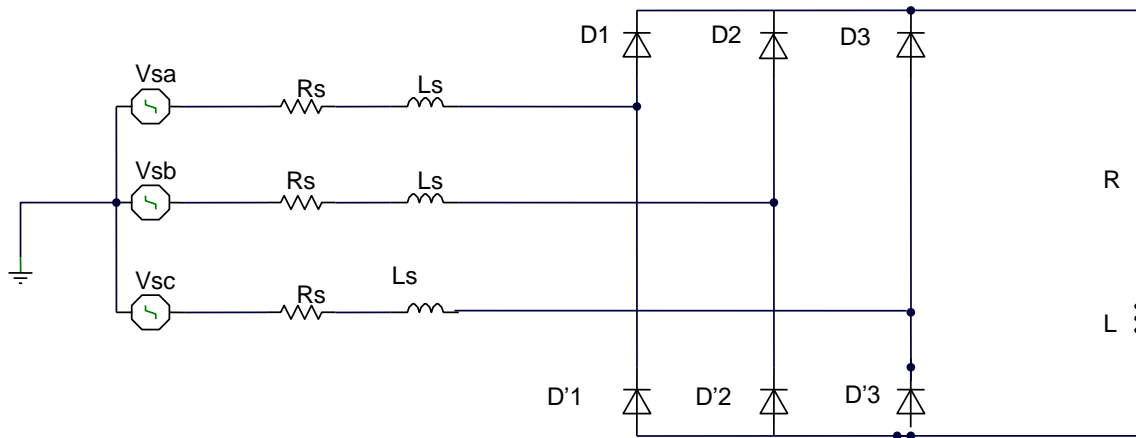


Figure III.4 Redresseur triphasé en pont alimentant une charge RL

Pour simplifier le calcul, on suppose que le redresseur est idéal et l'empiètement est nul (deux diodes de même bras ne peuvent pas conduire simultanément)[3]. Lorsque D1 conduit, l'une de deux diodes D2 ' et D3 ' conduit également. Il en vient que D1 conduit lorsque Vsa est supérieure à Vsb et Vsc , ou encore :

$$V_{sa} = \text{Max} (V_{sj}) ; j = a, b, c \tag{III.2}$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

$$D_i' \text{ conduit si } V_{si} = \text{Max} (V_{sj}) ; i = 1, 2, 3 ; j = a, b, c \tag{III.3}$$

$$D_i \text{ conduit si } V_{si} = \text{Min} (V_{sj}) ; i = 1, 2, 3 ; j = a, b, c$$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension Ud a la sortie du redresseur est donnée par :

$$U_d = \text{Max} (V_{sj}) - \text{Min} (V_{sj}) ; j = a, b, c \tag{III.4}$$

A partir de la relation (I.4), on peut définir la valeur moyenne de la tension redressée par :

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{max} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{2} V_{eff} \tag{III.5}$$

La figure (III.5) représente la tension Ud a la sortie du redresseur avec la tension triphasée au point de connexion du redresseur.

En supposant que le courant redresse id est parfaitement filtre et constant, on a :

$$i_{sa} = i_d \text{ pour } \frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{6} \tag{III.6}$$



Donc :
$$i_{saeff} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} i_d^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (III.7)$$

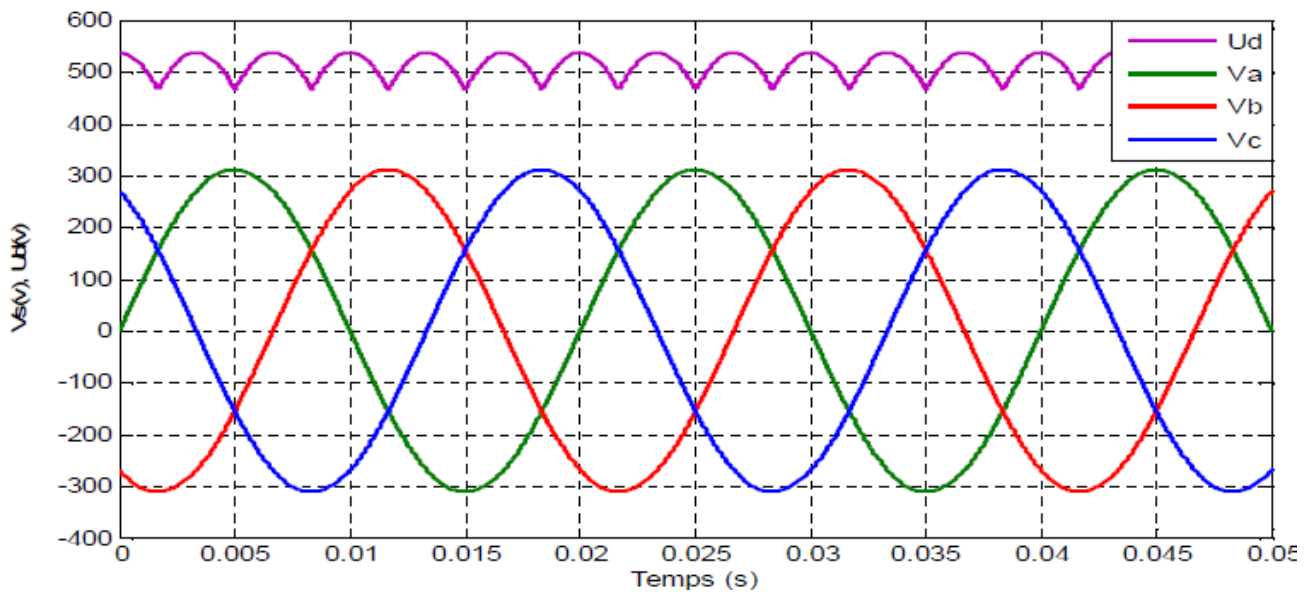


Figure III.5 Tension redressée et tensions triphasées au point de connexion du redresseur

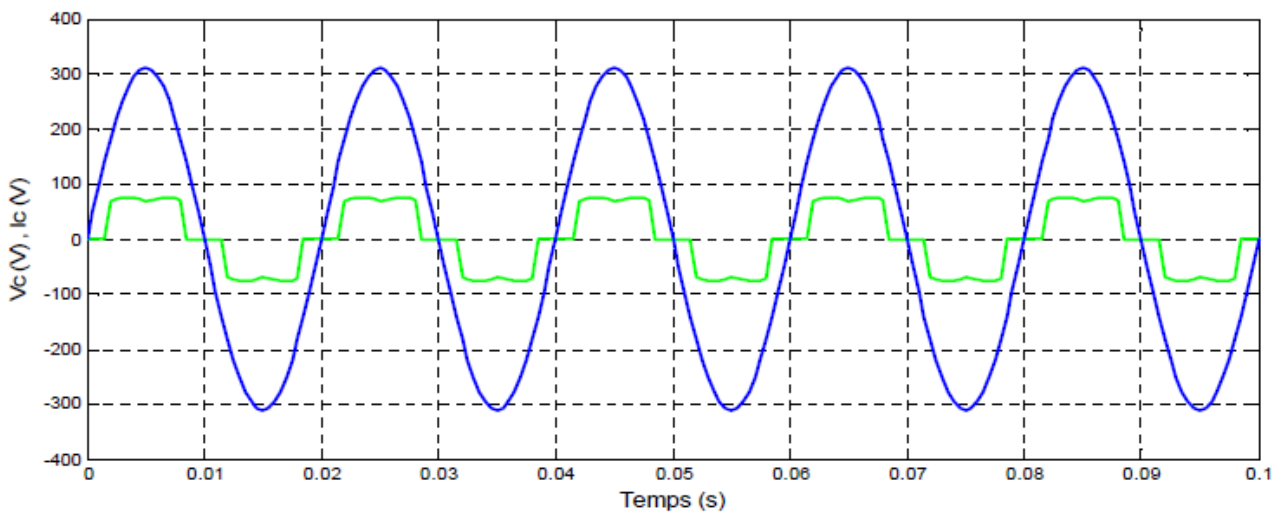


Figure III.6 Courant et tension de la charge de la première phase

La figure (III.6) montre le courant et la tension de la charge polluante et la figure (III.7) représente l'analyse spectrale de ce courant. La valeur THD est de 25.85%.

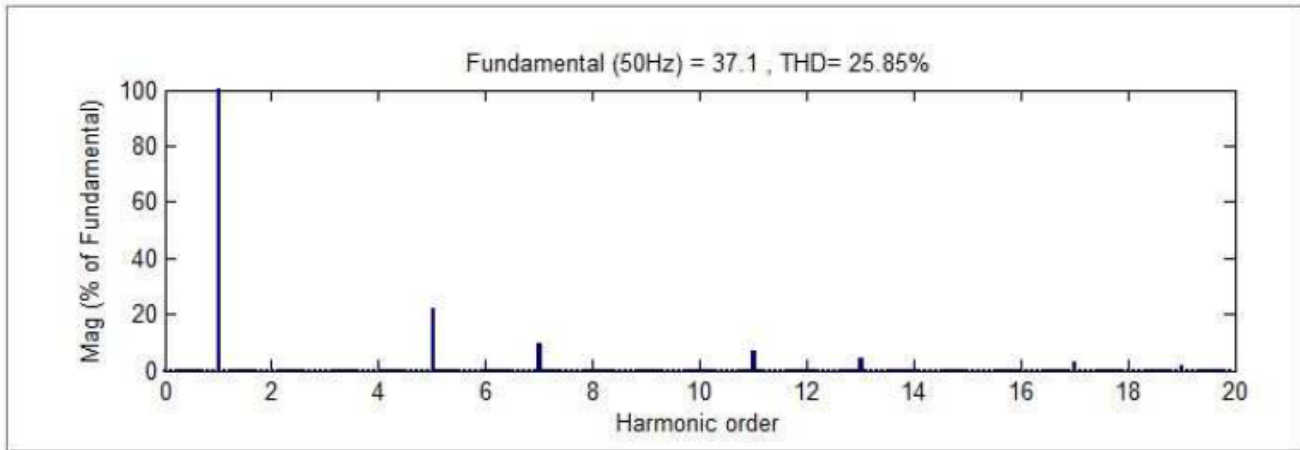


Figure III.7 Spectre harmonique du courant de la charge

III.4.3 Transformateur d'injection :

En général, comme il est illustre sur la Figure (III.8), on utilise un transformateur de couplage ou d'injection de tension pour raccorder le compensateur actif série au réseau.

L'avantage principal de l'utilisation du transformateur est qu'il permet de raccorder les compensateurs à des tensions supérieures, tout en assurant l'isolation galvanique par rapport à la partie haute tension. Egalement, ils permettent d'injection en série avec le réseau électrique et avec le taux de transformation souhaite la tension produite par l'onduleur. Pour notre cas, trois transformateurs d'injection de tension seront utilisés avec un taux de transformation unitaire. Ces transformateurs doivent être capables à supporter le courant de la charge à protéger et la tension maximale injectée au réseau électrique[10][11].

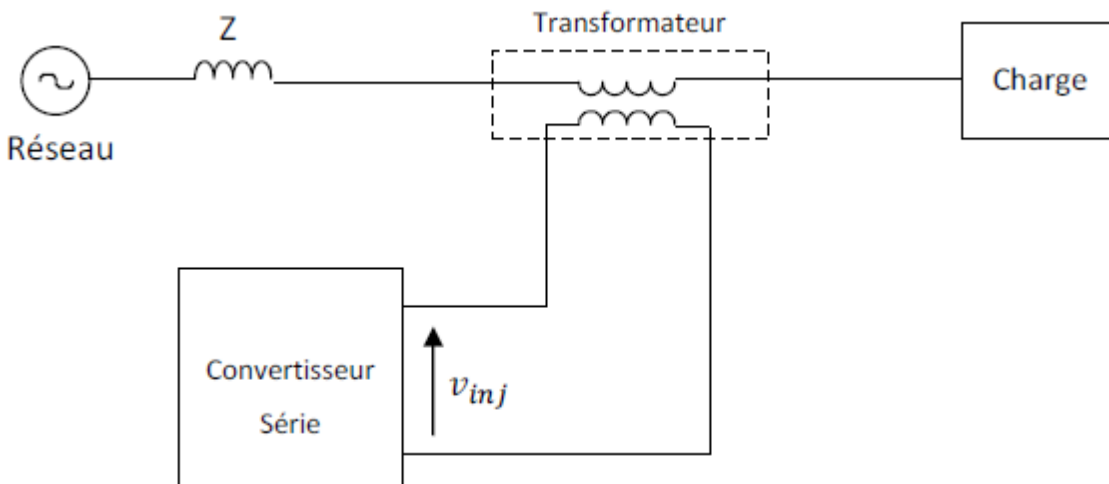


Figure III.8 Raccordement du compensateur par transformateur de couplage

III.5 Etude de la partie commande :

III.5.1 Identification des harmoniques :

Le but du filtrage est de compenser les harmoniques produits dans les réseaux électriques par des charges non linéaires, et de rendre les signaux de courant et de tension du réseau à la forme sinusoïdale. La première étape dans le filtrage est la détection des harmoniques à éliminer dans le but de les injecter dans le réseau électrique. Une bonne détection assure une bonne compensation des harmoniques, et cela permet d'améliorer la

qualité du signal du réseau. Plusieurs méthodes d'identification ont déjà été proposées dans la littérature, elles peuvent être regroupées en deux familles d'approche.

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant ou de la tension. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Les inconvénients les plus importants de cette méthode sont des résultats moyens en régime transitoire et un volume de calcul et une allocation de mémoire très considérable[11].

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes précédentes. Récemment, de nouvelles méthodes d'identification ont été présentées pour donner le choix de compenser un, plusieurs ou voire même tous les types de perturbations. La méthode de détection synchrone qui repose sur la transformée de Park, a été proposée. Elle exige une précision parfaite du calcul de pulsation fondamentale afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés. Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées[11].

III.5.2 Identification des tensions harmoniques du FAS :

La méthode d'identification sert à calculer les tensions perturbatrices qui sont injectées par l'onduleur, en opposition de phase, pour dépolluer la tension aux bornes de la charge à protéger. Ces tensions perturbatrices représentent les tensions déséquilibrées et harmoniques, et les creux de tension. Dans ce cas, les méthodes d'identification des tensions perturbatrices sont constituées de deux parties, partie d'extraction des harmoniques qui est propre à chaque méthode et une autre commune à toutes les méthodes, chargée de calculer la chute de tension aux bornes de la charge en cas de creux ou déséquilibre de tension.

III.5.2.1 Méthode des puissances active et réactive instantanées (PQ) :

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation (III.8) :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{III.8})$$

La méthode des puissances instantanées a été introduite par H. Akagi. Son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne, à un système biphasé (α - β) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. Ensuite, pour déterminer les tensions harmoniques de la charge, la composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Dans la méthode classique des puissances instantanées, on utilise généralement, soit un filtre passe-haut, soit un filtre passe-bas afin de ne garder que la composante harmonique du signal. Le schéma bloc relatif à cette méthode est représenté par la Figure (III.8)[11].

Notons, respectivement, les tensions simples d'alimentations et les courants de charge d'un système triphasé équilibré par (v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}) et (i_{la}, i_{lb}, i_{lc}) . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système biphasé dont les axes



sont en quadrature. Cette transformation appliquée aux tensions de réseau et aux courants de charge comme aux expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

$$\begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Si on fait coïncider les axes α et β avec les axes réels et imaginaires du plan complexe, les systèmes triphasés des tensions et des courants s'écrivent :

$$\begin{aligned} \text{Et} \quad V_s &= V_{s\alpha} + jV_{s\beta} \\ i_l &= i_{l\alpha} + j i_{l\beta} \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

On n'en déduit que la puissance apparente complexe est:

$$S_l = V_s i_l^* \quad (\text{III.13})$$

Ou i_l^* : Le vecteur conjugué de i_l donc :

$$S_l = (V_{s\alpha} + jV_{s\beta})(i_{l\alpha} - j i_{l\beta}) \quad (\text{III.14})$$

Ce qui donne :

$$S = (V_{s\alpha} i_{l\alpha} + V_{s\beta} i_{l\beta}) + j(V_{s\beta} i_{l\alpha} - V_{s\alpha} i_{l\beta}) \quad (\text{III.15})$$

Par identification avec l'expression :

$$S_l = P_l + jQ_l \quad (\text{III.16})$$

Alors la puissance réelle instantanée peut s'écrire comme suit :

$$P_l = V_{s\alpha} i_{l\alpha} + V_{s\beta} i_{l\beta} \quad (\text{III.17})$$

Et la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire comme suit :

$$Q_l = V_{s\beta} i_{l\alpha} - V_{s\alpha} i_{l\beta} \quad (\text{III.18})$$

Les puissances QL et PL ont une signification plus large que les puissances active et réactive habituelles. En effet, contrairement aux puissances active et réactive, qui ne considèrent que la fréquence fondamentale, les puissances réelle et imaginaire prennent en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on leur donne des autres dénominations (puissance réelle et puissance imaginaire).

A partir des relations et (III. 17), (III. 18) nous pouvons établir la relation matricielle suivante



$$\begin{bmatrix} P_l \\ Q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ V_{s\beta} & -v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{l\alpha} & i_{l\beta} \\ -i_{l\beta} & i_{l\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Dans le cas général, chacune des puissances QL et PL comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$P_l = \bar{P}_l + \tilde{P}_l \quad (\text{III.20})$$

$$Q_l = \bar{Q}_l + \tilde{Q}_l \quad (\text{III.21})$$

Avec : \bar{P}_l et \bar{Q}_l les puissances continues de P_l et Q_l liées aux fondamentales de Vs et il

Et \tilde{P}_l et \tilde{Q}_l : les puissances alternatives de P_l et Q_l liées aux harmoniques de Vs et il

Nous pouvons recalculer les tensions dans le repère stationnaire comme le montre l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{l\alpha} \\ v_{l\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & -i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

$$\text{Avec } \Delta = i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2$$

$$\begin{bmatrix} v_{l\alpha} \\ v_{l\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & -i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{P} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & -i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ Q \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & -i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

Tension active

Tension harmonique

Les tensions harmoniques sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{h\alpha} \\ v_{h\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & -i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

Finalement les tensions perturbatrices de référence dans le repère abc sont données par:

$$\begin{bmatrix} v_{aref} \\ v_{bref} \\ v_{cref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{h\alpha} \\ v_{h\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta v_{la} \\ \Delta v_{lb} \\ \Delta v_{lc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

Ou Δv_{labc} représente la chute de tension aux bornes de la charge

Le schéma de principe permettant l'identification des tensions perturbatrices basée sur la méthode (PQ) est donné par la figure (III.9) :



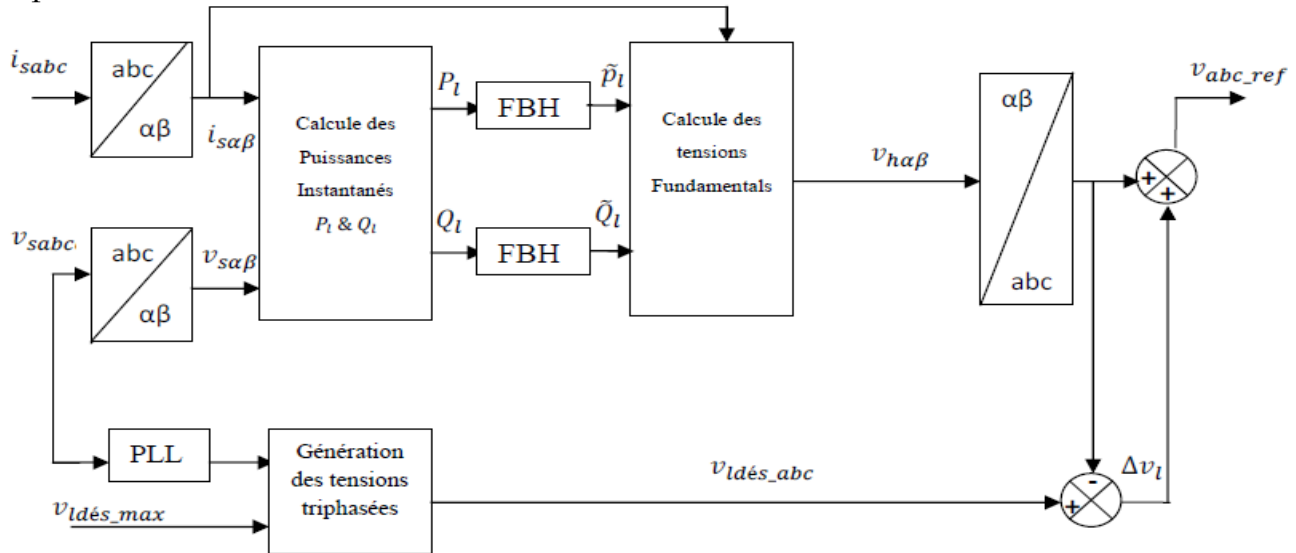


Figure III.9 : Schéma d'identification des tensions perturbatrices par la méthode PQ

Ou $V_{Idés}$ représente la tension désirée aux bornes de la charge, notre cas $V_{Idés} = 300\sqrt{2}$ V

III.5.2.2 Méthode du repère synchrone (SRF) :

Dans cette méthode, la tension de la source est transformée dans le repère synchrone afin d'extraire la composante harmonique. La figure (II.12) représente le schéma de principe de cette méthode. La transformation de Park utilisée est définie comme suit [11]:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \tag{III.26}$$

Ou θ_s qui représente la position angulaire du repère tournant, estimée par la PLL, est une fonction linéaire de la pulsation angulaire. Ce repère de référence tourne à une vitesse constante en synchronisme avec les tensions triphasées.

Le fondamental sera extrait des harmoniques dans le repère synchrone à l'aide d'un filtre passe-bas de deuxième ordre a fréquence de coupure $f_c=25$ Hz, puis avec un soustracteur on obtient les tensions harmoniques suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{ha} \\ v_{hb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{v}_{sa} \\ \tilde{v}_{sb} \end{bmatrix} \tag{III.27}$$

Avec
$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s \\ \sin \theta_s & \cos \theta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{v}_d \\ \tilde{v}_q \end{bmatrix} \tag{III.28}$$

Le schéma de principe permettant l'identification des tensions perturbatrices basée sur la méthode (SRF) est donne par la figure (III.10)

$$\begin{bmatrix} v_{aref} \\ v_{bref} \\ v_{cref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ha} \\ v_{hb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta v_{la} \\ \Delta v_{lb} \\ \Delta v_{lc} \end{bmatrix} \tag{III.29}$$

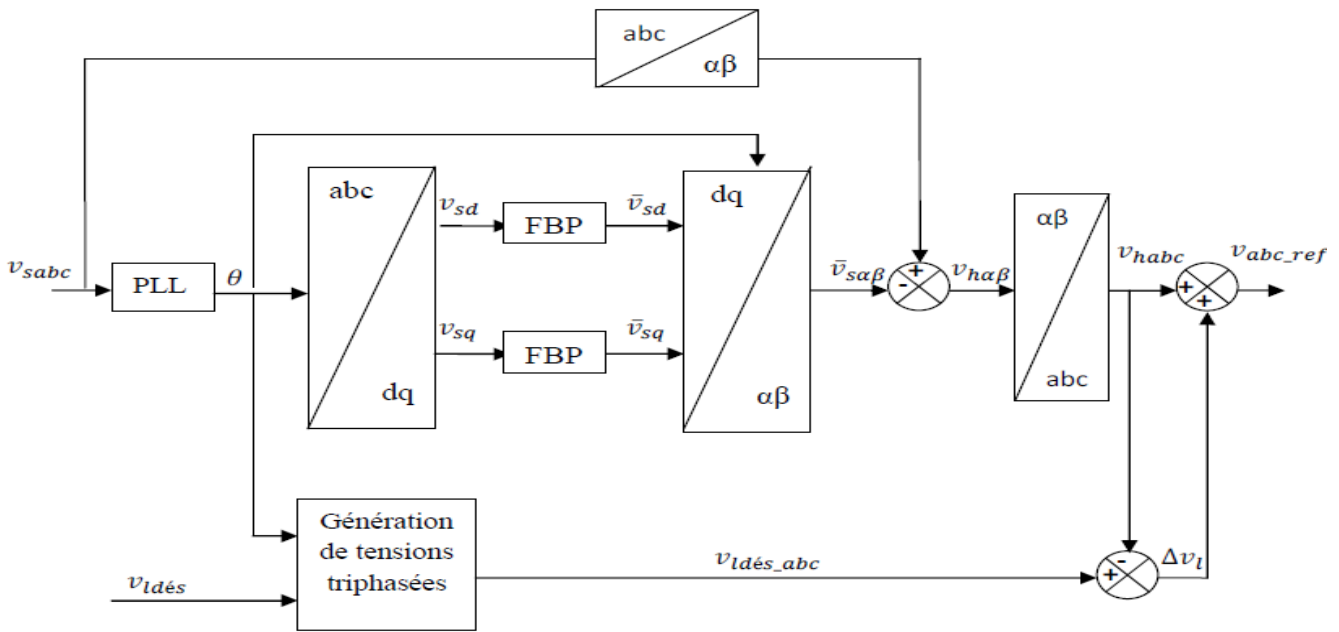


Figure III.10 Schéma d'identification des tensions perturbatrices par la méthode SRF

III.5.3 Système à base de PLL :

La PLL est utilisée pour extraire la phase de la composante fondamentale directe de tension. Son fonctionnement se base sur la transformation de Park dans le repère dq. Les tensions V_{sabc} subissent dans un premier temps la transformation $(\alpha \beta)$. Les tensions ainsi obtenues sont exprimées dans le repère de Park par une rotation. L'angle de cette rotation, issu de l'intégration de l'estimation de la pulsation déterminée par le régulateur, représente l'angle de la composante directe de tension. Nous souhaitons que l'angle de rotation estime soit égal à l'angle réel de la tension directe. Cela peut être réalisé en choisissant la valeur de V_{dref} qui satisfait cette condition [9]. La PLL sera verrouillée lorsque l'angle estime sera égal à la tension directe.

Le schéma du PLL est donné par la figure (III.11)

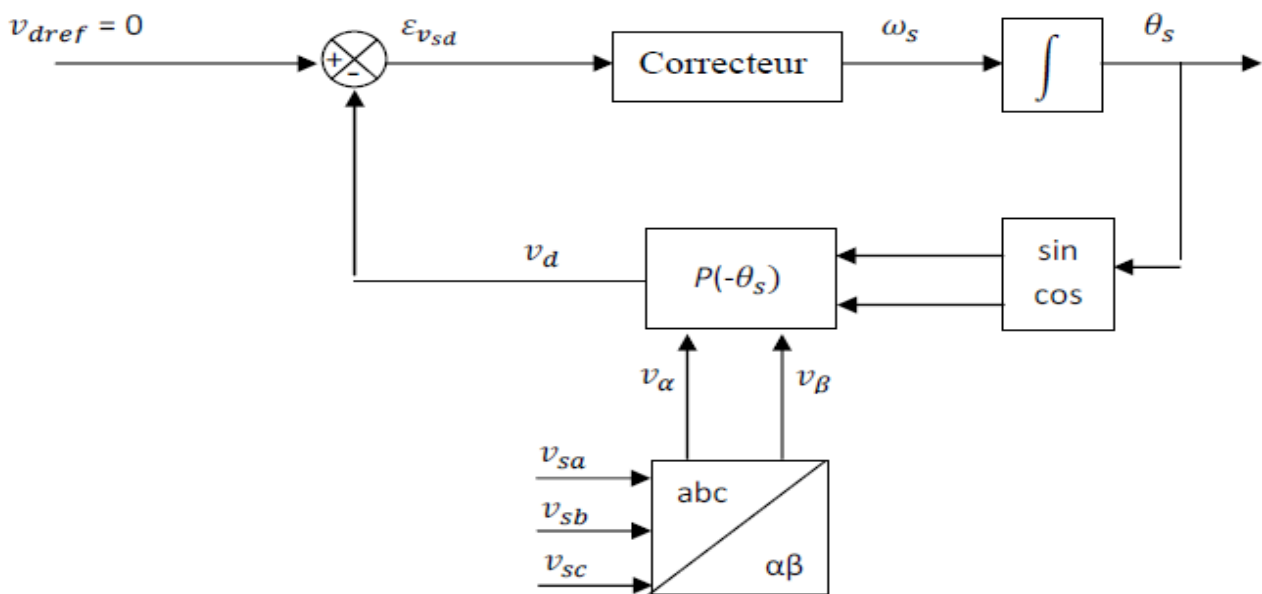
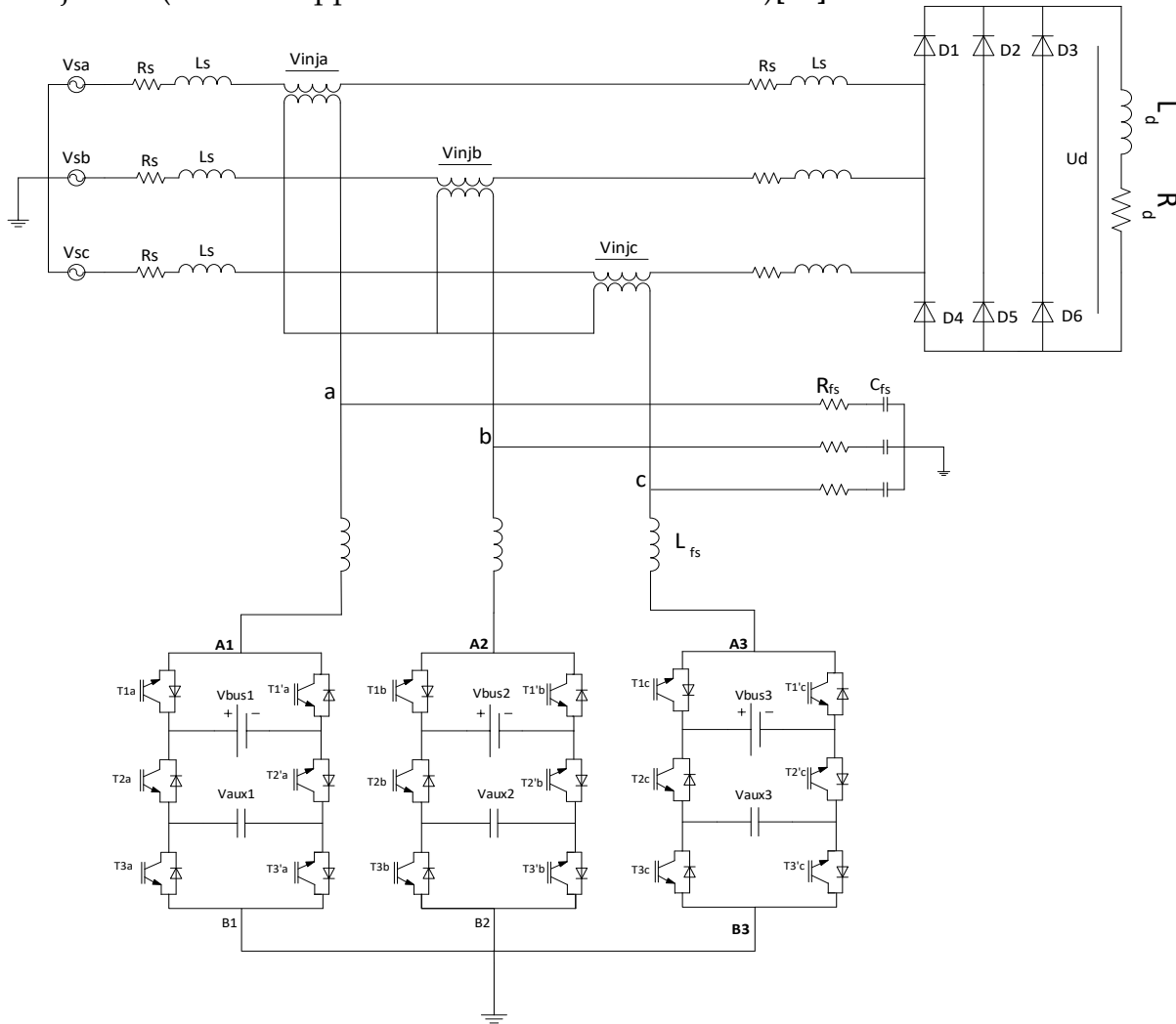


Figure III.11 Structure d'un PLL triphasé

III.6 Modélisation du filtre active série :

La figure (III.12) montre la structure de l'onduleur à 07 niveaux type PUC fonctionnant comme un filtre active série. Ce compensateur série injecte une tension en opposition de phase avec la tension harmonique venant de la source à travers trois transformateurs d'injection (avec un rapport de transformation unitaire)[11]



Figure(III.12) : Structure de puissance du FAS

L'application de la loi de Kirchhoff pour les tensions donne :

$$\begin{aligned}
 L_{fs} \frac{di_{f_{sa}}}{dt} &= -R_{fs} i_{f_{sa}} - v_{inja} + v_{fa} \\
 L_{fs} \frac{di_{f_{sb}}}{dt} &= -R_{fs} i_{f_{sb}} - v_{injb} + v_{fb} \\
 L_{fs} \frac{di_{f_{sc}}}{dt} &= -R_{fs} i_{f_{sc}} - v_{injc} + v_{fc}
 \end{aligned}
 \tag{III.30}$$

Le modèle en courants du FAS dans le repère stationnaire est :

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{f_{sa}}}{dt} &= \frac{-R_{fs} i_{f_{sa}}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}} v_{inja} + \frac{1}{L_{fs}} v_{fa} \\
 \frac{di_{f_{sb}}}{dt} &= \frac{-R_{fs} i_{f_{sb}}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}} v_{injb} + \frac{1}{L_{fs}} v_{fb}
 \end{aligned}
 \tag{III.31}$$



$$\frac{di_{fsc}}{dt} = \frac{-R_{fs}i_{fsc}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}}v_{injc} + \frac{1}{L_{fs}}v_{fc}$$

Le modèle en courants du FAS dans le repère stationnaire est :

$$\begin{aligned}\frac{di_{f\alpha}}{dt} &= \frac{-R_{fs}i_{f\alpha}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}}v_{inja} + \frac{1}{L_{fs}}v_{f\alpha} \\ \frac{di_{f\beta}}{dt} &= \frac{-R_{fs}i_{f\beta}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}}v_{inj\beta} + \frac{1}{L_{fs}}v_{f\beta}\end{aligned}\quad (III.32)$$

Le modèle en courants du FAS dans le repère synchrone est :

$$\begin{aligned}\frac{di_{f\alpha d}}{dt} &= \frac{-R_{fs}i_{f\alpha d}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}}v_{inj\alpha d} + \frac{1}{L_{fs}}v_{f\alpha d} + \omega_s i_{f\alpha q} \\ \frac{di_{f\alpha q}}{dt} &= \frac{-R_{fs}i_{f\alpha q}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}}v_{inj\alpha q} + \frac{1}{L_{fs}}v_{f\alpha q} - \omega_s i_{f\alpha d}\end{aligned}\quad (III.33)$$

Un deuxième modèle s'obtient par l'application de la loi de Kirchhoff pour les courants aux nœuds (a, b et c), comme suit :

$$\begin{aligned}C_{fs} \frac{dv_{inja}}{dt} &= i_{la} + i_{f\alpha} \\ C_{fs} \frac{dv_{inj\beta}}{dt} &= i_{lb} + i_{f\beta} \\ C_{fs} \frac{dv_{inj\gamma}}{dt} &= i_{lc} + i_{f\gamma}\end{aligned}\quad (III.34)$$

Alors le modèle en tensions du FAS dans le repère triphasé est :

$$\begin{aligned}\frac{dv_{inja}}{dt} &= \frac{1}{C_{fs}} i_{la} + \frac{1}{C_{fs}} i_{f\alpha} \\ \frac{dv_{inj\beta}}{dt} &= \frac{1}{C_{fs}} i_{lb} + \frac{1}{C_{fs}} i_{f\beta} \\ \frac{dv_{inj\gamma}}{dt} &= \frac{1}{C_{fs}} i_{lc} + \frac{1}{C_{fs}} i_{f\gamma}\end{aligned}\quad (III.35)$$

Le modèle en tensions du FAS dans le repère synchrone est :

$$\begin{aligned}\frac{dv_{inj\alpha d}}{dt} &= \frac{1}{C_{fs}} i_{l\alpha d} + \frac{1}{C_{fs}} i_{f\alpha d} + \omega_s v_{inj\alpha q} \\ \frac{dv_{inj\alpha q}}{dt} &= \frac{1}{C_{fs}} i_{l\alpha q} + \frac{1}{C_{fs}} i_{f\alpha q} + \omega_s v_{inj\alpha d}\end{aligned}\quad (III.36)$$

Avec $\omega_s = 2\pi f_s$: la pulsation du vecteur de tension v_s

Donc, pour maintenir la tension de la sortie du compensateur actif de puissance autour de sa référence, il existe diverses techniques de commande.



III.6.1 Commande d'onduleur par MLI :

La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre la tension mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe la commande est donnée par la Figure (III.13)[8].

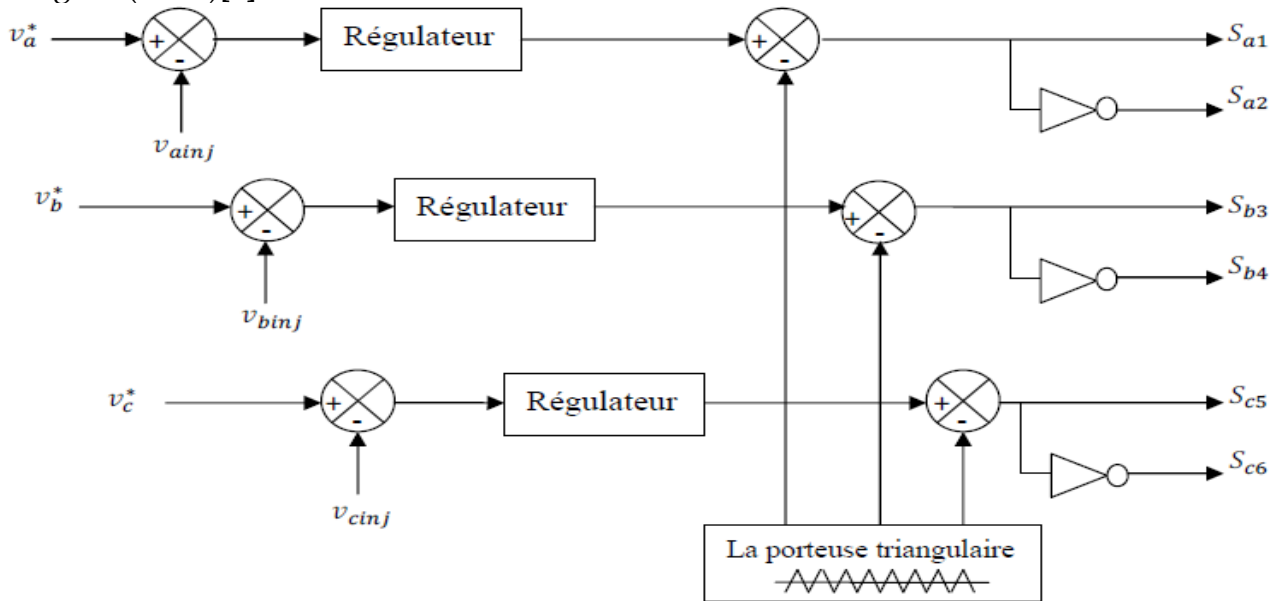


Figure III.13 Principe de contrôle des tensions par MLI

III.6.2 Réglage des tensions :

Dans le cas de la commande linéaire du FAS, le correcteur PID est le plus approprié pour le réglage des tensions injectées. Le schéma de la boucle de régulation des tensions injectées par ce régulateur est illustré par la figure (III.14)

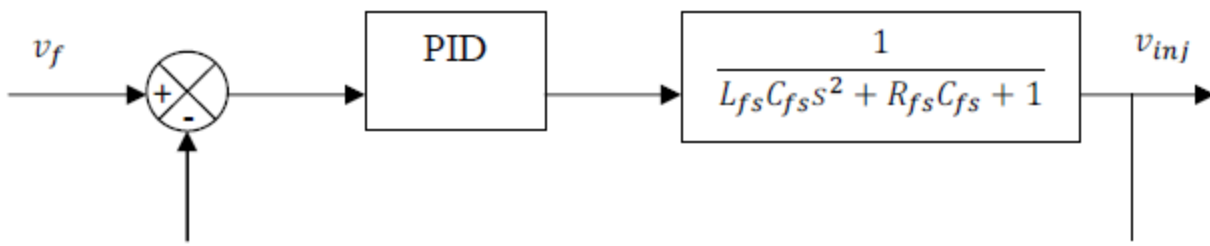


Figure III.14 Schéma de la boucle de régulation des tensions du FAS

La fonction de transfert du régulateur PID donnée par :

$$H_{PID}(s) = K_p s + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{III.37}$$

Les paramètres du régulateur (k_p, k_i, k_d) ont été choisis pour poursuivre en boucle fermée les références des tensions.

III.7 méthode de Commande du FAS basé sur la méthode PQ :

La figure (III.15) représente le schéma bloc de la commande par MLI de FAS avec identification des perturbations par la méthode PQ :

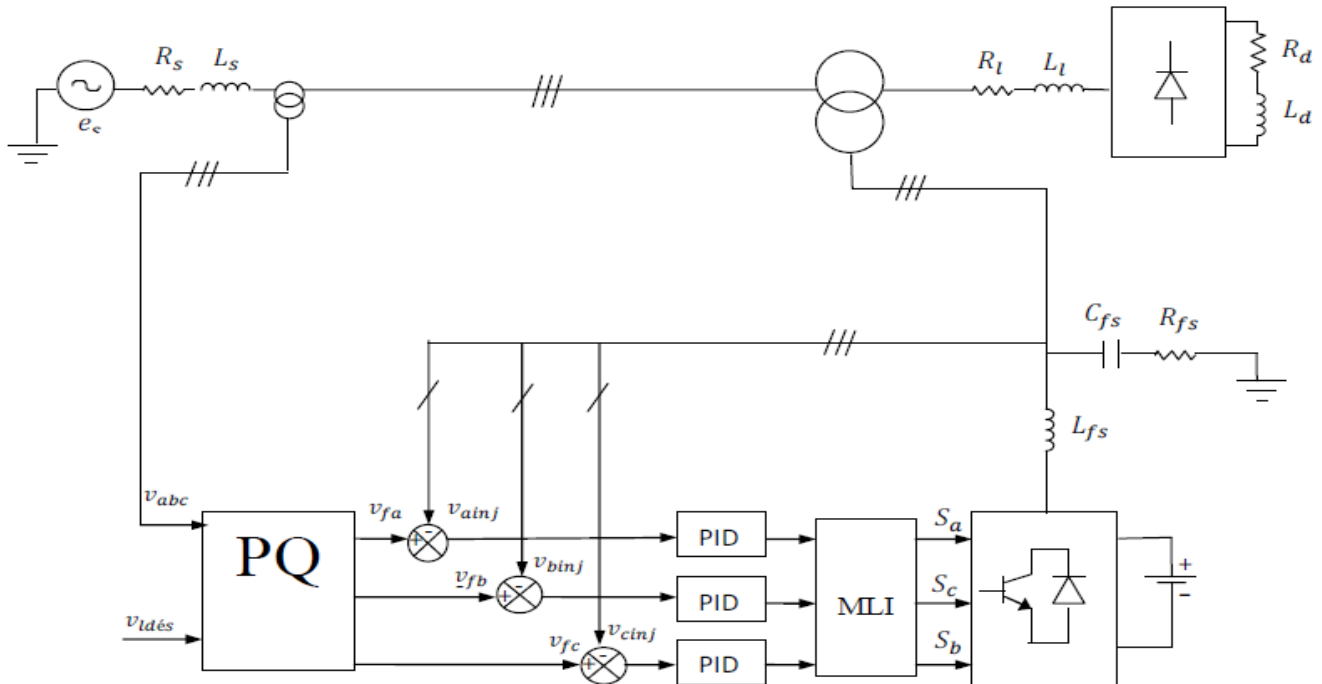


Figure III.15 Schéma bloc de la commande par MLI du FAS avec identification des perturbations par la méthode PQ

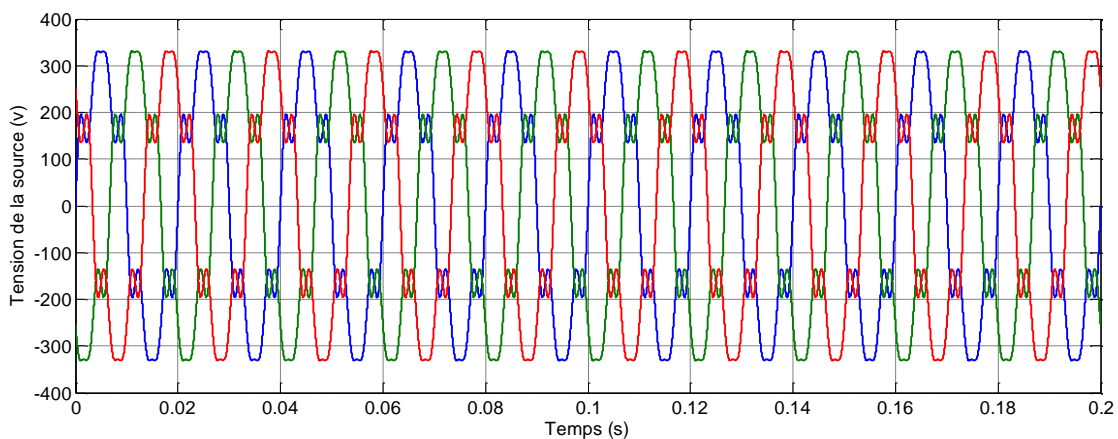
III.7.1 Résultats de simulation

a) Compensation des harmoniques de tension

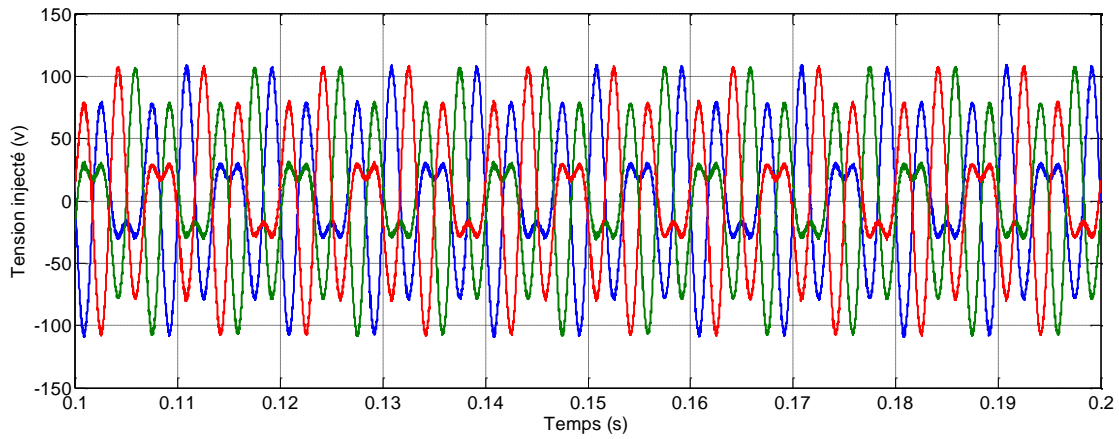
La simulation de la commande par MLI de FAS avec identification des harmoniques par la méthode PQ a été réalisée avec les paramètres suivants :

- La valeur de la tension continue est égale à 900V
- La valeur désirée de la tension de la charge est égale à $V_{ldés} = 300 \sqrt{2}$ V
- Les paramètres des régulateurs de tensions sont : $k_p= 0.3$, $k_i= 10$, $k_d= 3$
- La tension de la source perturbée est définie par le système (III.1).

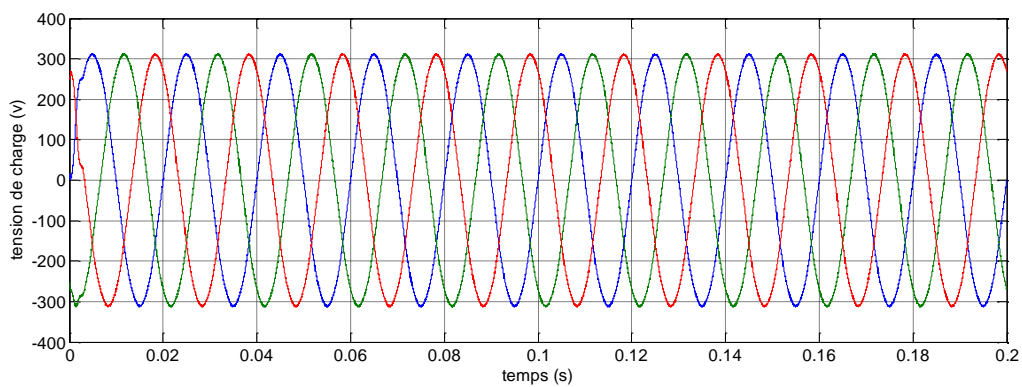
Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation des harmoniques affectant la tension de charge



(a) Tension de source avant le filtrage



(b) Tension injecté



(c) Tension aux bornes de la charge après le Filtrage

Figure III.16 Compensation des harmoniques de tension

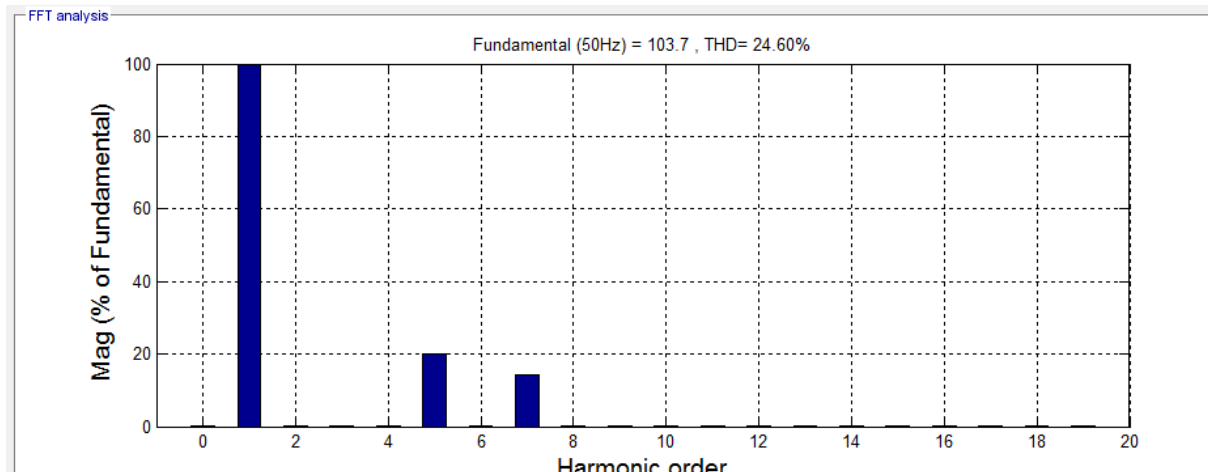


Figure III.17 Spectre d'harmoniques de tension de source

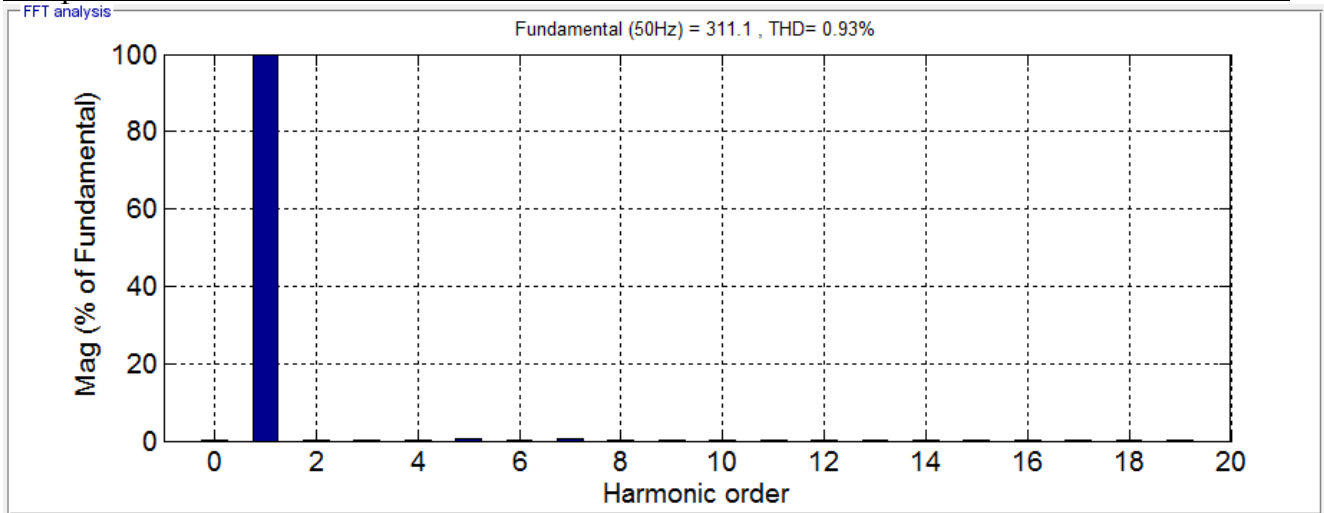
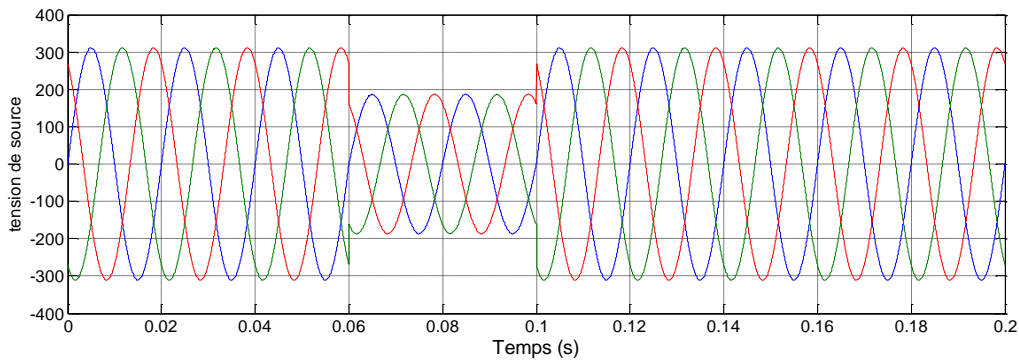


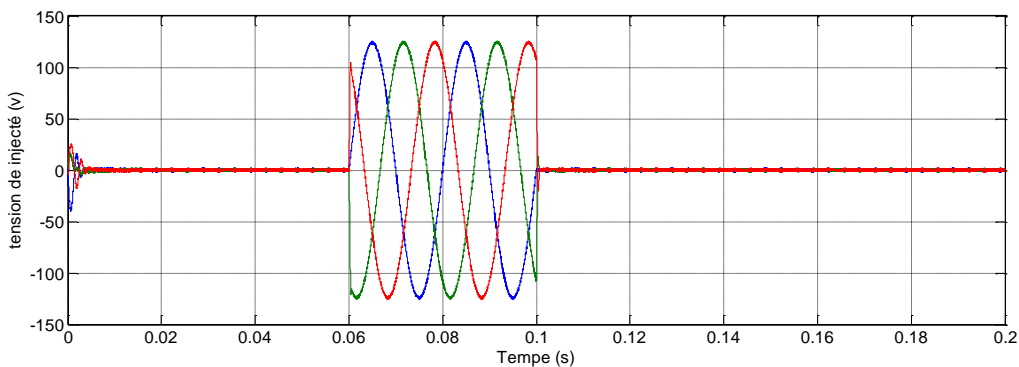
Figure III.18 Spectre d'harmoniques de tension de charge

b) Compensation des creux de tension

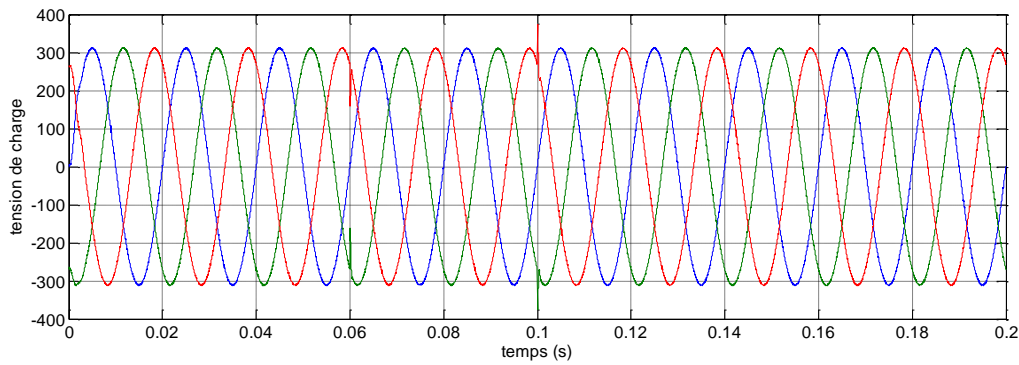
Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation d'un creux de tensions triphasées d'une profondeur de 40% et d'une durée de 40ms :



(a) Tensions de la source lors d'un creux de tension



(b) Tension injecté par le FAS lors d'un creux de tension



(c) Tension aux bornes de la charge après le Filtrage
Figure III.19 Compensation des creux de tension

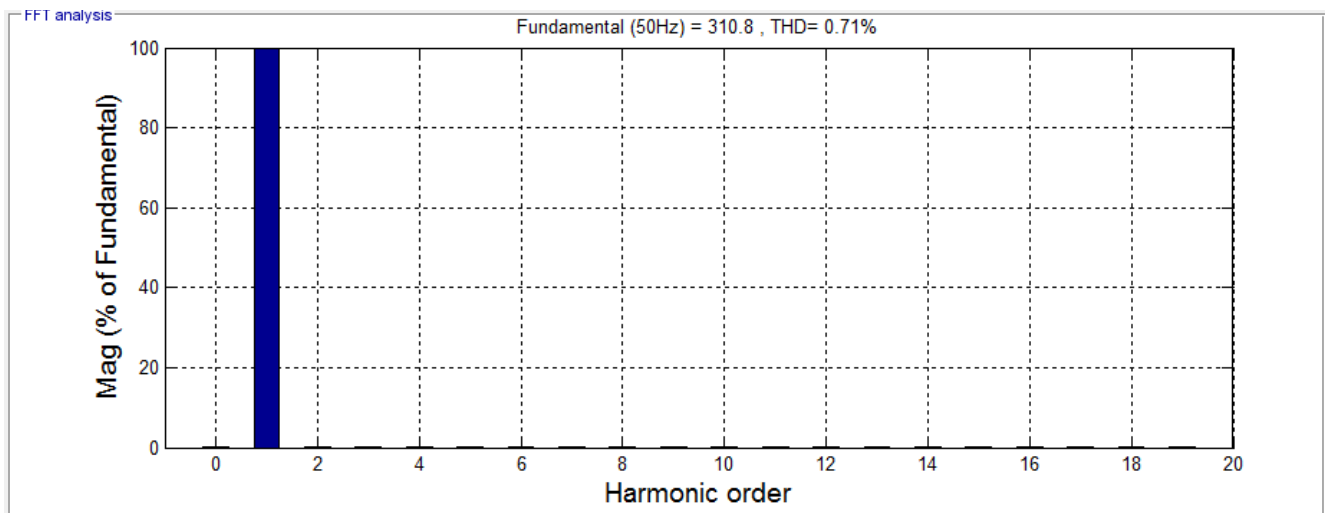
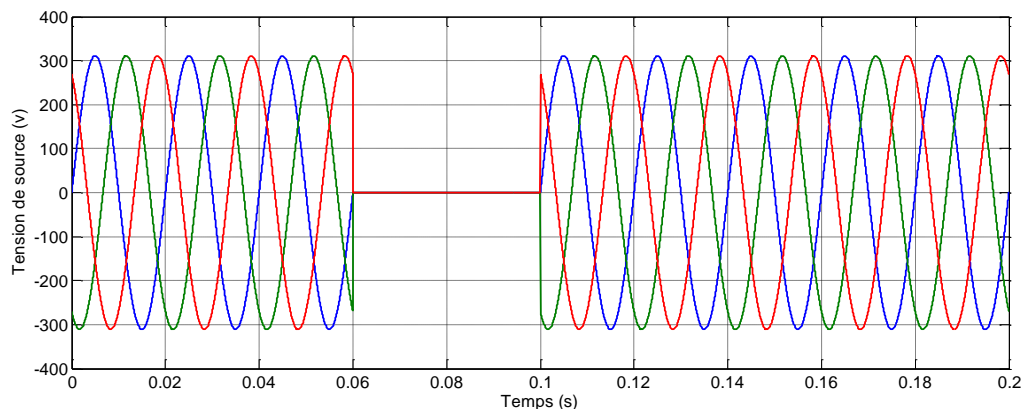


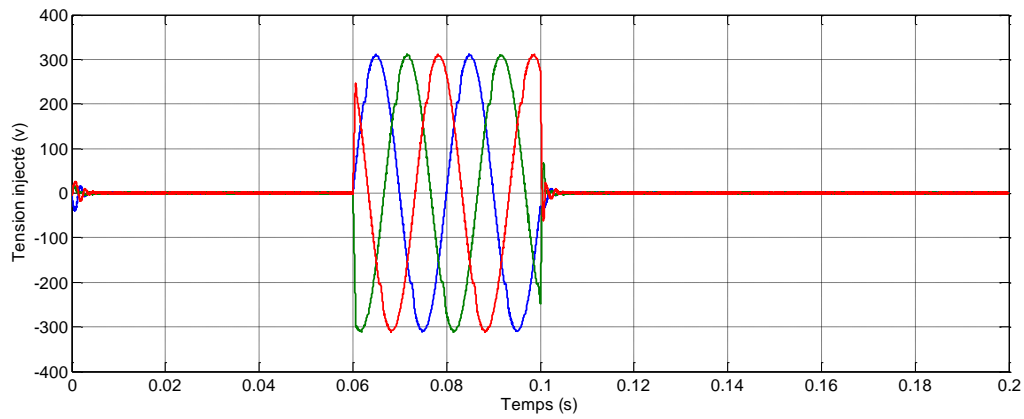
Figure III.20 Spectre d'harmoniques de tension de la charge

c) Compensation des coupeurs de tension

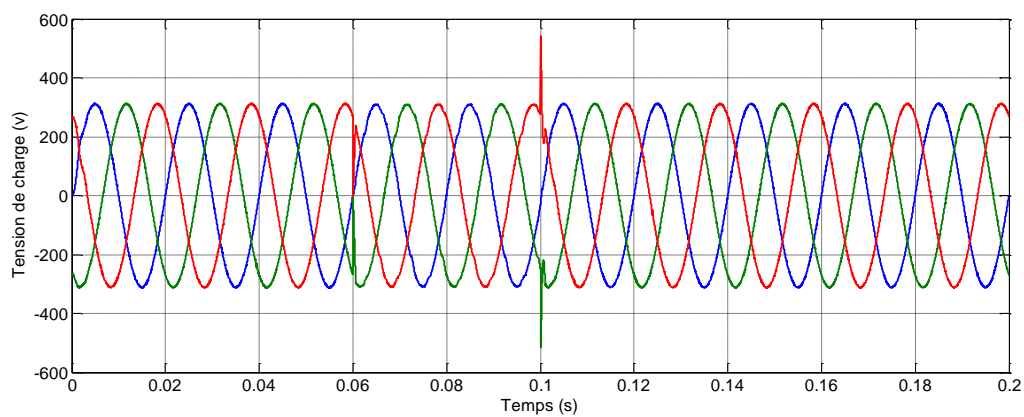
Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation d'un coupeur de tensions triphasées d'une profondeur de 40% et d'une durée de 40ms :



(a) Tensions de la source lors d'un coupeur de tension



(b) Tension injecté par le FAS lors d'un coupure de tension



(c) Tension aux bornes de la charge après le Filtrage
Figure III.21 Compensation des coupures de tension

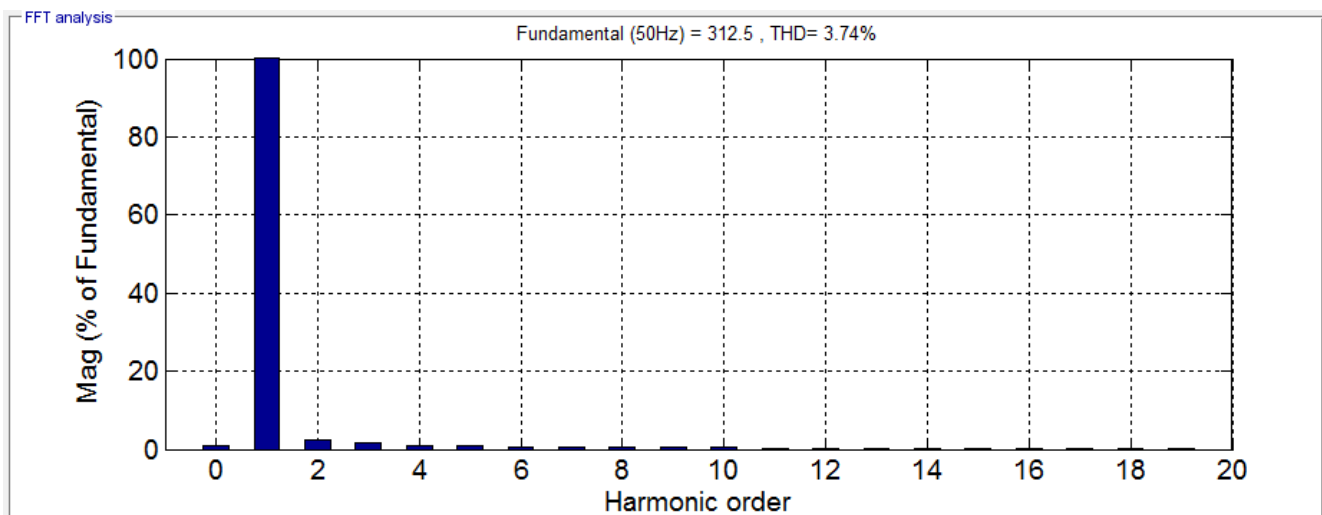
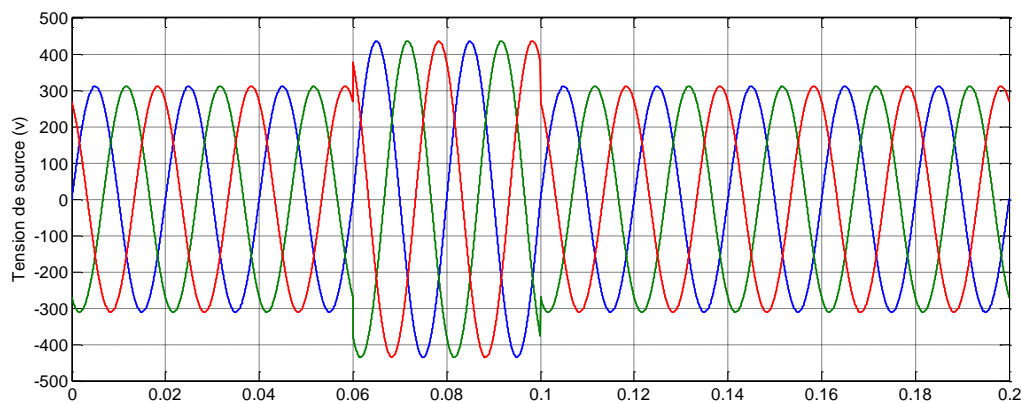


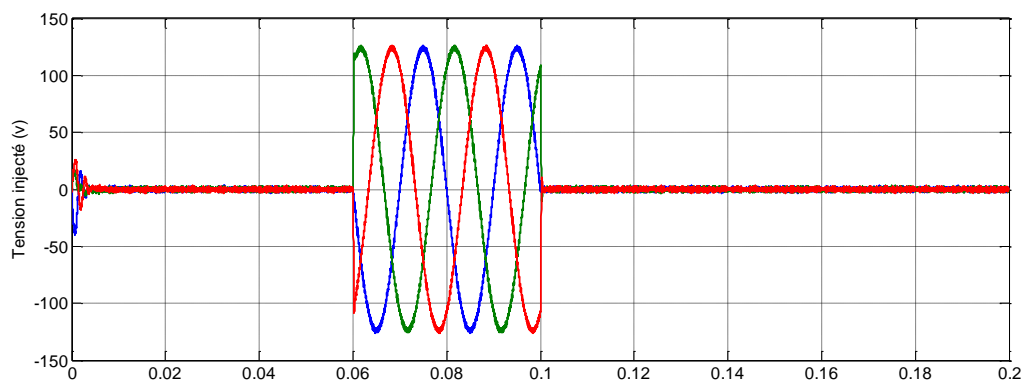
Figure III.22 Spectre d'harmoniques de tension de la charge

d) Compensation des surtensions de tension :

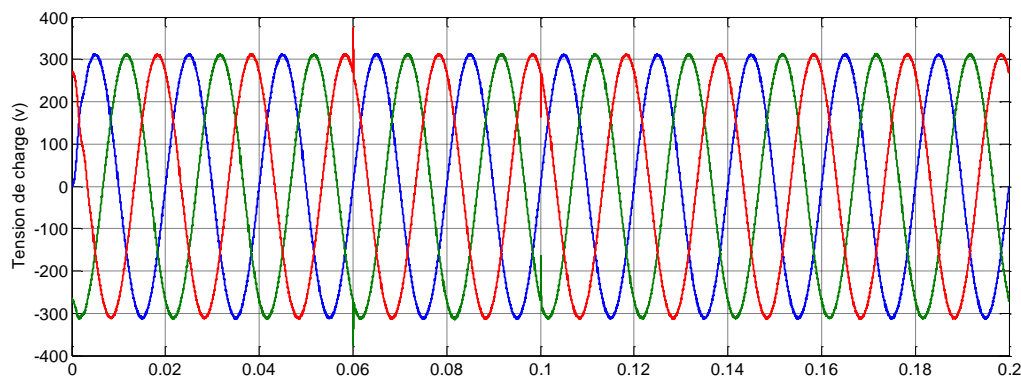
Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation d'une surtension de tensions triphasées d'une profondeur de 40% et d'une durée de 40ms :



(a) Tensions de la source lors d'une surtension de tension



(b) Tension injecté par le FAS lors d'une surtension de tension



(c) Tension aux bornes de la charge après le Filtrage

Figure III.23 Compensation des surtensions de tension

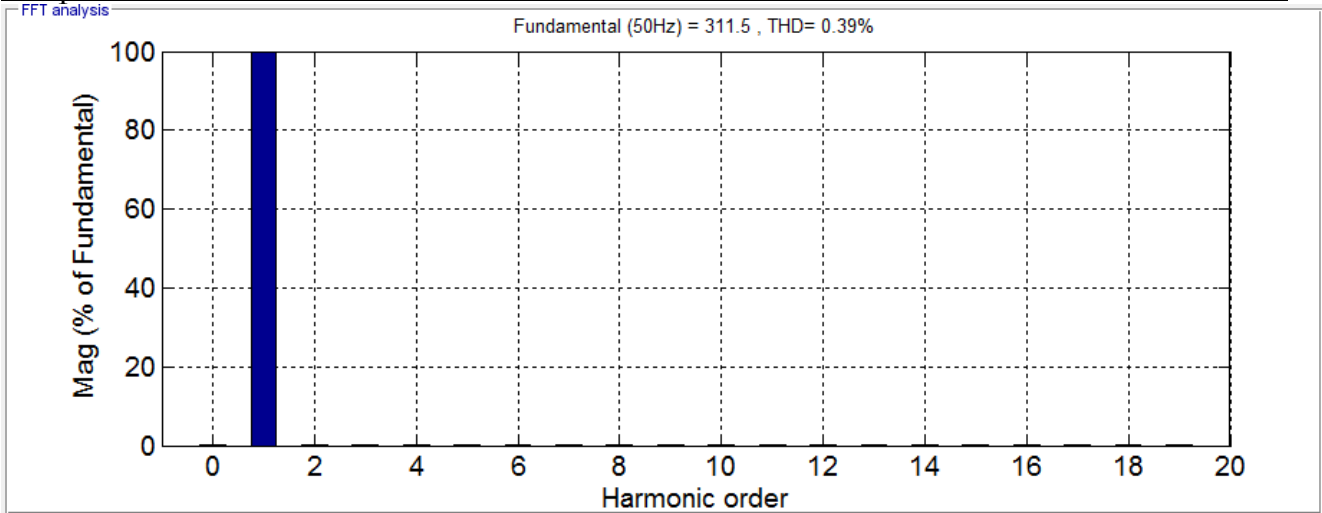


Figure III.24 Spectre d'harmoniques de tension de la charge

III.7.2 Interprétations des résultats :

Selon les résultats obtenus, on enregistre une nette amélioration dans l'allure de la tension de charge, comme illustré dans la figure (III.16.c). Donc, la tension de source a été dépolluée à un niveau assez satisfaisant, ceci est conforté par le spectre harmonique de la figure (III.18), avec un THD de 0.93%.

L'or d'un creux de tension. La tension aux bornes de la charge est toujours sinusoïdale comme illustré La figure (III.19.c), avec un THD de 0.71%.

L'or d'un coupeur de tension. La tension aux bornes de la charge est toujours sinusoïdale comme illustré La figure (III.21.c), avec un THD de 3.74%.

L'or d'une surtension de tension. La tension aux bornes de la charge est toujours sinusoïdale comme illustré La figure (III.23.c), avec un THD de 0.39%.

III.8 méthode de Commande du FAS basé sur la méthode SRF

La figure (III.25) représente le schéma bloc de la commande par MLI de FAS avec identification des perturbations par la méthode SRF

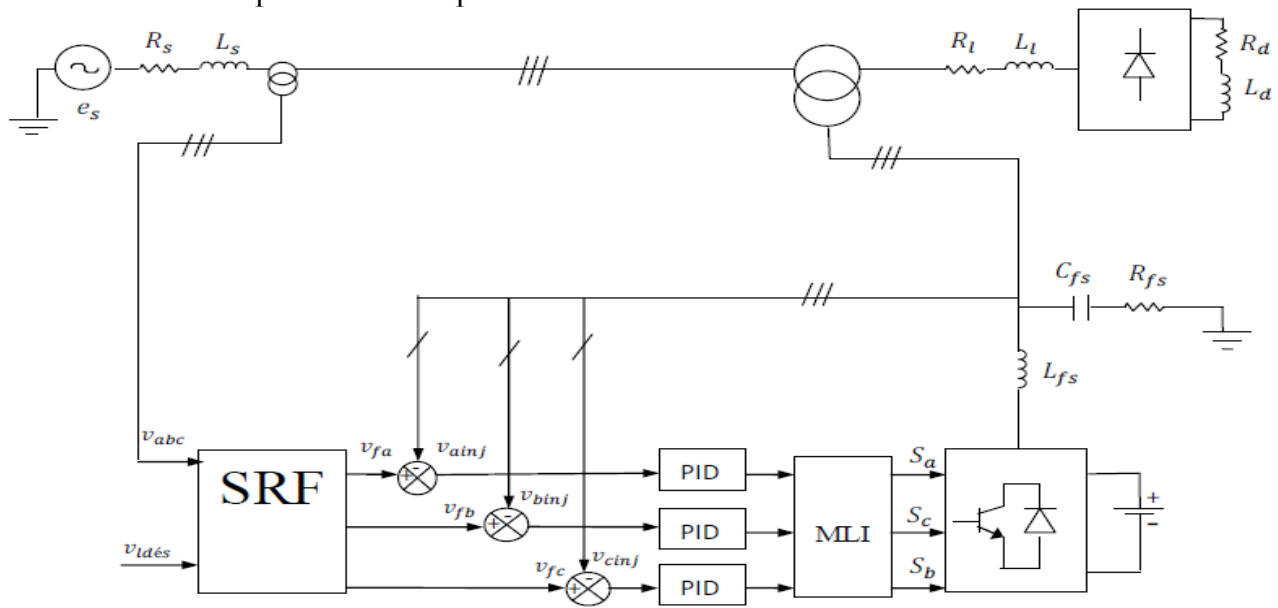


Figure III.25 Schéma bloc de la commande par MLI du FAS avec identification des perturbations par la méthode SRF



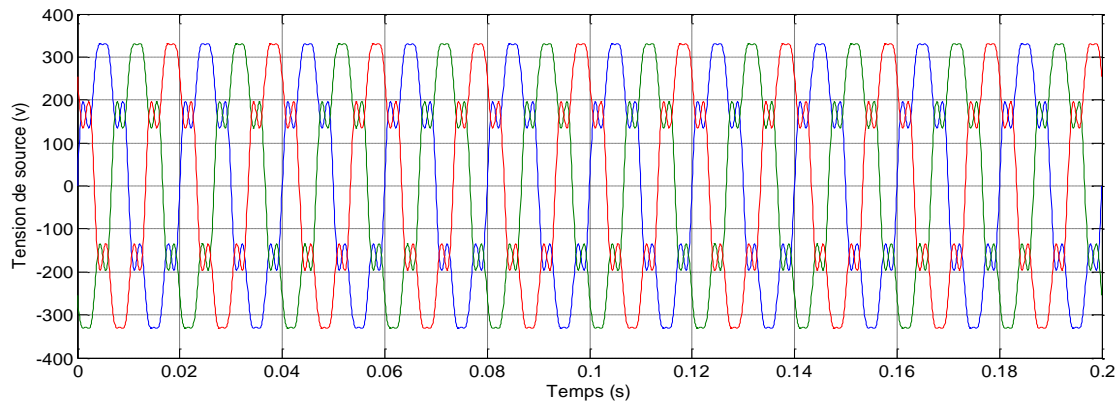
III.8.1 Résultats de simulation

a) Compensation des harmoniques de tension

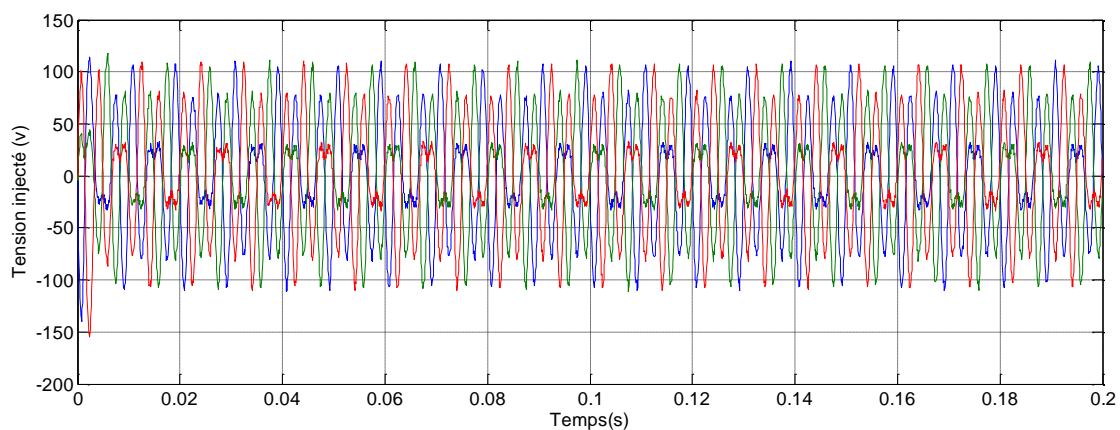
La simulation de la commande par MLI de FAS avec identification des harmoniques par la méthode SRF a été réalisée avec les paramètres suivants :

- La valeur de la tension continue est égale à 900V
- La valeur désirée de la tension de la charge est égale à $V_{ldés} = 300\sqrt{2}$ V
- La tension de la source perturbée est définie par le système (III.1).

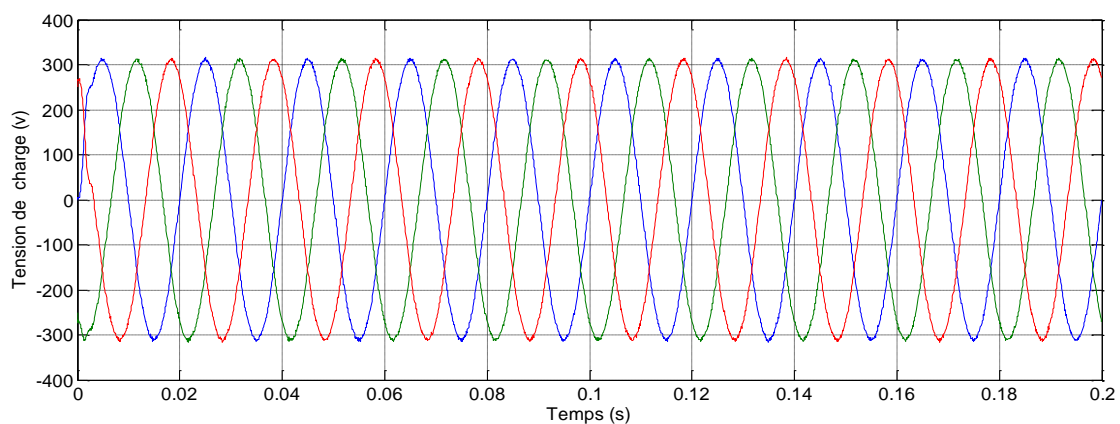
Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation des harmoniques affectant la tension de charge.



(a) Tension de source avant le filtrage



(b) Tension injecté



(c) Tension de la charge après le Filtrage

Figure III.26 Compensation des harmoniques de tension

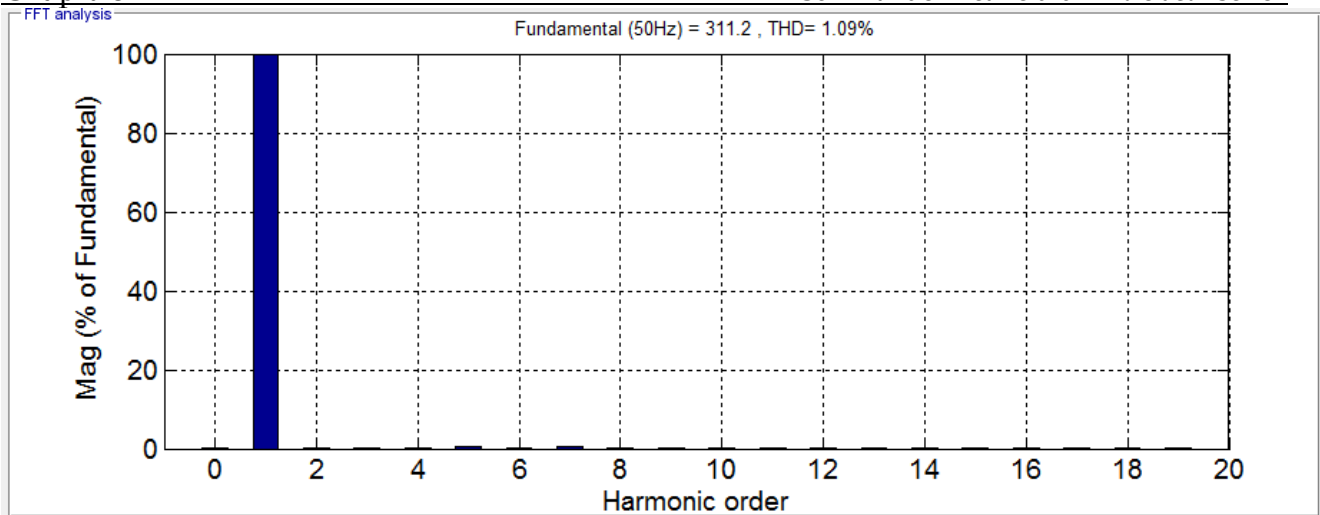
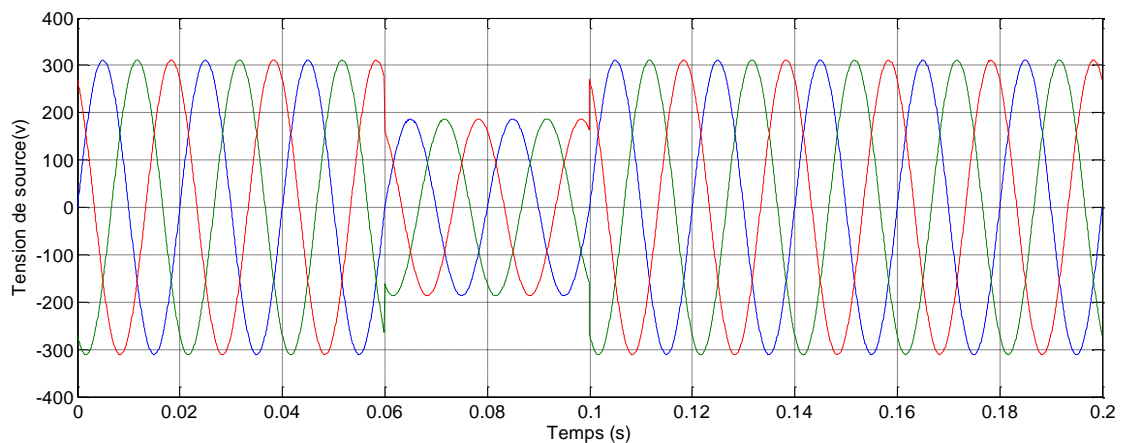


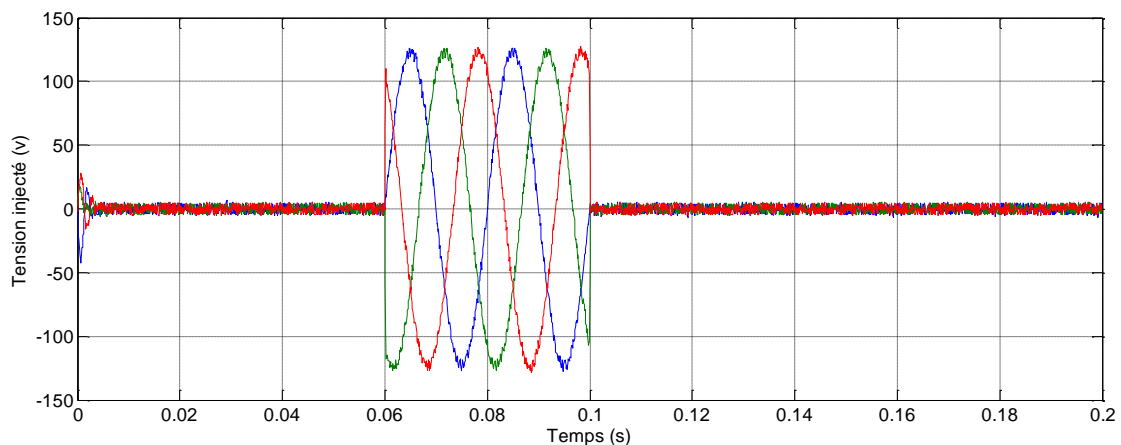
Figure III.27 Spectre d'harmoniques de tension de charge

b) Compensation des creux de tension

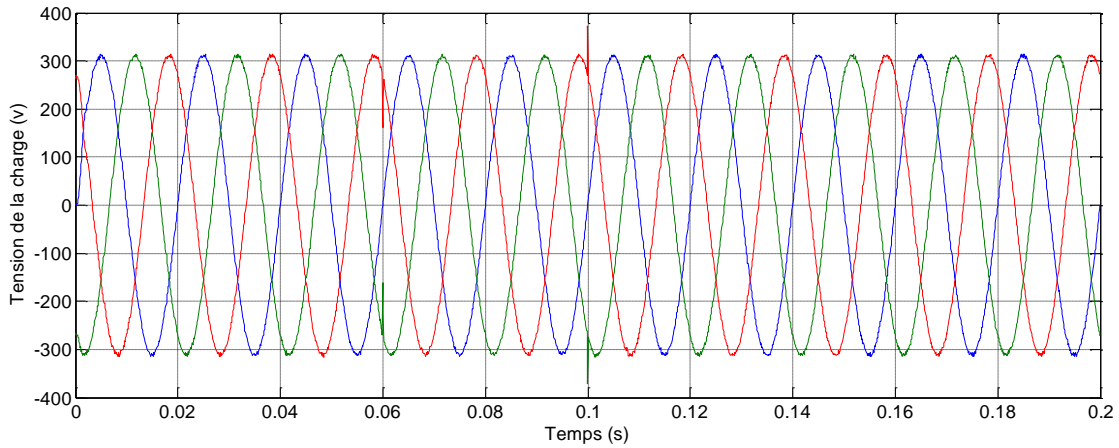
Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation d'un creux de tensions triphasées d'une profondeur de 40% et d'une durée de 40ms :



(a) Tensions de la source lors d'un creux de tension



(b) Tension injecté par le FAS lors d'un creux de tension



(c) Tension aux bornes de la charge après le Filtrage
Figure III.28 Compensation des creux de tension

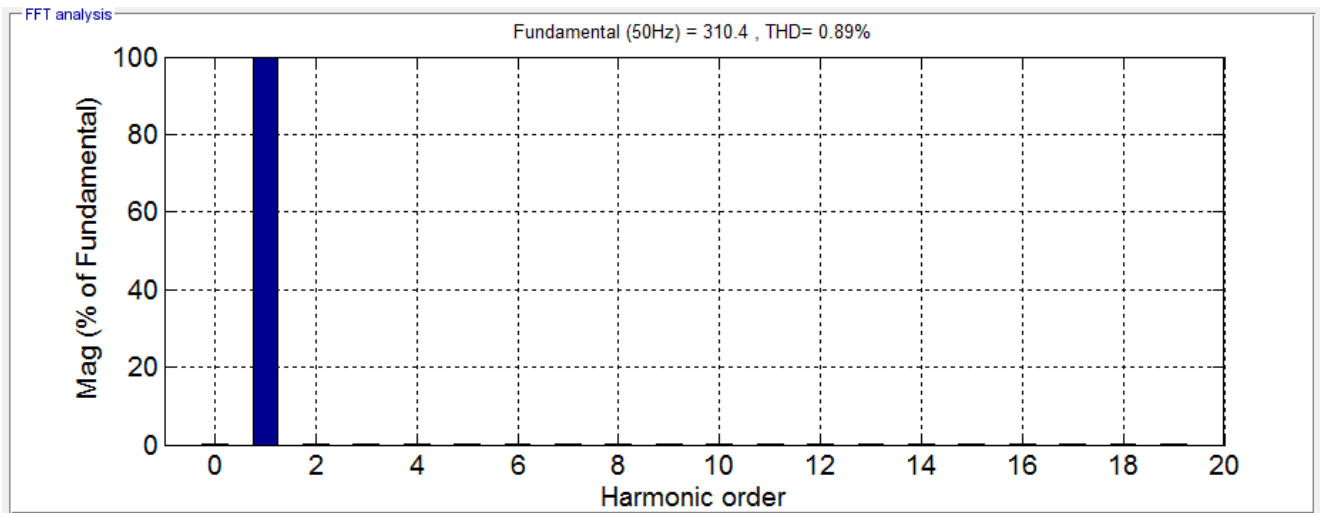
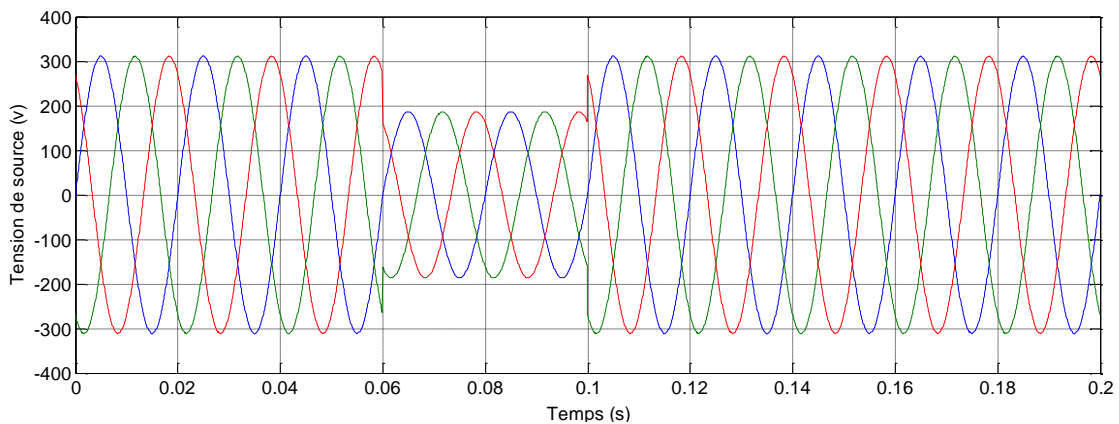


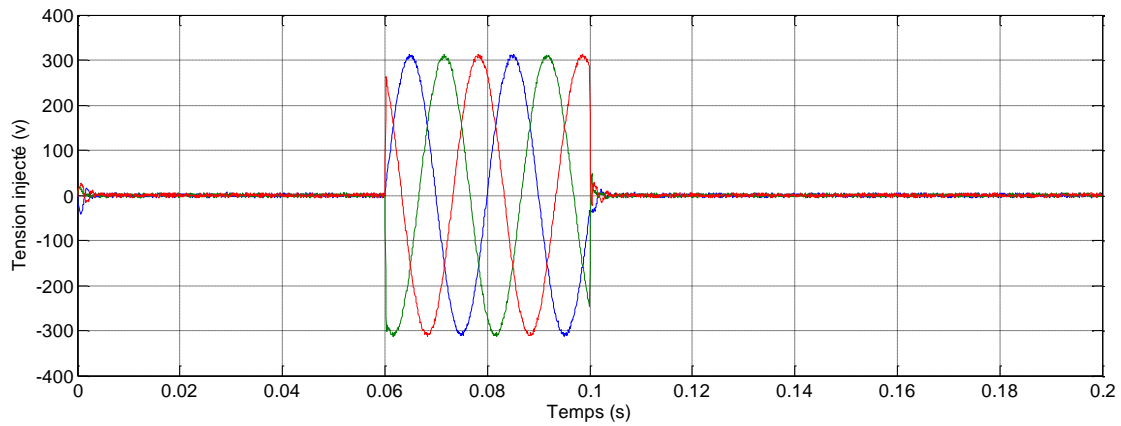
Figure III.29 Spectre d'harmoniques de tension de la charge

c) Compensation des coupeurs de tension

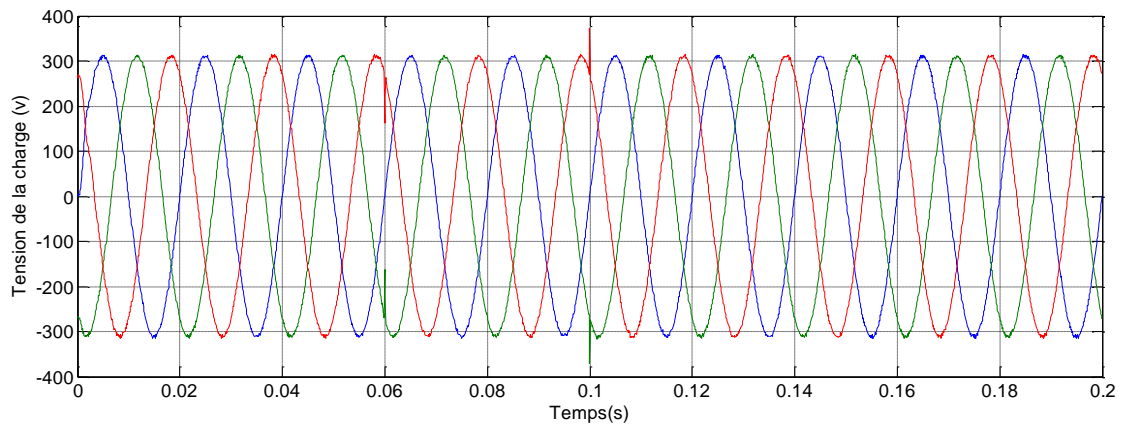
Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation d'un coupeur de tensions triphasées d'une profondeur de 40% et d'une durée de 40ms :



(a) Tensions de la source lors d'une coupure de tension



(b) Tension injecté par le FAS lors d'une coupure de tension



(c) Tension aux bornes de la charge après le Filtrage

Figure III.30 Compensation des coupures de tension

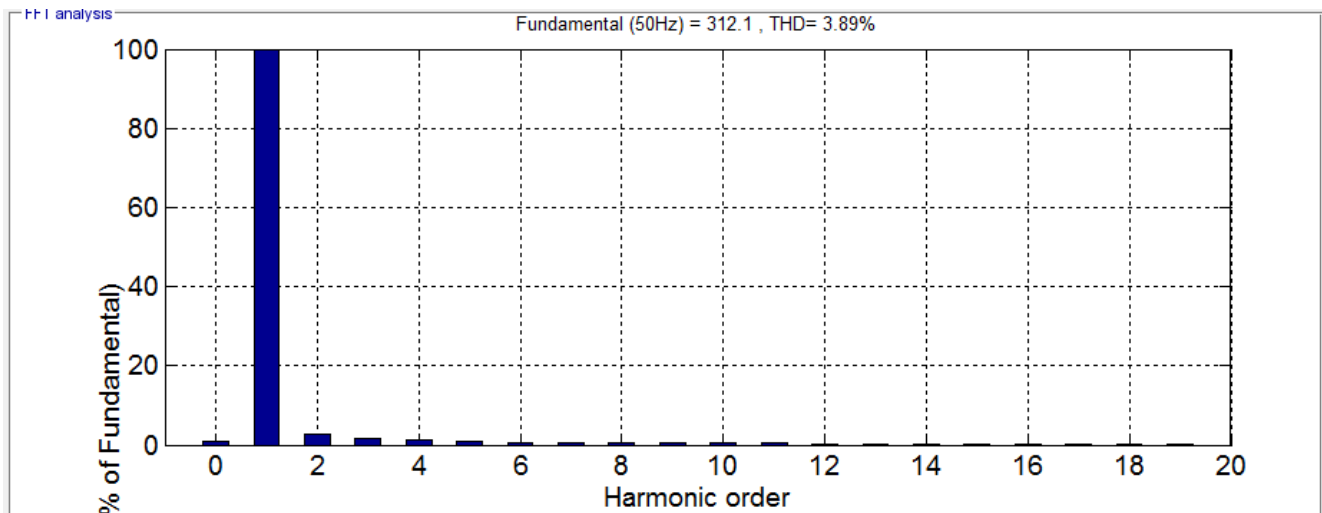
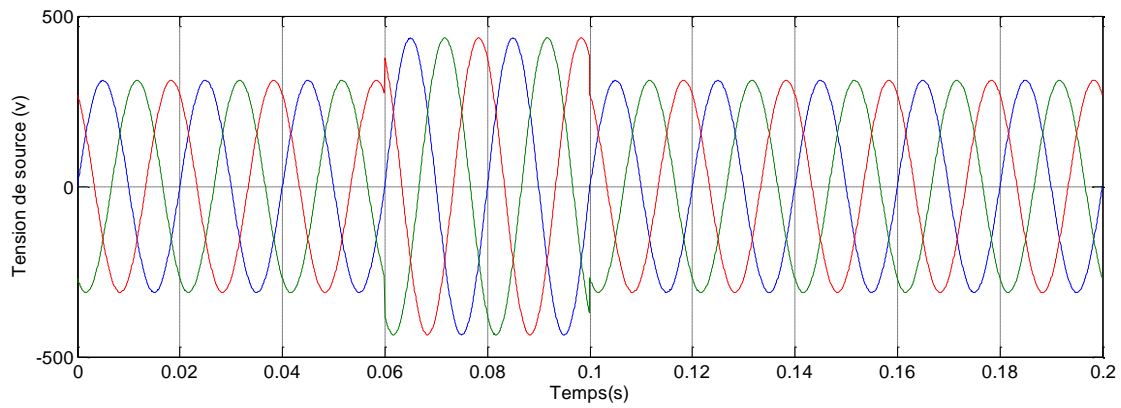


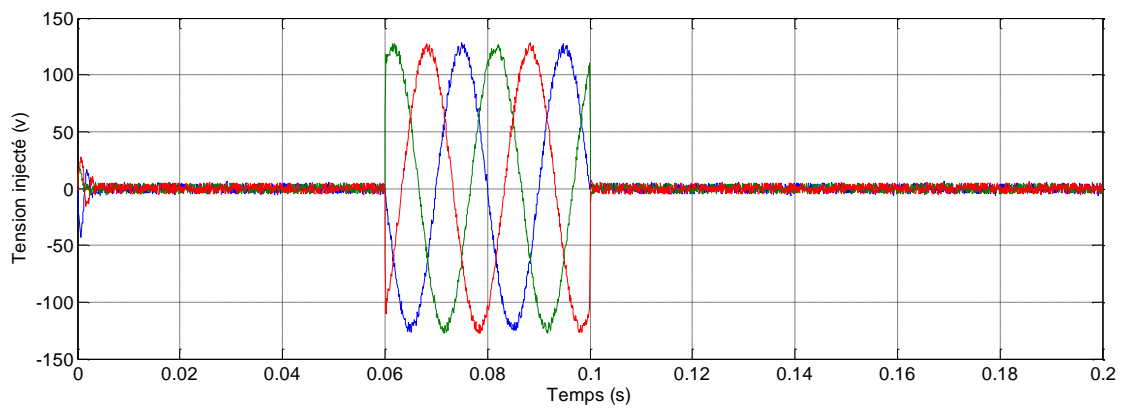
Figure III.31 Spectre d'harmoniques de tension de la charge

d) Compensation des surtensions de tension

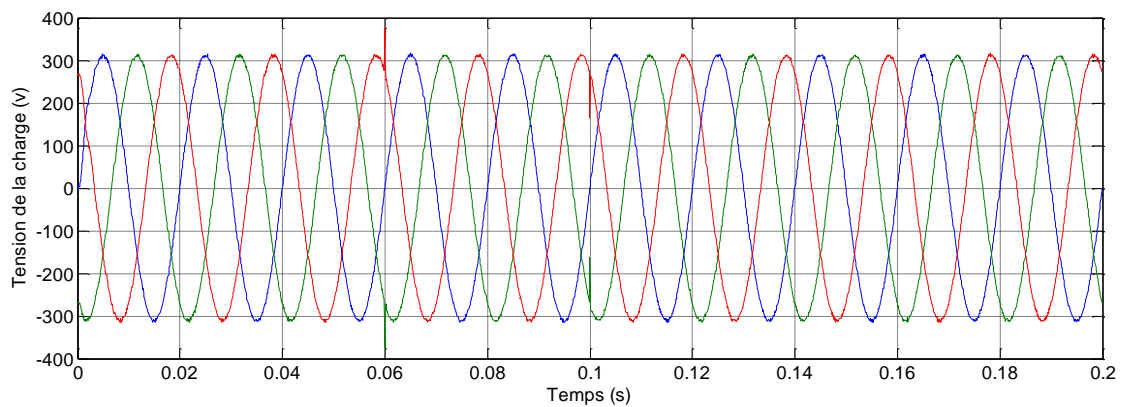
Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation d'une surtension de tensions triphasées d'une profondeur de 40% et d'une durée de 40ms :



(a) Tensions de la source lors d'une surtension de tension



(c) Tension injecté par le FAS lors d'une surtension de tension



(c) Tension aux bornes de la charge après le Filtrage

Figure III.32 Compensation des surtensions de tension

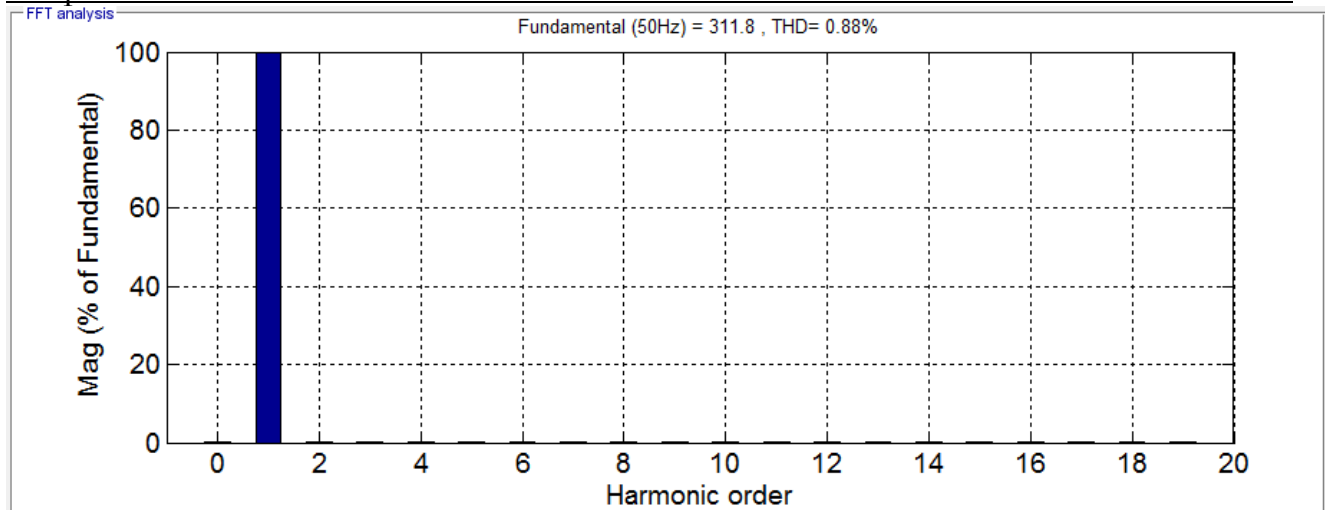


Figure III.33 Spectre d'harmoniques de tension de la charge

III.8.2 Interprétations des résultats :

Selon les résultats obtenus, on enregistre une nette amélioration dans l'allure de la tension de charge, comme illustré dans la figure (III.26.c). Donc, la tension de source a été dépolluée à un niveau assez satisfaisant, ceci est conforté par le spectre harmonique de la figure (III.27), avec un THD de 1.09%.

L'or d'un creux de tension. La tension aux bornes de la charge est toujours sinusoïdale comme illustré La figure (III.28.c), avec un THD de 0.89%.

L'or d'un coupeur de tension. La tension aux bornes de la charge est toujours sinusoïdale comme illustré La figure (III.30.c), avec un THD de 3.89%.

L'or d'une surtension de tension. La tension aux bornes de la charge est toujours sinusoïdale comme illustré La figure (III.32.c), avec un THD de 0.88%.

III.9 Interprétations des résultats méthode SRF et PQ:

La tension de la charge montré dans la figure (III.16.c) a une forme sinusoïdale, en outre, son spectre est nettement dépollué, comme constaté dans la figure (III.18), avec un THD de 0.93% grâce aux tensions harmoniques injectées par le FAS en opposition de phase avec celles superposé sur le fondamentale de la tension de la source comme le montre la figure (III.18.b).

Lors du creux, le filtre actif série réagissent pour maintenir les tensions de la charge égales aux tensions désirées, comme illustré par les figures (III.16.b), (III.16.c).

Le tableau (III.1) Résume les résultats de simulation du FAS en présence des deux perturbations harmonique. Nous constatons que le résultat de THD obtenues avec la méthode PQ sont plus meilleurs aussi que la méthode SRF.

Méthode d'extraction d'harmonique	THD harmonique (%)	THD creux (%)	THD coupeur (%)	THD surtension (%)
PQ	0.93	0.71	3.74	0.39
SRF	1.09	0.89	3.89	0.88

Tableau (III.1) : Les valeurs de THD en fonction de la méthode d'identification PQ et SRF

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre plusieurs simulations à travers de commande d'onduleur, ont été effectuées afin de valider le fonctionnement de FAS.

Nous avons présenté les schémas de FAS par consacrée à la commande MLI de FAS et toujours avec la même méthode d'identification étudiée PQ et SRF, et la même méthodologie schémas, dimensionnement de régulateur et simulation. A partir des résultats de simulation, nous constatons la prédominance de la méthode PQ par rapport à la méthode SRF tant au niveau performances qu'en THD.



Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons traité le problème de la pollution de tension harmonique dans les réseaux électriques.

Dans un premier temps, nous avons présenté les sources des harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, en présentant les solutions traditionnelles et modernes pour les réduire, notamment le filtrage passif, Le filtrage actif et le filtre hybride.

Dans deuxième chapitre porte sur modélisation du filtre actif série (FAS) à type PUC de convertisseur de tension. Nous présentons dans les principaux éléments qui constituent notre système ou structure électrotechnique et leurs caractéristiques.

Enfin dans le troisième chapitre nous avons traite les stratégies d'identification des tensions de références et utilisant différentes méthodes d'identification des harmoniques à savoir la méthode des puissances active et réactive instantanées (PQ), la méthode du repère synchrone (SRF), Les résultats de simulation montrent qu'ils offrent des performances satisfaisantes.



ANNEXE

Paramètres utilisés

Valeur efficace et la fréquence de la tension du premier réseau (V_{sabc}, f_s)	220 V ; 50 Hz,
Impédance du premier réseau (R_{sabc}, L_{sabc})	3 m Ω , 2.6 μ H
Impédance à l'entrée de la première charge polluante (R_{labc}, L_{labc})	10 m Ω , 1 mH
Charge continu du premier pont diode (R_d, L_d)	15 Ω , 2 mH
Impédance du FAS (R_f, L_f, C_f)	1.5 Ω , 3 mH, 0.1 mF
Impédance du transformateur d'injection (R_f, L_f, m)	0.1 m Ω , 1.1 μ H, 1

Tableau (C.1) : Paramètres du système



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] **Mohamed Talel CHEBBAH** «étude et simulation d'un convertisseur multi niveaux type puc» maitrise en génie, concentration énergies renouvelables et efficacité énergétique. montréal, avril 2014

[2] **Eric BETTEGA et Jean Noël FIORINA.** «Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs». Cahier Technique Schneider Electric n° 183, janvier2000.

[3] **Thierry GOURAUD.** «Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique». Thèse de doctorat, à l'Ecole Centrale de Nantes Janvier 1997.

[4] **Boubakeur ROUABAH.** «Commande d'un Convertisseur Multicellulaire Pour une Application de Filtrage Actif ». Magister En Electrotechnique Sétif 2011-2012

[5] **hani vahedi.** «manuscript-based thesis presented to école de technologie supérieure in partial fulfillment for the degree of doctor of philosophy ph.d. montréal, november 11th, 2016

[6] **Hanane KOUARA.** «Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension». Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2006

[7] **K. HEMICI.** "Commande d'un compensateur actif série à base d'un onduleur à cinq niveaux ", Thèse de Magister, Université Hassiba Ben Bouali-Chlef, 2011.

[8] **M. OMAR.** "Application de la MLI vectorielle à trois dimensions (SVM 3D) au filtrage actif série en utilisant des onduleurs de tension multi niveaux à structure NPC ", Thèse de Magister, Université Hassiba Ben Bouali-Chlef, 2012.

[9] **C. K. Duffey et R. P. Stratford.** " Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems ", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 25, n° 6, p. 1025-1034, 1989.

[10] **A. CHAOUI.** " Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires ", Thèse de Doctorat,École nationale supérieure d'ingénieurs-Poitiers, 2010.

[11] **H. Hicham.** " Etude, simulation et applications des filtres actifs série ", Thèse deMagister, Université Mohamed Lakhdar Ben Amara dit Hamma Lakhdar-d'El Oued, 2013

