Université Dr. YAHIA FARES de Médéa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique et de l'Informatique



Mémoire de fin d'études pour l'obtention de diplôme

Master en Géné Eléctrique

Option :CEI

Tème

Etude et commande d'un filtrage actif série multiniveaux a structure NPC

Présenté Par :

M. BENDALI Oussama

M. METIDJI Mohamed

Encadré par :

HENINI noureddine

2014 /2015

Remerciements

Remerciement

Au terme de ce mémoire nous tenons à remercier tout naturellement en premier lieu Dieu le tout puissant qui nous a donné la force, le courage et la patience de bien mener ce travail.

A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre promoteur ***NOURE EDDINE HENINI*** pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apportées durant notre étude et réalisation de ce projet.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude universitaire.

Sans omettre bien sur de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation du présent travail.

Dédicaces

Dédicaces

Je dédie cet humble travail,

- À mes très chers parents, pour leurs amour et sacrifices,
- A mon promoteur HAMZA HOUASSIN,
- A toutes la famille *BENDALI BRAHAM* sans exception,
- A tous les enseignants de faculté des sciences et de la technologie,
- À mes adorables frères, sœur pour leur patience,
- À mes proches amis pour leurs soutient et encouragements,
- A toute la promotion 3ème années Licence sans exception.

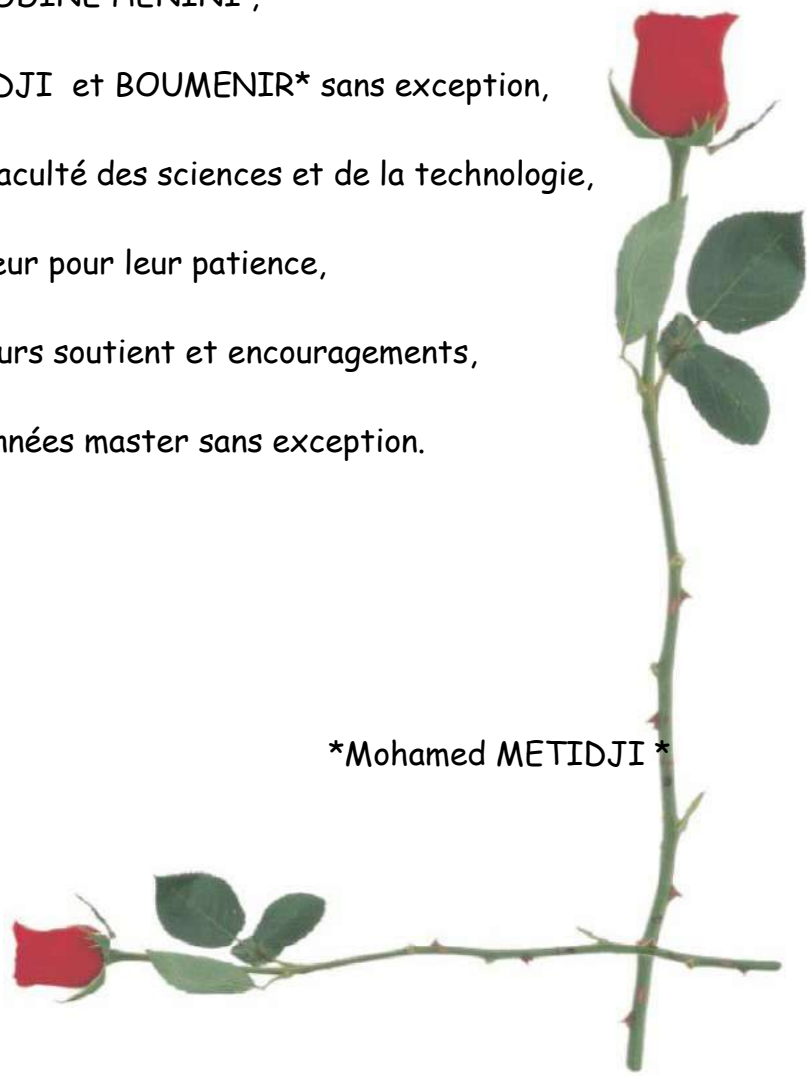


*Oussama BENDALIBRAHAM *

Dédicaces

Je dédie cet humble travail,

- À mes très chers parents, pour leurs amour et sacrifices,
- A mon promoteur NOUR EDDINE HENINI ,
- A toutes la famille *METIDJI et BOUMENIR* sans exception,
- A tous les enseignants de faculté des sciences et de la technologie,
- À mes adorables frères, sœur pour leur patience,
- À mes proches amis pour leurs soutient et encouragements,
- A toute la promotion 2ème années master sans exception.



*Mohamed METIDJI *

Résumé

الملخص:

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة نظرية و محاكاة رقمية للمصافي الفعالة الطاقية باستعمال مختلف الاستراتيجيات و نظم التحكم التقليدية وهذا للقضاء على توافقيات التيار أو فرق الكمون

في البداية قدمنا عرض لنوعية الطاقة الكهربائية ومختلف أنظمة التصفية الطاقية خاصة المصفاة الفعالة المتسلسلة(FAS) ومضبط الطاقة المتكامل(PQ)، بعد هذا تركزت الدراسة على نمذجة رياضية للمصفاة الفعالة بعدها قمنا بدراسة المصفاة الفعالة المتسلسلة المخصصة للقضاء على توافقيات فرق الكمون و معظم الاضطرابات الأخرى مثل نقص فرق الكمون ، زيادة فرق الكمون،أولا تزامن فرق الكمون، و قمنا ايضا بدراسة المحولات متعددة المستويات باستخدام محول بتشكيلة **NPC --**(النقطةالحياديةالمتراوحة)

Sim Power System و MATLAB-Simulinkتم تطوير نماذج المحاكاة العددية باستخدام برنامج نتائج المحاكاة المتحصل عليها ، أثبتت فعالية النماذج المقترحة.

مفاتيح الكلمات:فرق الكمون،لاتزامن فرق الكمون،متحكم ذكى،مصفاة فعالة متوازية،مصفاة فعالة متسلسلة،مضبط الطاقة المتكامل،نظرية الطاقة الكهربائية الفعالة وغير الفعالة

كلمات مفتاحية:

مصفاة فعالة متوازنة توافقية. مصفاة فعالة متسلسلة.مضبط الطاقة المتكامل .تقنية الكشف المتزا من للتيارات المرجعية .تقنيةالطاقات الفعالة والغير فعالة اللحظية. القضاء توافقيات التيار و فرق الكمون

Résumé :

L'objectif de ce mémoire est l'étude par simulation numérique des systèmes de filtrage actif de puissance utilisant différentes stratégies de contrôle à base de contrôleurs conventionnels en vue de réduire les harmoniques de courant et/ou de tension.

Dans 1er chapitre nous avons présentés les différentes perturbations qui peuvent avoir lieu dans les réseaux électriques, les normes internationales ainsi que l'ensemble de systèmes de filtrage de puissance moderne en particulier le Filtre Actif Série (FAS). Dans 2eme chapitre l'étude à été focalisé sur le FAS dédié à la compensation des harmoniques de tension et des différentes autres perturbations liés à la tension en particulier les creux de tension, surtension, déséquilibre, etc.Le troisième chapitre a étémis en avant par une étude théorique sur les onduleurs de type NPC à trois et cinq niveau et leurs stratégie de commande MLI à **N** porteuse. Nous avons ensuite étudié la simulation de filtre actif série à structure tension deux niveaux (NPC) utilisant une stratégie de contrôle PQ.

Le modèle de simulation est développé en utilisant le logiciel MATLAB-Simulink et le ToolboxSimPowerSystem. L'évaluation des performances de chaque système de filtrage étudié tient compte de son comportement en régime permanent. Les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité des modèles proposés

Mots-clés :

Filtre actif série (FAS), Universel Power Qualité Conditionner (UPQC), Méthode du référentiel lié au synchronisme,
Méthode des puissances active et réactive instantanées PQ, compensation des harmoniques courant et tension.

Abstract:

The main purpose of this thesis is established on a numerical study of the active filter systems using several control strategies based on many conventional and intelligent controllers to reduce the harmonic current and/or the voltage.

In the first chapter, we presented the various disturbances that may appear in electrical networks, the international standards and the set of powerful modern filtering systems aswell, particularly the Series Active Filter (Series AF). In the second chapter, the study has been focused on the Series AF dedicated to the compensation of harmonic tensions and many other disturbances linked to the tension, particularly the voltage dips, the over-tensions, etc. The third chapter highlighted a theorical study based on the three and five level NPC inverter and their PWM command strategies with N carrier. And then we have also studied the simulation of a two-level Series Active Filter (NPC) using a PQ control strategy.

The simulation model has been developed with the MATLAB-Simulink software and Toolbox SimPowerSystem. The assessment of the performance of each filtering system that has been studied take account of its steady-state behaviour. The findings of the simulation obtained show the obvious efficiency of the proposed models.

Keywords:

Series active filter (Series AF), Unified Power Quality Conditioner (UPQC) , Synchronous reference frame method, Méthod despuissances active and reactive instantanées PQ, method Harmonics currentand voltage compensation.

Table des Matières

Liste figures …… I

Liste des acronymes …… II

Introduction générale ……. 1

Chapitre I : Perturbation harmonique

I.1.Introduction…… ... 3

I.2. Causes et effets de la propagation des harmoniques…….. 4

I.2.1. Charges génératrices d'harmoniques…… 4

I.2.1.1. Charges génératrices d'harmoniques de tension…… 4

I.2.1.2.Charges génératrices d'harmoniques de courant ……..... 4

I.2.1.2. 1. Les montages électroniques……. 5

I.2.1.2. 2. Les charges non linéaires passives ……. 5

I.2.2. Emission d'harmoniques par catégorie d'utilisateurs ……. 6

I.2.2.1 Utilisateurs domestiques ……..... 6

I.2.2.2. Secteur tertiaire …… .. 6

I.2.2.3. Secteur industriel ……. 6

I.2.3. Impact de la propagation des harmoniques ……..... 6

I.2.3.1. Effets des harmoniques…… 6

I.2.3.2. Sensibilité de différents types de matériels …… 7

I.2.4.Formules de mesure quantitatives des harmoniques …… 8

I.2.4.1.Transformée de Fourrier ……. 8

I.2.4.2.Grandeurs électriques en régime déformé……..... 9

I.3.Solutions de filtrage des harmoniques……. 12

I.3.1 Filtrage passif ……. 12

I.3.1.1. Principe ……. 12

I.3.1.2 Différents types de filtres parallèles……. 13

I.3.1.3.Avantages et inconvénients des filtres passifs …… 16

I.3.2. Filtrage actif …….. 17

I.3.2.1. Principe ……. 18
I.3.2.2. Principaux types de filtres ……... 18
I.3.2.3.Principales combinaisons possibles ……. 20
I.3.2.3.1.Filtrage actif parallèle (shunt) …….. 20
I.3.2.3.2.Filtrage actif série …… 20
I.3.2.3.3.Filtrage hybride (mixte actif -passif) ……... 20
I.3.2.4. avantage et inconvénients des filtres actifs …… 21
I.4.Conclusion …….. 22

Chapitre II : Filtre actif série a structure tension

II.1.Introduction ……. 23
II.2.Principe de fonctionnement d'un Filtre Actif Série à structure Tension…… 23
II.3.Stratégies de contrôle d'un Filtre Actif Série à structure Tension ……. 24
II.3.1.Méthode basée sur le calcul des composantes symétriques ……. 24
II.3.2.Méthode basée sur le calcul des perturbations dans le repère (d-q)…… 26
II.3.3 Méthodes des puissances active et réactive instantanées (PQ) …… 28
II.4 Filtre Actif Série à structure Tension à deux et à trois-niveaux (NPC) ……. 34
II.4.1 Filtre actif série à structure tension deux niveaux…….. 34
II.4.2 Modèle mathématique du FAS à structure tension deux niveaux …….. 34
II.4.3 Filtre actif série à structure tension trois-niveaux (NPC) …… 37
II.4.4.Transformateur d'injection …… 38
II.4.5.Filtre de sortie Lfs, Cfs …… 38
II.4.6 .Système de stockage de la tension continue …….. 40
II.5. Conclusion…… 42

Chapitre III : Modélisation et simulation d'un onduleur multiniveaux

III.1. Introduction…… 44
III.2. Onduleurs multiniveeau ……... 44
III.2.1.Structure générale d'un onduleur à trois niveaux……..... 44

III.2.2.Différents topologie des onduleurs multiniveaux……. 45
III.3.Différent stratégie de commande des convertisseurs multiniveaux……... 45
III.3.1.Classification des stratégies de modulation ……. 46
III.3.1.1. Commande par modulation de largeur d'impulsions……. 46
III.3.1.1.1.Modulation sinusoïdal triangles multiples…… 46
III.3.1.2 .modulation vectorielle…… 47
III.3.1.3. Elimination d'Harmoniques sélective ……. 47
III.4.Simulation de l'onduleur trois et cinq niveaux …… 48
III.4.1.Onduleur à trois niveaux type NPC ……. 48
III.4.1.1. principe de fonctionnement …….. 48
III.4.1.2.Partie simulation …… 50
III.4.2.Onduleur à cinq niveaux type NPC ……. 52
III.4.2.1.principe de fonctionnement ……..... 52
III.4.2.2.Partie simulation …… 54
III.5.Conclusion…… 56

Chapitre IV : Etude et simulation d'un filtre actif série

IV.1-Introduction…… 57
IV.2- Filtre actif série: …… 57
IV.3. Structure générale du filtre actif série ……. . 58
IV-3-1-Partie puissance ……..... 58
IV.3.1.1 Onduleur de tension ……... 58
IV.3.1.2 Système de stockage de l'énergie……..... 59
IV.3.1.3 filtre de sortie . . ..……. 59
IV.3.1.4.1Modélisation du filtre de sortie ……. 60
IV.3.1.5. Transformateurs d'injection …….……. 61
IV.3.2. Partie contrôle commande…… 61
IV.3.3.Commande de l'onduleur……... 62
IV.4.Simulation du fonctionnement d'un filtre actif série-charge non linéaire……. 63
IV.4..1 Filtre actif sérieà base d'un convertisseur de tension deux niveaux…….. 63

IV.4.2.Compensation des harmoniques de tension…….. 64
IV.5.CONCLUSION …….. 67
Conclusion générale …… 68
Bibliographi:…… 69
Annexe……... 74

Liste des Figures

Fig I-1: Raccordement d'une inductance anti-harmonique……. 13
Fig I-2 : Installations de filtres résonants…… 14
Fig I-3 : Filtres amortis passe-haut…….. 15
Fig I-4 : Installation d'un filtre amorti…… 16
Fig I-5 : Convertisseur à source de tension …… 18
Fig I-6 : Modèle d'un convertisseur à source de courant…….. 19
Fig. II-1 :Schéma de principe d'un filtre actif série …….. 24
Fig II-2 :Identification des tensions perturbatrices ……... 31
Fig II-3 :Diagramme vectoriel des tenions et des courants……... 32
Fig. II-4 Tension de référence de compensation utilisant la méthode PQ…….. 33
Fig II-5 :Schéma de principe d'un filtre actif série-convertisseur tension……... 34
Fig II-6 :Schéma de principe d'un filtre actif série-convertisseur tension……... 38
Fig. II-7 Compensateur série avec filtre passe-bas LC……. 39
Fig II-8 :Schéma de principe d'un filtre actif série utilisant un redresseur…… 41
Fig II-9 :Schéma de principe d'un filtre actif série à mode de charge…… 42
Fig III-1: Structure générale d'un redresseur de courant MLI……. 45
Fig III.2: Schéma d'une branche d'onduleur NPC à 3 niveaux…… 48
Fig III-3: Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé trois niveau de type NPC……. 49
Fig III-4 : schéma bloc l'onduleur de tension trois niveaux……. 50
Fig III-5 : Tension simple Va de sortie de l'onduleur à trois niveaux……. 51
Fig III-6 : Les différents signaux de la stratégie triangulo –sinusoïdale……... 51
Fig III-7 : Structure triphasé d'un onduleur cinq niveaux…… 52
Fig III-8 : onduleur triphasé a 5 niveaux a structure NPC……... 54
Fig III-9 : onduleur triphasé a cinq niveau (SPWM) simlunk……... 55
Fig III-10 : La tension simple V_a de l'onduleur triphasé à cinq niveaux…….. 55
Fig III-11 : Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale…….. 56
FigIV.1 :Principe du filtre actif série…….. 57
Fig IV.2 :Structure générale du filtre actif série…… 58
Fig IV.3 : Partie puissance du filtre actif série……... 59
Fig IV4 : Schéma du filtre de sortie pour un FAS…….. 60
Fig IV5 : Principe de la commande MLI…….. 62
Fig- IV-6 : Principe de commande par hystérésis…… 63
Fig.IV-7 :Bloc diagramme du FAS utilisant une stratégie de contrôle PQ(I) …… 63

Figure IV.8 : Spectre harmoniques de la tension source…….. 65

Figure. IV-9 : Spectre des harmoniques de la tension de la charge…….. 66

Liste des Abréviations

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

FAP : Filtre actif parallèle

FAS : Filtre actif série

UPQC : Conditionneur universel d'énergie électrique

SRF : Méthode du référentiel lié au synchronisme (SRF)

PQ : Méthode des puissances active et réactive instantanées (PQ)

HB : Bande d'hystérésis

a,ß : Axe du plan stationnaire (a,ß)

d,q : Axe direct, axe en quadrature du plan tournant synchrone (d,q)

1,2,3 : Axe du plan 123

C_{pq}: transformation matricielle des tensions de phase $(u_p \; et \; u_\beta)$ en$(u_p \; et \; u_q)$

C32 : Transformation de Concordia 3-2

C23 : Transformation inverse de Concordia 2-3

MLI : Modulation en largeur d'impulsions

DC : Courant continus

HB : Bande d'hystérésis

$\bar{p}$: Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant

$\bar{q}$ *:* Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant

$\tilde{p}$: Puissance harmonique active

$\tilde{q}$: Puissances réactive harmonique

HB : Bande d'hystérésis

P_{in} : Puissance fournie par la source d'alimentation

Pin- pcc : Puissance écoulée au point de raccordement (PCC)

$P_{série}$: Puissance active absorbée par le filtre série émanant du bus continu

Liste des Symboles

i_{ch} (t) : Courant instantané absorbé par la charge

v_{ch}(t) Tension instantanée aux bornes de la charge

v_s(t) : Tension instantanée simple de source

V_s : Valeur efficace du fondamental de la tension source

i_s(t) : Courant instantané fourni par la source

I_s : Valeur efficace du courant fournit par source

P : Puissance active

Q : Puissance réactive

THDv : Voltage Total Harmonics Distorsion (Taux de distorsion harmonique en tension)

THD_i : Current Total Harmonics Distorsion (Taux de distorsion harmonique en courant)

U_{dc} : Tension continue aux bornes du condensateur de stockage

$U_{dc\text{-}ref}$: Tension de référence du condensateur de stockage

L_f : Valeur de l'inductance du filtre actif parallèle

R_f : Valeur de la résistance interne du filtre actif parallèle

R : Valeur de la résistance interne du filtre actif parallèle

V_f : Tension simple en sortie du convertisseur du filtre actif parallèle

U_d : Tension redressée coté charge

I_d : Courant redressée coté charge

R_s :Résistance de la source d'alimentation

L_s : Inductance de la source d'alimentation

R_{ch} : Résistance de charge du convertisseur AC/DC

L_{ch} : Inductance de charge du convertisseur AC/DC

f : Fréquence de commutation du convertisseur

L_{fs}, C_{fs} : Inductance et capacité du filtre actif série

tv : Taux de déséquilibre de tension

V_d : Amplitude de la tension directe

V_i : Amplitude de la tension directe

V_d : Amplitude de la tension directe

V_i : Amplitude de la tension directe

$C_{dc}1,2$: Valeur des deux condensateurs stockage

$z_S\, i_{dh}$: chute de tension harmonique

V_{sf} : la tension de sortie de l'onduleur ;

i_l : courant de la charge à protéger……..

Vsf : La tension de sortie de l'onduleur ……..

V_p la valeur crête de la tension de la porteuse

V_{dc} : la valeur crête de la tension continue à l'entrée de l'onduleur

Introduction Générale

L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans l'industrie a entraîné ces dernières années d'énormes problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels utilisant des charges non-linéaires comme les redresseurs, les variateurs de vitesse, et tous les autres équipements à base d'électronique de puissance.

Les harmoniques engendrées par ces charges non-linéaires circulent dans les réseaux électriques et peuvent perturber le fonctionnement normal voir même engendrer la destruction de certains équipements électriques; ces effets néfastes peuvent apparaître instantanément ou se produire en différé. Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et améliorer la qualité de l'énergie électrique différents systèmes de filtrage ont été développés et utilisés, parmi eux les filtres passifs, ils permettent d'éliminer les harmoniques de courant et compenser aussi la puissance réactive sauf que ces systèmes de filtrage traditionnel présentent certains inconvénients, en effet ils sont figés sur des fréquences fixées au départ, apparition de phénomène de résonance ,etc...

Pour contourner ces inconvénients, les chercheurs activant dans le domaine du filtrage de puissance ont développés ces dernières années des systèmes de filtrage moderne communément appelés Active Power Filters, parmi ces systèmes on trouve le filtre actif parallèle qui doit être connecté en parallèle à la source et permet de compenser les harmoniques de courant et la puissance réactive. Le filtre actif série qui doit être connecté en série avec la source de tension à pour fonction la compensation à la fois des tensions harmoniques et des différentes autres perturbations liées à la tension. L'UPQC est la solution universelle permettant de compenser tous les types de perturbations courant et tension. Les performances de ces systèmes de filtrage moderne sont étroitement liées à la topologie du convertisseur utilisé, la stratégie de contrôle adoptée permettant l'identification des courants ou tensions de référence ainsi qu'au contrôleur employé pour la poursuite de ces courants (tensions) de référence et à la commande (conventionnelle ou intelligente) du convertisseur composant le filtre actif.

Dans le premier chapitre, nous présentons les perturbations électriques, leurs sources et leurs effets, les normes standards pour chaque perturbation ainsi qu'un exposé sur les diverses techniques de l'intelligence artificielle et leurs applications dans les systèmes de filtrage moderne.

Le deuxième chapitre est consacré au filtre actif série à structure tension deux et trois-niveaux (NPC) pouvant protéger les charges sensibles contre les harmoniques de tension, les creux de tension, les surtensions, etc. Différentes stratégies de contrôle pour l'identification des tensions de compensation ont été présentées et discutés. La méthode PQ, et vue ces avantages, a été adoptée pour le développement des modèles du FAS en utilisant deux approches différentes.

Le troisième chapitre on a présenté une étude théorique sur les onduleurs de type NPC à trois et cinq niveau et leurs stratégie de commande MLI à **n** porteuse.

Le quatrième et dernier chapitre étude et simulation de filtre actif série structure tension deux niveaux (NPC) utilisant une stratégie de contrôle PQ.

Les travaux de simulation ont été élaborés en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink et le Toolbox SimPowerSystem dédié à l'étude des applications électrique de puissance intégrant dans le même modèle le circuit de puissance du filtre et les différents blocs de commande et de régulation.

Enfin, nous concluons le manuscrit de ce mémoire par la présentation des principaux résultats obtenus en particulier, l'influence de la topologie du convertisseur, la stratégie de contrôle adoptée, la technique de pilotage du convertisseur de puissance et l'apport des techniques de l'intelligence artificielle dans la simplification et l'amélioration des performances de ces systèmes de filtrage dédiés à la compensation des harmoniques courant et/ou tension.

Chapitre 1 :

PERTUBATION HARMONIQUE

I.1.Introduction

Les formes d'onde de courant et de tension relevées sur les réseaux électriques de distributions' éloignent assez souvent de la sinusoïde idéale pure. La déformation de la tension résulte de la circulation sur le réseau de courants non sinusoïdaux. Les éléments du réseau ayant un comportement linéaire, l'effet sur la tension de l'ensemble des courants est la superposition de l'effet qu'aurait chaque courant individuellement.

Les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires qui soumises à une tension sinusoïdale, absorbent un courant non sinusoïdal. Dans de nombreux cas, ces charges se comportent comme des sources de courants harmoniques, le courant harmonique étant fixé par la charge et non par la tension ou l'impédance du réseau. On peut définir aussi en tout point d'un réseau une impédance harmonique qui dépend du rang harmonique h considéré; elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point.

On parle également d'une source de tension harmonique pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire; le produit des harmoniques de courant par l'impédance harmonique du réseau en un point crée des harmoniques de tension selon la loi d' Ohm.

La pollution harmonique est considérée comme étant un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les systèmes de distribution.

Les effets des harmoniques la plus connue est :

- la destruction de condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet de forts courants harmoniques amplifiés par des résonances ; l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre et les effets sur le long terme qui se traduisent par une fatigue accélérée du matériel [1], [2] ..

Dans l'état actuel du réseau électrique, il n'y a pas d'équipement qui soit apte à contrôler de façon idéale la circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges. En effet, les filtres passifs peuvent altérer d'une manière indirecte la propagation des harmoniques mais leur comportement dépend fortement de la structure du réseau. Les filtres actifs, avec un comportement plus autonome, peuvent réagir directement sur le courant ou la

tension harmonique dans le réseau; comme compensateurs d'harmoniques autonomes, leurs avantages par rapport aux filtres passifs ont été démontrés dans de nombreuses applications. Cependant, l'utilisation des dispositifs comme les filtres actifs pour le contrôle de la propagation des harmoniques n'ont été abordée que récemment par un nombre limité de chercheurs Plus d'études de cas sont indispensables afin de développer des solutions efficaces et viables économiquement. [3],.

I.2. Causes et effets de la propagation des harmoniques

I.2.1. Charges génératrices d'harmoniques

I.2.1.1. Charges génératrices d'harmoniques de tension

Les alternateurs, les transformateurs et les ASI (Alimentation Statique In interruptibles) représentent les principales charges génératrices d'harmoniques de tension. Le taux de distorsion harmonique produit par ces charges est généralement faible.

- ***Les alternateurs**:*

Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la faonne sinusoïdale de l'onde.

- ***Les transformateurs**:*

Ils peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu' ils fonctionnent en régime saturé.

- ***Les alimentations statiques interruptibles (ASI) :***

Elles servent à protéger le matériel, en général des charges non-linéaires comme du matériel informatique, contre les creux de tension et les coupures.

Le taux de tension harmonique est dû essentiellement aux courants harmoniques créés par les charges non-linéaires alimentées en aval.

I.2.1.2.Charges génératrices d'harmoniques de courant

Les charges non linéaires consomment un courant non sinusoïdal et représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux. On peut distinguer différents types de charges perturbatrices :

I.2.1.2. *1. Les montages électroniques*

- ***Le redresseur monophasé à filtre capacitif:***

Il est utilisé comme premier étage des alimentations de télévisions, d'ordinateurs, d'imprimantes, des variateurs de vitesse des machines asynchrones, des lampes à ballast électronique, des ballasts électroniques pour rampes d'éclairage, etc.

- ***Le gradateur monophasé :***

Il est utilisé pour la commande de l'intensité des lampes à incandescence halogène, la commande de certains fours de cuisson, la régulation de puissance (chaudières), les démarreurs de moteurs électriques, etc.

- ***Le redresseur triphasé à thyristors :***

Il permet de réguler la tension appliquée aux bornes d' une charge en faisant varier l'angle de commande des gâchettes; il est utilisé pour la commande en vitesse variable des moteurs à courant continu, des machines synchrones (nous rencontrons des montages redresseurs suivis d' un onduleur pour commander la machine synchrone en vitesse variable), les fours à induction lorsqu' ils sont régulés, etc. Les redresseurs triphasés ses thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel.

- ***Le redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif:***

Il est utilisé pour la commande en vitesse variable des machines asynchrones, ces derniers servent pour l'entraînement des compresseurs, des ventilateurs, des pompes, etc.

I.2.1.2. 2. Les charges non linéaires passives

- ***Les moteurs asynchrones :***

En théorie, ces moteurs génèrent des ondes de courant purement sinusoïdales; en pratique, les taux d'harmoniques mesurés sont variables.

- ***Les lampes fluorescentes et les lampes à vapeur haute pression :***

Elles représentent les deux tiers de la puissance consommée par l'éclairage dans le secteur tertiaire (bureaux, grands commerces, etc.).

- ***Les appareils à arc électrique :***

Ils regroupent les fours à arc à courant alternatif et les machines de soudure à l'arc à courant alternatif ou continu.

I.2.2. Emission d'harmoniques par catégorie d'utilisateurs

Sur un réseau de taille réduite, il est souvent possible de mesurer directement l'émission harmonique des clients industriels. S'agissant d'un réseau plus vaste, on se penne d'utiliser, sur la base de résultats de mesure, des modélisations du réseau par secteur d'activité dont le comportement harmonique est relativement homogène.

I.2.2.1 Utilisateurs domestiques

Le secteur résidentiel contribue pour une part importante à la pollution harmonique observée sur les réseaux à cause de l'introduction de l'électronique dans les appareils électrodomestiques, l'un des principaux appareils perturbateurs est le poste de télévision dont l'alimentation est constituée d'un redresseur monophasé à filtre capacitif.

I.2.2.2. Secteur tertiaire

Les activités les plus perturbatrices sont les bureaux, l'administration et les commerces, les institutions d'enseignement viennent occuper la troisième place. Les appareils injecteurs d'harmoniques sont essentiellement les redresseurs à filtre capacitif (informatique, bureautique),le froid alimentaire, la climatisation, les ascenseurs et les lampes fluorescentes.

I.2.2.3. Secteur industriel

De fortes injections harmoniques sont constatées au niveau des installations relevant des secteurs de l'énergie ainsi que des transfos nations et de la mécanique. Panné les appareils injecteurs d harmoniques: les variateurs pour moteurs à courant alternatif qui remplacent progressivement les variateurs pour moteur sa courant continu et qui sont trois fois plus polluants. L'injection harmonique dépend également des périodes de l'année et des tranches horaires, un facteur des simultanéités peut être appliqué pour un nombre N d'utilisateurs homogènes, selon une tranche horaire spécifiée.

I.2.3. Impact de la propagation des harmoniques

I.2.3.1. Effets des harmoniques

On distingue deux grands types d'effets:

- ***Les effets instantanés:***

Ce sont les effets immédiats sur le fonctionnement d'un matériel, ils concernent les appareils produisant une image électronique (écrans d'ordinateurs, téléviseurs), les appareils produisant un son censé être de bonne qualité (chaîne Hi-fi, téléphone) ou la précision des appareils de mesure.

- ***Les effets différés:***

Ils se manifestent après une exposition longue au phénomène et se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités sou une destruction complète de l'appareil.

I.2.3.2. Sensibilité de différents types de matériels

- ***Machines asynchrones:***

La circulation des courants harmoniques dans les enroulements du moteur, crée des échauffements supplémentaires ainsi qu'une altération, généralement faible, du couple moteur.

- ***Transformateurs:***

Ils subissent des échauffements supplémentaires en présence des courants harmoniques et peuvent également entrer en résonance mécanique aux fréquences harmoniques, ce qui entraîne outre l'inconvénient sonore, une fatigue mécanique.

- ***Câbles de puissance :***

La circulation de courants harmoniques dans les câbles se traduit par des pertes Joule supplémentaires.

- ***Condensateurs :***

En présence de charges générant des harmoniques, il est nécessaire de sur-dimensionner les condensateurs.

En cas de résonance dans un réseau, les condensateurs peuvent être soumis à de fortes tensions harmoniques et se détériorer.

- ***Relais de protection des réseaux :***

La présence de courants harmoniques se traduit par des déclenchements intempestifs ou par une perte de précision du seuil de déclenchement.

❖ ***Compteurs électriques :***

La précision des mesures des puissances est influencée par la présence d'harmoniques de tensions et de courant.

❖ ***Matériels électroniques de grande diffusion :***

Ils sont susceptibles d'être perturbés au niveau de leur alimentation en courant continu. Sur les écrans de téléviseurs et de micro-ordinateurs, des raies blanchâtres apparaissent lorsque le rang de l'harmonique appliqué ainsi que son amplitude sont élevés.

❖ ***Lignes téléphoniques:***

Leur juxtaposition avec des lignes électriques où circulent des courants harmoniques, produit par induction, l'apparition de tensions harmoniques indésirables qui viennent perturber le signal sonore.

Le signal est d'autant plus perturbé que la fréquence en cause est proche du maximum de la sensibilité de l'oreille humaine dans la gamme de fréquence utilisée pour la transmission téléphonique.

I.2.4.Formules de mesure quantitatives des harmoniques

I.2.4.1.Transformée de Fourrier

Soit un signal Sgt(t), pouvant représenter un courant ou une tension, périodique de période T , donc de fréquence $\boldsymbol{f}$=**1**/$\boldsymbol{T}$ et de pulsation $\boldsymbol{\omega = 2pf}$.

Ce signal peut se décomposer en série de Fourier de la façon suivante:

$$sg(t) = a_0 + \sum_{h=l}^{\infty}[ah.\cos(\omega.h.t) + bh.\sin(\omega.h.t)] \qquad \textbf{I-1}$$

Avec

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T sg(t).dt$$

Et pour

$$h \geq 1.\ a_h = \frac{2}{T}\int_0^T sg(t).\cos(\omega.h.t)\,.dt$$

$$b_h = \frac{2}{T}\int_0^T sg(t).\cos(\omega.h.t)\,.dt$$

Soit :

$$sg(t) = a_0 + \sum_{h=l}^{\infty}[ch.\sin(\omega.h.t + \theta_h)] \qquad \textbf{I-2}$$

Ou :

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}\ \ et\ \ \Theta_h = \text{arct}an(\frac{a_h}{b_h})$$

Les fréquences harmoniquesf_h, sont définies comme les fréquences multiples de la fréquence dite fondamentale$f$.

Leur rang « h » est tel que:

$$f_h = \text{h x F} \qquad \textbf{I-3}$$

Le terme [$\boldsymbol{a_h.COS(\omega.h.t) + b_h.sin(\omega.h.t)}$] est l'harmonique de

Rang h.

La grandeur$\boldsymbol{c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}}$est l'amplitude de l'hannonique de rang **h**.

Un signal déformé comporte généralement plusieurs harmonique. On représente souvent ce signal sous la forme d'un spectre. A chaque fréquence harmonique $\boldsymbol{f_h}$, on fait correspondre la valeur de$\boldsymbol{c_h}$.

L'intérêt de la décomposition harmonique est de faciliter les calculs de réseaux, car on des social ' étude à la fréquence fondamentale de celles relatives aux fréquences harmonique. Cette décomposition, dite harmonique, est un artifice mathématique très commode, il ne s'agit pas d'un phénomène physique distinct car, en réalité, on observe que des signaux non sinusoïdaux et non pas réellement des harmonique.

I.2.4.2.Grandeurs électriques en régime déformé et indices d'harmoniques

Les expressions de tension et de courant instantanés sont données

Respectivement par :

$$v(t) = \sum_{h=l}^{\infty} \sqrt{2}\, V_h . \sin(h.w.t + \Theta_h) \quad \textbf{I-4}$$

$$i(t) = \sum_{h=l}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=l}^{\infty} \sqrt{2}\, . I_h . \sin(h.w.t + \phi_h) \quad \textbf{I-5}$$

Où:

$\boldsymbol{v_h}$: Valeur efficace de la tension hannonique de rang h

$\boldsymbol{I_h}$: Valeur efficace du courant harmonique de rang h

- ***Puissance instantanée et puissance moyenne (active) :***

$$p(t) = v(t).i(t)$$

$$p = \frac{1}{T}\int_0^T v(t).i(t)dt$$

$$p = \sum_{h=l}^{\infty} V_h . I_h . \cos(\Theta_h - \phi_h) = \sum_{h=l}^{\infty} P_h \quad \textbf{I-6}$$

- ***Valeurs efficaces du courant et de la tension :***

$$\boldsymbol{V = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)dt} = \sqrt{\sum_{h=l}^{\infty} V_h^2}} \quad \textbf{I-7}$$

$$\mathbf{I} = \boldsymbol{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt} = \sqrt{\sum_{h=l}^{\infty} I_h^2}} \quad \textbf{I-8}$$

- ***Puissance apparente, puissance réactive et puissance de distorsion:***
  - **Une définition de la puissance apparente est donnée par :**

$$\boldsymbol{S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad \textbf{I-9}$$

  - **En monophasé, si la tension et le courant instantanés ont pour expression :**

$$\boldsymbol{v(t) = \sqrt{2}.V.sin(\omega.t)} \quad \textbf{I-10}$$

$$\boldsymbol{i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2}\, . I_h . sin(h.\omega.t + \phi_h)} \quad \textbf{I-11}$$

Nous avons alors:

$P = V.I_1.\cos(\phi_1)$, $Q = V.I_1 \sin(\phi_1)$, $S = V.I$

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \cdots I_n^2} \quad \textbf{I-12}$$

$$D = V.\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \cdots I_n^2} \quad \textbf{I-13}$$

Lorsque les harmoniques ne sont pas présents, S est égal à $V_1.I_1$, qui est la définition classique delà puissance apparente à la fréquence fondamentale.

❖ ***Facteur de puissance :***

Indépendamment du régime sinusoïdal ou déformé, le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active et apparente:

$$F_p = \frac{P}{S} \quad \textbf{I-14}$$

❖ ***Indices d'harmoniques:***

Il existe plusieurs indices qui permettent de décrire les effets des harmoniques sur l'appareillage du réseau électrique.

Les harmoniques de courant et de tension sont caractérisés par les principaux indices suivants:

➢ **TAUX DE DISTORSION INDIVIDUEL :**

C'est le rapport entre valeur efficace de l'harmonique (de courant ou de tension) de rang h et la valeur efficace du fondamental (de courant ou de tension) :

$$\frac{I_h}{I1} ou \quad \frac{V_h}{V1} \quad \textbf{I-15}$$

➢ **TAUX GLOBAL DE DISTORSION (THD) :**

il est utilisé pour mesurer la déviation d'une on de périodique contenant des harmoniques par rapport à une onde purement sinusoïdale :

*Taux global de distorsion en tension

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad \textbf{I-16}$$

*Taux global de distorsion en courant

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad \textbf{I-17}$$

I.3.Solutions de filtrage des harmoniques

I.3.1 Filtrage passif[4], [5]

De nombreuses solutions ont été développées pour désensibiliser les installations industrielles et le réseau vis-à-vis de la pollution harmonique. La solution la plus fréquemment mise en œuvre est le filtrage passif des harmoniques.

I.3.1.1. Principe

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à « dériver » les courants harmoniques et à éliminer les tensions harmoniques y afférentes. Des éléments capacitifs et inductifs sont, en effet, associés de manière à obtenir une résonance série accordée sur une fréquence choisie.

Une connaissance précise des rangs harmoniques devant être filtrés et des atténuations requises est nécessaire à la réalisation d'un filtre.

Une telle étude est généralement menée à l'aide d'un Logiciel de simulation. En fonction de l'atténuation harmonique recherchée, différents types de filtres passifs sont utilisés.

Ils peuvent être classifiés selon leur emplacement, leur mode de connexion au circuit principal, leur degré d'amortissement ainsi que les fréquences de leurs résonances. On distingue généralement un filtre shunt et un filtre série. Par ailleurs, le filtre shunt est utilisé exclusivement du côté courant alternatif (ca) pour les raisons suivantes:

- Le filtre série peut porter le courant en entier à partir du circuit principal et doit être isolé de la terre.
- Le filtre shunt, par contre, porte uniquement le courant harmonique et peut être lié à la terre à l'une des extrémités.
- A la fréquence fondamentale, un filtre shunt (ca) a l'avantage de fournir de la puissance réactive alors qu'un filtre série consomme de la puissance réactive.

- Pour des performances égales, un filtre shunt est beaucoup moins cher qu'un filtre série.

Dans ce sens, le présent projet s'intéresse à l'étude de filtres passifs de type shunt (ou filtres parallèles) dont les différents types pouvant être rencontrés

Sont:

a) l'inductance anti harmonique.
b) le filtre résonant.
c) le filtre amorti.

I.3.1.2 Différents types de filtres parallèles

a- Inductance anti-harmonique :

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

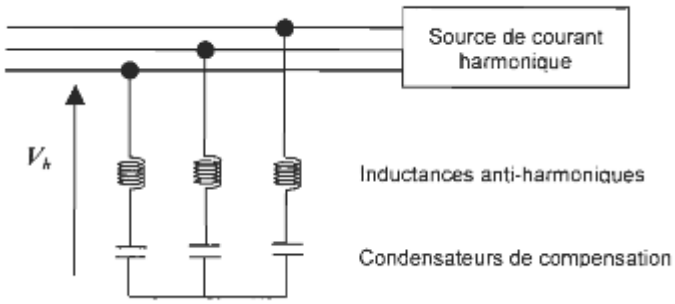


Figure I.1: Raccordement d'une inductance anti-harmonique

Ce type de filtre a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques.

Il a en outre pour effet de réduire les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Il permet souvent de réduire les valeurs d'impédance harmonique du réseau, vues du point d'injection au voisinage de la fréquence d' accord et donc les tensions harmoniques sur le réseau.

Pour éviter que ce filtre présente une résonance parallèle (antirésonances) avec l'inductance Du réseau sur lequel ils sont raccordés, on les accorde sur une fréquence inférieure à celle de la première injection de courant harmonique.

A noter aussi que l'installation d'inductances anti-harmoniques accroît la tension permanente à la fréquence fondamentale aux bornes des condensateurs qui doivent donc être dimensionnés en conséquence.

b- Filtre résonant :

Un filtre résonant a pour objet de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique à un rang déterminé.

Le facteur de qualité d'un filtre résonant est élevé; l'accord du filtre est donc très pointu.

Plusieurs filtres résonants correspondant aux différents rangs harmonique à filtrer, sont souvent installés, en parallèle.

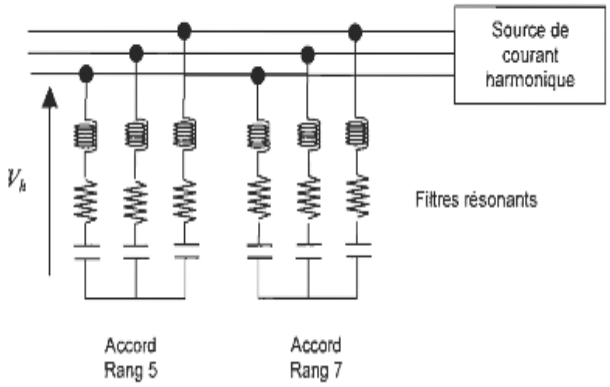


Figure I.2 : Installations de filtres résonants

La puissance réactive nécessaire pour l'installation est répartie entre condensateurs des différents filtres. Ceci nécessite une étude fine du profil de charge de l'installation.

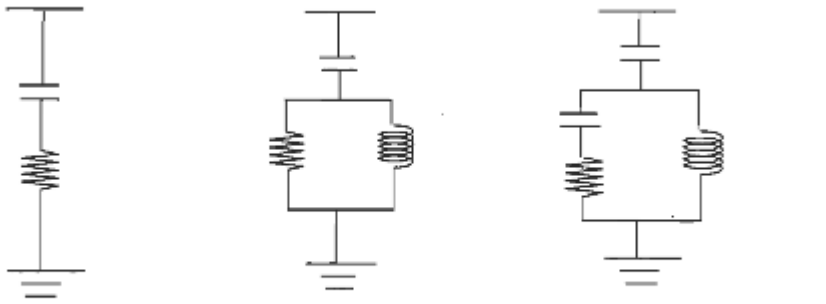
Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance (dues à la qualité de réalisation) ou de la capacité (dues au vieillissement ou à la température), ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble.

Cette dérive est plus marquée pour les filtres utilisant des condensateurs de faible capacité.

Afin d'ajuster la fréquence du filtre à la mise en service, l'inductance doit être munie de prises de réglage.

c- Filtre amorti:

On distingue trois types de filtres amortis tels qu'illustrés en figure I.3; nous avons en (a) un filtre amorti de premier ordre, en (b) un filtre amorti de second ordre et en (c) un filtre de troisième ordre.



1.5.a : filtre de 1er ordre 1.5.b : filtre de 2ème ordre 1.5.c : filtre de 3ème ordre

Figure I.3 : Filtres amortis passe-haut

Le filtre de premier ordre exige une grande capacité et présente une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale. Les filtres de second ordre et d'ordre 3 sont couramment utilisés.

Tous les deux sont en général conçus avec un faible facteur de qualité Fq compris entre 0,7 et 1,4.

Un filtre amorti de second ordre se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement.

Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas élevées pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre; c'est un filtre passe-haut de deuxième ordre.

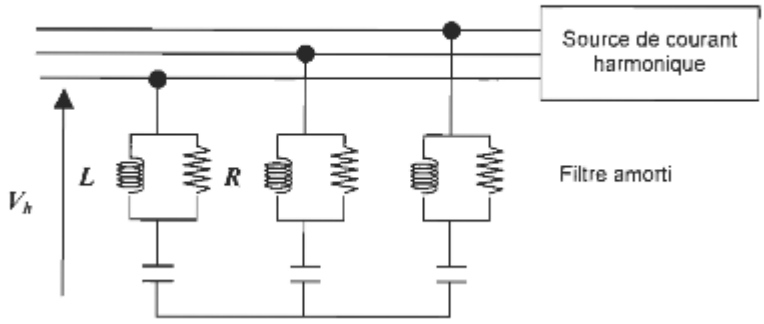


Figure I.4 : Installation d'un filtre amorti

En pratique, il est courant de mettre en œuvre :

- des filtres résonants accordés sur les premiers rangs harmoniques (rangs 5 et 7) où les injections de courant sont importantes.
- Un filtre amorti pour limiter l'impédance harmonique sur le reste du spectre (rangs>11).

L'antirésonance des filtres provoque une amplification des rangs harmoniques inférieurs à la fréquence d' accord. Le premier filtre est alors accordé sur la première fréquence d'injection de façon à ne pas faire coïncider la fréquence d'antirésonances avec une injection de courant.

Il est important de prévoir une inductance ajustable afin d'accorder correctement le filtre; c'en raison des tolérances sur les valeurs des condensateurs et de l'inductance dont l'effet peut être très important sur l'efficacité du filtre.

I.3.1.3.Avantages et inconvénients des filtres passifs

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

- La présence sur un même réseau de deux filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, mais en pratique légèrement différent, provoque entre eux la circulation de courants harmoniques très importants qui provoque rapidement leur destruction. Ce cas se rencontre facilement en raison du fait que la fréquence d'accord

varie lentement avec le vieillissement des éléments du filtre. Il faut absolument éviter de raccorder des filtres harmoniques de même rang sur un même réseau.

- La mise en parallèle d'un filtre anti-harmonique et d'une batterie de condensateurs provoque une contrainte pouvant amener la destruction des condensateurs.
- Lorsqu'il y a plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtre sac cordés sur les rangs correspondants. Ce problème peut être résolu en adoptant un filtre à large bande qui atténue plusieurs rangs harmoniques; ce avec un facteur d'atténuation moindre.
- L'implantation de filtres passifs sur un réseau nécessite une étude poussée et précise. En outre, il n'est pas toujours possible de connaître tous les paramètres du réseau, nécessaire à l'étude, lorsqu'il est de grande dimension.
- Finalement, l'amortissement de la résonance dans les systèmes de puissance par les filtres passifs peut introduire des résonances additionnelles indésirables pouvant conduire à la destruction de ces filtres.
- L'amortissement utilisant la commande et l'électronique de puissance se présente comme solution pour améliorer efficacement le mode opératoire du réseau.

I.3.2. Filtrage actif

Les filtres actifs de puissance ont été étudiés pour compenser les harmoniques dans les systèmes de puissance industriels depuis le principe de compensation de base proposé en 1971 par Sasaki et Machida [6]

Cependant, au début de l'année 1970, le domaine de filtres actifs de puissance ne connaissait presque pas de progrès au-delà du stade de test de laboratoire, parce que la technologie de ces circuits était très pauvre pour l'implantation pratique du principe décompensation. [7]

Dans les années 80, un remarquable progrès des dispositifs de commutation rapide comme les transistors de puissance et les thyristors à induction statique a aiguillonné le centre d'intérêt dans l'étude des filtres actifs pour la compensation des harmoniques.

En plus de la technologie de commande (MLL) [i .e. modulation de largeur d'impulsion] sophistiquée, le développement de l'étude théorique a rendu possible leur mise au stade de test pratique. En 1990, le filtre actif (MLL)

a connu un regain d'intérêt. Ses performances décompensation harmonique sont supérieures à celles du filtre passif Le classique. [8]

I.3.2.1. Principe

Les filtres actifs sont des convertisseurs de puissance, agissant comme source de courants ou de tensions harmoniques, qui injectent en série ou en parallèle sur les réseaux des courants ou des tensions harmoniques en opposition par rapport aux perturbations existantes.

Les convertisseurs de puissance totalement commanda blés utilisent un GTO, IGBT ou un MOFSET comme organe de réglage en vue d' asservir l' évolution de certaines grandeurs relatives au générateur ou au récepteur. Ces interrupteurs sont à amorçage et blocage commandés.

L'utilisation de réseaux de commutation avec les thyristors classiques limite la fréquence Del' onduleur à environ 100 Hz. Les thyristors interruptibles par la gâchette étendent la fréquence jusqu' à environ 2 kHz, le transistor bipolaire à 10 kHz et le transistor MOS de puissance à 25 kHz.

La principale rusons de l'utilisation de dispositifs de commutation rapides est de pouvoir commander l'onduleur par modulation de largeur d'impulsions. Plus on effectue des commutations par période, plus on élimine les harmoniques de rangs supérieurs.

I.3.2.2. Principaux types de filtres

Le filtre actif peut être à source de tension ou à source de courant dont les schémas généraux sont présentés aux figures(I.5) et(I.6).

Filtre actif à source de tension[9] [10] [11]

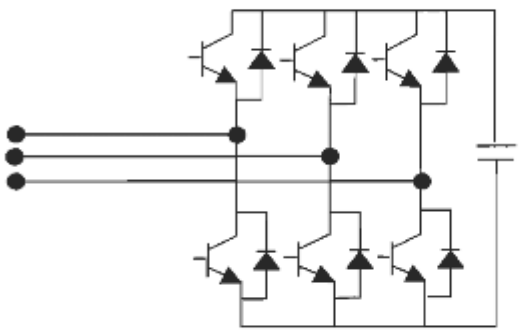


Figure I.5 : Convertisseur à source de tension

Filtre actif à source de courant : [12] [13]

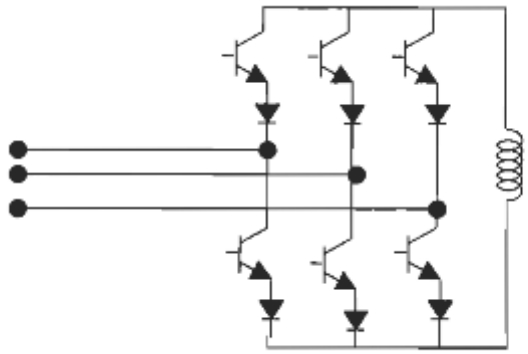


Figure I.6 : Modèle d'un convertisseur à source de courant

Il est requis que le convertisseur ait :

1- Une grande capacité de contrôle de courant pour une meilleure performance

2- Une grande efficacité d'opération pour une puissance supérieure Les convertisseurs à source de tension ou à source de courant peuvent être utilisés pour le filtrage actif.

Un filtre actif à source de courant (CSAF) est supérieur en (1), parce que le contrôle de courant se fait sans une boucle de retour.

Le filtre actif à source de tension (VSAF) est supérieur en (2), parce que les pertes dans les capacités (CC) sont inférieures à celles dans les réactances(CC) utilisées dans les (CSAF) Plaçant l'importance en (2), plusieurs littératures s'intéressent au Filtre actif à source de tension(VSAF).

Cependant, le CSAF peut s'avérer prometteur si des bobines supraconductrices entrent dans l'usage pratique parce qu'elles peuvent offrir une réactance (CC) avec moins de pertes[13].

Un système de filtrage pratique consiste en une combinaison d'un filtre actif (FA) et d'un filtre passe-haut de second ordre; une excellente performance de filtrage avec une faible fréquence de commutation est ainsi obtenue. Le filtre actif supprime les harmoniques de rangs faibles, pendant que le filtre passe haut s'occupe du filtrage des harmoniques de rangs élevés dans les courants de la charge.

I.3.2.3.Principales combinaisons possibles

I.3.2.3.1.Filtrage actif parallèle (shunt)

Il est placé en parallèle avec la charge. On parle alors de filtre shunt ou parallèle. Il existe deux types de fonctionnement pour un filtre actif parallèle

- Compensation de courants harmoniques : Le filtre actif parallèle compensateur de courant injecte un courant qui s'oppose au courant harmonique émis par la charge. L'ensemble charge/filtre se présente sur le réseau comme une charge qui absorbe un courant sinusoïdal. Le dimensionnement du filtre actif dépend du courant harmonique à fournir.
- Compensation de tensions harmoniques : Le filtre actif parallèle compensateur de tension a pour rôle de maintenir sinusoïdale la tension à ses bornes, c'est-à-dire du côté de la charge. Le filtre actif injecte un courant harmonique au travers de l'impédance Zs de façon à créer à ses bornes une chute de tension harmonique qui permet de régler la tension harmonique aux bornes de la charge. Cette stratégie de filtrage convient lorsque l'impédance de ligne Zs est suffisamment grande. En effet, le dimensionnement en courant du filtre actif dépend du rapport: tension -source /impédance -source.

I.3.2.3.2.Filtrage actif série

Le filtre actif fonctionnant en compensateur de tension fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique du côté de la source et à la chute de tension harmonique due à la charge non linéaire. Il permet de limiter la tension harmonique aux bornes de la charge.

I.3.2.3.3.Filtrage hybride (mixte actif -passif)

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 filtrages fonction de l'évolution de la charge et du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc' optimiser le rapport performance/coût et d'avoir une meilleure tenue de tension. De nombreuses variantes sont possibles mais peu ont été réalisées industriellement. Des performances élevées sont possibles, même avec un filtre actif de puissance réduite. [15]

- Filtre actif en série avec la source / filtres passif en parallèle avec la charge: Les filtres passifs sont accordés aux fréquences des harmoniques fortement présents sur le réseau, ils absorbent une grande partie des courants harmoniques créés par la chargé non linéaire.
- Le filtre actif fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique venant du côté source et à la chute de tension harmonique due à la charge non linéaire de façon à contrôler la tension harmonique aux bornes de la charge.

- Filtre actif et filtres passifs en parallèle avec la charge : Les filtres passifs sont accordés aux fréquences des harmoniques fortement présents sur le réseau. Le filtre actif se comporte comme une source de tension contrôlée en courant. Les composantes harmoniques du courant de la charge sont absorbées par la branche parallèle. Le courant Isdu réseau est alors sinusoïdal.

I.3.2.4. avantage et inconvénients des filtres actifs

- Le filtre actif offre de nombreux avantages:

-Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau;

-Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante).

-Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.

-Le risque de résonance entre le filtre et l'impédance du réseau ne se présente pas comme dans le cas du filtre passif.

-Il peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge.

- Toutefois, le filtrage actif présente quelques inconvénients :

-Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance.

-Il penne la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif.

-Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtrage passif.

le filtrage actif est donc plus intéressant sur des charges ne nécessitant pas de compensation de la puissance réactive. Par contre, le filtrage passif est intéressant sur des charges nécessitant cette compensation

I.4.Conclusion :

La recherche bibliographique présentée dans ce chapitre a permis de relever toutes les causes responsables de la propagation harmonique et particulièrement du problème de résonance dû à la circulation de ces harmoniques dans les réseaux électriques. Mais surtout elle a permis de mettre en relief les différentes solutions possibles pour le contrôle des harmoniques en précisant les avantages et les inconvénients de chacune. Ainsi, les solutions de filtrage passif ou actif à étudier dans le cadre de ce projet ont été définies.

Chapitre II :

Filtre actif Série à structure Tension

II.1.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. [14] [15], [16].

Ce chapitre est consacré à l'étude détaillée du filtre actif de puissance série à structure tension connecté en série avec le réseau électrique.

La première partie du chapitre décrit le principe de fonctionnement d'un FAS poursuivi des stratégies de contrôle permettant l'identification des tensions de compensation.

La deuxième partie présente les deux configurations d'un FAS à base d'un convertisseur de tension deux et trois-niveaux (NPC).

II.2.Principe de fonctionnement d'un Filtre Actif Série à structure Tension :

Le filtre actif série est une solution pour protéger des charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique. Il s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension. Le schéma de principe d'un filtre actif série est donné par la Fig. II-1, il est composé principalement de deux blocs l'un de puissance l'autre de commande. Le bloc puissance est constitué le plus souvent d'un convertisseur de tension triphasé deux ou trois-niveaux (NPC), d'un système d'alimentation en tension continue, d'un filtre de sortie et de trois transformateurs monophasés d'injection de tension. Le bloc commande consiste en l'identification des tensions perturbatrices et du contrôle des tensions injectées au réseau.

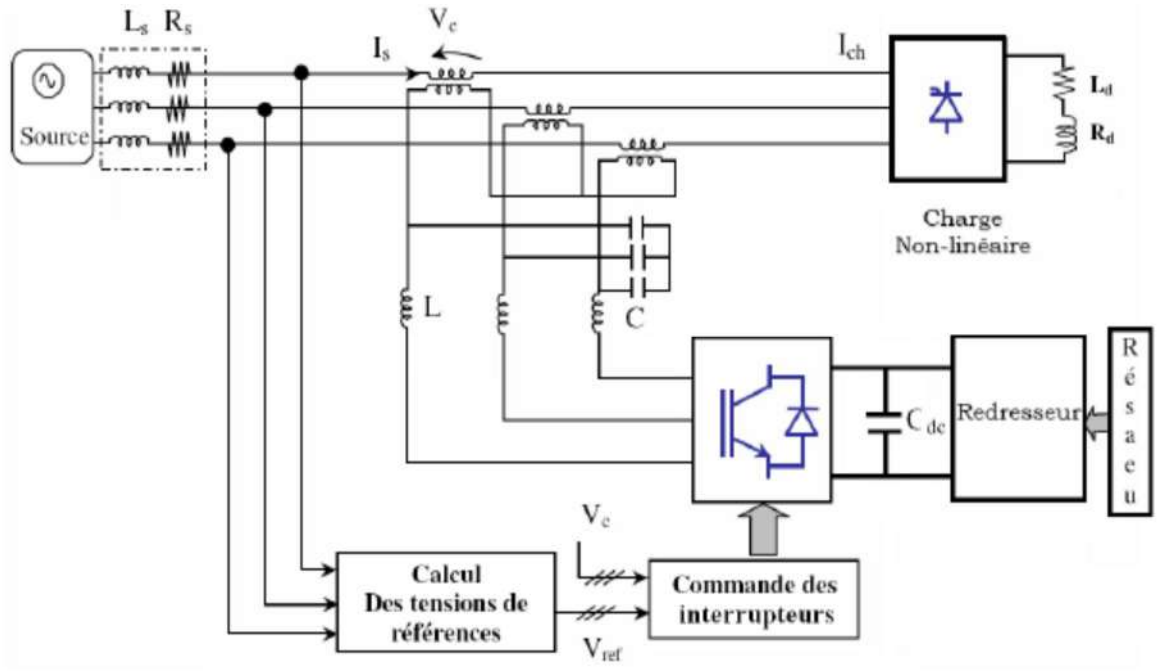


Fig. II-1 Schéma de principe d'un filtre actif série

II.3.Stratégies de contrôle d'un Filtre Actif Série à structure Tension

Afin d'identifier les tensions perturbatrices de la composante fondamentale directe de la tension du réseau électrique, plusieurs méthodes ont été étudiées. [17], [16], [18]

Parmi elles, les méthodes basées sur le calcul des composantes symétriques, méthodes basées sur le calcul des perturbations dans le repère (d,q) et les méthodes basées sur l'emploi d'un système à base d'une PLL. Dans cette partie, nous allons décrire les principales méthodes d'identification des tensions de compensation nécessaire au bon fonctionnement d'un filtre actif série.

II.3.1.Méthode basée sur le calcul des composantes symétriques

Cette méthode est basée sur le calcul des composantes symétriques de la tension du réseau électrique. [17], [16], [19], [20].

Les tensions composées d'un réseau électrique en montage triangle sont données par l'équation suivante :

$$[V_{abc}] = [V_{ab} V_{bc} V_{ca}]^T \qquad \textbf{II-1}$$

Ces tensions peuvent être décomposées en trois séquences positives (Vp) (appelées directes), négatives (Vn) (appelées inverses) et homopolaires (Vo), comme le décrit l'équation (II-2):

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad \textbf{II-2}$$

$\alpha = e^{j120}$

Considérant que le réseau étudié est composé de trois fils, les composantes homopolaires VO deviennent nulles. Afin de calculer la composante négative, le premier paramètre de compensation doit être défini. Il s'agit du facteur négatif U_n, appelé aussi taux inverse, qui est le rapport entre les composantes négative et positive de tension :

$$U_n = \frac{V_n}{V_p} \quad \textbf{II-3}$$

Afin de calculer la composante positive nécessaire pour réguler la tension de la charge à protéger, le deuxième paramètre de compensation doit être défini.

Il s'agit du facteur d'amplitude M_p qui est lerapport entre la composante positive et la tension de référence V_{d-des}:

$$M_p = \frac{V_p}{V_{d-des}} \quad \textbf{II-4}$$

Les tensions composées nécessaires pour compenser les tensions négatives sont :

$$[U_c] = -V_n.[T_n]$$

$$[T_n] = [1 \quad \alpha \quad \alpha^2]^T \quad \textbf{II-5}$$

En reportant les valeurs de Vn et Vp des équations (II-3) et (II-4) dans l'expression (II-5), on obtient:

$$[U_c] = -U_n.M_p[T_n] \quad \textbf{II-6}$$

Les tensions négatives simples (Vn1,2,3) peuvent être obtenues par l'équation suivante :

$$[V_{n1.2.3}] = \frac{U_n}{1-\alpha} = -U_n . M_p . \frac{[T_n]}{1-\alpha} \quad \textbf{II-7}$$

Les tensions composées nécessaires pour réguler la tension de la charge afin d'obtenir une amplitude V_{d-des}(tensions de référence) s'obtiennent par :

$$[M_c] = -V_p[T_p]$$

$$[T_e] = V_p[1 \quad \alpha^2 \quad \alpha]^T \quad \textbf{II-8}$$

En reportant la relation (II-4) dans (II-8), on trouve :

$$[M_e] = (1 - M_p)[T_p] \quad \textbf{II-9}$$

Les tensions positives simples Vp1,2,3 peuvent être obtenues par l'équation suivante :

$$[V_{p1,2,3}] = \frac{M_p}{1-\alpha^2} = \frac{(1-M_p)}{1-\alpha^2} . [T_p] \quad \textbf{II-10}$$

A partir des équations (II-7) et (II-10), on obtient les tensions nécessaires pour réguler et compenser le déséquilibre de tension de la charge à protéger :

$$[V_{ref1,2,3}] = [V_{n1,2,3}] + [V_{p1,2,3}]$$

$$[V_{ref1,2,3}] = \frac{[T_p]}{1-\alpha^2} - M_P . \left(\frac{[T_p]}{1-\alpha^2} + U_n \frac{[T_n]}{1-\alpha}\right) \quad \textbf{II-11}$$

Cette méthode permet la compensation des composantes inverse et directe d'une tension déséquilibre, mais ne permet pas la compensation de la composante homopolaire ni les harmoniques.

II.3.2.Méthode basée sur le calcul des perturbations dans le repère (d-q)

Cette méthode utilise la décomposition des tensions perturbatrices en séquences positive V_p, négative V_n, et homopolaire Vo. En passant par la transformation de Park nous obtenons pour chaque composante symétrique des valeurs constantes V_p(d,q-mes),$V_{n(d,q\text{-}mes)}$,Vo(d,q-mes) [17], [14], [16]

En fixant les composantes désirées dans le repère direct et en quadrature aux grandeurs (Vp(d-des), Vp(q-des)) pour la composante positive, aux grandeurs (Vn(d-des),Vn(q-des) pour la composante négative, et aux grandeurs (Vo(d-des),Vo(q-des)) pour la composante homopolaire, les tensions de référence dans le repère de Park sont déterminées de la façon suivante :

$$\begin{aligned} V_{d-ref}^{p} &= V_{d-des}^{p} - V_{d-mes}^{p} \\ V_{q-ref}^{p} &= V_{q-des}^{p} - V_{q-mes}^{p} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{d-ref}^{n} &= V_{d-des}^{n} - V_{d-mes}^{n} \\ V_{q-ref}^{n} &= V_{q-des}^{n} - V_{q-mes}^{n} \end{aligned} \qquad \textbf{II-12}$$

$$\begin{aligned} V_{d-ref}^{0} &= V_{d-des}^{0} - V_{d-mes}^{0} \\ V_{q-ref}^{0} &= V_{q-des}^{0} - V_{q-mes}^{0} \end{aligned}$$

Les tensions perturbatrices (tensions de référence) triphasées sont ensuite calculées grâce à la transformation suivante **:**

$$\begin{pmatrix} V_{ref1} \\ V_{ref2} \\ V_{ref3} \end{pmatrix} = C_{23}.P(\omega.t).\begin{pmatrix} V_{d-ref}^{p} \\ V_{d-ref}^{p} \end{pmatrix} + C_{23}.P(-\omega.t).\begin{pmatrix} V_{d-ref}^{n} \\ V_{d-ref}^{n} \end{pmatrix} \qquad \textbf{II-13}$$

$$P(\omega.t) = \begin{pmatrix} cos\omega t & -sin\omega t \\ sin\omega t & cos\omega t \end{pmatrix}$$

Avec C_{23} la transformation de Concordia inverse.

Cette méthode se complique en présence des composantes harmoniques, car il faut appliquer la transformation de Park directe et inverse pour chaque fréquence et procéder au filtrage des signaux à fréquence autre que celle de la transformation de Park. A cela nous ajoutons le fait que ces méthodes ont besoin d'une très bonne connaissance de la tension du réseau et qu'elles pour raient occasionner un surdimensionnement du filtre actif série, s'il n'y avait pas de conservation de l'angle de la composante directe de tension lors de la régulation de la tension de la charge.

II.3.3 Méthodes des puissances active et réactive instantanées (PQ)

Deux stratégies peuvent être utilisées pour l'identification des tensions perturbatrices en utilisant la théorie des puissances actives et réactives instantanées. La première approche peut être formulée de la façon suivante [18], [21], [22], [23], [24]:

Admettons que la tension source est triphasé symétrique et polluée, nous avons :

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \sin(n\omega t + \Theta_n) \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}\, U_n sin\left[\left(n\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \Theta_n\right] \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}\, U_n sin\left[\left(n\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \Theta_n\right] \end{bmatrix} \qquad \mathbf{II-14}$$

Ou Un et θn sont respectivement la valeur de la tension efficace et l'angle de phase initiale de chaque tension pour les différents ordres, n est l'ordre de l'harmonique.

Lorsque n=1, nous avons une source de tension triphasé fondamentale:

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \Theta_1) \\ \sqrt{2} U_1 \sin\left[\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \Theta_1\right] \\ \sqrt{2} U_1 \sin\left[\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \Theta_1\right] \end{bmatrix} \qquad \mathbf{II\text{-}15}$$

La transformation de l'équation (II-14) au repère de référence (α–β) donne l'équation (II-16):

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} U_n sin(n\omega t + \Theta_n \\ \sum_{n=1}^{\infty} \mp U_n sin(n\omega t + \Theta_n \end{bmatrix} \qquad \mathbf{II-16}$$

Avec:

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3/2} & -\sqrt{3/2} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{II\text{-}17}$$

Les trois courants de phase (fondamentale positive) sont donnés par:

II-18

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \textbf{II-18}$$

La transformation de l'équation (II-18) au repère de référence (α–β) est donné par:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ -\cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad \textbf{II-19}$$

En faisant appel à la théorie des puissances active et réactive instantanées :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad \textbf{II-20}$$

Alors:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} U_1 cos\theta_1 - \sum_{n=1}^{\infty} U_{3n+1} \cos(3n\omega t + \theta_{3n+1}) + \sum_{n=1}^{\infty} U_{3n+1} \cos(3n\omega t + \theta_{3n+1}) \\ U_1 sin\theta_1 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{3n+1} \sin(3n\omega t + \theta_{3n+1}) + \sum_{n=1}^{\infty} U_{3n+1} \sin(3n\omega t + \theta_{3n+1}) \end{bmatrix}$$

II-21

Ou les composantes DC et AC sont inclues:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \textbf{II-22}$$

En faisant passer p et q à travers des filtres passe-bas (FPB), la composante continue est donné par:

$$\begin{bmatrix} \bar{p} \\ q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} U_1 \cos(\theta_1) \\ U_1 \sin(\theta_1) \end{bmatrix} \quad \textbf{II-23}$$

En utilisant l'équation (II-22), la transformation est réalisée:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha} & i_{\beta} \\ -i_{\beta} & i_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} \quad \textbf{II-24}$$

Les composantes DC de p et q sont donnés par:

$$\begin{bmatrix}\bar{p}\\ \bar{q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u_{\alpha f} & u_{\beta f}\\ u_{\beta f} & -u_{\alpha f}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{\alpha}\\ i_{\beta}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}i_{\alpha} & i_{\beta}\\ -i_{\beta} & i_{\alpha}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_{\alpha f}\\ u_{\beta f}\end{bmatrix} \quad \textbf{II-25}$$

Les tensions fondamentales dans le référentiel (α–β) sont donné par

:

$$\begin{bmatrix}u_{\alpha f}\\ u_{\beta f}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}i_{\alpha} & i_{\beta}\\ -i_{\beta} & i_{\alpha}\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\bar{p}\\ \bar{q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}i_{\alpha} & -i_{\beta}\\ i_{\beta} & i_{\alpha}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{p}\\ \bar{q}\end{bmatrix} \quad \textbf{II-26}$$

Finalement les tensions fondamentale triphasés sont données par:

$$\begin{bmatrix}U_{saf}\\ U_{sbf}\\ U_{scf}\end{bmatrix}=C_{23}\begin{bmatrix}u_{\alpha f}\\ u_{\beta f}\end{bmatrix}=\sqrt{2}U_1\begin{bmatrix}\sin(\omega t+\theta_1)\\ \sin(\omega t+\theta_1-\frac{2\pi}{3})\\ \sin(\omega t+\theta_1+\frac{2\pi}{3})\end{bmatrix} \quad \textbf{II-27}$$

Avec:

$$C_{23}=\begin{bmatrix}1 & 0\\ -1/2 & \frac{\sqrt{3}}{2}\\ -1/2 & \frac{\sqrt{3}}{2}\end{bmatrix} \quad \textbf{II-28}$$

Le schéma de principe permettant l'identification des tensions perturbatrices basée sur la méthode des puissances active et réactive est donnée par
la Fig. II-2.

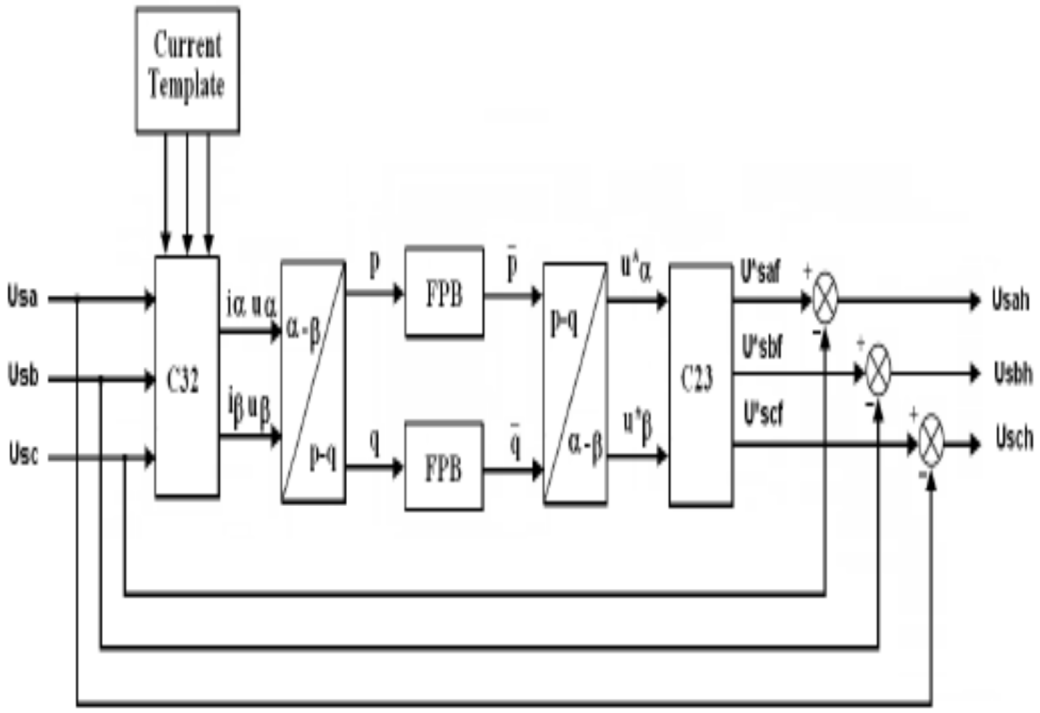


Fig. II-2 Identification des tensions perturbatrices

La deuxième approche consiste en la transformation des tensions instantanées triphasés de charge Ucha, Uchb, Uchc et des courants icha, ichb, ichc en coordonné biphasé (α–β), deux tensions de phase u_α , u_β et deux courants de phase i_α , i_β sont respectivement obtenus:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{cha} \\ U_{chb} \\ U_{chc} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} U_{cha} \\ U_{chb} \\ U_{chc} \end{bmatrix} \quad \textbf{II-29}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad \textbf{II-30}$$

Avec C_{32} est la matrice permettant de transformer un système triphasé (abc) en un système biphasé (α–β).

Dans le plan (α–β), $\overrightarrow{u}$ peut être décomposé en$\overrightarrow{u_\alpha}$ et $\overrightarrow{u_\beta}$

De même que pour le courant$\vec{\imath}$, il peutêtre décomposé en $\vec{\imath}_\alpha$et$\vec{\imath}_\beta$:

$$\vec{u} = \overrightarrow{u_\alpha} + \vec{u}_\beta$$
$$\vec{\imath} = \overrightarrow{\imath_\alpha} + \vec{\imath}_\beta \qquad \textbf{II-31}$$

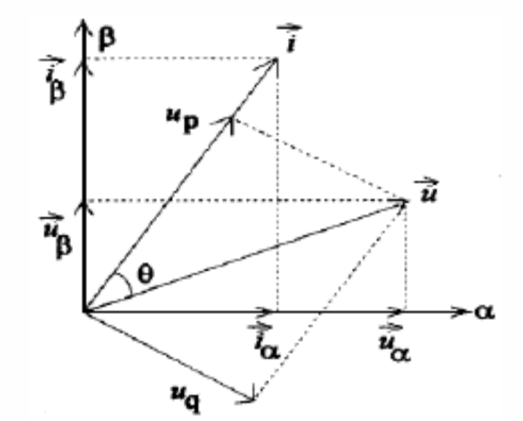


Fig. II-3 Diagramme vectoriel des tenions et des courants

Ou *u* et *i* sont les modules des vecteurs $\vec{u}$et $\vec{\imath}$ respectivement et u_q est l'angle entre $\overrightarrow{u}$et $\vec{\imath}$.

Assumons que $u_{\ p}$est la projection de $\vec{u}$ dans la direction de $\vec{\imath}$et $u_q$est la projection de $\vec{u}$dans ladirection orthogonale de $\vec{\imath}$, les expressions de $u_{\ p}$et $u_q$sont données par :

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sin\omega t & -cos\omega t \\ -cos\omega t & -sin\omega t \end{bmatrix} \left[\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} U_{lu} \\ U_{lv} \\ U_{hv} \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \end{bmatrix} = C_{pq} C_{32} \begin{bmatrix} U_{lu} \\ U_{lv} \\ U_{lw} \end{bmatrix} \qquad \textbf{II-32}$$

Avec:

C_{Pq}est la transformation matricielle permettant la conversion des tensions de phase u_α et u_β en$u_p$et u_q. Uch_a, Uch_b and Uch_c sont les tensions de charge triphasées.

Lorsque les tensionsUch_a , Uch_b and Uch_c sont asymétriques ou riche en harmoniques, les composantes respective $\overrightarrow{u_p}$et$\overrightarrow{u_q}$dans $u_p$et$u_q$correspondent à la séquence positive fondamentales active et réactive des tensions de phase triphasées et les composantes alternatifs correspondent aux composantes harmoniques dans les trois tensions de phase.

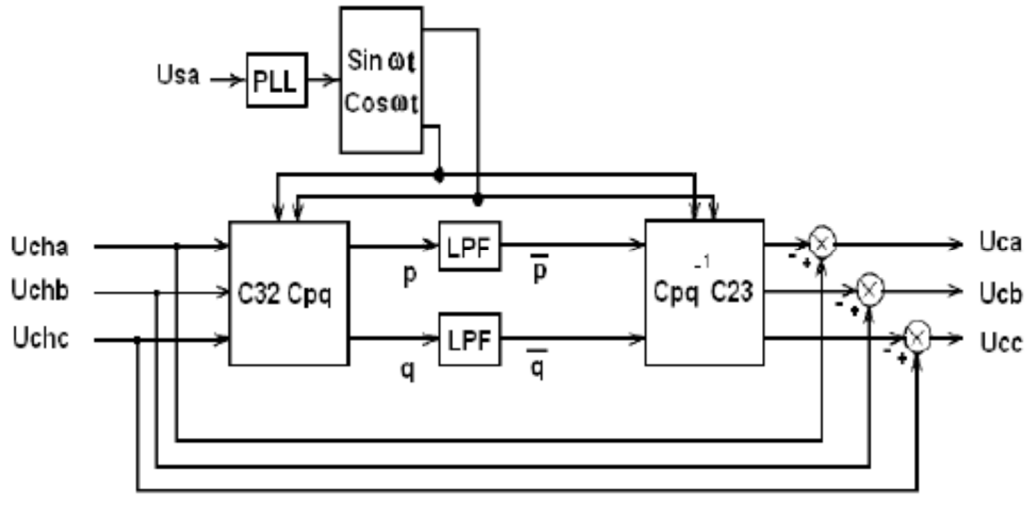
Alors, les composantes fondamentalesUch_{af}, Uch_{bf} et Uch_{cf}peuvent être obtenues par la transformation inverse : [25]

$$\begin{bmatrix} U_{chaf} \\ U_{chbf} \\ U_{chcf} \end{bmatrix} = \left[\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} sin\omega t & -cos\omega t \\ -cos\omega t & -sin\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{u_p} \\ \overline{u_q} \end{bmatrix} \quad \textbf{II-33}$$

$$\begin{bmatrix} U_{chaf} \\ U_{chbf} \\ U_{chcf} \end{bmatrix} = C_{23} C_{pq}^{-1} \begin{bmatrix} \overline{u_p} \\ \overline{u_q} \end{bmatrix}$$

Ou ${C_{Pq}}^{-1}$est la matrice inverse deC_{Pq}. Cependant les composantes harmoniques de compensation peuvent être calculées selon:

$$\begin{bmatrix} U_{ca} \\ U_{cb} \\ U_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{cha} \\ U_{chb} \\ U_{chc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{chaf} \\ U_{chbf} \\ U_{chc} \end{bmatrix} \quad \textbf{II-34}$$



μ

Fig. II-4 Tension de référence de compensation utilisant la méthode PQ

II.4 Filtre Actif Série à structure Tension à deux et à trois-niveaux (NPC)

II.4.1 Filtre actif série à structure tension deux niveaux

Le schéma de principe d'un filtre actif série à base d'un convertisseur de tension deux niveaux est donné par la Fig. II-5, le FAS est inséré entre la source de tension perturbée et la charge à protégée. Il est composé de la source de tension triphasé, d'un filtre de sortie LfCf afin de supprimer les ondulations de commutation et de trois transformateurs permettant d'injecter les tensions compensatrices au réseau. [22], [25].

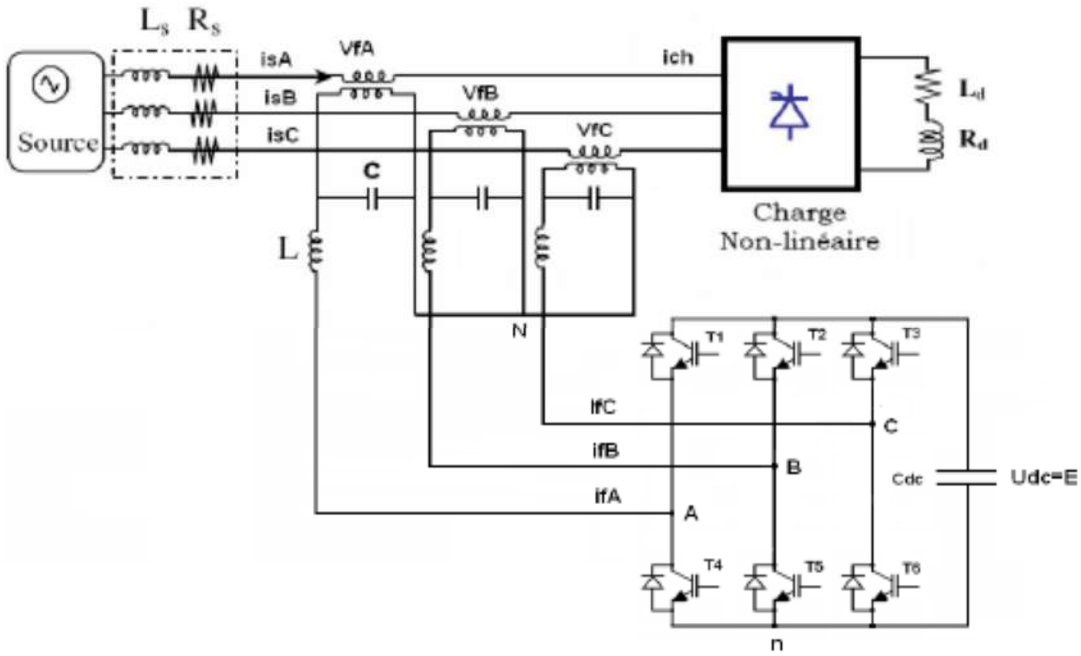


Fig. II-5 Schéma de principe d'un filtre actif série-convertisseur de tension deux niveaux

II.4.2 Modèle mathématique du FAS à structure tension deux niveaux

Le modèle mathématique du filtre actif série est basé sur les équations électriques qui gouvernent son fonctionnement. Il dépend des variables d'état tel que le courant dans l'inductance L du filtre, la tension aux bornes de la Capacité C et la tension DC aux bornes condensateur de filtrage Cdc . En choisissons un rapport de transformation 1 :1, les équations électriques peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{aligned} L\frac{di_{f\,A}}{dt} &= v_{f\,A} - v_{AN} \\ L\frac{di_{f\,B}}{dt} &= v_{f\,B} - v_{BN} \\ L\frac{di_{f\,C}}{dt} &= v_{f\,C} - v_{CN} \end{aligned} \quad \textbf{II-35}$$

$$\begin{aligned} C\frac{dv_{f\,A}}{dt} &= i_{s\,A-}i_{f\,A} \\ C\frac{dv_{f\,B}}{dt} &= i_{s\,B-}i_{f\,B} \\ C\frac{dv_{f\,C}}{dt} &= i_{s\,c-}i_{fc} \end{aligned} \quad \textbf{II-36}$$

$$i = C_{dc}\frac{dE}{dt} = d_1 i_{f\,A} + d_2 i_{f\,B} + d_3 i_{f\,C}$$

Avec $i_{f\,.A.B\,.C}$sont les courant traversant les inductances du FAS, et $i_{s\,.A.B\,.C}$ représente les courants principaux coté primaire du FAS. D'autre part :

$$\begin{aligned} v_{AN} &= d_1 E \\ v_{BN} &= d_2 E \\ v_{CN} &= d_3 E \end{aligned} \quad \textbf{II-37}$$

$$v_{nN} = -\frac{1}{3}(v_{AN} + v_{BN} + v_{CN})$$

Ce qui conduit aux équations suivantes :

$$\begin{aligned} v_{AN} &= v_{An} + v_{nN} = \frac{2}{3}v_{An} - \frac{1}{3}v_{Bn} - \frac{1}{3}v_{Cn} \\ v_{BN} &= v_{Bn} + v_{nN} = \frac{2}{3}v_{An} - \frac{1}{3}v_{Bn} - \frac{1}{3}v_{Cn} \\ v_{CN} &= v_{Cn} + v_{nN} = \frac{2}{3}v_{An} - \frac{1}{3}v_{Bn} - \frac{1}{3}v_{Cn} \end{aligned} \quad \textbf{II-38}$$

Ou « N » représente le point neutre principal et « n » nœud commun.

Cependant, le système peut être représenté comme suit :

$$\begin{aligned} L\frac{d}{dt}\overline{i_f} &= \overline{v_f} - T\overline{d}E \\ C\frac{d}{dt}\overline{v_f} &= \overline{i_s} - \overline{i_f} \\ C_{dc}\frac{dE}{dt} &= \overline{d^T}\overline{i_f} \end{aligned} \qquad \textbf{II-39}$$

Avec:

$$\overline{i_f} = \begin{bmatrix} i_{f\,A} \\ i_{f\,B} \\ i_{f\,C} \end{bmatrix}. \overline{v_f} = \begin{bmatrix} v_{f\,A} \\ v_{f\,B} \\ v_{f\,C} \end{bmatrix}. \overline{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix}. \overline{i_s} = \begin{bmatrix} i_{s\,A} \\ i_{s\,B} \\ i_{s\,C} \end{bmatrix}. \; T = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & 1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix}$$

Pour réduire l'ordre du système et le nombre des équations électriques, on utilise la transformation matricielle de Park :

$$K = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t) & -\cos(\omega_0 t) & 0 \\ \cos(\omega_0 t) & \sin(\omega_0 t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 3/2 & 3/2 & 3/2 \end{bmatrix} \qquad \textbf{II-40}$$

Ou ω_0 est la fréquence angulaire principale. Cette transformation permet d'exprimer les équationsdécrivant notre système dans le référenciel (d,q,o).

Les variables du système deviennent :

$$\begin{aligned} \overline{i_s} &= [i_{sd} i_{sq} i_{so}]^T = K\overline{i_s} \\ \overline{i_f} &= [i_{fd} i_{fq} i_{fo}]^T = K\overline{i_f} \\ \overline{v_f} &= [v_{fd} v_{fq} v_{fo}]^T = K\overline{v_f} \\ \overline{d} &= [d_d d_q d_o]^T = K\overline{d} \end{aligned} \qquad \textbf{II-41}$$

Le système (II-39) devient alors:

$$\begin{aligned} L\frac{di_{f\,d}}{dt} &= v_{f\ d} + L\omega_0 i_{f\,q} - d_d E \\ L\frac{di_{f\,q}}{dt} &= v_{f\ q} + L\omega_0 i_{f\,d} - d_q E \\ L\frac{di_{f\,0}}{dt} &= v_{f\ 0} \end{aligned} \qquad \textbf{II-42}$$

$$\begin{aligned} C\frac{dv_{f\,d}}{dt} &= C.\omega_0 v_{f\,q} - i_{f\,d} + i_{s\,d} \\ C\frac{dv_{f\,q}}{dt} &= -C.\omega_0 v_{f\,d} - i_{f\,q} + i_{s\,q} \\ C\frac{dv_{f\,0}}{dt} &= i_{s\,0} - i_{f\,0} \end{aligned} \qquad \textbf{II-43}$$

$$C\frac{dE}{dt} = \frac{3}{2}\left(d_d i_{f\,d} + d_q i_{f\,q}\right) + \frac{1}{3} d_0 i_{f\,0} \qquad \textbf{II-44}$$

Pour déduire le modèle d'état du système on considère que les variables de la séquence zéro sont nulles.

La variable d'état x incluant les variables d'état réduit du filtre série est définie comme suit :

$$x = [i_{fd} i_{fq} v_{fd} v_{fq} E]^T$$

Ainsi le système peut être représenté sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \\ v_{fd} \\ v_{fq} \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & \frac{1}{L} & 0 & -\frac{d_d}{L} \\ -\omega_0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{d_d}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 & 0 & \omega_0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} & -\omega_0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}\frac{d_d}{C_{dc}} & \frac{3}{2}\frac{d_d}{C_{dc}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \\ i_{fd} \\ i_{fq} \\ E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \qquad \textbf{II-45}$$

II.4.3 Filtre actif série à structure tension trois-niveaux (NPC)

L'inconvénient des topologies deux niveaux est la limitation des interrupteurs de puissance à travailler à haute tension [23], [25], , afin de contourner ce problème plusieurs travaux de recherche ont été élaborés en utilisant la topologie trois-niveaux (NPC) dont la commande est plus ou moins facile comparé aux autres structures multi-niveaux [LIN04] ou multicellulaires.

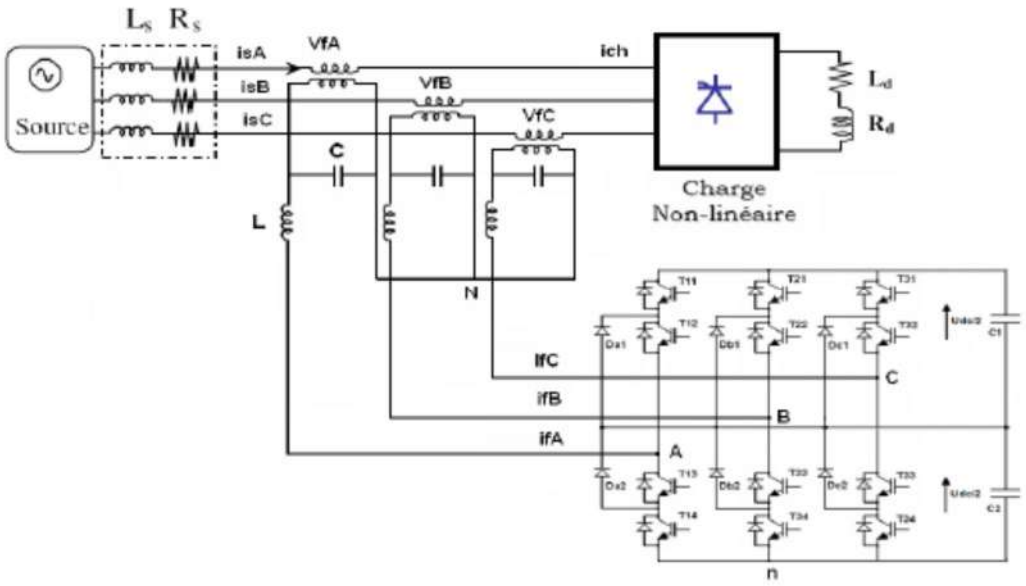


Fig. II-6 Schéma de principe d'un filtre actif série-convertisseur de tension trois-niveaux (NPC)

II.4.4.Transformateur d'injection

Les transformateurs d'injection de tension permettent d'injecter en série avec le réseau électrique avec le taux de transformation souhaité la tension produite par le convertisseur. Grâce à leurs caractéristiques magnétiques de saturation ces transformateurs contribuent à la protection du filtre actif série contre les défauts côté charge. [26]

Les désavantages de l'emploi de ces transformateurs sont leurs coûts élevés et la chute de tension occasionnée par leurs inductances de fuite (Lt,Rt) pour les systèmes de grande puissance. Le choix d'un filtre actif série sans transformateur d'injection nécessite l'emploi de trois onduleurs de tension monophasés avec trois sources continues indépendantes, cette solution augmentant l'énergie nécessaire pour compenser les mêmes creux de tension.

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.

II.4.5.Filtre de sortie Lfs, Cfs

Le filtre de sortie d'un filtre actif série est généralement un filtre passif du deuxième ordre (Lf,Cf), il est placé à la sortie du convertisseur afin d'atténuer les ondulations à hautes

fréquences dues à la commutation et à l'obtention d'une tension de compensation de meilleure qualité[16]. [27]

Ce filtre peut être raccordé de part et d'autre du transformateur de couplage, soit du coté convertisseur ou bien du coté ligne. [28]

La relation liant la valeur d'inductance et de la capacité à la fréquence de coupure est donnée par:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{fc}C_{fs}}} \quad \textbf{II-46}$$

Du point de vue de l'atténuation des harmoniques de découpage on pourrait choisir n'importe quelle combinaison des valeurs dont le produit respecte la valeur précédente. Cependant ce choix a des conséquences importantes sur le niveau de tension de sortie et sur le dimensionnement en puissance du convertisseur. D'un point de vue de la tension de sortie l'intérêt est de choisir une valeur d'inductance la plus réduite possible de façon à limiter au maximum les chutes de tensions produites dans cette dernière. La fréquence fondamentale du système pour un fonctionnement normale est de 50 Hz, le rejet des hautes fréquences peut être obtenu pour une fréquence de résonance de 500 Hz [22], [17], [25].

Si nous fixons la valeur de Lf à 10 mH, la valeur correspondante du condensateur Cf est de 10 µF.

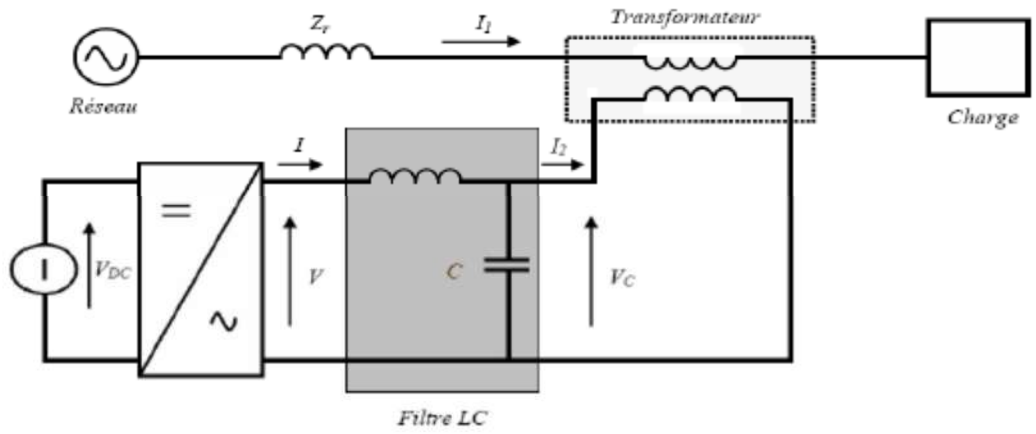


Fig. II-7 Compensateur série avec filtre passe-bas LC

II.4.6 .Système de stockage de la tension continue

Les creux de tension sont l'une des perturbations les plus rencontrés dans les réseaux électriques, des mesures effectuées indiquent que 92% de tous les événements correspondant à des creux ne dépassent pas 40% à 50% de la tension nominale et que la plupart dure moins de 02 secondes. Les interruptions longues de 02 à 10 minutes sont par contre rares et représentent environ 4% des événements. La capacité de compensation d'un creux est donc limité par son circuit des stockages, différentes systèmes sont envisageables [17], [29] :

- une alimentation DC à base d'un pont redresseur à diodes, triphasé ou monophasé, inclus dans la structure, le pont redresseur étant alimenté par le réseau électrique, chaque condensateur aura la valeur crête de la tension simple du réseau. Ce montage prévoit dessaleurs élevées des capacités de stockage pour assurer, dans le cas d'un réseau perturbé, un faible taux d'ondulation aux bornes des condensateurs. Il faut également s'assurer, dans ce cas, du dimensionnement en courant des diodes du pont redresseur.
- un système DC indépendant à base des batteries alimentant les condensateurs de stockage d'énergie. [29]
- Cette solution assure au filtre actif série une durée d'autonomie assez

Large avec une tension de sortie relativement stable pendant la décharge,

- pour les cas des filtres actifs de puissance élevée et de tension continue relativement basse, l'utilisation des super-condensateurs ou des supraconducteurs peut être envisagée
- pour les cas des filtres actifs de puissance élevée et de tension continue relativement basse, l'utilisation des super-condensateurs ou des supraconducteurs peut être envisagée. [17]

Dans le cas d'une alimentation à base d'un redresseur à diodes triphasé, la chute de tension du condensateur pendant la période de décharge ne doit pas influencer la qualité de compensation du filtre actif série. Cela est possible si la différence entre la tension nominale (Udc-n) et celle à la fin de la période de décharge (Udc-f) est assez petite. Donc pour pouvoir compenser un creux de tension de profondeur x%, la chute de tension aux bornes de chaque condensateur doit rester inférieure à (1-x)%. Cela revient à dire qu'il faut assurer que la tension continue aux bornes du condensateur soit supérieure à la tension de référence

(tensions perturbatrices identifiées). Le schéma de principe de la technique utilisant un redresseur à diode-condensateur est donné par La Fig. II-8.

Pour compenser un creux polyphasé de profondeur x% et de durée t, le compensateur doit fournir l'énergie suivante : [17]

$$\Delta W = i.\frac{P}{3}.\frac{X}{100}.\Delta t \qquad \textbf{II-47}$$

p : Puissance totale absorbée par la charge,

i : Le nombre de phases perturbées.

La variation d'énergie dans une capacité de stockage pendant la compensation du creux est égale à :

$$\frac{1}{2}C_{dc}(U_{dc-f}^2 - U_{dc-i}^2) \qquad \textbf{II-48}$$

Udc-f et Udc-i sont respectivement les tensions aux bornes de chaque capacité à la fin et au début de période de décharge.

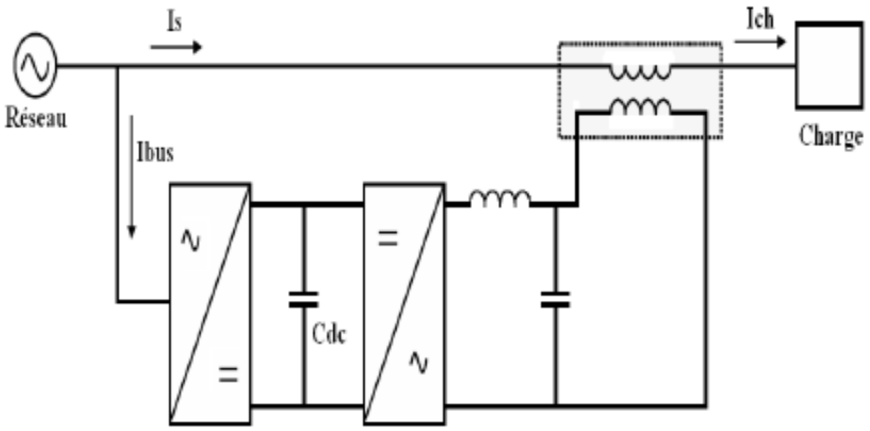


Fig. II-8 Schéma de principe d'un filtre actif série utilisant un redresseur à diode-condensateur

La technique de charge autonome proposée par [30], [29] permet de charger directement la capacité via le convertisseur lui-même. Le schéma de principe est représenté sur la Fig. II-9.

Le fonctionnement du FAS peut être divisé en trois phases selon l'état des interrupteurs du convertisseur de puissance utilisé :

Mode repos (redresseur non contrôlé) : les interrupteurs de puissance sont bloqués et le convertisseur fonctionne en mode redresseur non-contrôlé, le condensateur se charge tant que $i_{charge} \neq 0$ jusqu'à la tension coté continu dépasse la valeur crête de la tension réseau. Lorsqu'uncreux de tension est détecté, le mode de compensation est activé automatiquement.

Les inconvénients de cette technique sont :

- Durant la phase de charge autonome du condensateur, aucune compensation n'est possible.
- La durée de la compensation du creux dépend de l'énergie stockée dans le condensateur ,pour un creux de longue durée, cette technique ne donne pas de bon résultats.

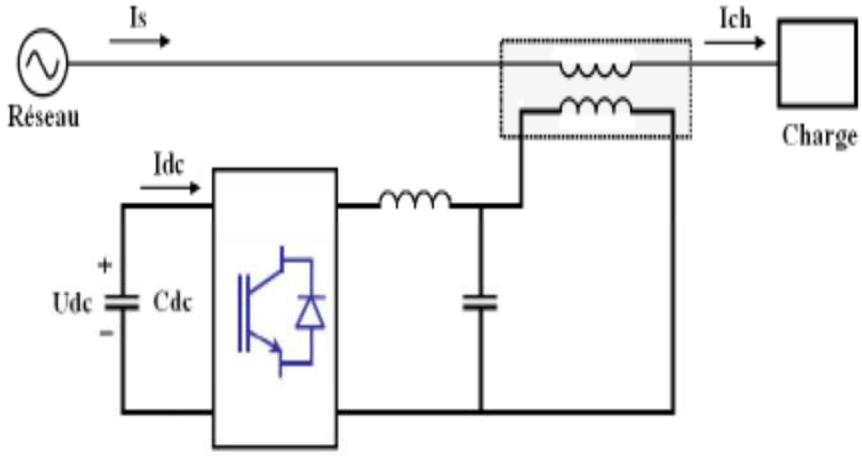


Fig. II-9 Schéma de principe d'un filtre actif série à mode de charge autonome

II.5. Conclusion

Le filtrage active série c'est une solution pour protéger les charges sensible contre les perturbations de tension du réseaux électriques.

Ce filtre n'a aucune influence sur les courants harmoniques qui pourraient circuler dans le réseaux.la tension aux bornes de la charge est sinusoïdale ,ce qui n'est pas le cas du courant

de la source car cette dernière est traversée par la totalité du courant de la charge.une des solution qui permet de pallier cet inconvénient est l'association d'un filtre actif série avec un filtre passif .

Chapitre III :

Modélisation et simulation d'un onduleur multiniveaux

III.1. Introduction

Grâce aux progrès technologiques réalisés ces dernières années dans le domaine de L'électronique de puissance, les convertisseurs statiques voient progressivement leur champ d'applications s'élargir. Certaines de ces nouvelles applications, telles que le filtrage actif et la dépollution de réseaux électriques, ou l'alimentation de machines à courant alternatif pour des applications particulières, sont très exigeantes en termes de performances dynamiques.

Les applications de l'électronique furent pendant longtemps limité à la technique des Hautes fréquences. Les possibilités d'application étaient limitées par le manque de fiabilité des éléments électroniques alors disponibles. Cette fiabilité était insuffisante pour répondre aux hautes exigences requises par les nouvelles applications dans le domaine industriel. Ce ne fut qu'à la suite du développement des composants électroniques spéciaux de fiabilité plus élevée et de tolérance plus restreintes, que les nouvelles techniques peuvent être envisagées, ainsi naisse une nouvelle branche de l'électronique appelée l'électronique de puissance.

A ` la base de l'électronique de puissance se trouvent les éléments de puissances, qui Peuvent être subdivisés en éléments redresseurs non contrôlables (diodes) et éléments Redresseurs contrôlables (thyristors, triacs, transistors ...).

Les éléments de puissance, associés à des dispositifs auxiliaires appropriés (commande De gâchettes, radiateurs de dissipation, circuit RC de protection), composent des modules Standard permettant la conversion de puissance, tel que les redresseurs, les onduleurs, les cycloconvertisseur … etc

III.2. Onduleurs multiniveeau

Durant ces dernières années, on vit la naissance de nouveaux convertisseurs de Puissance multi niveaux qui sont utilisés dans le domaine des entrainements de grande Puissance trouvent une intégration rapide dans le domaine PV. Parmi les convertisseurs Multiniveaux, on peut citer les redresseur multiniveaux et les onduleurs multiniveaux[31]

III.2.1.Structure générale d'un onduleur à trois niveaux [32]

La figure (III.1), ci-dessous représente la structure générale d'un redresseur de courant à trois Niveaux structure NPC, le rôle de ce redresseur de courant est de générer une tension de sortie continue à partir d'une source alternative

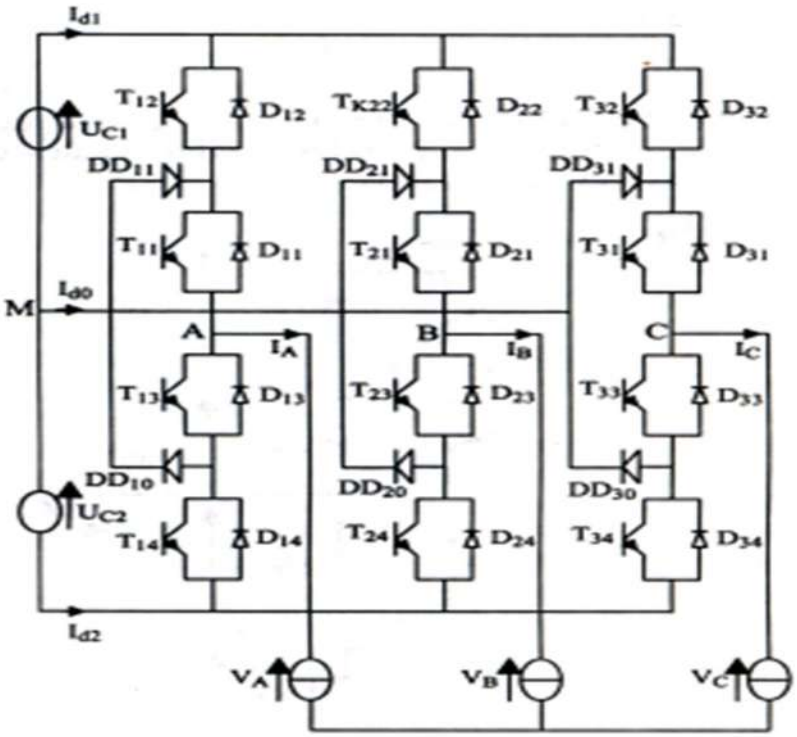


Figure (III-1): Structure générale d'un onduleure de courant à trois niveaux à MLI

III.2.2.Différents topologie des onduleurs multiniveaux

Par définition, l'onduleur de tension multiniveaux possède trois ou plusieurs niveaux. L'objectif de cette partie est de donner un aperçue générale des trois topologies de base des onduleurs multi niveaux, [33]:

- la topologie à diode de bouclage
- la topologie à condensateur flottant
- la topologie en cascade

III.3.Différent stratégie de commande des convertisseurs multiniveaux

Afin de générer une tension la plus sinusoïdal que possible [34], des techniques d'élimination des harmoniques et de commutation d'onduleurs ont été l'objet de recherche Les stratégies de commande des convertisseurs multiniveaux sont en générale une adaptation de celles appliquées aux convertisseurs à deux niveaux. Dans cette partie, nous présentons quelques techniques de commande.

III.3.1.Classification des stratégies de modulation

Les méthodes de modulation utilisée dans les onduleurs multiniveaux peuvent être classées en fonction de la fréquence de commutation .La méthode la plus populaire dans les applications industrielles est celle à MLI à porteuse Sinusoïdale(SPWM) qui utilise la technique du décalage de phase pour réduire les harmoniques de la tension de charge.

III.3.1.1. Commande par modulation de largeur d'impulsions

La commande par MLI consiste à découper la tension de sortie générée par le convertisseur en une série de motifs élémentaires de période très faible, et de rapport cycliquevariable dans le temps. L'évolution temporelle du rapport cyclique de chaque interrupteur est alors déterminée par un signal modulant que l'on choisit en général sinusoïdal. Les ordres de commande de chaque cellule sont générés par l'intersection entre une porteuse triangulaire et le signal modulant. Selon la stratégie adoptée, ce dernier peut être échantillonné en synchronisme avec la porteuse triangulaire ,ou comparé directement à celle-ci. Chaque interrupteur commute à une fréquence imposée par celle de la porteuse. [35]
Dans cette partie, on analyse trois stratégies de modulation à MLI sinusoïdale: classique, à double triangle et modifiée. Il s'agit de déterminer, pour un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC, le signal de commande généré par chacune des trois techniques. [33] cette méthode de commande permet:

- De repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie.
- De faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

III.3.1.1.1.Modulation sinusoïdal triangles multiples

Cette technique est basée, dans son principe, sur la modulation sinusoïdale classique. Pour un onduleur à trois niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires de même fréquence fp et de même amplitude Ap.

Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase, avec un signal de référence D'amplitude Ar_{ef} et de fréquence f_{ref}. C'est la modulation sinusoïdale à double triangle.

Pour les onduleurs avec un nombre de niveaux N supérieur à trois, la technique sinusoïdale Classique avec son signal triangulaire unique, ne permet pas la génération de tous les signaux de Commande requis. Alors, c'est la modulation sinusoïdale à triangles multiples qui le permet. Cette technique nécessite (N-1) signaux triangulaires de même fréquence fp et de même amplitude Ap.[36]

Le taux de modulation ma et le rapport de fréquence mf sont donnée respectivement par les Expressions suivants :

$$m_a = \frac{A_{ref}}{N-1} A_p \quad \textbf{III.1}$$

$$m_f = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad \textbf{III.2}$$

III.3.1.2 .modulation vectorielle

A la différence de la MLI inter sective, dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et Les temps d'application de ces vecteurs afin d'obtenir en valeur moyenne une tension de référence à partir des états de commutation de l'onduleur sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques.

Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur.
En général, la valeur moyenne du vecteur de référence peut être calculée en utilisant plus d'un vecteur par cycle de modulation, par l'approximation MLI valeur moyenne. Si l'on sélectionne les vecteurs adéquats et si l'on les applique dans l'ordre correct il est possible d'obtenir une fréquence de commutation à la sortie relativement élevée avec une fréquence de commutation réduite au niveau de composante.
La modulation vectorielle diffère, entre autres, des techniques inters sectives par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de l'onduleur en même temps. [37]

III.3.1.3. Elimination d'Harmoniques sélective.

Cette technique de modulation, qui est une méthode très efficace et très importante pour la commande des onduleurs deux niveaux afin d'améliorer beaucoup plus la qualité de leurs tensions de sortie. Elle consiste à former l'onde de sortie de l'onduleur d'une succession de créneaux de largeurs variables. Généralement, on utilise une onde qui présente une double symétrie par rapport au quart et à la demi- période. [38]

III.4.Simulation de l'onduleur trois et cinq niveaux

III.4.1.Onduleur à trois niveaux type NPC

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'un et tension de sortie à trois niveaux parla superposition de deux interrupteurs supplémentaires alimenté chacun par une source de tension continue distincte, Figure (III.2)

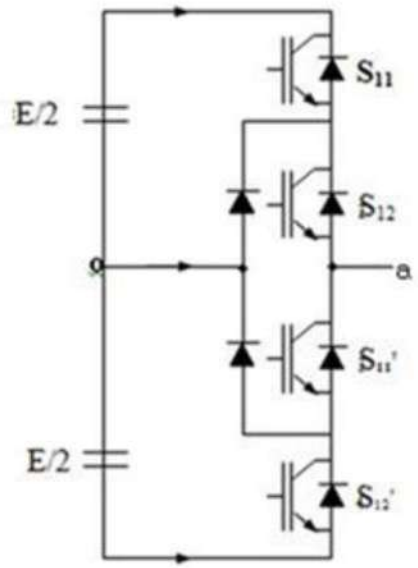


Figure (III.2): Schéma d'une branche d'onduleur NPC à 3 niveaux

En général un convertisseur NPC N-niveau à trois phases, est composé de$2 * (N-1)$ Interrupteurs connectés en série et $(N-1)$ liaison à courant continu. La tension aux bornes du condensateur est égale à $(Udc/N-1)$.

III.4.1.1. principe de fonctionnement

Pour décrire le fonctionnement de l'onduleur triphasé de type NPC, on considère un seul bras dont la structure est représentée dans la Figure (III-3**)**.Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple Vao entre la borne "a" de la charge et le point neutre 0.

Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs $S_{11}, S_{12}, S_{11'}$ et S_{12}'du bras.

Pour ce type d'onduleur, seules trois séquences sont fonctionnelles. Elles sont décrites comme suit:

- Séquence1:S_{11},S_{12}, sontpassantset$S_{11'}$, S_{12}' sont bloqués:

Dans ce cas la tension de sortie est :

$$Vao = +E/2 \quad \textbf{III-3}$$

- La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est:

$$V_{S11'} = V_{S12'} = +E/2 \quad \textbf{III-4}$$

- Séquence2:
- S12, S11' sont passants etS11, S12' sont bloqués:

La charge est mise en court-circuit à travers l'un des interrupteurs S12ouS11'et l'une des Diodes de bouclage (roue libre).Donc, le point « ***a*** » est relié directement au point neutre O. Alors, la tension de sortie Vao est nulle: Vao=0.

- La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est:

$$VS11=VS12'=+E/2 \quad \textbf{.III-5}$$

- Séquence3:

S11, S12 sont bloqués et S11', S12sont passants:

Dans ce cas la tension de sortie est :

$$Vao=- E/2. \quad \textbf{III-6}$$

- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$VS11 = VS12 = +E/2 \quad \textbf{.III.7}$$

Les figures suivantes illustrent les formes d'onde de la tension de sortie Vao, ainsi que les signaux de commande de chaque interrupteur.

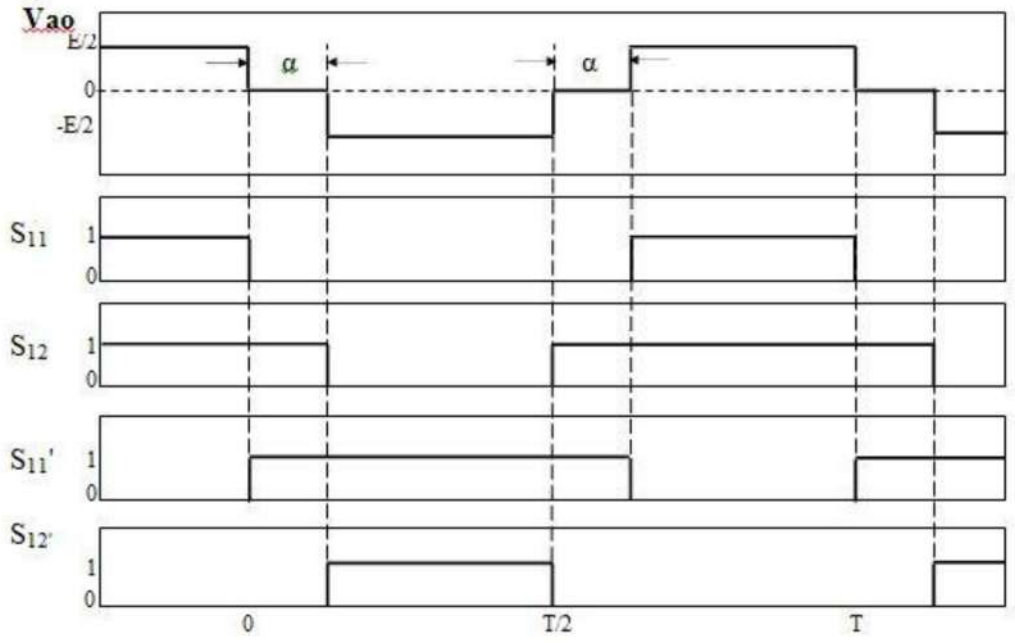


Figure (III-3): Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé trois niveau de type NPC

Cette analyse montre que la structure de l'onduleur à trois niveaux limite à E/2 la tension imposée à chaque interrupteur lorsqu'ils bloqué, alors que dans la structure classique de l'onduleur à deux niveaux, cette tension vaut la tension continue complète E.

C'est cette caractéristique de l'onduleur à trois niveaux qui permet de monté en tension et en puissance dans le cas des applications de forte puissance

III.4.1.2.Partie simulation :

Pour réaliser les différentes simulations de l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC avec la stratégie de commande MLI, on représente d'abord sa structure générale donnée par la Figure (III-4)schématisée par un schéma bloc dans l'environnement MATLAB

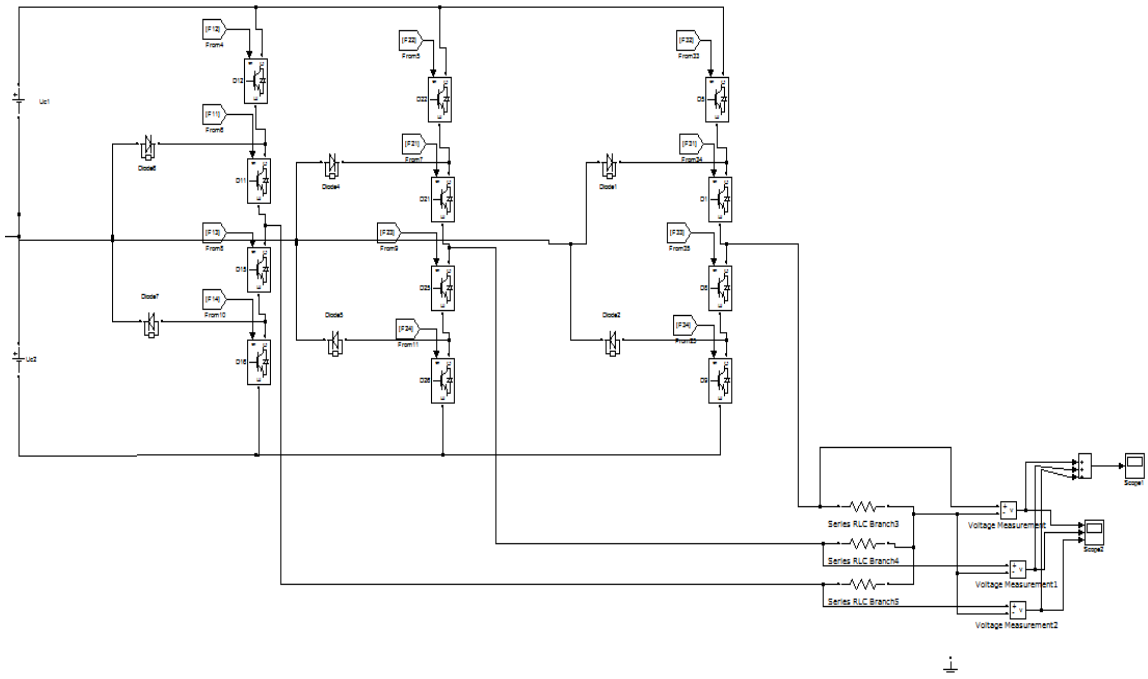


Figure (III-4) : schéma bloc l'onduleur de tension trois niveaux

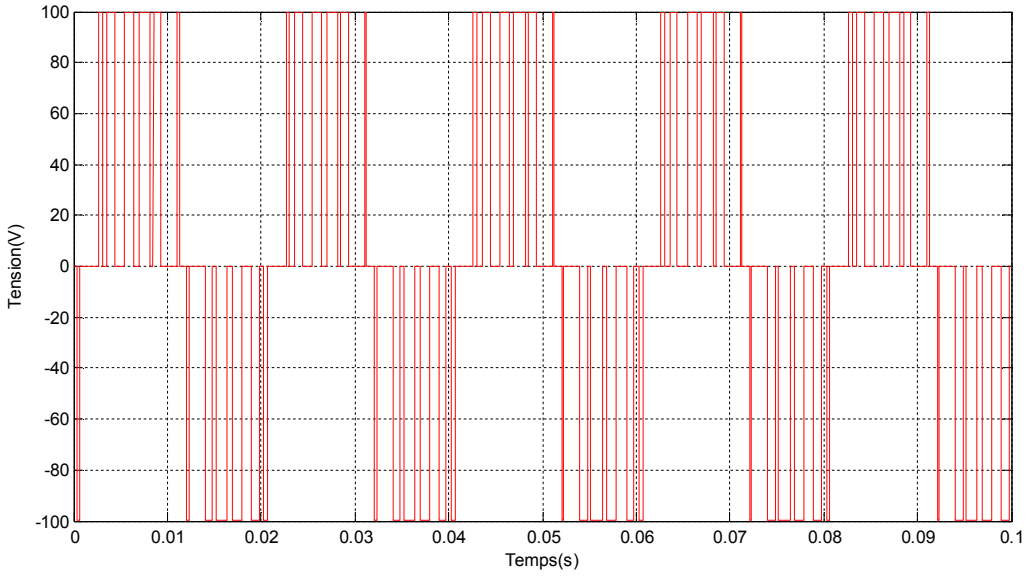


Figure (III-5) : Tension simple Va de sortie de l'onduleur à trois niveaux

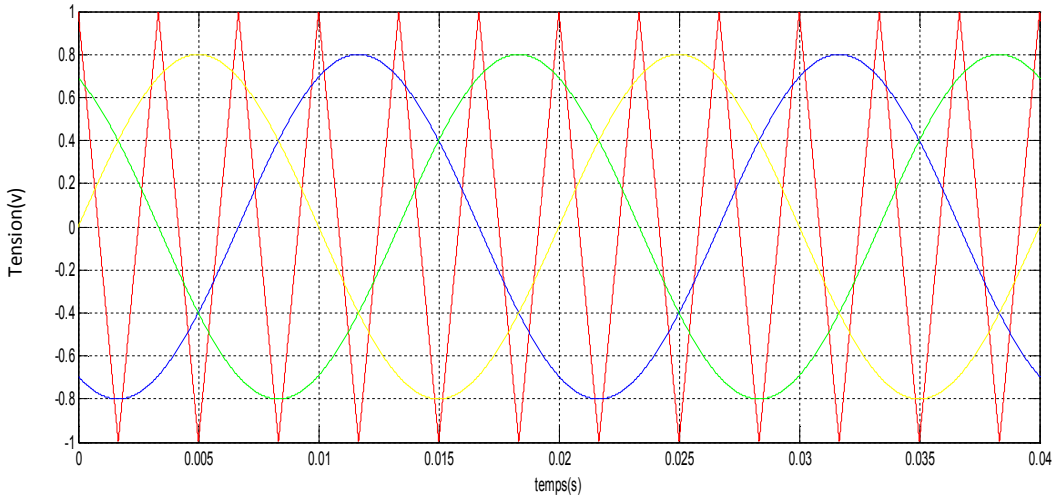


Figure (III-6) : Les différents signaux de la stratégie triangulo –sinusoïdale

(m =6, r =0.8).

III.4.2.Onduleur à cinq niveaux type NPC

La Figure (III.7) présente l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC dans lequel les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence O. Pour l obtention d'une tension de N-niveaux, N-1 capacités sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à E/(N-1). Chaque couple d'interrupteurs (S_{xy},S'_{xy}) forme une cellule de commutation, ces deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire.

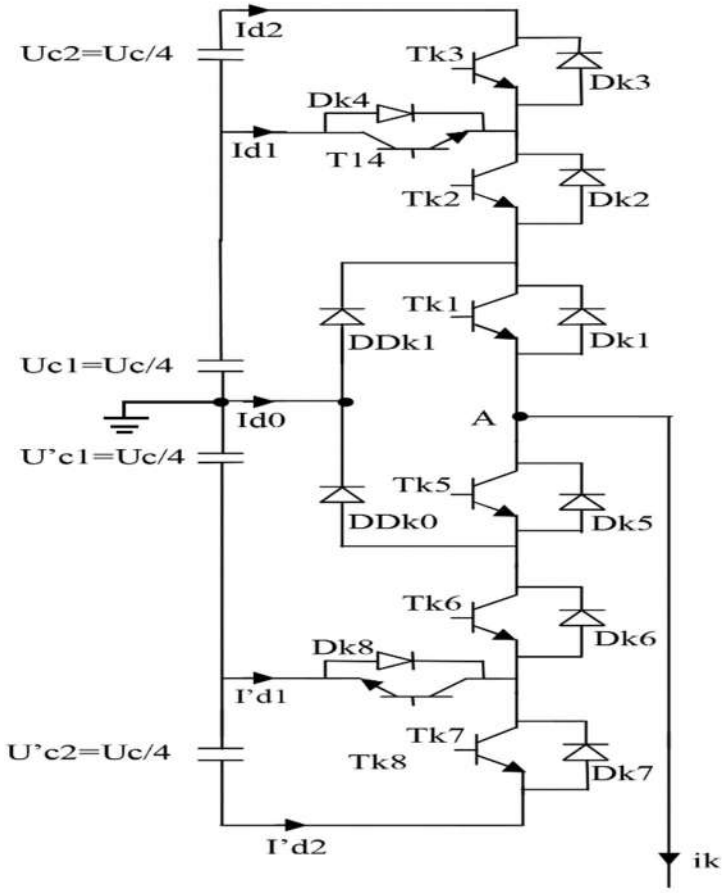


Figure (III-7) : Structure triphasé d'un onduleur cinq niveaux

III.4.2.1.principe de fonctionnement

Pour ce type d'onduleur, seules cinq séquences sont fonctionnelles. Elles sont d'écrites comme suit:

✓ Séquence 1

$S_{11}S_{12}S_{13}$ et S_{14}sont passant et S'_{11}, S'_{12}, S'_{13} et S'_{14}sont bloqués:

- la tension de sortie est :

$$V_{ao}= +E/2 \quad \textbf{III-8}$$

- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{S'11}=V_{S'12}= V_{S'13}= V_{S'14}=+E/4 \quad \textbf{.III.9}$$

✓ séquence 2

S_{12}, S_{13}, S_{14} et S'_{11}sont passantetS'_{12}, S'_{13}, S'_{14} et S_{11}sont bloqués :

- la tension de sortie :

$$V_{ao} = +E/4 \quad \textbf{III.10}$$

- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{S'12}= V_{S'13}=V_{S'14}=V_{S11} = +E/4 \quad \textbf{III.11}$$

✓ séquence 3

S_{13}, S_{14},S'_{11}et S'_{12}sont passant et S'_{13},S'_{14}, S_{11} et S_{12}sont bloqués :

- La tension de sortie :

$$V_{ao} =0 \quad \textbf{III.12}$$

- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{S'13} =V_{S'14}= V_{S11} = V_{S12}= +E/4 \quad \textbf{III.13}$$

✓ séquence 4

S_{14},S'_{11}, S'_{12} et S'_{13} sont passant et S_{11}, S_{12},S_{13} et S'_{14}sont bloqués:

- La tension de sortie :

$$V_{ao} = -E/4 \quad \textbf{III.14}$$

- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{S11} = V_{S12}= V_{S13} = V_{S'14}= +E/4 \quad \textbf{III.15}$$

✓ séquence5

S'_{11}, S'_{12}, S'_{13} et S'_{14} sont passant et S_{11}, S_{12}, S_{13} et S_{14}sont bloqués:

- La tension de sortie

$$V_{ao} = -E/2 \quad \textbf{III.16}$$

- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{S11} = V_{S12} = V_{S13} = V_{S14} = +E/4 \qquad \textbf{III.17}$$

III.4.2.2.Partie simulation :

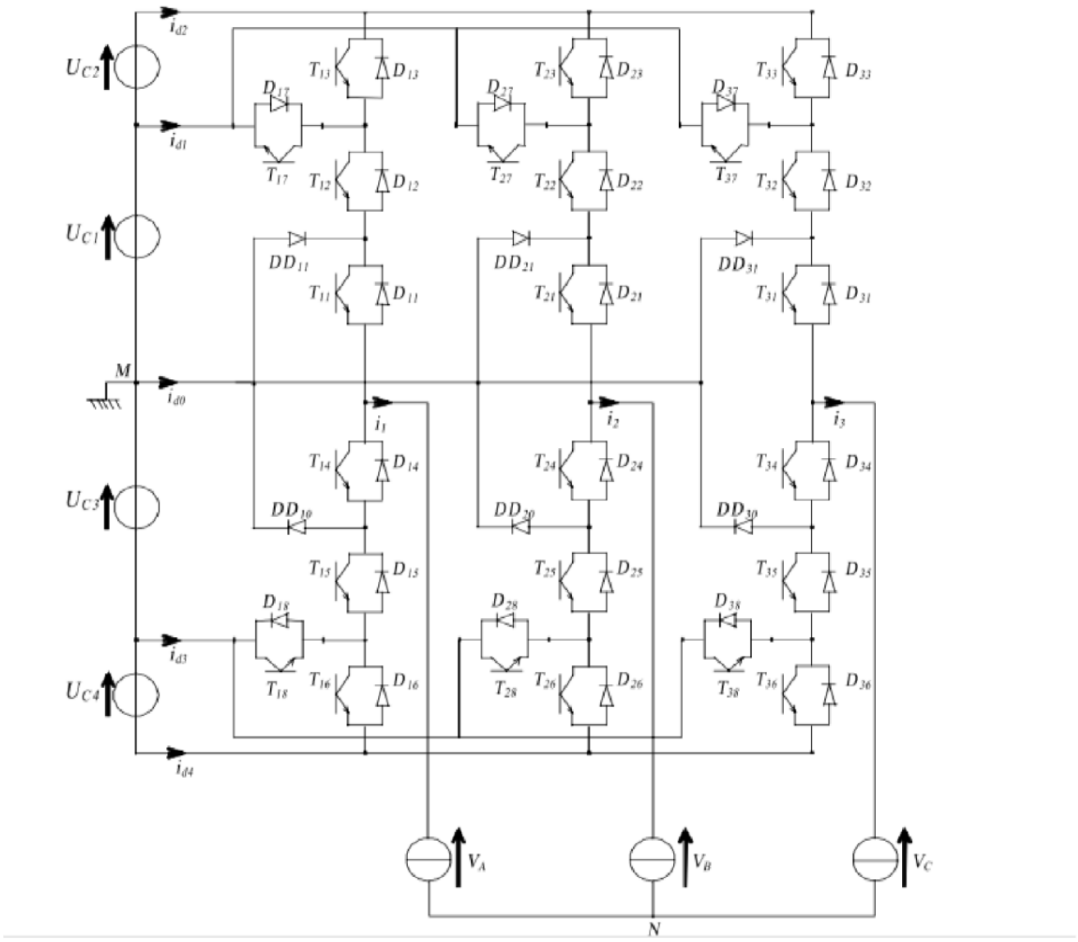


Figure (III-8) : onduleur triphasé a 5 niveaux a structure NPC

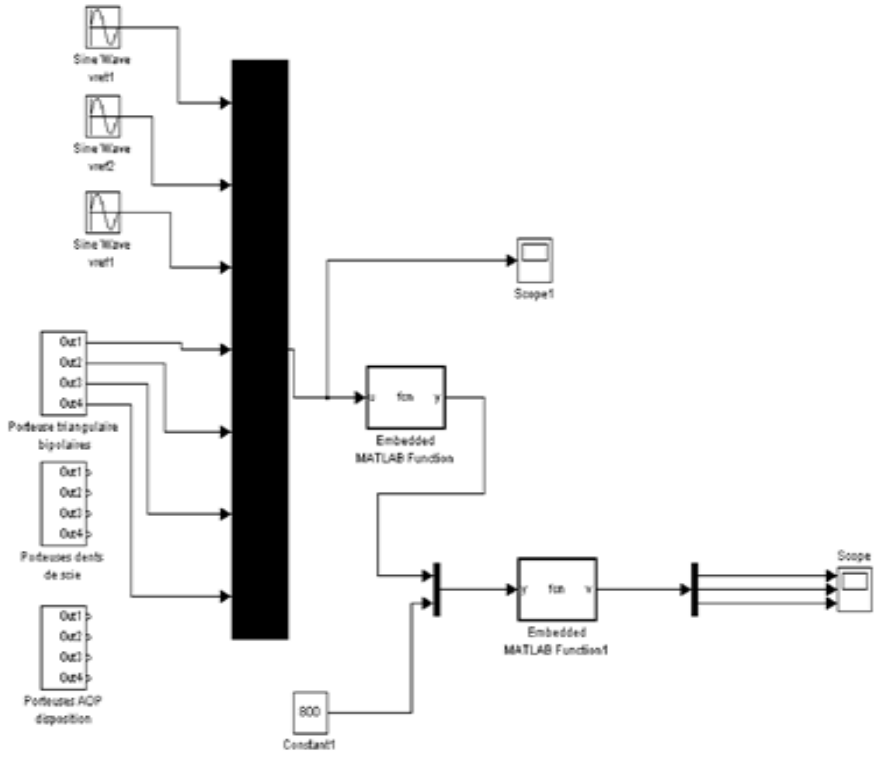


Figure (III-9) :onduleur triphasé a cinq niveau (SPWM) simlunk

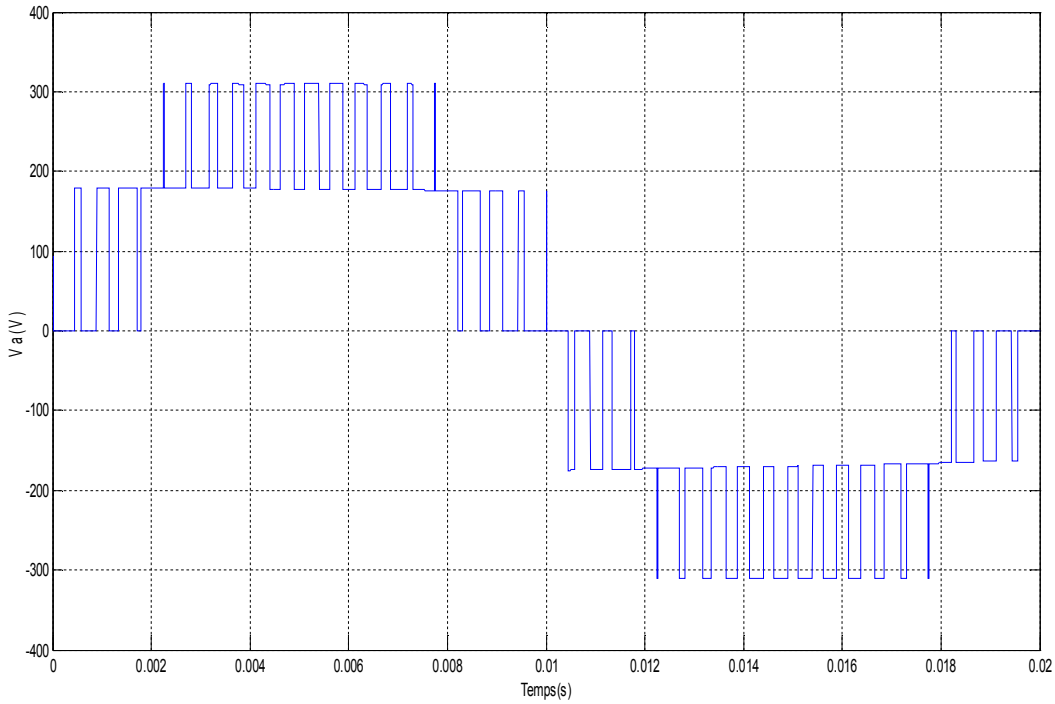


Figure (III-10) : La tension simple V_a de l'onduleur triphasé à cinq niveaux

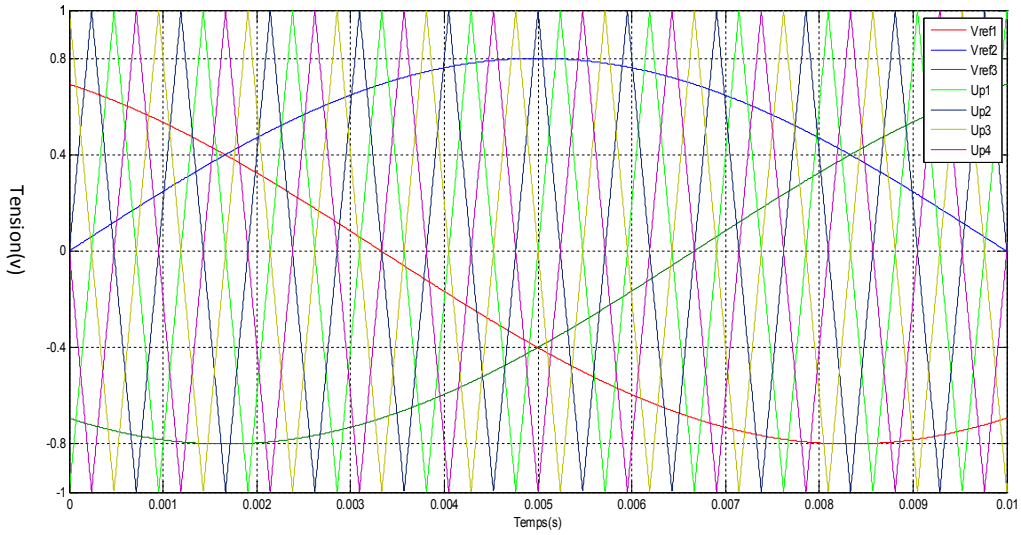


Figure (III-11) : Les différents signaux de la stratégie triangulo -sinusoïdale (m =21, r =0.8).

III.5.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé les stratégies de commande MLI de l'onduleur de tension à trois et cinq niveaux. L'étude des caractéristiques de la tension de sortie de l'onduleur pour la stratégie définie dans ce chapitre nous avons représenté le principe de fonctionnement des onduleurs NPC à trois et cinq niveaux associé à la commande triangule sinusoïdal à n porteuses.

Chapitre IV :

Etude et simulation d'un filtre actif série

IV.1-Introduction :

En vue de dépolluer le réseau électrique et de maintenir la tension sinusoïdale, aux bornes de la charge quelque soit le courant absorbé par celle-ci; on doit compenser les harmoniques.

Cependant, l'objectif de l'étude de ce chapitre est l'amélioration des performances de la compensation des harmoniques de la tension à partir d'une structure de filtre actif série (FAS). Ainsi, dans un premier temps, nous étudierons la structure générale et le principe de compensation du filtre actif série.Puis, dans un second temps, nous monterons la validation de la structure adaptée à travers plusieurs essais de simulation. [39]

IV.2- Filtre actif série :

Le filtrage actif série est une solution pour protéger les charges sensibles contre les Perturbations de tension du réseau électrique. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions (v_{fa}) s'opposant aux tensions harmoniques (v_{sh}) venant du coté source et à la chute de tension harmonique ($z_S i_{dh}$). Le circuit du filtre actif série, illustré par la figure 1, joue le rôle d'un compensateur de tension. [9]

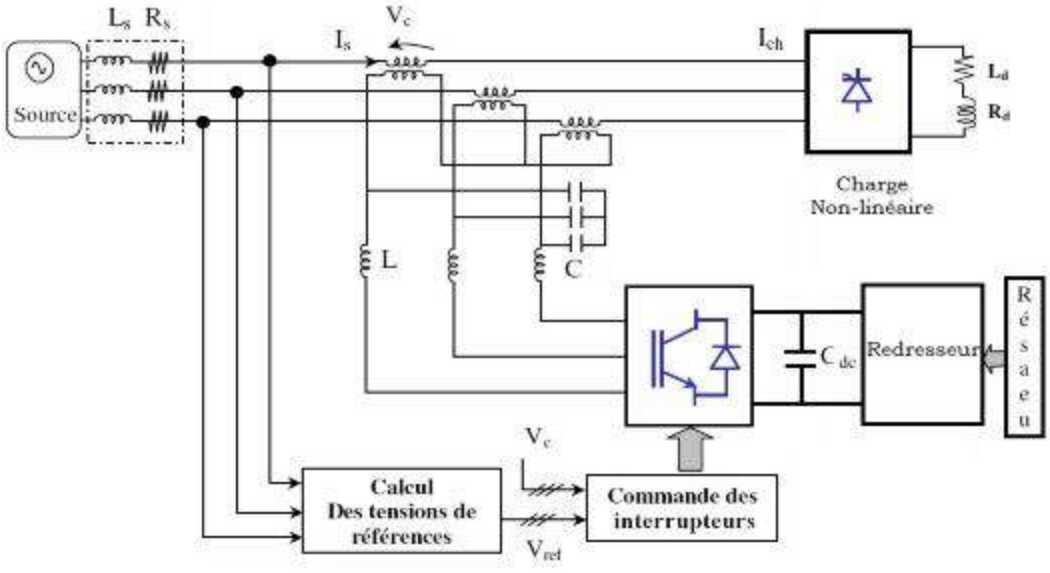


Figure IV.1 :Principe du filtre actif série

IV.3. Structure générale du filtre actif série :

Plusieurs structures du filtre actif série ont été proposées dans la littérature [40]. La plus utilisée est présentée sur Figure IV.2 . Cette structure, est composée d'une partie puissanceet d'une partie contrôle commande.

Le filtre actif série s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension.

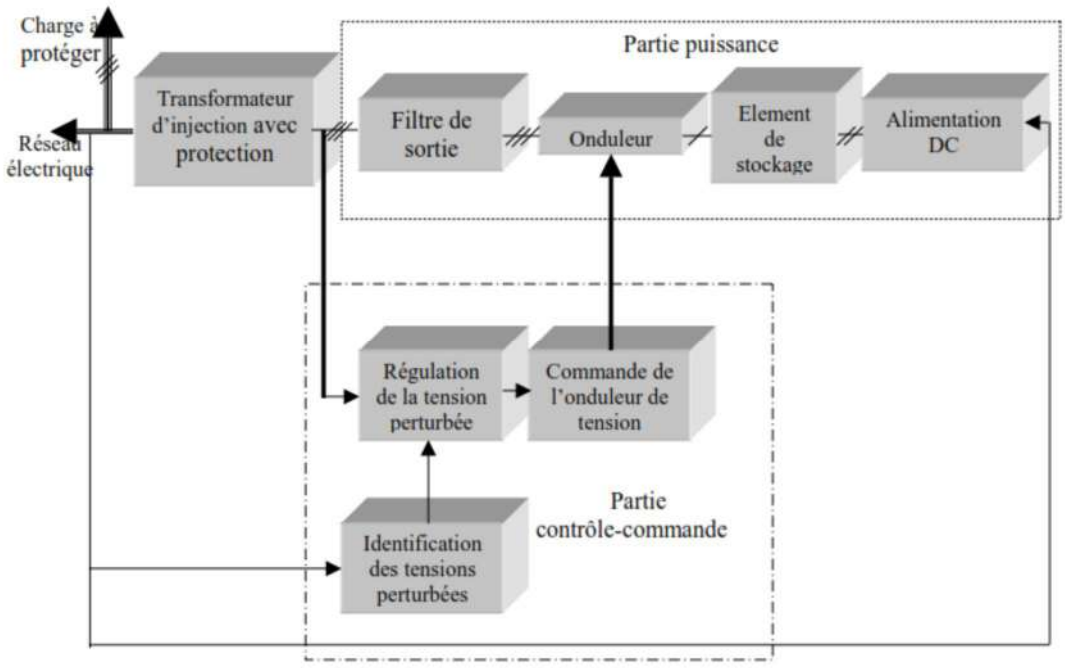


Figure IV.2 :Structure générale du filtre actif série

IV-3-1-Partie puissance :

Dans cette partie, on va détailler les éléments constitutifs du FAS. Nous commencerons par l'étude de l'onduleur en passant par le filtre de sortie et nous terminerons par les transformateurs d'injection de tension.

IV.3.1.1 Onduleur de tension :

L'onduleur de tension réalise l'interface entre deux types de sources :

- Source de courant du coté alternatif;
- Source de tension du coté continu

La présence de ces sources impose le respect des règles de fonctionnement suivantes:

- La source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit pas être court-circuitée, par

Conséquent deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandés d'une manière complémentaire. [40]

La source de courant coté alternatif ne doit pas être en court-circuit, d'où la mises-en Antiparallèle de diodes avec les interrupteurs.

L'onduleur de tension (figure 3) se compose de six interrupteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (IGBT, GTO), repartis d'une façon symétrique sur trois bras, montés avec des en antiparallèle avec des diodes. [39]

IV.3.1.2 Système de stockage de l'énergie :

Le choix d'un système de stockage à deux condensateurs (C_{dc1}, C_{dc2}) avec un point milieu, comme le montre Figure IV.3 , permet d'assurer aux bornes des condensateurs, une tension continuv_{dc}sans fluctuation. Cela permet aux trois phases du filtre actif série defonctionner indépendamment, ce choix dans le cas de l'utilisation du filtre actif parallèle auraitdégradé la dynamique. En effet, un système de stockage sans point milieu permet d'avoir une tension maximale à la sortie de l'onduleur d'une valeur de $v_f = 2 \cdot v_{dc}/3$, d'unevaleur maximale de$v_{dc}/2$mais dans le cas d'une structure avec un point milieu.

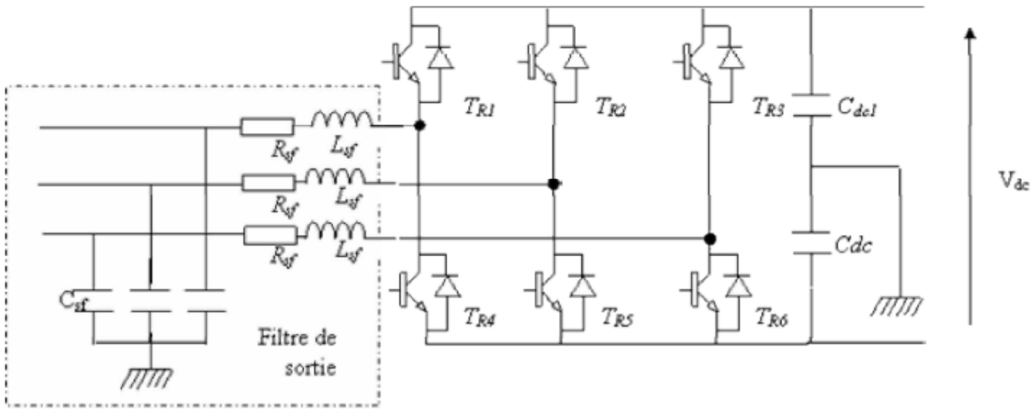


Figure IV.3 : Partie puissance du filtre actif série.

IV.3.1.3 filtre de sortie :

Le filtre de sortie d'un filtre actif série est généralement un filtre passif du deuxième ordre (R_f,L_f,C_f) comme le montre les figures3 et 4. L'ensemble onduleur et filtre de sortie se comportent comme une source de tension où le filtre de sortie sert à atténuer les composantesdues aux commutations de l'onduleur [40],d'autre part à connecter le filtre actif auréseau électrique dedistribution[39]

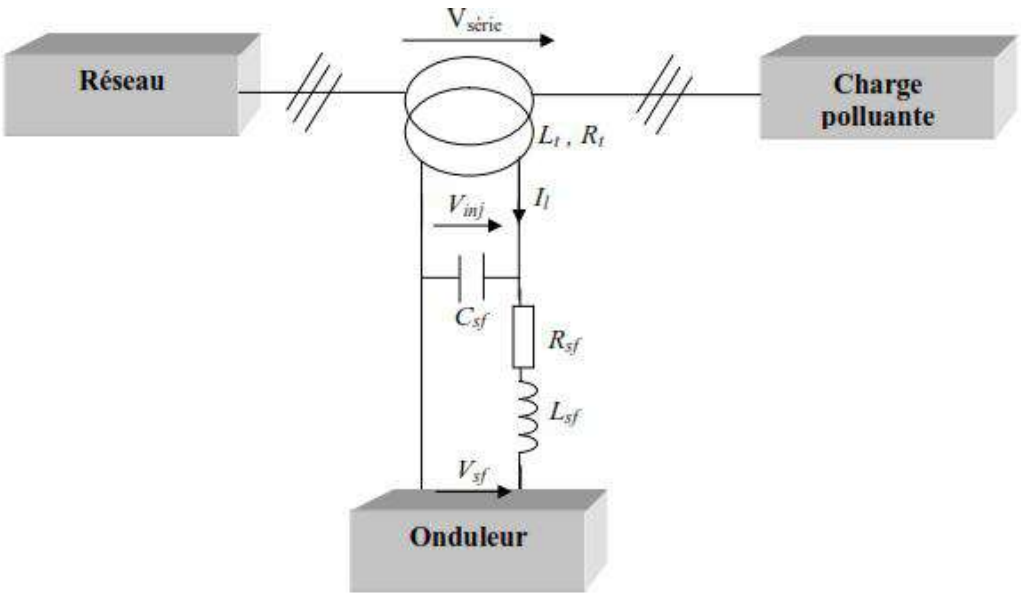


Figure IV4 : Schéma du filtre de sortie pour un FAS

IV.3.1.4.1Modélisation du filtre de sortie :

A partir de la figure 4, on obtient :

$$V_{inj}(s) = \frac{B_1(s)}{A(s)} V_{sf}(s) + \frac{B_2(s)}{A(s)} i_l(s) \qquad \textbf{(IV.1)}$$

Où

V_{sf}: La tension de sortie de l'onduleur$C$;

V_{inj}: La tension aux bornes du condensateur;

i_l: Courant de la charge à protéger.

Et,

$\frac{B1(S)}{A(S)}$: Fonction du transfert du filtre de sortie du système d'origine.

$\frac{B2(S)}{A(S)}$: Fonction du transfert du modèle de perturbation.

Ces perturbations sont causées par le passage du courant de la charge à protégeri_l.

Avec,

Et :

$$\begin{cases} A(s) = a_1 s^2 + a_2 s + a_3 \\ B_1(s) = b_0 \\ B_2(s) = b_{21} s + b_{21} s \end{cases} \qquad \textbf{(IV.2)}$$

Où

$$\begin{cases} a_1 = L_{sf} \cdot C_{sf} \\ a_2 = R_{sf} \cdot C_{sf} \\ a_3 = 1 \\ b_0 = 1 \\ \quad b_{21} = L_{sf} \\ \quad b_{22} = R_{sf} \end{cases} \quad \textbf{(IV.3)}$$

La fréquence de résonnasse du système d'origine est donnée par la relation suivante :

$$f_{cr} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{sf}C_{sf}}} \quad \textbf{(IV.4)}$$

Et, le facteur de qualité est donné par l'équation

$$Q = \frac{1}{R_{sf}}\sqrt{\frac{L_{sf}}{C_{sf}}} \quad \textbf{(IV.5)}$$

Donc on doit dimensionner le filtre de sortie pour empêcher les composantes dues à la fréquence de commutation de se propager sur le réseau électrique.

IV.3.1.5. Transformateurs d'injection :

Les transformateurs d'injection (l_t,R_t) en série avec le réseau électrique permettent d'injecter avec le taux de transformation souhaité la tension produite par l'onduleur. Ces transformateurs, considérés comme des transformateurs de courant [39], permettent
Grâce à leurs caractéristiques magnétiques de saturation ces transformateurs contribuent à la protection du filtre actif série contre les défauts côté charge [41]
Les désavantages dus à l'emploi de ces transformateurs, sont leurs coûts élevés et leurs chutes de tension causées par leurs inductances de fuite (L_t, R_t) .Pour palier à cetinconvénient, un filtre actif série à base d'un onduleur multicellulaire et un seul bus continu aété proposé.

Dans notre travail, on utilise trois transformateurs d'injection de tension à taux de transformation unitaire, dimensionnés pour supporter le courant de la charge et la tensionmaximale injectée au réseau électrique. [39]

IV.3.2. Partie contrôle commande :

Les éléments principaux de la partie contrôle et commande du filtre actif série sont :

- La commande de l'onduleur;
- La méthode d'identification des tensions perturbatrices appropriées;
- La régulation des tensions injectées au réseau électrique.

IV.3.3.Commande de l'onduleur :

Les deux principaux types de commande des onduleurs sont :

- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- La commande par hystérésis

a- Commande en MLI :

Elle consiste à comparer une onde modulatrice de référence (V) avec une onde porteuse triangulaire (V_p) comme le montre la Figure (IV5)

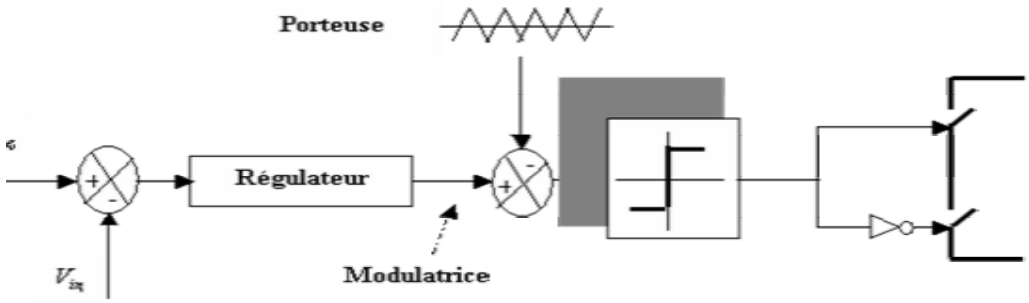


Figure IV5 :Principe de la commande MLI

La tension de sortie de l'onduleur V_{sf} est égale à :

$$\begin{cases} V_{sf} = KV_{entrèe} \\ K = \frac{V_{dc}}{2 \cdot V_p} \end{cases} \quad \textbf{(IV.6)}$$

Avec :

V_p:La valeur crête de la tension de la porteuse ;

V_{dc}: La valeur crête de la tension continue à l'entrée de l'onduleur.

b- ***Commande à hystérésis :***

C'est une commande non linéaire qui utilise l'erreur entre la tension de référence et la tension produite à la sortie du filtre de l'onduleur (figure 5). Cette erreur est comparée à la bande d'hystérésis. Ainsi, dés que l'erreur atteint le minimum ou le maximum de la bande, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. [39]

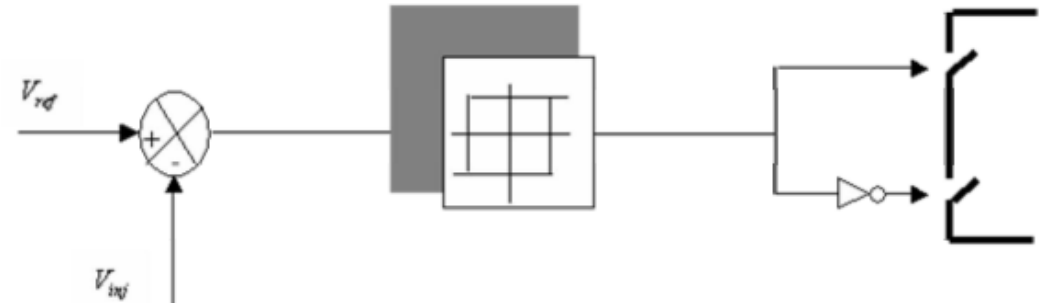


Figure- IV-6 : Principe de commande par hystérésis

IV.4.Simulation dufonctionnement d'un filtreactifsérie-chargenonlinéaireinductive

IV.4..1 Filtreactifsérieà base d'unconvertisseur de tension deux niveaux

Le schéma du FAS à base d'un convertisseur de tension deux niveaux est donné par la Fig.IV-7.

La stratégie de contrôle adopté pour l'identification des tensions compensatrices est basée sur la méthode PQ, la commande du convertisseur est réalisé moyennant un contrôleur à hystérésis. La tension continue nécessaire à la compensation est obtenue en utilisant la technique de charge autonome.

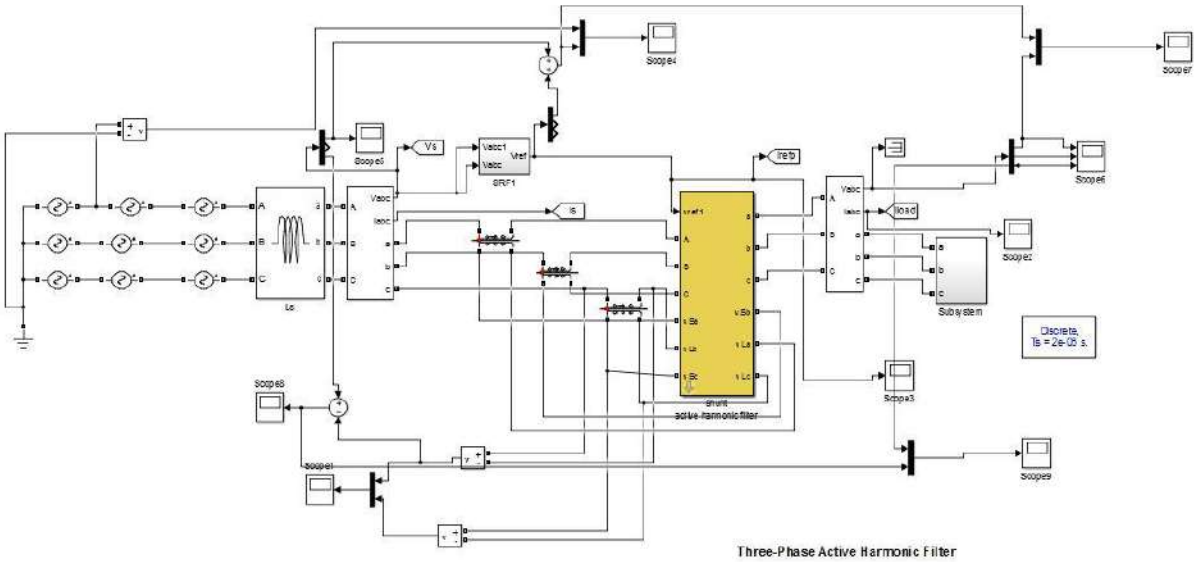


Fig.IV-7 : Bloc diagramme du FAS utilisant une stratégie de contrôle PQ(I) associé à un contrôleur à hystérésis à base d'un convertisseur de tension deux niveaux

IV.4.2. Compensationdes harmoniques de tension

L'expression des trois tensions triphasées équilibrée déformées sont donnés par:

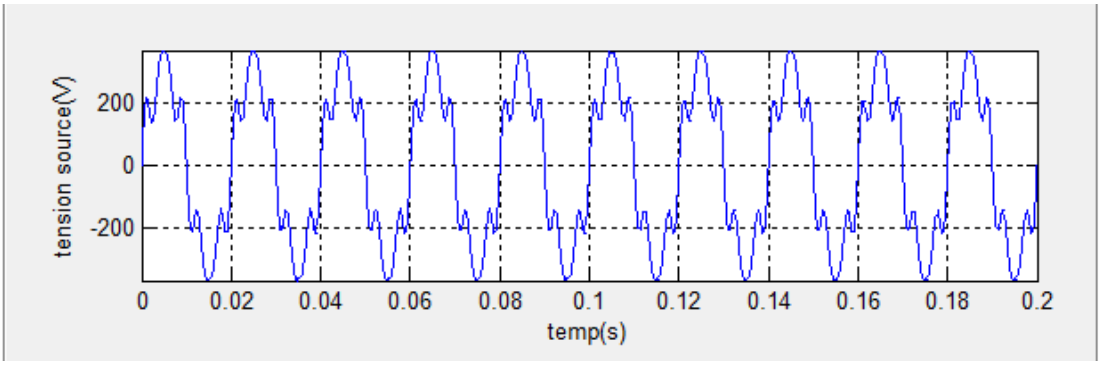
$$v_{sa} = 311\sin(\omega t) + 311/5\sin(5\omega t) + 311/7\sin(7\omega t)$$

$$v_{sb} = 311\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{311}{5\sin\left(5\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)} + \frac{311}{7\sin\left(7\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)} \quad \textbf{IV-7}$$

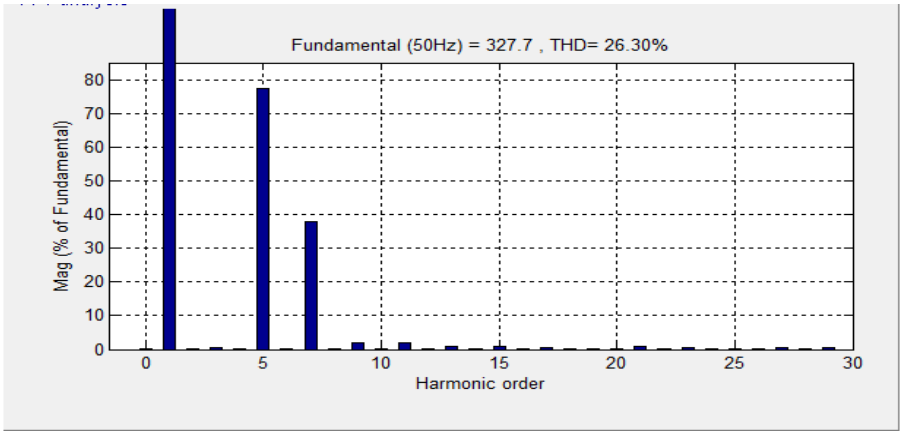
$$v_{sc} = 311\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + 311/5\sin\left(5\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + 311/7\sin\left(7\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Les résultats de simulations en utilisant la première approche sont représentés par les figures suivants de Compensation d'un réseau triphasé équilibré et déformé-Convertisseur de tension deux niveaux-Méthode PQ(I) est la matrice permettant de transformer un système triphasé (abc)en un système biphasé(α–β).est la matrice permettant de transformer un système triphasé (abc)en un système biphasé.

-Sans (FAS) :



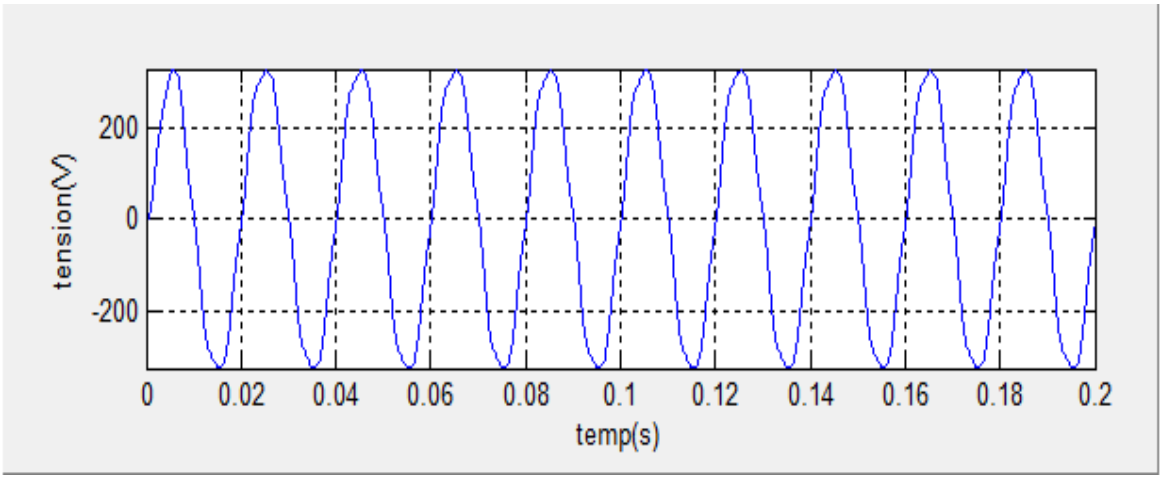
Tension de source



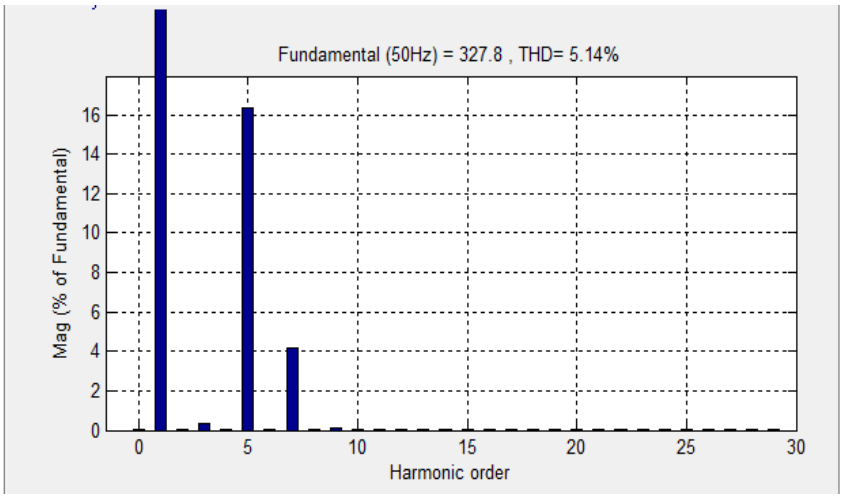
THDv(26.30%)

FigureIV.8 : Spectre harmoniques de la tension source

-avec fas :



Tension de la charge



THDv(5.14%)

Figure. IV-9 : Spectre des harmoniques de la tension de la charge

IV.5.CONCLUSION :

Ce chapitre à été consacré au filtre actif série à structure tension à base des convertisseurs de tension deux niveaux(. La stratégie de contrôle permettant la détermination des tensions de référence adoptée est celle des puissances active et réactive instantanées (PQ),

Conclusion Générale

Cette thèse a été consacrée à l'étude des différents systèmes de filtrage moderne permettant la compensation des harmoniques de courant et/ou de tension en utilisant différentes stratégies de contrôle en utilisant le logiciel MATLAB-Simulink et le Toolbox SimPowerSystem. Les principaux systèmes étudiés sont le filtre actif série (FAS) par la méthode (PQ). Le filtre actif, le filtre actif série a pour objectif la compensation des harmoniques de tension en plus des différentes autres perturbations comme le déséquilibre, les creux de tension, les surtensions, etc. Finalement, PQ est proposé comme une solution universelle pour la compensation de toutes les perturbations coté source et charge.

Dans le cas du filtre actif série, deux configurations ont été proposés aussi à base des topologies de convertisseur deux et trois-niveaux (NPC). La stratégie de contrôle choisi pour la détermination des tensions de compensation est basée sur la méthode des puissances actives et réactives instantanées (PQ) avec deux approches différentes. Les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité, la dynamique de réponse rapide et instantané des FASs proposés pour la compensation des harmoniques de tension et des autres type de perturbations liés à la tension avec une nette amélioration des performances de la topologie trois-niveaux (NPC) en matière de réduction du THDv.

Dans le dernier chapitre nous avons étudie la simulation de filtre actif série structure tension deux niveaux (NPC) utilisant une stratégie de contrôle PQ. l 'objectif est compenser les perturbation dans la tension.

Ce travail de thèse permis d envisagé de nombreuse orientation future :

- utilisé ces compensateur actifs dans les réseaux de transport (HT ,voire THT) ou des structures mulitniveaux seront a développer
- des nombreuses actions peuvent faire suite a nos travaux de recherche de manière a repousser les limites d'application et de performance des filtres actifs ,on peut travailler plus directement sur la boucle de régulation du courant du filtre actif en mesurent les effets du dépassement ,observé dans la fonction de transfert en poursuite en mode discret ,sur la qualité de compensation et sur l'existence possible d'une résonance.

Bibliographie

[1] **Thierry Deflandre, Philippe Mauras**, « Les harmoniques sur les réseaux électriques», Paris Eyrolles, France 1998.

[2**] J Hirofumi Akagi**, « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping ofharmonic propagation in power distribution systems», IEEE Transactions on PowerDelivery, Vol. 12, No 1, pp.354-363, January 1997.

[3**] Su Chen and Géza Joos** « Analysis and comparison of passive and active harmonicsuppression filters in distribution systems», Electrical and Computer Engineering, 2000 Canadian Conference,Vol. 2 , pp.615-619, 7-10 March 2000.

[4] **Edward Wilson Kimbark** « Direct current transmission», Volume 1, New York-WileyInterscience Division, United States 1971.

[5] **Fang Z. Peng, Gui-Jia Su, and George Farquharson** « A séries LC filter for harmonie compensation of ac drives», Power Electronics Specialists Conference, PESC 99. 30thannual IEEE, VoLl , pp. 213-218, 1999.

[6] **H. Sasaki and T. Machida**, « A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic compensation-consideration on basic design», IEEE Transactions on Power Appl. Syst.,Vol. 90, No 5, pp.2009-2019, 1971.

[7] **Hirofumi Akagi, Yukifumi Tsukamoto, and Akira Nabae**, «Analysis and design of an activepower filter using quad-series voltage source PWM converters», IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 26. No. 1. January/ February 1990.

[8] Fang-Zhang Peng, Hirofumi Akagi, and Akira Nabae, Fellow, IEEE, «A study of active power filters using quad-series voltage-source PWM converters for harmonic compensation», IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 5, No 1, pp. 9-15, January 1990.

[9] Hirofumi Akagi, Akira Nabae, and Satoshi Atoh, « Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters», IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. IA-22, N° 3, pp. 460-465, May/June 1986

[10] Hirofumi Akagi, Yoshihira Kanazawa, and Akira Nabae, « Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components », IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. lA-20, N° 3, pp. 625-630, May/June 1984.

[11] Shoji Fukuda and Masaru Yamaji, « Design and characteristics of active power filter using CUITent source converter», Industry Applications Society Annual Meeting, 1990., Conference Record of the 1990 IEEE, Vol. 2, pp. 965-970, 7-12 October 1990.

[12] Yoichi Hayashi, Noriaki Sato, and Kinzo Takahashi, «A nove! control of CUITent source active filter for ac power system harmonic compensation », Industry Applications Society Annual Meeting, 1988., Conference Record of the 1988 IEEE, VoU, pp. 837-842, 2-7 October 1988.

[13] **Hideak Fujita and Hirofumi Akagi**, «A practical approach to harmonic compensation in power systems - series connection of passive and active filters », Industry Applications Society Annual Meeting, 1990., Conference Record of the 1990 IEEE, Vol.2, pp. 1107- 1112, 7-12 October 1990.

[16] **Mekri Fatiha**, "Commande robuste des conditionneurs actifs de puissance", Thèse de Doctorat en génie électrique, Ecole Polytechnique de l"Université de Nantes, (France) 2007

[15]**I. Etxeberria-Otadui,** "Sur les Systèmes de l"Electronique de Puissance dédiés à la Distribution Electrique – Application à la Qualité de l"Energie", Thèse de Doctorat de l"Institut Nationale Polytechnique de Grenoble (France), 2003.

[16]**A. Sannino, J. Svensson,** "A series connected voltage source converter for voltage sag mitigation using vector control and a filter compensation algorithm", 35th IAS annual meeting of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, 8-12October 2000 Rome, Italy, pp.2476-2481.

[17]**Alali Mohamed Alaa Edin**, "Contribution à l"étude des compensateurs actifs des réseaux életriques", Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Louis Pasteur ULP, (France) 2002

[18]**Hamadi Ab., S. Rahmani, K. Al-Haddad**,"A new hybrid series active filter configuration to compensate voltage sag, swell, voltage and harmonics and reactive power", IEEE, International Symposium on Industry Electronics (ISIE), 2009, July 5-8, Seoul, Korea, pp.286–291.

[19]**J. Svensson, A. Sannio**,"Active filtering of supply voltage with series connected voltage source converter", EPE Journal, Vol. 12, N° 1, February 2002, pp. 19-25.

[20]**Campos, G. Joos, P. DZiogas, J. F. Lindsay** „" Analysis and design of series voltage unbalance compensator based a three VSI operating with unbalanced

switching functions‟‟‟ IEEE Trans on power electronics, Vol. 9, N° 3, October 1994, pp.269-274.

[21]**Hai Lan, Jincheng Liang, Weiping Wu**, “Reseearch of harmonic detection and fuzzy PID control in series active power filter”, IEEE, (2007), pp. 2957-2962.

[22]Chennai salim and Benchouia M.T, “Three-level (NPC) series active filter based on fuzzy logic voltage controller to compensate voltage sags, swells, harmonics and unbalances”, Journal of Electrical Engineering , JEE, ISSN 1582-4594, March, Vol.12 (2012) No.1, pp.100-110.

[23]Chennai salim, Benchouia M.T, Goléa A, “Series active power filter for harmonic voltage compensation using two control strategies based on fuzzy control techniques ”, 4th International Conference on Electrical Enginnering, ICEE‟12, Université Sciences et Technologie Houari Boumediène d‟Alger, 07-09 Mai 2012.

[23]Chennai salim, **Benchouia M.T, Goléa A**, “ Three-phase series active power filter to protect sensible loads based on fuzzy voltage controller at distorted supply network”, 2ème Conférence Nationale sur les Systèmes d‟ordre Fractionnaires et leurs Applications, SOFA‟2011, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 24-26 Octobre 2011.

[24]**Bor.Ren Lin and Richard G.Hoft**, “Power electronics inverter control with neural networks”, IEEE, pp. 128–134, 1993.

[25] Chennai salim and Benchouia M.T, “A simplified control scheme for three-phase three-level (NPC) series active filter to compensate all voltage perturbations”, Acta Electrotechnica et Informatica, AEI, ISSN 1338-3957, Vol.11(2011) No.4, pp.52-59.

[26] L.A. Moràn, I. Pastorini, J. Dixon,R. Wallace, “A fault protection scheme for series active power filters”, IEEE Trans. on power electronics, vol.14, N°5, September 1999, pp.928-938

[27] **R. Tounsi** “Développement d‟un contrôle commande pour un compensateur série de creux de tension. Validation par simulation du fonctionnement avec des charges industrielles”, Thèse de doctorat de l‟Université de Toulouse (France) 1999.

[28]**Zhan, C., Ramachandaramurthy, V. K., Arulampalam, A. Fitzer, C., Kromlidis, S, Barnes, M. and Jenkins, N.** “Dynamic Voltage Restorer Based on

Voltage-Space-Vector PWM Control". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, Nov-Dec 2001.

[29]**Khor Shafiee Mohsen**, "Amélioration de la qualité de l"énergie à l"aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques", Thèse de Doctorat en génie électrique, Université de Nantes, (France) 2006.

[30] L.Awad, J.Sevensson, "Charging techniques for energy storage capacitors of static series compensator", IEEE, International Symposium on Industrial Electronics, L"Aquila, Italy, July 8-11, (2002), pp.930-935.

[31] **D. Mohamed Salah,** «Etude comparative des redresseurs cascades et multiniveaux a commande MLI », Mémoire de Magister, Université Constantine, 2005.

[32] : **R. Aziza,** «Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux », Mémoire de Magister Université de Boumerdes, 2008.

[33] : **Y. Khadidja**, «Réduction des effets de tension homopolaire dans les associations onduleurs multiniveaux moteur à induction», Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.

[34] : **R. Taleb, A. Meroufel, P. Wira** , «Commande par la stratégie d'élimination d'harmoniques d'un onduleur multiniveau asymétrique à structure cascade», Medimira Science Publicher, 2008.

[35]: **D. Ostojic,** «A multilevel conveter structrure for grid connected PV plants», Thèse de Doctorat, Université Bologna, 2010.

[36] : **K. Merabet,** « Commande MLI d'un onduleur triphasé Basé sur la dispersion de la tension triphasé », Mémoire de la Maitrise en Génie Electrique, Université du Québec, 2011.

[37]: **J. Rodriguez, J. Sheng lai, F. Zheng peng**, «Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications», IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 49, N°4, Aout 2002.

[38] : **Y. Sahali, M. K. Fellah**, «Technique de modulation à sélection d'harmonique à Eliminer (SHEPWM) pour la commande des onduleurs de tension trois niveaux

monophasé et triphasés», Intelligent Control and Electrical Power Systèms Loboratory ICEPS, Universié Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2003

[39] : **Mr BOUKADOUM AZIZ,** «Contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique » Thèse Magister, Université BADJI MOKHTAR ANNABA, Octobre 2007

[40]: **M. A. E. Allai,** « Contribution à l'Etude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat, université de Louis Pasteur, Strasbourg, septembre 2002

[41] : **C.Salim**, « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle» Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, septembre 2013

Annexes

Source d'alimentation	
220V, 50Hz	
Rs, Ls	$25e^{-5}\Omega$, $19.4e^{-6}$mH
Charge non-li néaire	
RL, CL	1 Ω, e^{-6}µF
FAS	
L_{sf}, C_{Sf} R_{sf}	$500e^{-6}$mH, $200e^{-6}$µF. ;$31e^{-6}$
Fréquence de commutation	10 kHz

Tableau Paramètres du FAS