

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE HASSIBA BEN BOUALI DE CHLEF



Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER EN GENIE ELECTRIQUE

ECOLE DOCTORALE

Option : Entraînement des Systèmes Electriques

Présenté par

MAAROUF OMAR

Ingénieur d'état en électrotechnique

Thème

Application de la MLI vectorielle à trois dimensions (SVM 3D) au filtrage actif série en utilisant des onduleurs de tension multi niveaux à structure NPC

Soutenu le 10/03/2012 devant le jury compose de :

ZAHLOUL Hamou	M.C.A	UHB Chlef	Président
BELMADANI Bachir	Professeur	UHB chlef	Encadreur
DAHAMANE Rabah	M.A.A	UHB Chlef	Co. encadreur
MAHMOUDI MOUHAND Ouelhadj	Professeur	ENP, Alger	Examineur
NEZLI Lazhari	M.C.A	ENP, Alger	Examineur

-Année Universitaire 2011/2012-

REMERCIEMENTS

Je tiens profondément à remercier tout d'abord DIEU l'unique qui a permis à ce travail de voir le jour.

Je tiens à remercier vivement

Mes frères , ma mère,

mon copromoteur Monsieur R.Dahmane et promoteur Monsieur M.B.Belmadani, pour ses orientations éclairées, ses conseils constructifs, son esprit critique et son aide précieuse.

Nous remercions très chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteurs de notre mémoire.

Tous les enseignants qui ont contribué à notre cycle de formation et *en particulier M.Benyamina ; Drouazin;*

Que tous ce qui a contribué de près ou de loin, dans ma formation ainsi qu'à la réalisation de ce travail reçoit ici le témoignage de ma grande sympathie.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail :

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je nécessitais pour l'accomplissement de cette mémoire.

A ma mère, que Dieu la récompense pour sa patience et sa soutenance ;

A mes chers frères et sœurs, tous par leurs noms ;

A tous mes amis en particulier Ismail, Mohamed, Abderrahmen ,Kamel ,Omar ,Nabil.

A tous ceux qui me sont chers.

ملخص

هذا العمل يهدف الى تحسين نوعية تحويل الطاقة الكهربائية من المنبع الى الحمل وتخفيض الاضطرابات الناتجة عن الحملات الكهربائية غير الخطية وغير المتوازنة في هذه المذكرة نقوم بدراسة تخفيض الاضطرابات التوتيرية التوافقية مع استعمال مخرج توتر متعدد المستويات ذو طبيعة متحكم بطريقة حديثة والمسماة بتقنية التحكم الشعاعي ثلاثي الأبعاد وهذه الأخيرة تقوم بالتحكم في التواترات وسعة التوتر في مخرج المخرج لكي يقوم بخفض التواترات التوافقية وذلك باستعمال طريقة الاستطاعات اللحظية الحقيقية والتخيلية .

كلمات مفتاحية

توتر توافقي تحكم شعاعي ثلاثي الأبعاد ,مخرج متعدد المستويات ,طريقة الاستطاعات الحقيقية والتخيلية

SUMMARY

In this work we have studied the compensation of the harmonic tensions by using an inverter of tension multi levels to structure NPC to order by a new technique of the three-dimensional type MLI vectorial (SVM 3d). This new technique of order offers the advantage of ordering the frequency and the amplitude of the output voltages of the inverter and of making the compensation of the harmonic tensions through methods of identifications to knowing, the method of the real and imaginary powers.

Key words : voltage harmonics, three dimensional space vector modulation, inverter multilevel , the method of the real and imaginary powers.

RESUME

Dans ce travail nous avons étudié la compensation des tensions harmoniques en utilisant un onduleur de tension multi niveaux à structure NPC commander par une nouvelle technique de type MLI vectorielle tridimensionnelle (SVM 3D). Cette nouvelle technique de commande offre l'avantage de commander la fréquence et l'amplitude des tensions de sortie de l'onduleur et faire la compensation des tensions harmoniques à travers des méthodes d'identifications à savoir, la méthode des puissances réelles et imaginaires.

Mots clés : Tension harmonique, MLI vectorielle à trois dimensions, onduleur multi niveaux, méthode des puissances réelles et imaginaires.

LISTE DE SYMBOLE

p	Puissance active
q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
D	Puissance déformante
\bar{p}	Puissance active continue
\bar{q}	Puissance réactive continue
\tilde{p}	Puissance active alternative
\tilde{q}	Puissance réactive alternative
i_c	Courant de charge
v_f	tension fondamentale
v_h	tension harmonique
V_s	tension simple de la source perturbée
I_d	Courant redressé
α	Angle d'amorçage de thyristors
ϕ	Déphasage entre le courant et la tension
δ	Coefficient d'amortissement
τ	Constante de temps
ω	Pulsation du réseau
f_c	Fréquence de coupure
f	Fréquence fondamentale du réseau (Hz)
n	Rang harmonique
R_{cc}	Résistance d'une phase de réseau (Ω)
L_{cc}	Inductance d'une phase de réseau (H)
U_d	Tension redressée
m	Indice de modulation
r	Taux de modulation
f_p	Fréquence de la porteuse
T_p	Période des porteuses
f	Fréquence
E	Tension continue appliquée à l'onduleur
R_{mn}	Réceptivité de transition entre la configuration (m) et (n)
F_{ks}	Fonction de connexion de l'interrupteur T_{ks}
F_{km}^b	Fonction de connexion du demi-bras k
F_c	Fonction de commutation
F_{cg}	Fonction génératrice de commutation
F_p	Facteur de puissance

U_{pm}	Décalage entre les deux porteuses
L_f, R_f	Impédance de la sortie du filtre
i_1, i_2, i_3	Courant de ligne d'un système triphasé équilibré
e_1, e_2, e_3	Tension réseau sur la phase 1, 2, 3
i_h ou i_{inj}	Courant harmonique
$i_{h_mesuré}$	Courant harmonique de mesurée
$I_{ref1,2,3}$	Courants de référence
R	Résistance d'induit
L	Inductance de l'induit
K_f	Coefficient de frottement
$K\varphi$	Constantes Kc et Km
J	Moment d'inertie
Ω_{nom}	Vitesse nominale
C_{nom}	Couple nominal
V_{inj}	Tension harmonique
$U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}, U_{c4}$	Tensions d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux
$i_{d0}, i_{di}, i_{d2}, i_{d3}, i_{d4},$	Courants d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux
$V_\alpha, V_\beta, I_\alpha, I_\beta$	Composante de Concordai
$[N(t)]$	Matrice de conversion simple
$[M(t)]$	Matrice de conversion composée
$[N_g(t)]$	Matrice génératrice de conversion simple
$[M_g(t)]$	Matrice génératrice de conversion composée
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actif série
FPP	Filtre passif parallèle
$UPQC$	Unified Power Quality Conditionner
THD	Taux de distorsion harmoniques
NPC	Neutral Point Clamping (point neutre des sources continues M)
$SVM 3D$	Modulation tridimensionnelle (space vector modulation three dimensions)

Sommaire

REMERCIEMENTS	(1)
DEDICACES.....	(2)
RESUME	(3)
LISTE DE SYMBOLE.....	(4)
LISTE DES FIGURES.....	
SOMMAIRE.....	(7)
Introduction générale	1

Chapitre I : La pollution harmonique

I. Introduction.....	3
I.1 La qualité de l'énergie électrique	4
I.1.1 Critères et définitions.....	4
I.1.2. les normes de la qualité d'énergie électrique	5
I.2 Identification et caractérisation des principales sources de perturbations.....	5
I.2.1.Caractéristiques des phénomènes perturbateurs.....	6
I.2.2 Origines et conséquences des phénomènes perturbateurs.....	6
I.2.2.1 Creux de tension et coupures.....	8
I.2.2.2 Variation et fluctuation de tension	9
I.2.2.3. Surtensions temporaires ou transitoires	11
I.2.2.4 Déséquilibre du système triphasé de tension	14
I.2.2.5 Variation de fréquence.....	15
I.2.2.6 Harmoniques et inter harmoniques.....	16
I.3 Les perturbations harmoniques en courant et/ou en tension.....	17
I.3.1 Origine des harmoniques.....	17

I.3.2 Conséquences des harmoniques.....	18
a) Conséquences instantanés.....	18
b) Conséquences à terme.....	18
I.3.3 caractérisation des perturbations harmoniques	19
I.3.3.1 le taux de distorsion harmonique (THD)	19
I.3.3.2 le facteur de puissance	22
I.4 Identification des tensions perturbées.....	24
I.4.1 Principe de la méthode d'identification des tensions perturbatrices.....	24
I.4.3 Séparation des puissances.....	27
I.4.4 Identification des tensions de référencées.....	28
I. Conclusion.....	29

Chapitre II : Stratégie de dépollution des harmoniques

II. Introduction.....	30
II.1 Stratégie de dépollution traditionnelle.....	30
II.1 .1 Dépollution des courants perturbateurs.....	30
II.1.1.1 Rééquilibrage des courants du réseau électrique.....	30
II.1.1.2 Compensation de la puissance réactive.....	31
II.1.1.3 Compensation des courants harmoniques.....	31
II.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices.....	32
II.2 Stratégies de dépollution modernes.....	32
II.2.1 Convertisseurs à absorption sinusoïdale	33
II.2.2 Compensateurs actifs des harmoniques	33
II.2.2.1 Filtre actif parallèle.....	34
II.2.2.2 Filtre actif série.....	34
II.2.2.3 Combinaison parallèle-série actifs.....	35
II.2.2.4 Combinaison hybride active et passive.....	35
II.2.2.4.1 Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.....	36

II.2.2.4.2 Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.....	36
II.2.2.4.3 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	37
II.2 Etude d'un compensateur actif série.....	38
II.2.1 Mis on œuvre.....	38
II.2.2 Modélisation du réseau électrique perturbé.....	39
II.2.3 Principe de la compensation actif série.....	40
II.2.4 Topologie générale d'un compensateur actif série.....	42
II.2.4.1 Etude de la partie puissance.....	43
II.2.4.1.1 onduleur de tension	43
II.2.4.1.2 Système de stockage d'énergie.....	44
II.2.4.1.3 Filtre passif de sortie.....	44
II.2.4.2 Etude de la partie contrôle commande.....	44
II.2.5 Modélisation de la charge polluante.....	44
II.2.5.1 Modélisation du redresseur a thyristor.....	44
II. Conclusion	46

Chapitre III : La modulation vectorielle tridimensionnelle(SVM 3D)

III. Introduction.....	48
III. Modulation vectorielle à trois dimensions (SVM 3D).....	48
III.1 Description de l'onduleur deux niveaux à quatre bras.....	48
III .1.1 Modèle de l'onduleur à quatre bras	49
III.1.1.1Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.....	50
III.1.2La commande vectorielle tridimensionnelle.....	53
III.1.3Détection de la position du vecteur de référence.....	53
III.1.3.1Détection de prisme.....	54
III.1.3.2 Détection de tétraèdre.....	55
III.1.3.2.1Méthode de détections des tétraèdres.....	57
III.1.3.2.2Exemple de choix de tétraèdre.....	57
III.1.3 Calcul des durées d'application des vecteurs de command.....	58

III.1.4. Algorithme général de la SVM 3D.....	62
III.1.5 les résultats de simulation.....	62
III.2 Description de l'onduleur trios niveaux à quatre bras.....	63
III.2.1 Description de l'onduleur à trois niveaux.....	63
III.2.2 Fonctions de commutation.....	64
III.2.3 Tensions de sortie.....	65
III.2.4Commande de l'onduleur.....	66
III.2.5 Résultats de simulation.....	66
III. Conclusion.....	67

Chapitre IV : Application de la SVM 3D sure le filtre actif série

IV.1 Introduction.....	69
IV.2 Structure générale du filtre actif série.....	69
IV.2 Partie puissance du filtre actif série.....	70
VI.2.1 Onduleur de tension.....	70
IV.2.2 Filtre de sortie.....	71
IV.2.3 Transformateurs d'injection et protection du F.A.S.....	71
IV.3 Partie contrôle-commande du filtre actif série.....	71
IV.3.1 Commande de l'onduleur.....	72
IV.3.2 Identification des tensions perturbatrices.....	72
IV.3 simulation du filtre actif série.....	72
IV.3.1 Modélisation du système.....	72
IV.3.2 Modélisation du réseau.....	73
IV.3.3 Filtrage d'une charge linéaire déséquilibrée.....	73
IV.3.3.1 Modélisation de la charge déséquilibrée.....	73
IV.3.3.2Résultats de la simulation.....	74
IV.3.3.2.1 Compensation des tensions harmoniques.....	74
IV.3.3.2.1.1 Cas d'onduleur deux niveau.....	74
IV.3.3.2.1.2 Cas d'onduleur à trois niveaux.....	75

IV.3.4 Filtrage d'une charge non linéaire déséquilibrée.....	76
IV.3.4.1 La Charge.....	77
IV.3.4.3 Résultants de simulation.....	78
IV.3.4.4 Compensation des tensions harmoniques.....	79
IV.3.4.4.1 Cas d'onduleur à deux niveaux.....	80
IV.3.4.4.2 Cas d'onduleur à trois niveaux.....	81
IV.4 Conclusion.....	84
Conclusion générale.....	91
Annexes.....	93
Bibliographie.....	95

Introduction générale

Introduction générale

Dans le passé, la qualité de la tension signifiait que la tension était disponible à un niveau acceptable au moment où on avait besoin. Aujourd'hui, la qualité de l'énergie dépend des charges et de leur sensibilité aux variations de la tension. Les charges étant de plus en plus sophistiquées, les perturbations de la tension deviennent très coûteuses pour les industriels en termes de perte de production, de frais de main d'œuvre, de pertes de matières premières et d'avarie de matériels. Parallèlement, les perturbations ont un coût pour le distributeur en termes d'énergie non distribuée, d'avarie de matériels et de mécontentement du client.

Dans un contexte de plus en plus concurrentiel et avec davantage de normes et de réglementations, la qualité de la tension est un service que peut fournir le distributeur à ses clients. Ce service peut être gratuit pour fidéliser le client ou payant. Cette tendance à l'amélioration de la qualité nécessite donc de développer des solutions de compensation des perturbations. L'utilisation de nouveaux dispositifs à base d'électronique de puissance dans les réseaux électriques est un moyen d'améliorer la qualité et les performances des réseaux. Le compensateur actif série en est un exemple.

Dans le cadre de cette problématique de recherche une solution pour maîtriser la qualité de l'énergie consiste à insérer dans les réseaux électriques des compensateurs série ou shunt capables d'absorber tous ces types de défauts.

Le compensateur actif série est un dispositif placé en série avec les charges sensibles.

Il est compensé essentiellement d'un onduleur de tension

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'application de la méthode vectorielle à trois dimensions (SVM 3D) au filtrage actif série en utilisant des onduleurs multi niveaux à structure NPC qui est destiné au filtrage des tensions harmoniques

Pour atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire est organisé en quatre chapitres:

Le premier chapitre décrit les phénomènes principaux qui dégradent la qualité de l'énergie électrique, leurs origines, les conséquences sur les équipements et les normes inhérentes à ces perturbations seront également analysées. Dans ce chapitre,

nous présenterons également la pollution harmonique et l'identification des tensions perturbées.

Le deuxième chapitre sera consacré à la proposition des stratégies de dépollution harmonique et on passe l'étude d'une des stratégies de compensation (le filtre actif série).

Dans le troisième chapitre sera consacré à la modélisation d'onduleur triphasé à deux et à trois niveaux. On présentera son modèle de connaissance et celui de commande. Ainsi que les stratégies de commande MLI vectorielle tri dimensionnelle (*SVM 3D*).

Dans le dernier chapitre, on a appliqué la modulation tri dimensionnelle (*SVM 3D*) sur l'onduleur à trois niveaux. Pour réduire les harmoniques de tension et déséquilibre des tensions, nous étudierons principalement le dimensionnement de block de régulation a basée sur le régulateur *PI* qui appliquée pour réguler ici la tension harmonique injecté au réseau pour diminué les perturbations de tension ou autrement dit diminué le taux d'harmonique de tension.

La validation de notre étude propose sera effectuée par simulation à partir du logiciel MATLAB.

Chapitre I :
La pollution harmonique

Introduction

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

Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau. Dans ces conditions, des problèmes de compatibilité électromagnétique peuvent survenir entre ces éléments connectés au réseau.

Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et les identifier.

Nous commencerons dans la première partie par un exposé du problème de la dégradation de la qualité d'énergie,

Dans une deuxième partie nous discuterons les phénomènes principaux qui dégradent la Qualité de l'Énergie Electrique (QEE), leurs origines et les conséquences sur les équipements.

Dans la troisième partie, nous soulèverons une étude spéciale sur les perturbations harmoniques en courant et/ou en tension

Dans la quatrième, on a proposé une méthode pour identifier les perturbations en tension. Cette méthode basée sur les puissances réelles et imaginaires.

I.1 La qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance ou de gestion de sites tertiaires ou industriels, et les constructeurs d'équipements, essentiellement pour les raisons suivantes :

- la nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises,
- la généralisation d'équipements sensibles aux perturbations de la tension et/ou eux-mêmes générateurs de perturbations,
- l'ouverture du marché de l'électricité. **[Hmi 10]**

I.1.1 Critères et définitions

Les critères de qualité de l'électricité sont directement issus de l'observation des perturbations électromagnétiques des réseaux électriques.

- On parle de Compatibilité Electromagnétique (C. E. M.) afin de caractériser l'aptitude d'un appareil, d'un dispositif **[Djaf 05]**, à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans produire lui même des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs.

Les perturbations électromagnétiques susceptibles d'entacher le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont en général rangées en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées

La CEM classe ces perturbations selon deux groupes :

- basses fréquences (< 9 kHz) ;
- hautes fréquences (> 9 kHz) **[Hmi 10]**

I.1.2. les normes de la qualité d'énergie électrique

Afin de limiter les effets des perturbations électromagnétiques sur les réseaux électriques, des normes ont été mis en place. Les deux principaux organismes qui ont établi de telles normes sont la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) et l'IEEE. Les normes qu'ils ont établies sont, de façon respective, la série CEI 61000 et l'IEEE Standard 519 [IEEE 93].

De façon générale ces normes identifient les principales sources de perturbations électromagnétiques décrivent les effets de ces perturbations sur les réseaux, décrivent des méthodes d'analyse et de mesure pour les harmoniques et fournissent diverses recommandations en vue de réduire la présence des phénomènes perturbatrices sur les réseaux électriques.

I.2 Identification et caractérisation des principales sources de perturbations électromagnétiques[Hmi 10]

I.2.1.Caractéristiques des phénomènes perturbateurs

La mesure de la qualité de l'énergie électrique consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites à basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau).

Les phénomènes observés sont nombreux : creux de tension et coupures, surtensions temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (flicker), variations de la fréquence, déséquilibres du système triphasé, harmoniques et inter harmoniques, tensions continues dans les réseaux alternatifs, ...

Ils peuvent être regroupés en quatre catégories selon qu'ils affectent :

- La fréquence,
- L'amplitude des trois tensions,
- La forme d'onde, qui doit être le proche possible d'un sinusoïdal
- Le déséquilibre.

Afin de bien analyser les pollutions des réseaux électriques en basse tension et, par conséquent, de trouver les meilleures méthodes de dépollution, on va distinguer deux types de perturbations, à savoir les perturbations de courant et celles de tension. [Djaf 05]

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, et/ou déséquilibrées à base d'électronique de puissance. La puissance réactive peut être aussi consommée par des charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présents dans les sites industriels.

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

Ces types de perturbations ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements ou de l'arrêt des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

I.2.2 Origines et conséquences des phénomènes perturbateurs [Djaf 05],[Hmi 10]

I.2.2.1 Creux de tension et coupures

- **Origine du phénomène**

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise (par convention) entre 90 % et 1% (CEI 61000-2-1, CENELEC EN 50160), ou entre 90 % et 10 % (IEEE 1159) d'une tension de référence (H_{ref}) suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps compris entre la demi période fondamentale du réseau (10 ms à 50 Hz) et une minute comme il est représenté dans la figure (I.1)

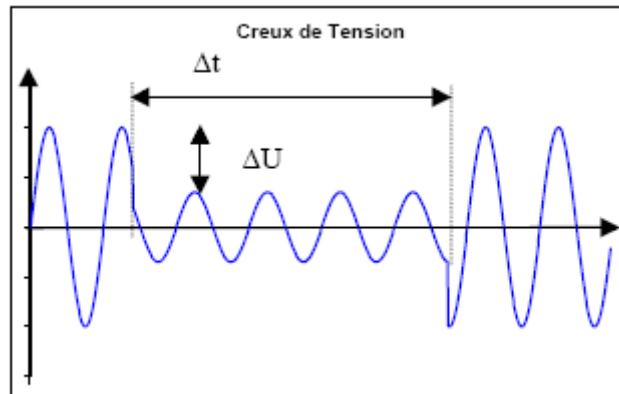


Figure I.1: Creux de tension

Il est caractérisé par [12]

- sa profondeur (ΔU)
- sa durée (Δt)

Une coupure de tension quand à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues [5]

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Sa profondeur est supérieure à 90 % et elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes). Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes.

- **Causes du phénomène**

Les creux de tension et les coupures brèves sont principalement causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension d'amplitude d'autant plus faible que le point d'observation est électriquement éloigné de la source de la perturbation.

Les creux de tension et les coupures brèves ont différentes causes :

- des défauts sur le réseau de transport (HT) de distribution (BT et MT) ou sur l'installation elle même.

- la commutation de charges de puissance importante (moteurs asynchrones, fours à arc, machines à souder, chaudières...) par rapport à la puissance de court-circuit
- Les coupures longues sont le résultat de l'isolement définitif d'un défaut permanent par les dispositifs de protection ou de l'ouverture volontaire ou intempestive d'un appareil
- Les transitoires sont causés, par exemple, par la mise sous tension de condensateurs ou l'isolement d'un défaut par un fusible ou par un disjoncteur rapide BT, ou encore par les encoches de commutations de convertisseurs polyphasés
- **Conséquence du phénomène**

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture *UDF*. Il peut durer de 10 ms à 3 mN []. Il est la cause la plus fréquente de problèmes de qualité d'énergie.

La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms .

Les conséquences des creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Le Tableau.1.2 résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles.

Types d'appareils	Conséquences néfastes
Eclairage	Moins de luminosité, extinction et ré allumage (lampes à arc)
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt du dispositif
Dispositifs de protection	Ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissements, décrochage, surintensité au retour de la tension
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	-En mode onduleur : destruction des protections - En mode redresseur : ralentissement de la machine
Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur

Tableau. I.1: Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles[Hmi 10]

I.2.2.2 Variation et fluctuation de tension

- **Origine du phénomène**

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude, comme illustré sur la figure I.2

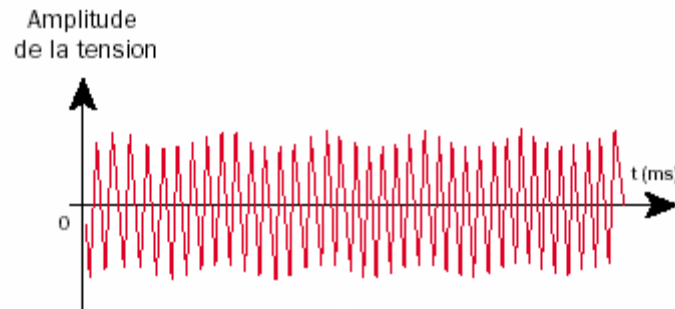


Figure. I.2: Exemple de variations rapide de la tension,

- **Causes du phénomène**

Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau ; Les fluctuations de tension sont principalement dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants.

L'origine de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé *fliqué*.

- **Conséquences du phénomène**

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 10\%$, la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker). La gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse) dépend de l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation.

I.1.2.3. Surtensions temporaires ou transitoires

- **Origine du phénomène**

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension. Les surtensions sont de trois natures :

- Temporaires à fréquence industrielle ;
- De manœuvre ;
- D'origine atmosphérique (foudre).

Elles peuvent apparaître :

- En mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre) ;
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).

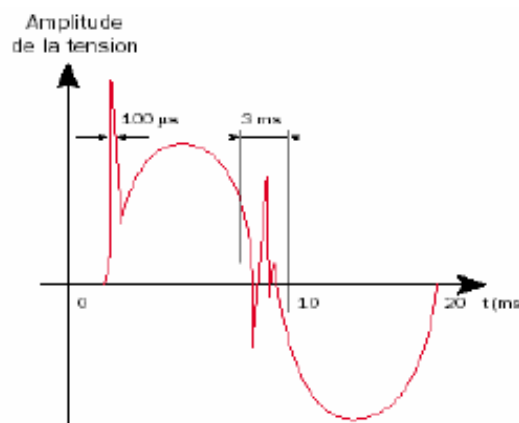


Figure. I.3: Exemple de cas de surtensions transitoires

- **Surtensions à fréquence industrielle :**

- Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz). Elles sont aussi causées par les défauts d'isolement ;
- Ferro résonance, Il s'agit d'un phénomène oscillatoire non linéaire rare, souvent dangereux pour le matériel, se produisant dans un circuit comportant un condensateur et une inductance saturable ;

- Rupture du conducteur de neutre ;
- Défauts du régulateur d'un alternateur ou d'un régleur en charge du transformateur ;
- Surcompensation de l'énergie réactive.

- **Surtensions de manœuvre**

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection...), On distingue particulièrement trois types :

- Surtensions de commutation en charge normale ;
- Surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs ;
- Surtensions provoquées par la manœuvre de circuits capacitifs (lignes ou câbles à vide, gradins de condensateurs).

- **Surtensions atmosphériques**

La foudre est un phénomène naturel apparaissant en cas d'orage. On distingue les coups de foudre directs (sur une ligne ou sur une structure) et les effets indirects d'un coup de foudre (surtensions induites et montée en potentiel de la terre).

- **Conséquences du phénomène**

Leurs conséquences sont très diverses selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée et la fréquence :

- Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques..);
- Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées) ;
- Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels) ;

- Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible ;

- Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par :

* La foudre essentiellement ;

* Les surtensions de manœuvre qui est répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue.

I.2.2.4 Déséquilibre du système triphasé de tension[Hmi 10]

- **Origine du phénomène**

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphase. La quantification du phénomène fait appel à la décomposition de la composante fondamentale selon les composantes symétriques de Fortescue.

Le déséquilibre du système tri phase de tension est représenté sur la figure I.4:

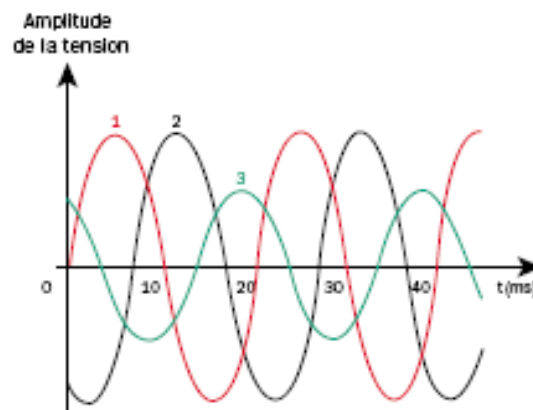


Figure. I.4: Représentation du déséquilibre système triphasé de tensions

- **Causes du phénomène**

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau.

- **Conséquence du phénomène**

Il est plus intéressant d'aborder le problème du déséquilibre du système tri phase de tension : par type d'équipement. Le déséquilibre dans une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectés :

- _ Mauvais fonctionne d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (Lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),
- _ Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence du déséquilibre du système triphasé entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3.

L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une antirésonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande,

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.

Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur

est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

I.2.2.5 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la figure I.4). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ comme illustre la figure. I.5.

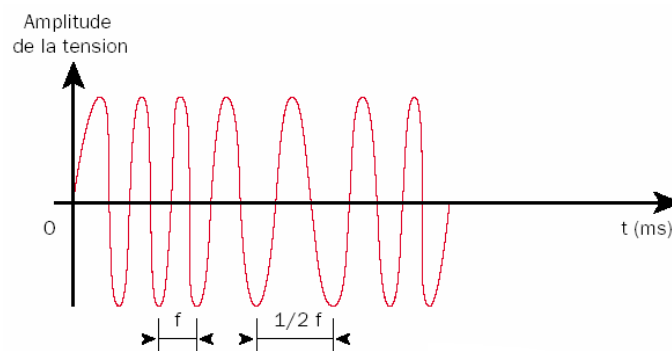


Figure. I.5: Exemple de fluctuation de la fréquence

I.2.2.6 Harmoniques et inter harmoniques

Dans de nombreux cas, le courant consommé par les charges n'a plus une forme de sinusoïde pure. La distorsion en courant implique une distorsion de la tension dépendant également de l'impédance de source.

On appelle harmonique une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental (figure (I.a6)) Afin de mesurer les harmoniques "courant" ou "tension", on utilise la transformée de Fourier permettant de décomposer un signal périodique en une somme de signaux sinusoïdaux multiples de la fréquence fondamentale

On parle d'inter harmoniques lorsque le signal possède une composante superposée à l'onde fondamentale (50 Hz) et qui n'est pas multiple de la fondamentale (ex : 175Hz, (figure (I.6b)).

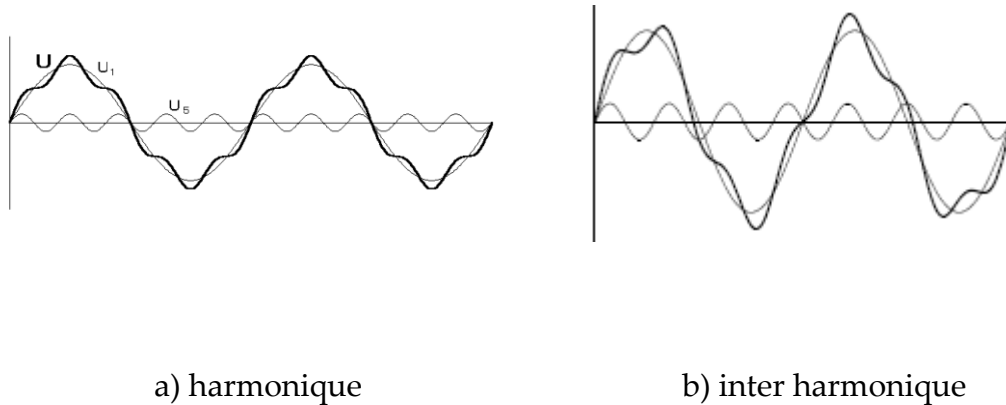


Figure. I.6 : représentation de l'harmonique et l'inter harmonique

- **Origine des phénomènes**

Les perturbations dites "harmoniques" sont causées par l'introduction sur le réseau de charges non linéaires comme les équipements intégrant de l'électronique de puissance (variateurs, onduleurs, convertisseurs statiques, gradateurs de lumière, postes de soudure). Plus généralement, tous les matériaux incorporant des redresseurs et des électroniques de découpage déforment les courants et créent des fluctuations de tension sur le réseau de distribution basse tension. Les origines principales de l'apparition d'inter harmonique sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande.

- **Conséquences des phénomènes**

Surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré, dégradation du rendement énergétique, perte de productivité. Perturbation des signaux de tarification, papillotement (flicker).

I.3 Les perturbations harmoniques en courant et/ou en tension

I.3.1 Origine des harmoniques

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques

I.3.2 Conséquences des harmoniques

Le passage des courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau.

Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donner lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types : les effets instantanés et les effets à terme

a) Conséquences instantanés

Les Conséquences instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques** : En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.
- **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs** : Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatives des moteurs d'entraînement de disque.
- **Erreurs dans les appareils de mesure** : Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.

- **Vibrations et bruits** : Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

b) Conséquences à terme

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

- **Echauffement des câbles et des équipements** : Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du sur échauffement du neutre et les matériels bobines comme les transformateurs ou les moteurs.
- **Echauffement des condensateurs** : L'échauffement est cause par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
- **Echauffement du aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs** Echauffement cause par les pertes dans le stator des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétiques) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.

Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques.

I.3.3 caractérisation des perturbations harmoniques

Pour quantifier les perturbations harmoniques et la consommation de la puissance réactive il suffi de caractériser la distorsion en régime déformé par deux grandeurs différentes :

Le taux global de distorsion harmonique (THD) ;

Le facteur de puissance $\cos(\varphi)$

I.3.3.1 le taux de distorsion harmonique (THD)

Notre étude se limite au cas où l'allure de la tension de source n'est plus sinusoïdale, c'est bien le cas où les charges polluantes sont des charges de tension harmonique, d'après le théorème de Joseph FOURIER cette tension est une fonction périodique qui peut être représentée par une somme de termes sinusoïdaux dont le premier, à la fréquence de répétition de la fonction, est appelé *fondamental*, et les autres à des fréquences multiples du fondamental appelés *harmoniques* (figure (I.7))

$$V(t) = V_0 + \sum V_h \sqrt{2} \sin(2\pi.h.f + \varphi_h) \quad (I.1)$$

Avec :

V_0 : Valeur de la composante continue ;

h : Est appelé rang harmonique ($h \geq 2$) ;

V_h : Valeur efficace de l'harmonique de rang h ;

$\omega = 2\pi f$: Pulsation de la fréquence du fondamental ;

φ_h : Déphasage de la composante harmonique de rang h

Cette notion d'harmonique s'applique à l'ensemble des phénomènes périodiques quelle que soit leur nature. En particulier au courant alternatif. La composante de rang 1 est la composante fondamentale

La valeur efficace de la tension de charge :

$$V_{eff} = \sqrt{V_f^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots} \quad (I.2)$$

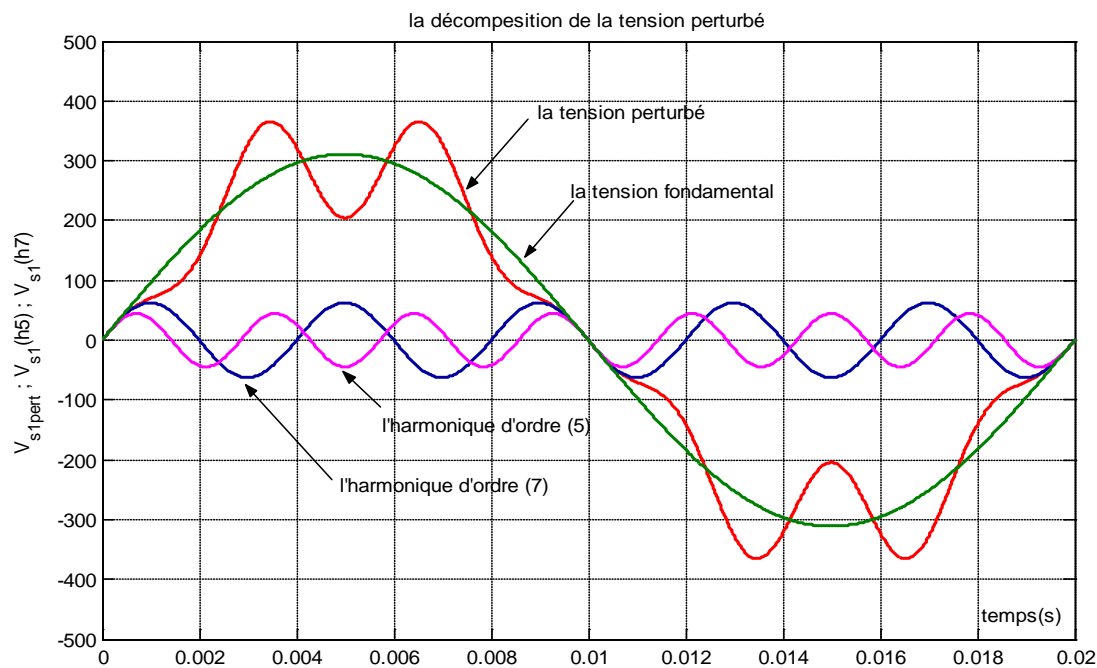


Figure. I.7: Représentation de la déformation de la tension.

Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformé

→ La composant de rang (1) est la composant fondamentale, sa valeur efficace est V_f

→ Les différentes harmoniques de rang h sont à des valeurs efficaces V_h

$$THD (0/0) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_f} \quad (I.3)$$

Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence.

Dans le Tableau. I.2 on donne quelques générateurs d'harmoniques

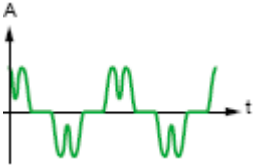
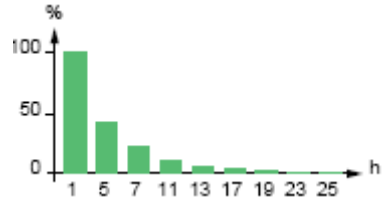
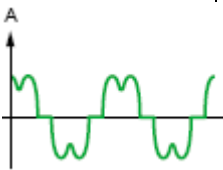


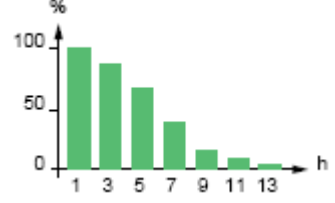
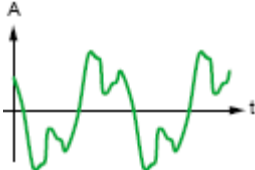
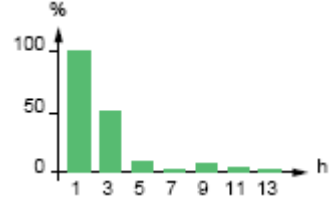
Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	spectre	THD
Variateur de vitesse			44%
Redresseur/chargeur			28%
Charge informatique			115%
Eclairage fluorescent			53%

Tableau. I.2 Les générateurs d'harmoniques

I.3.3.2 le facteur de puissance

En présence des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée puissance déformante (D), donnée par la relation (I.4) [3] apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure (I.8)

$$D = 3V\sqrt{I^2 + I_f^2} \tag{I.4}$$

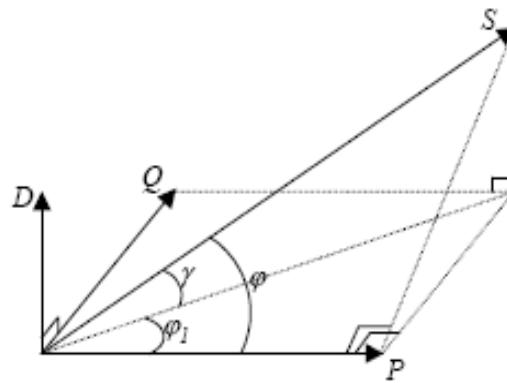


Figure I.8 : Diagramme de Fresnel des puissances

La puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive Q et déformante D . Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.4})$$

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant

Le facteur de puissance F_p est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi \cdot \cos \gamma \quad (\text{I.5})$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieurs a 1

$$\text{En posant : } P = 3VI_f \cos \varphi \quad (\text{I.6})$$

On aura :

$$F_p = \frac{V_f}{V_{eff}} \cos \varphi = F_{dis} \cos \varphi \quad (\text{I.7})$$

D'après les équations (I.5) et (I.7) le facteur de distorsion devient :

$$F_{dis} = \cos \gamma$$

Ou :

F_{dis} : représente le facteur de distorsion. Il vaut lorsque la tension est parfaitement sinusoïdale et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît

I.4 Identification des tensions perturbées

La qualité du filtrage réside dans l'efficacité de la méthode utilisée pour l'identification des courants ou des tensions harmoniques, la méthode qu'on a proposée est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les tensions et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active de la tension totale

Cette méthode utilise les notions des puissances réelle et imaginaire instantanées afin de séparer le fondamental dans le domaine fréquentiel. L'élimination de la composante fondamentale sera à ce moment là facile à mettre en œuvre. Cette méthode qui réalise dans la plupart des compensateurs actifs actuellement en service dans le monde. C'est cette méthode que nous allons utiliser tout au long de ce mémoire [AKAGI].

La stratégie de commande d'un compensateur actif série se passe sur la détection des tensions perturbées dans le domaine temporel, deux possibilités d'identification des tensions perturbées

- ✚ Identification à partir de la détection de la tension de la source ;
- ✚ Identification à partir de la détection de la tension de la charge ;

I.4.1 Principe de la méthode d'identification des tensions perturbées

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation I.4

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.4)$$

La méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées basée essentiellement sur le principe de la puissance active $p(t)$ et réactive $q(t)$ instantanée a pour but la détermination de la tension fondamentale v_f et de la tension harmonique v_h d'une tension de réseau perturbée, elle utilise la transformation de $\alpha - \beta$.

(v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}) : Les tensions simples de la source ;

(i_{c1}, i_{c2}, i_{c3}) : les courants de charge de notre système triphasé.

La transformation de Concordai permet de ramener ce système triphasé à un système diphasé dont les axes sont en quadrature. Cette transformation appliquée aux tensions réseaux et aux courants de charge mène aux expressions suivantes :

$$[V_{s\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{3}/2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{I.8})$$

$$[I_{c\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{3}/2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{I.9})$$

A partir des vecteurs $[v_{s\alpha\beta}]$ et $[i_{c\alpha\beta}]$ décrivant le système des tensions et le système des tension dans le repère $(\alpha\beta)$, on applique le concept des puissances instantanées défini par AKAGI valable aussi bien en régimes transitoires que dans le cas des régimes permanents. Cette théorie introduit une décomposition de puissances instantanées dans le plan $(\alpha\beta)$. Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement p et q , sont définies par la relation suivante

[AKAGI] :

$$p = v_s \cdot i_c$$

$$q = v_s \times i_c$$

$$p = v_{s1} \cdot i_{c1} + v_{s2} \cdot i_{c2} + v_{s3} \cdot i_{c3}$$

$$q = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{s1} - v_{s2}) i_{c3} + (v_{s2} - v_{s3}) i_{c1} + (v_{s3} - v_{s1}) i_{c2}]$$

Ou bien

$$p = v_{s\alpha} \cdot i_{c\alpha} + v_{s\beta} \cdot i_{c\beta}$$

$$q = v_{s\alpha} \cdot i_{c\beta} - v_{s\beta} \cdot i_{c\alpha}$$

Ou par la relation matricielle suivante

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{c\alpha} & I_{c\beta} \\ I_{c\beta} & -I_{c\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{c\alpha} \\ V_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{I.10})$$

Les quantités $v_{s\alpha} \cdot i_{c\beta}$ et $v_{s\beta} \cdot i_{c\alpha}$ ne représentent pas des puissances instantanées conventionnelles dans le sens où elles sont le résultat du produit d'une tension définie sur un axe par un courant défini sur l'axe en quadrature. Par conséquent q n'est pas homogène à une grandeur électrique conventionnelle. C'est la raison pour

laquelle ce nouveau concept est appelé « Puissance imaginaire instantanée » avec une nouvelle unité IVA (Imaginaire-Volt-Amper).

D'autre part, les puissances réelles et imaginaires peuvent être représentées comme suit :

$$p = \bar{p} + \tilde{p}(t)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}(t)$$

Où :

\bar{p} : est une puissance continue liée à la composante fondamentale active de la tension de la source

\bar{q} : est une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive de la tension de la source

\tilde{p} et \tilde{q} sont des puissances alternatives liées à la somme des composantes harmonique du tension.

De la relation (I.10) donnant les puissances réelle et imaginaire instantanées découle l'expression suivante pour les courants.

$$\begin{bmatrix} V_{c\alpha} \\ V_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{I.11})$$

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

En considération les équations I.10 et I.11, on sépare les tensions de charge dans le repère $(\alpha\beta)$ en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} v_{c\alpha} \\ v_{c\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix}}_{\text{tension active}} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix}}_{\text{tension réactive}} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix}}_{\text{tension harmoniques}} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{I.12})$$

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes de la tension dans le repère $(\alpha\beta)$ revient à séparer les termes continus et les termes alternatifs des puissances réelle et imaginaire instantanées.

I.4.3 Séparation des puissances

En conséquence, l'élimination de la composante fondamentale dans l'équation (II.6) s'effectue à l'aide de deux filtres passe-haut de Butterworth (figure I.9) d'ordre deux [Hmi 10]:

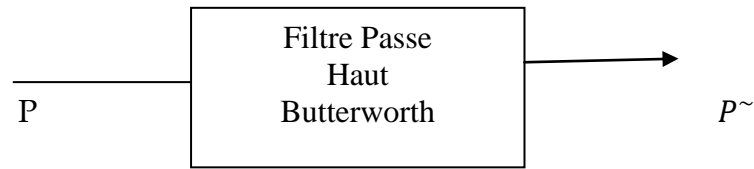


Fig. I.9: Schéma de principe du filtre utilisé pour l'extraction des composantes harmoniques

I.4.4 Identification des tensions de référencées

Après le filtrage de la puissance instantanée active et réactive, la transformation inverse permet le calcul des références de tension. La relation I.10 indique le calcul à effectuer afin d'obtenir les références dans le repère ($\alpha\beta$).

$$\begin{bmatrix} V_{ref\alpha} \\ V_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{ref} \\ q_{ref} \end{bmatrix} \tag{I.14}$$

La relation II.7 permet l'obtention de l'expression des signaux de référence utilisés pour la régulation des tensions dans le repère triphasé.

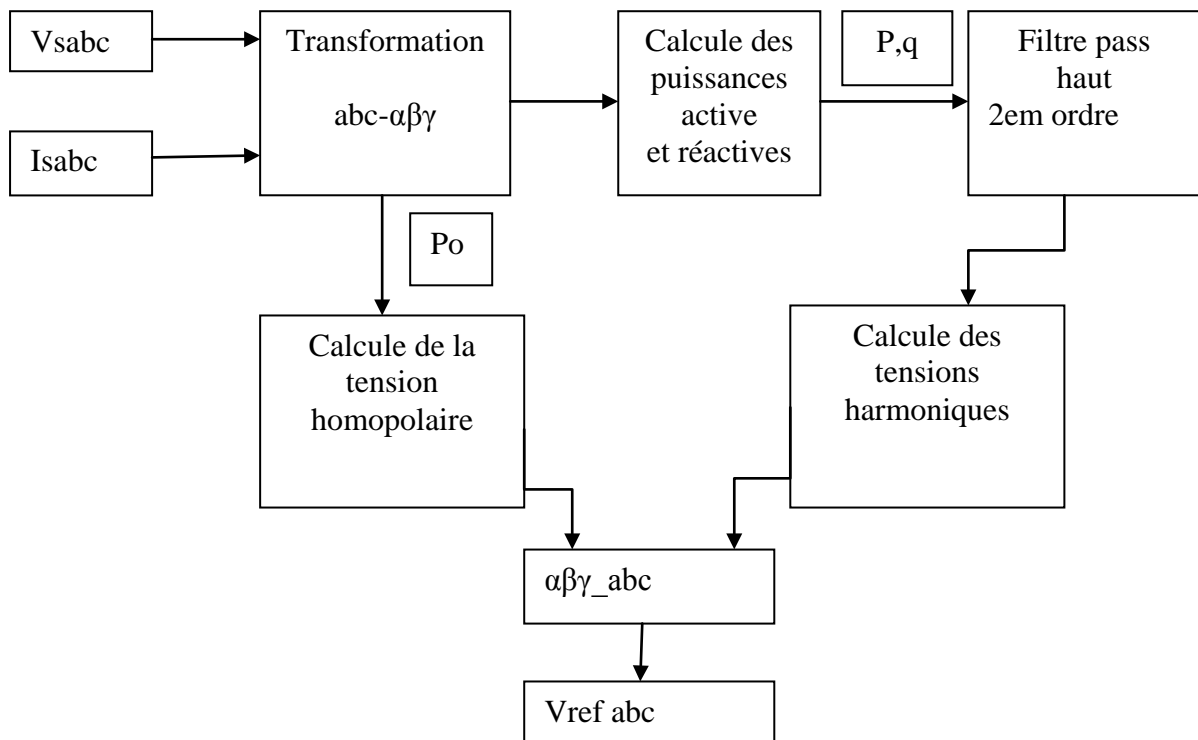


Fig.I.10 : Méthode d'extraction des tensions de références

- Résultats de simulation

Cas d'une charge résistive alimentée par une source de tension perturbée
(chap. VI).

$$R=[30 ;30 ;30]\Omega$$

$$V = V_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \cdot \sin(3\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \text{ (Volt)}$$

$$V_m=220V.$$

Les paramètres de filtre :

$$W_0=2\pi \cdot 50, z=0.707,$$

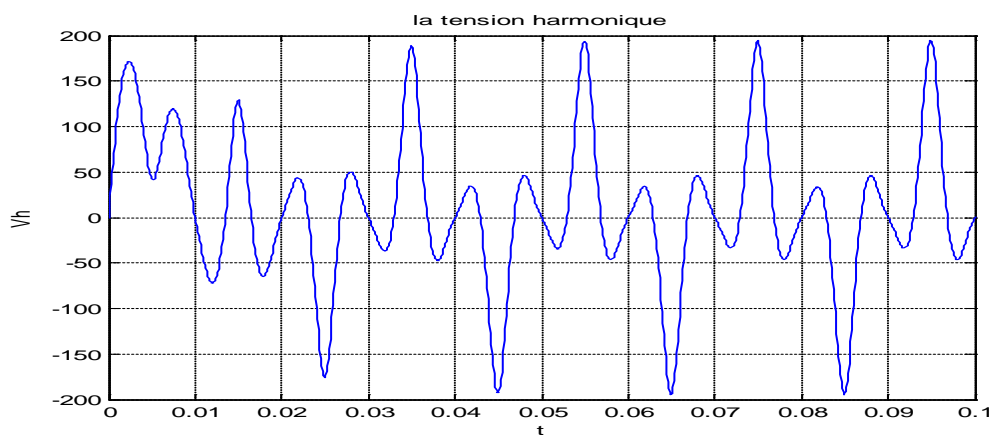


Fig. (III.3) : la tension harmonique

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le problème de la dégradation de la qualité d'énergie électrique qui due principalement aux phénomènes perturbateurs. Nous avons détaillé les différentes sources de perturbations électromagnétiques, leur caractéristiques et conséquences sur les réseaux électriques.

Une de ces phénomènes perturbateurs est les perturbations harmoniques qui résultent de la présence des charges non linéaire tel que les convertisseurs statiques, Nous avons expliquées en détail les conséquences et les caractéristiques des harmoniques dans les réseaux électriques, Le traitement du problème a conduit à identifier ces perturbations.

Nous présentons, dans le chapitre suivant, les diverses solutions classiques et moderne, les solutions classiques présentent de nombreuses contraintes pour répondre à un besoin actif de dépollution, elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement et de résonance. De

plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Chapitre II:
Stratégie de dépollution des
harmoniques

II. Introduction

Pour la dégradation de qualité d'énergie électrique peut conduire à une modification du comportement des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés dépendant avec les conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques, ceci suppose que:

- Un ou plusieurs générateurs de perturbations.
- Un ou plusieurs récepteurs sensibles à ces perturbations.
- Entre les deux, un chemin de propagation de ces perturbations.

Ces solutions peuvent être mise en œuvre pour :

- Corriger un dysfonctionnement dans une installation.
- Agir de façon préventive en vue de raccordement de charges polluantes.
- Mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie.
- Réduction du facteur énergétique.

L'existence de perturbations dans un réseau électrique conduit à prendre impérativement des dispositifs afin d'atténuer ou d'éliminer leurs conséquences sur les équipements électriques et sur les réseaux électriques.

Dans ce chapitre, on a proposé des stratégies de dépollution (traditionnelle, moderne), ensuite nous avons étudié une des stratégies de compensation (filtre actif série).

II. Stratégie de dépollution des harmoniques

Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en deux types : courant et tension, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiées. L'approche de la dépollution la mieux adaptée à notre objectif de recherche sera détaillée par la suite.

II.1 Stratégie de dépollution traditionnelle

Suivant les types de perturbation, courant et tension, deux solutions traditionnelles de dépollution sont analysées.

II.1.1 Dépollution des courants perturbateurs

Afin de dépolluer les réseaux électriques de ce type de perturbation, plusieurs solutions ont été introduites dans la littérature.

II.1.1.1 Rééquilibrage des courants du réseau électrique

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases.

Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur. La Fig. I.1 montre ce compensateur, appelé montage de Steinmetz [ME-96]. Ce montage permet de présenter à 50 Hz une impédance équilibrée. Cependant, le montage de Steinmetz provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de 50 Hz, avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques.

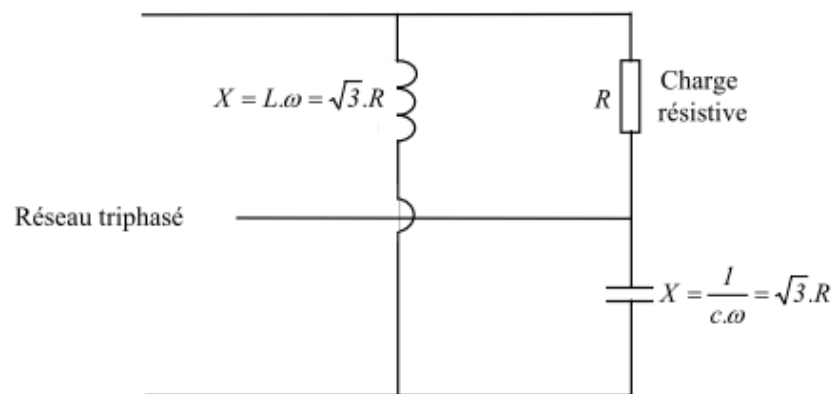


Fig. II.1 : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage

II.1.1.2 Compensation de la puissance réactive

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.

II.1.1.3 Compensation des courants harmoniques

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

- l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique,
- l'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant (Fig. I.2) et le filtre passif amorti ou passe-haut (Fig. I.3).

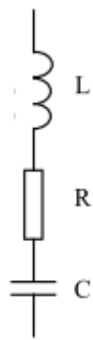


Fig. II.2 : Filtre passif résonnant

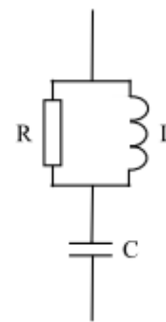


Fig. II.3 : Filtre passif amorti

Le filtre résonnant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,
- équipements volumineux,

- problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

II.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension, les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrés. Ces deux dernières sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés.

Pour dépolluer les réseaux électriques de ces deux types de perturbation, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de courant.

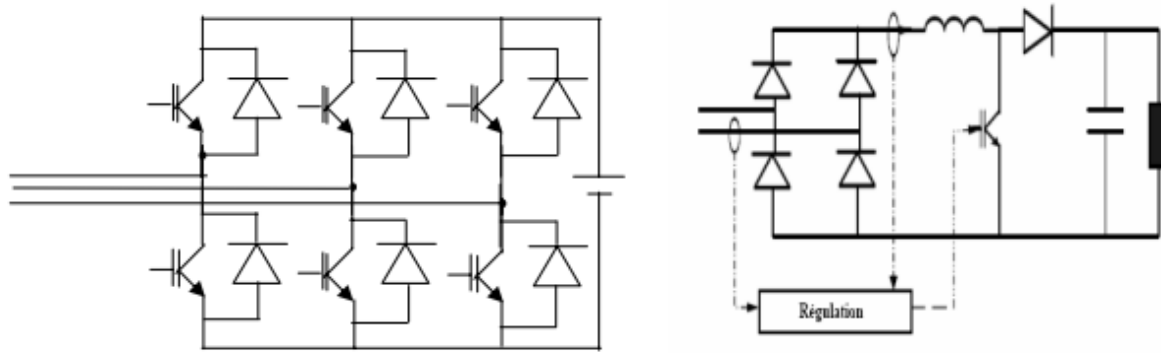
Quant aux creux de tension, la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels...etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique. Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème.

II.2 Stratégies de dépollution modernes

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées

II.2.1 Convertisseurs à absorption sinusoïdale

Grâce à la stratégie de modulation de largeur d'impulsions, un convertisseur AC- DC à absorption sinusoïdale a été rendu possible. C'est une solution très efficace, cependant elle doit être généralisée ce qui n'est pas le cas malheureusement de nos jours. Dans le cas monophasé, la structure la plus répandue est le pont redresseur monophasé à diode en parallèle avec un hacheur (Fig.I.4B) tandis que dans le cas triphasé c'est la structure en pont triphasé à base de GTO ou d'IGBT qui est la plus utilisée (Fig.I.4A). Cette solution consiste à réduire les harmoniques produits par le convertisseur AC- DC mais qui ne peut agir sur les harmoniques créés par les autres charges polluantes.



a- structure en pont triphasé à base d'IGBT b- pont redresseur monophasé à diode

Fig.II.4 : Convertisseurs à absorption sinusoïdale

II.2.2 Compensateurs actifs des harmoniques

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des perturbations du réseau électrique. Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Flexibles car auto-adaptatifs, ils viennent s'ajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en totalité ou en partie, présentes dans les réseaux électriques.

Dans cette partie du chapitre, nous allons introduire les principales structures, proposées dans la littérature, à savoir les filtres actifs parallèle, série, combiné parallèle-série et hybride, soit l'association filtres actifs avec filtre passifs.

II.2.2.1 Filtre actif parallèle (F.A.P) [Xu 94] [Sal 96] [Bench 98] [Ben 03]

Le filtre actif qui n'est autre qu'un onduleur trois bras connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (I.5), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs

(harmoniques et réactifs), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

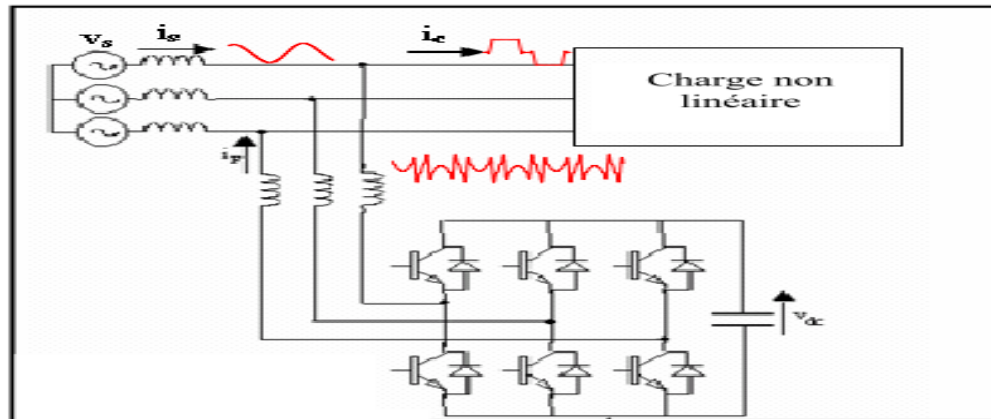


Fig II.5 : Filtre actif parallèle

Cette structure est plus répandue que celle du filtre actif série du fait des multiples modes de compensation qu'elle offre :

- Compensation des courants harmoniques.
- Compensation de la puissance réactive.
- Compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive

II.2.2.2 Filtre actif série (F.A.S) [To 99] [Ali 95]

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la figure (I.6), comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant du réseau et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

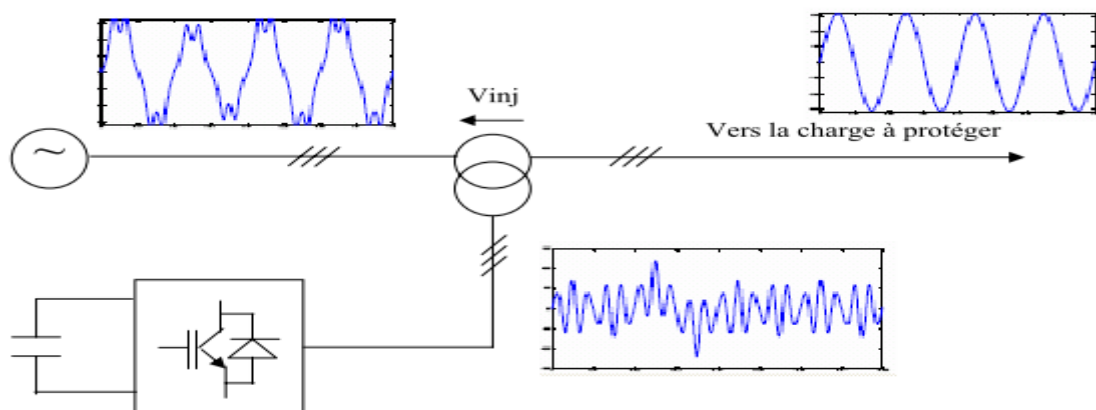


Fig II.6 : Filtre actif série

II.2.2.3 Combinaison parallèle-série actifs (UPQC) [Ar 95] [Fu 98] [To 99]

La combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la figure (I.7). Profitant des avantages de chacun des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés.

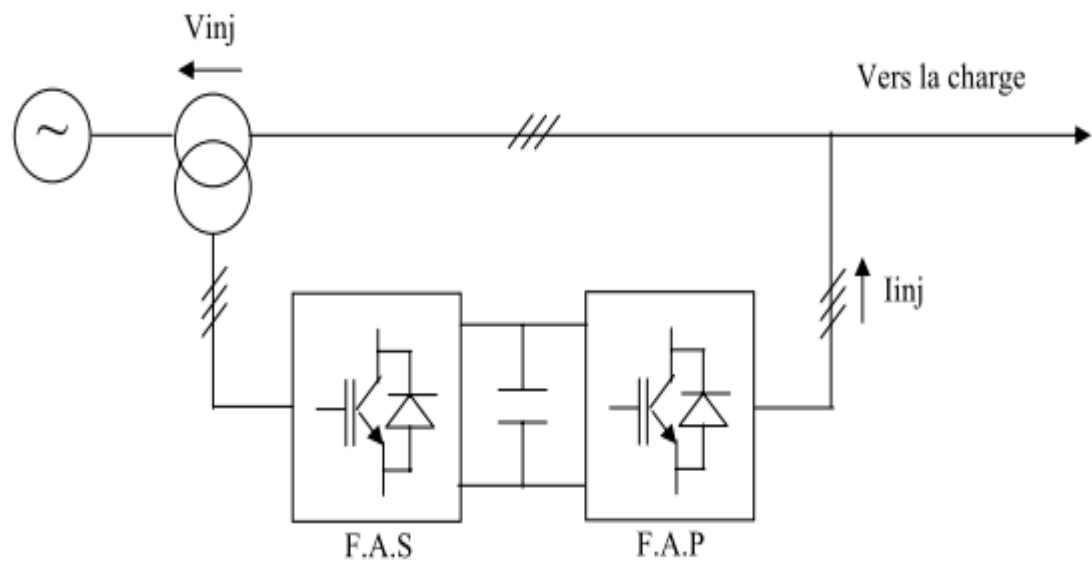


Fig II.7 : Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

II.2.2.4 Combinaison hybride active et passive

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution avantageuse. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques les plus importants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

- le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.
- le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

II.2.2.4.1 Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles [Ali 95]

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les forcer à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la figure (I.8).

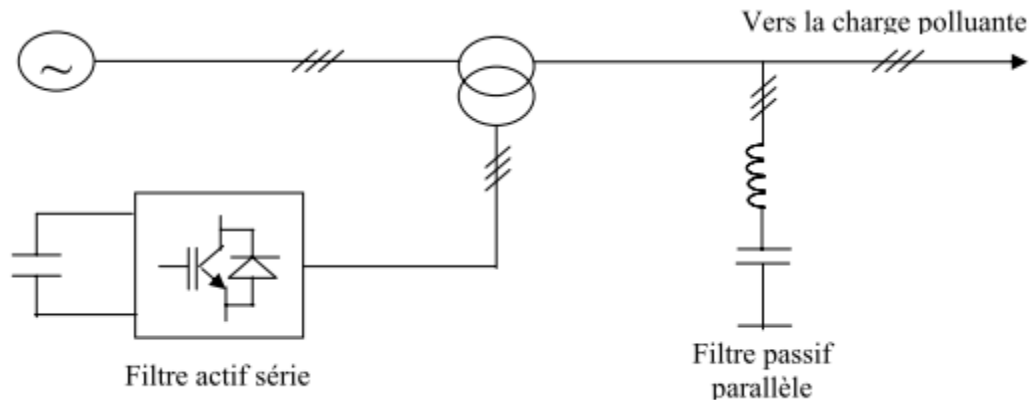


Fig II.8 : Filtre actif série et filtre passif parallèle

II.2.2.4.2 Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure (I.9), est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

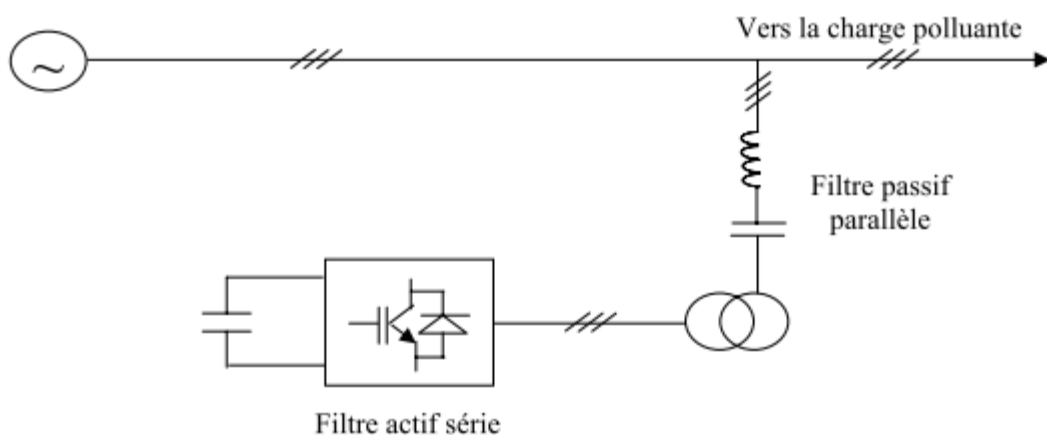


Fig II.9 : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

II.2.2.4.3 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en figure (I.10), est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les

harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo-convertisseur de forte puissance.

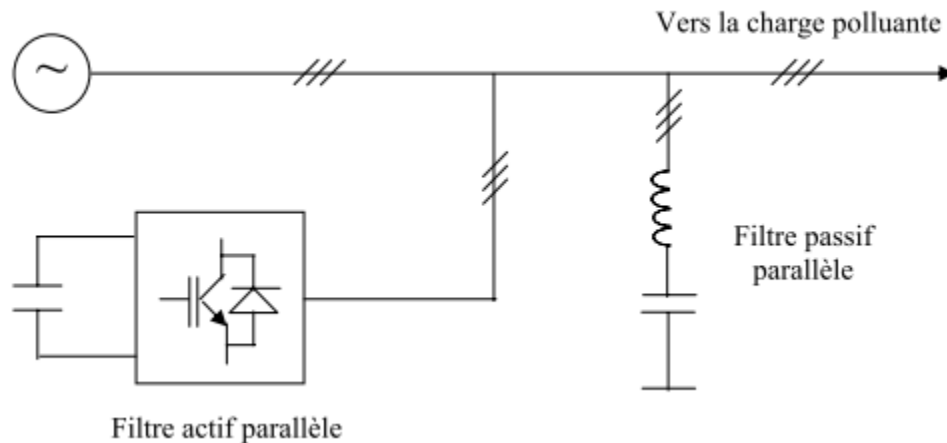


Fig II.10 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

II.2 Etude d'un compensateur actif série [Hmi 2010]

Le bon fonctionnement de la plupart des appareils électriques raccordés au réseau nécessite une alimentation sinusoïdale. Mais certains appareils, utilisant pour la plupart l'électronique de puissance, absorbent un courant qui n'est pas sinusoïdal. Ce courant a toujours une fréquence de 50 Hz, mais il est déformé. Lorsqu'il traverse l'impédance du réseau, ce courant produit une déformation de la tension.

Ces perturbations se propagent alors à l'ensemble du réseau. On dit que ces appareils sont non linéaires et qu'ils produisent des courants et des tensions harmoniques. On parle alors de distorsion harmonique. Dans certains cas, la configuration du réseau peut provoquer une amplification de la distorsion harmonique. La présence de charges non linéaires peut alors entraîner le dysfonctionnement d'autres appareils raccordés à proximité.

Cette partie sera consacré à la modélisation d'un réseau électrique perturbé, le principe de la compensation actif série, et ainsi la topologie générale d'un

compensateur actif série. Puis on étudie la modélisation de la charge polluante proposé

II.2.1 Mis on œuvre [HMI 2010]

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

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

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

II.2.2 Modélisation du réseau électrique perturbé

L'énergie électrique est distribuée sous forme de trois tensions sinusoïdales constituant le réseau triphasé perturbé comporte des harmoniques de tension d'ordre ($6k \pm 1$).

Dans notre étude on s'intéresse seulement aux harmoniques d'ordre (5) et d'ordre (7), avec en série dans chaque phase, une impédance

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega, \omega = 2\pi f$$

Avec

$$R_{cc} = 0.25m\Omega$$

$$L_{cc} = 19.4\mu H$$

$$f = 50Hz$$

$$\begin{bmatrix} V_{s1}(t) \\ V_{s2}(t) \\ V_{s3}(t) \end{bmatrix} = 220 \cdot \sqrt{2} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} - \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{5} \begin{bmatrix} \sin(5\omega t) \\ \sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{7} \begin{bmatrix} \sin(7\omega t) \\ \sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (II.1)$$

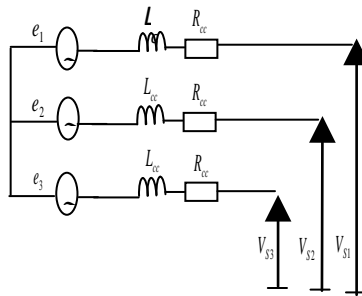


Fig.II.11 : Le modèle du réseau électrique

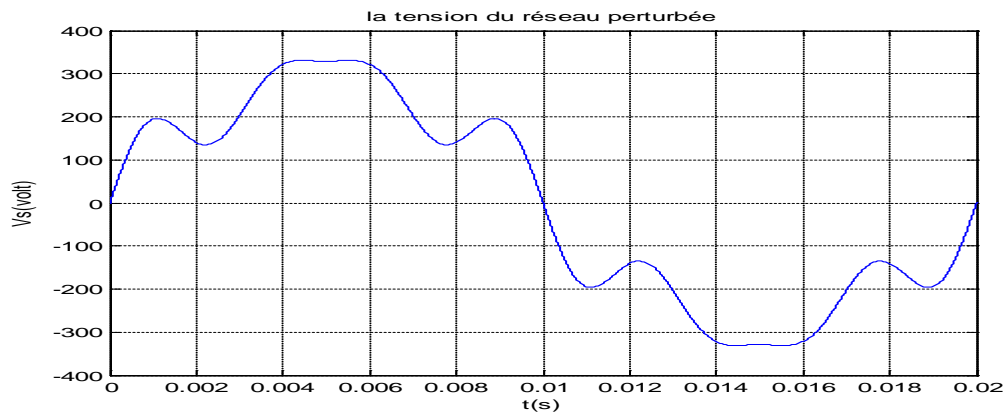


Fig.II.12 : La tension du réseau perturbé

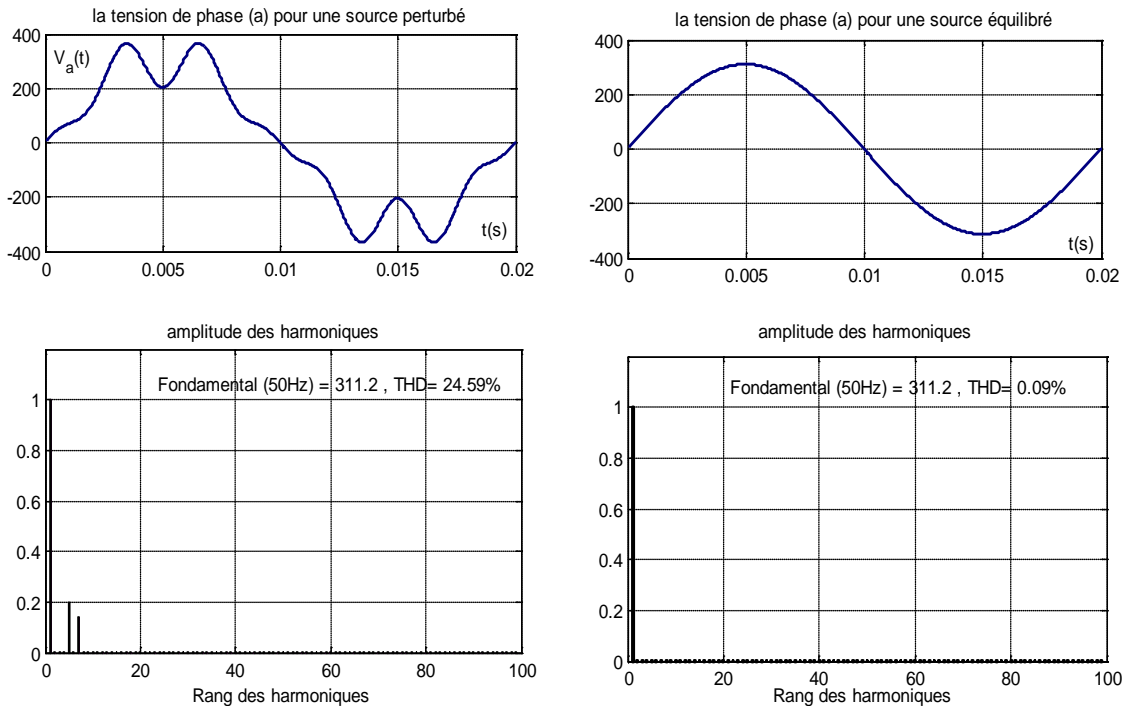


Figure II.13: Comparaison entre une tension de phase (a) pour une source perturbée et une tension de phase (a) pour une source une tension équilibré

II.2.3 Principe de la compensation actif série

Le compensateur actif série est une solution pour protéger des charges sensible 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. Il se comporte donc comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux de tension, déséquilibre, harmonique) venant de la source.

Le principe de la compensation active des tensions harmoniques consiste à ajouter en série avec la charge polluante un dispositif constitué d'un onduleur de tension commandé en temps réel de telle sorte que la tension appliquée à la charge soit sinusoïdal.

Pour ce faire, il faut premièrement identifier la tension de source (v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}) pour pouvoir connaître les tensions harmoniques (v_{h1}, v_{h2}, v_{h3}) qu'il faut ajouter pour avoir la tension de la charge sinusoïdale (v_{c1}, v_{c2}, v_{c3})

Dans cette étude, on a utilisé deux charges non linéaires de redresseur triphasé à base des thyristors statique et dynamique.

La figure (II.4) peut facilement expliquer le fonctionnement du compensateur actif série pour une tension de source perturbé (v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}). Les valeurs moines des tensions harmoniques (v_{h1}, v_{h2}, v_{h3}) que doit fournir le compensateur doit être égal a des harmoniques identifie a partir de la tension de réseau perturbé

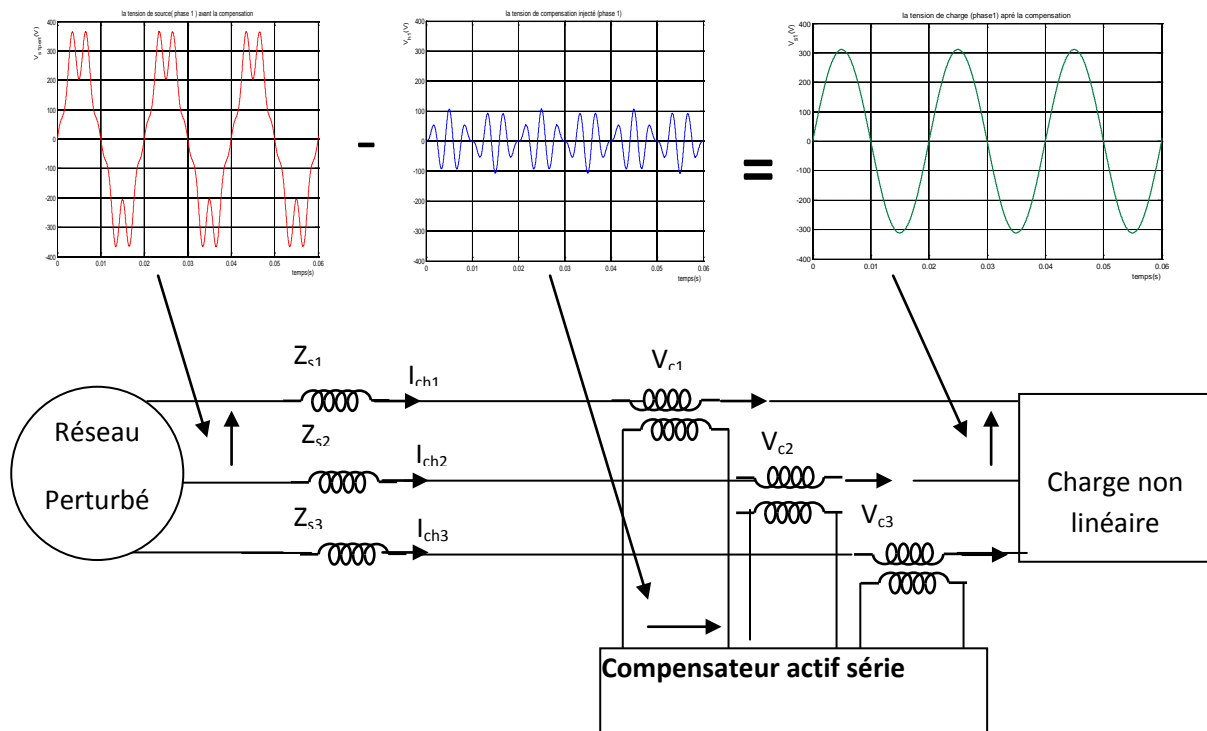


Figure II.14 : Principe du filtrage actif

II.2.4 Topologie générale d'un compensateur actif série [Hmi 2010]

Comme tous les compensateurs actifs le filtre actif série se compose essentiellement de deux parties, d'une partie puissance et d'une partie commande (figure II.5),

- ❖ La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'un élément passif lui servant de source d'énergie.

L'onduleur est un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandable à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle

- ❖ La partie commande, sert au contrôle de la commutation des éléments semi conducteurs formant l'onduleur de la partie puissance. Au moyen de stratégies de contrôle appropriées

L'idée c'est de générer des signaux harmoniques à la sortie de l'onduleur servant à compenser ceux présents sur le réseau électrique.

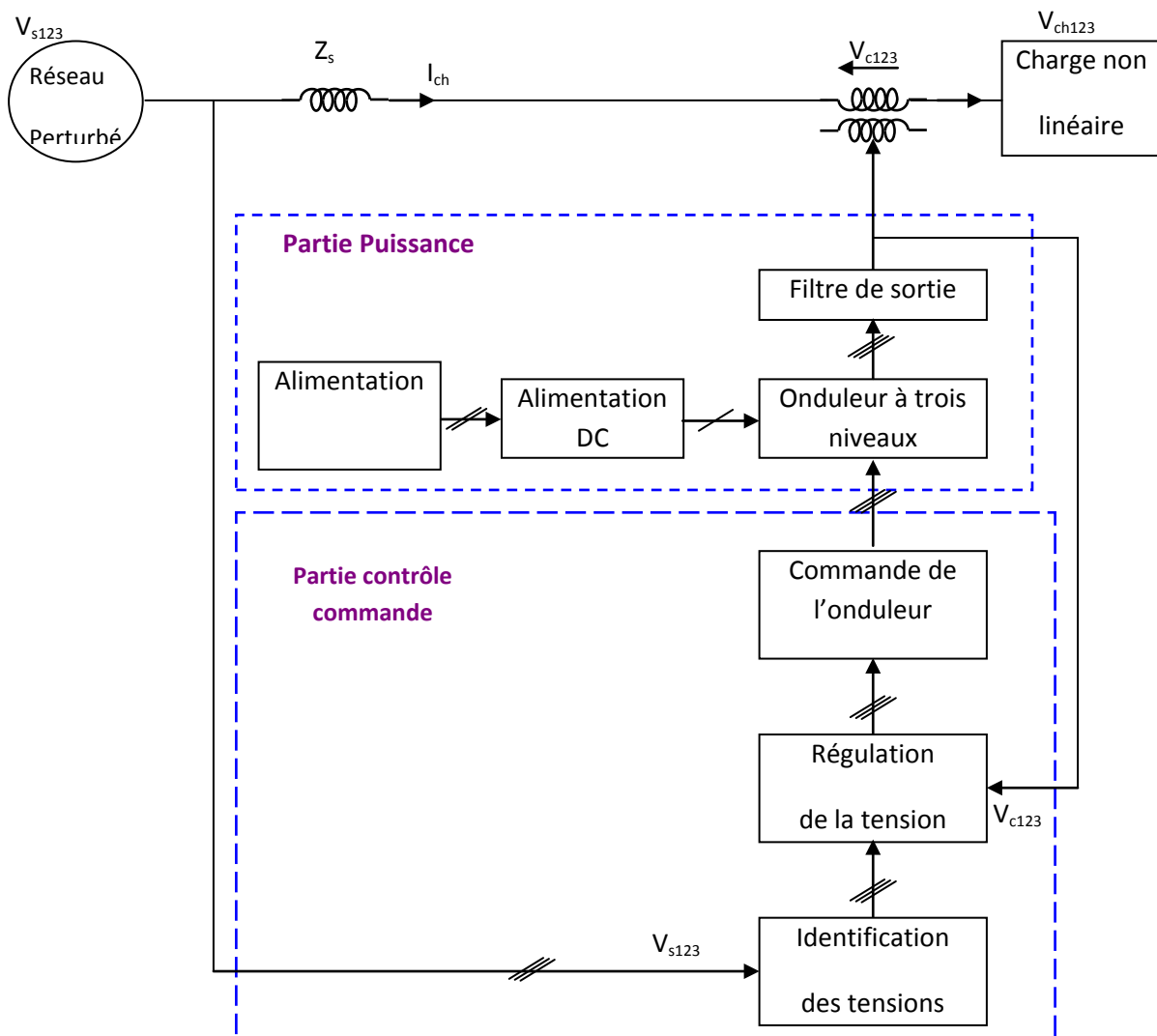


Figure II.15 : Structure générale du filtre actif

II.2.4.1 Etude de la partie puissance

II.2.4.1.1 onduleur de tension

Soit l'onduleur triphasé à structure tension en utilise dans notre travail un onduleur de tension à trois niveaux qui sera présenté dans le chapitre suivant

II.2.4.1.2 Système de stockage d'énergie

On a supposé que l'alimentation, est de valeur constante

II.2.4.1.3 Filtre passif de sortie

Le filtre passif représenté par l'inductance de découpage constitué le lien entre l'onduleur et le réseau électrique. Il doit empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

II.2.4.2 Etude de la partie contrôle commande

Cette partie, comporte les deux principaux éléments de la partie contrôle commande du filtre actif série ; l'identification des tensions perturbatrices et la régulation des tensions injectées au réseau électrique.

A ce point nous présentons seulement l'identification des tensions perturbatrices

La qualité du filtrage réside dans l'efficacité de la méthode utilisé pour l'identification des courants ou des tensions harmoniques, plusieurs méthodes on a été propose, une de ces dernier est basée sur le calcul des puissances instantanées dan le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autre peut être utilisées pour compenser à la fois la tension et la puissance réactive, en se basent sur la soustraction de la partie fondamentale active de la tension total.

La méthode d'identification que nous avons étudié, c'est la méthode qui on a proposé dans le chapitre précédant.

II.2.5 Modélisation de la charge polluante

La charge polluante que nous avons utilisée dans notre étude est le redresseur triphasé à base des thyristors, structure en pont de Graëtz. Alimente un filtre passif LC

II.2.5.1 Modélisation du redresseur a thyristor

Le redresseur génère les harmoniques de tension d'ordre $6k \pm 1$.

Le thyristor Th1 est débloqué avec un angle de retard α , donc pour $\omega.t = \alpha + \frac{\pi}{6}$.

Les autres thyristors sont débloqués de sixième de période en sixième de période dans l'ordre suivant: Th'3, Th2, Th'1, Th3, Th'2.

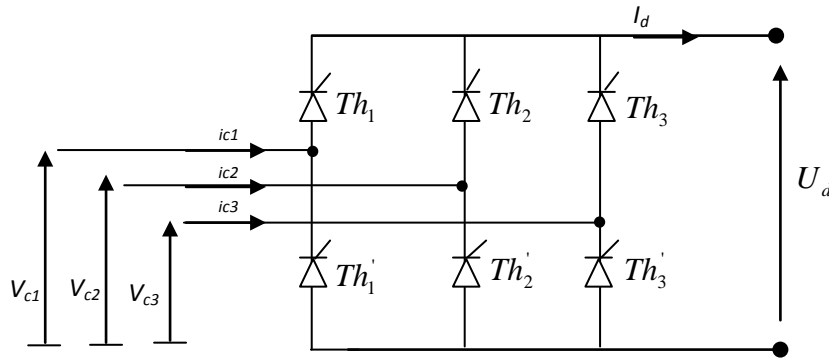


Figure II.16: un redresseur triphasé à thyristors

En fonctionnement idéal des semi-conducteurs on résume les états de conduction de la tension redressée U_d et des courant i_{ci} , $i=1, 2,3$.

$$\begin{aligned} i_{ci} &= X_i \cdot I_d \\ U_d &= \sum X_i \cdot V_i \end{aligned} \tag{II.2}$$

X_i : Les fonctions de conversion des semi-conducteurs.

$$x_1 = \begin{cases} 1 & \alpha + \frac{\pi}{6} < \omega t < \alpha + 5 \cdot \frac{\pi}{6} \\ -1 & \alpha + 7 \cdot \frac{\pi}{6} < \omega t < \alpha + 11 \cdot \frac{\pi}{6} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \tag{II.3}$$

Les autres fonctions sont décalées de 120° et de 240° .

Le schéma de la figure 1.8, montre l'allure du système de tension triphasée (v_1, v_2, v_3) à l'entrée du pont redresseur, ainsi que la tension redressée V_{red} à la sortie de celui-ci.

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$V_{redmoy} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{max} \quad (II.4)$$

Conclusion

La forte croissance de l'utilisation de convertisseurs générateurs d'harmoniques qui rentrent dans plusieurs applications demeure un souci inquiétant pour les distributeurs et les utilisateurs d'énergie électrique. Car ce type de charge dit non-linéaire engendre dans le réseau de distribution, des courants non-sinusoïdaux provoquant des perturbations envahissant ce dernier. Ces perturbations se répercutent sur la qualité de l'énergie électrique et sur le bon fonctionnement des installations. Elles se manifestent de deux manières différentes :

- Effets instantanés ;
- Effets différés

Faire face à ce fléau s'inscrit dans les occupations premières des distributeurs et même des utilisateurs d'énergie électrique; le filtrage est la solution la plus adoptée, il peut être effectué de deux manières :

- Filtrage passif (manque de souplesse)
- Filtrage actif (adaptatif)

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes stratégies de dépollution et une discussion sur le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, leurs effets sur le réseau électrique et les différentes méthodes de filtrage de ces harmonique y compris le filtrage actif. On a présenté aussi une nouvelle structure du filtre actif utilisée dans le cas du déséquilibre(FAS).

Dans la prochaine chapitre on montre l'élément essentielle dans le compensateur actif série c'est l'onduleur de tension à trois niveaux et sa nouvelle technique de commande (modulation vectorielle tridimensionnelle) pour augmentent les performances de la compensation actif sérié.

Chapitre III :

La modulation vectorielle tridimensionnelle(*SVM 3D*)

III. Introduction

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques assurant la conversion continue alternative, dont on distingue deux types d'onduleurs, les onduleurs de tension et les onduleurs du courant (dit commutateur). Ils se présentent dans plusieurs applications, le plus variés est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif.

L'évolution de la fonction de conversion s'est appuyée, d'une part, sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandable, puissants, robustes et rapides, d'autre part, sur l'utilisation des techniques dites de "modulation vectorielle tridimensionnelle".

Dans ce chapitre, on étudiera l'onduleur de tension triphasé à deux et à trois niveaux et les stratégies de commandes adaptées à ces derniers.

En premier lieu, on présentera la modélisation du fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux, puis on développera son modèle de connaissance et celui de commande. et on s'intéressera aux stratégies de commande des onduleurs triphasés à deux niveaux.

En deuxième lieu, on fait la présentation du modèle mathématique de l'onduleur à trois niveaux à travers l'onduleur deux niveaux, puis les stratégies de commande des onduleurs triphasés à trois niveaux.

III. Modulation vectorielle à trois dimensions (SVM 3D)

III.1 Description de l'onduleur deux niveaux à quatre bras

La structure de l'onduleur de tension triphasé à trois bras a été utilisée pour ses performances en terme de compensation des harmoniques et correction du facteur de puissance dans le réseau à trois fils. En revanche, cette structure ne permet pas de compenser les perturbations dues aux charges non linéaires et aux charges déséquilibrées connectées à un réseau à quatre fils.

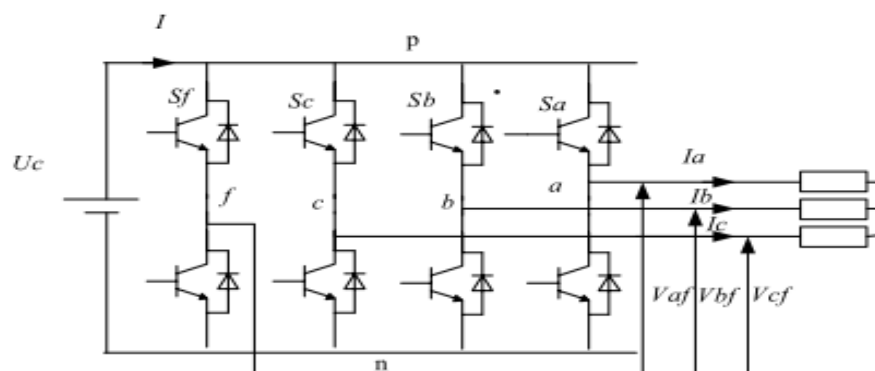


Fig. (III.1) Structure de l'onduleur triphasé à quatre bras

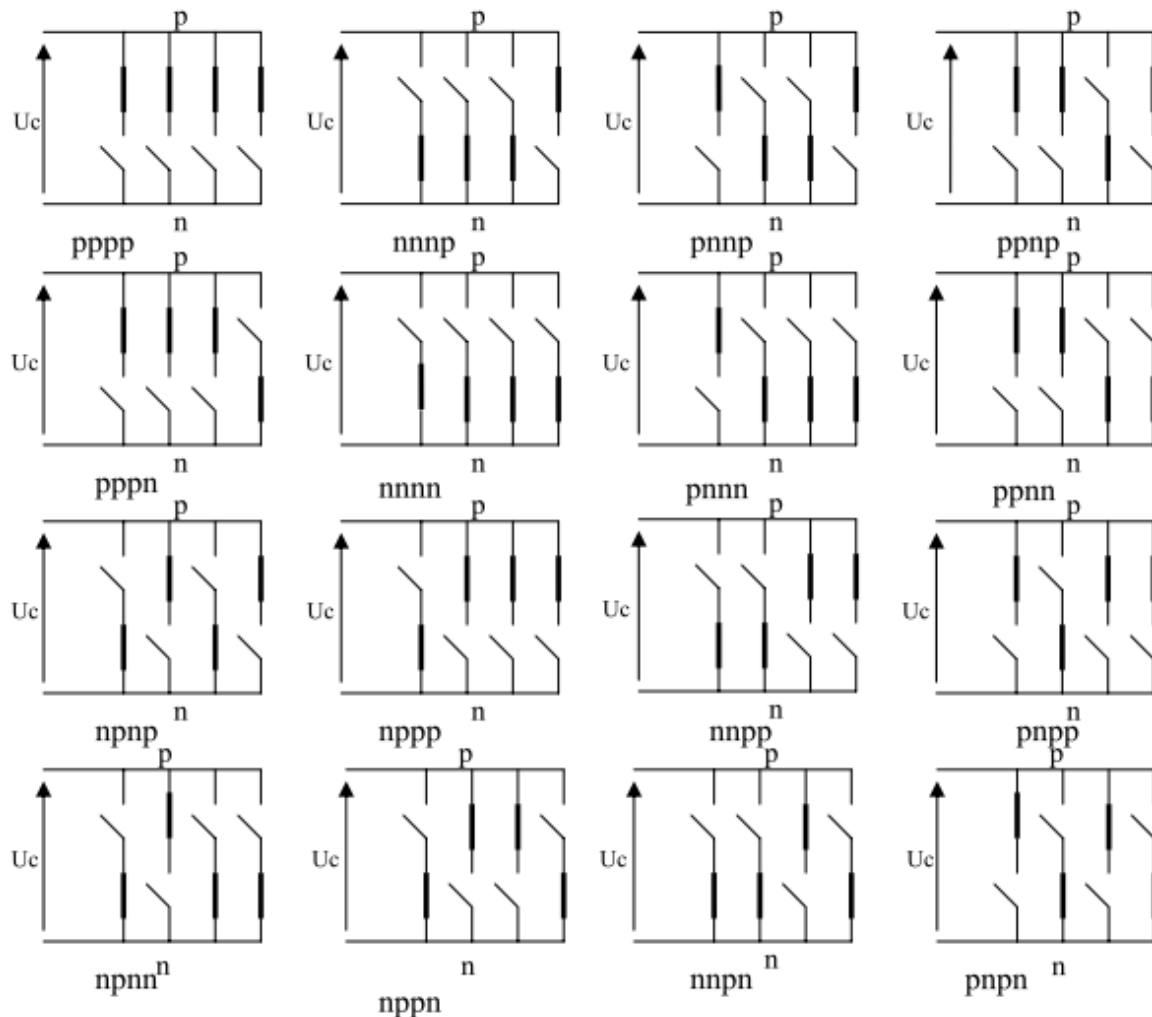
III .1.1 Modèle de l'onduleur à quatre bras [Zhang 98]

Les états de commutations possibles de l'onduleur à quatre bras sont seize ($2^4 = 16$) représentés en ordre par les combinaisons des interrupteurs [Sa, Sb, Sc, Sf] où :

$S_x = 'p'$ indique que l'interrupteur du haut de la phase 'x' est fermé,

$S_x = 'n'$ indique que l'interrupteur du bas de la phase 'x' est fermé.

Avec : $x = a, b, c, f$.



Fig(III.2) Les états de commutations de l'onduleur triphasé à quatre bras.

Chapitre III : La modulation vectorielle tridimensionnelle (SVM 3D)

Les tensions de sorties correspondantes aux états de commutations de l'onduleur à quatre bras sont données par le tableau (II.1). Elles sont obtenues par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{af} \\ V_{bf} \\ V_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a - S_f \\ S_b - S_f \\ S_c - S_f \end{bmatrix} U_c \quad (\text{III.1})$$

Avec: $S_x = 1$ si l'interrupteur du haut du bras x est fermé,

$S_x = 0$ si l'interrupteur du bas du bras x est fermé.

$x = a, b, c, f.$

Etat	<i>Pppp</i>	<i>nnnp</i>	<i>pnpn</i>	<i>ppnp</i>	<i>npnp</i>	<i>nppp</i>	<i>nnpp</i>	<i>pnpp</i>
Vecteur	\vec{v}_{15}	\vec{v}_8	\vec{v}_9	\vec{v}_{11}	\vec{v}_{10}	\vec{v}_{14}	\vec{v}_{12}	\vec{v}_{13}
V_{af}	0	-Uc	0	0	-Uc	-Uc	-Uc	0
V_{bf}	0	-Uc	-Uc	0	0	0	-Uc	-Uc
V_{cf}	0	-Uc	-Uc	-Uc	-Uc	0	0	0
Etat	<i>Pppn</i>	<i>nnnn</i>	<i>pnnn</i>	<i>ppnn</i>	<i>npnn</i>	<i>nppn</i>	<i>nnpn</i>	<i>pnpn</i>
Vecteur	\vec{v}_7	\vec{v}_0	\vec{v}_1	\vec{v}_3	\vec{v}_2	\vec{v}_6	\vec{v}_4	\vec{v}_5
V_{af}	Uc	0	Uc	Uc	0	0	0	Uc
V_{bf}	Uc	0	0	Uc	Uc	Uc	0	0
V_{cf}	Uc	0	0	0	0	Uc	Uc	Uc

Tab(III.1) : Tensions de sorties générées par l'onduleur à quatre bras.

Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

Le passage du repère (a,b,c) au repère orthogonal (α,β,γ) se fait par la transformée de Clark

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_\gamma \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{Avec : } C = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

La transformée inverse est donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = C^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_\gamma \end{bmatrix} \quad \text{Avec : } C^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Le tableau suivant résume les vecteurs de tension générés par l'onduleur dans le repère orthogonal (α, β, γ) :

Etat	<i>pppp</i>	<i>nnnp</i>	<i>pnpn</i>	<i>Ppnp</i>	<i>npnp</i>	<i>nppp</i>	<i>nmpp</i>	<i>pnpp</i>
vecteur	\vec{v}_{15}	\vec{v}_8	\vec{v}_9	\vec{v}_{11}	\vec{v}_{10}	\vec{v}_{14}	\vec{v}_{12}	\vec{v}_{13}
V_α	0	0	$\frac{2}{3} U_c$	$\frac{1}{3} U_c$	$-\frac{1}{3} U_c$	$-\frac{2}{3} U_c$	$-\frac{1}{3} U_c$	$\frac{1}{3} U_c$
V_β	0	0	0	$\frac{1}{\sqrt{3}} U_c$	$\frac{1}{\sqrt{3}} U_c$	0	$-\frac{1}{\sqrt{3}} U_c$	$-\frac{1}{\sqrt{3}} U_c$
V_γ	0	$-U_c$	$-\frac{2}{3} U_c$	$-\frac{1}{3} U_c$	$-\frac{2}{3} U_c$	$-\frac{1}{3} U_c$	$-\frac{2}{3} U_c$	$-\frac{1}{3} U_c$
Etat	<i>pppn</i>	<i>nnnn</i>	<i>pnnn</i>	<i>Ppnn</i>	<i>npnn</i>	<i>nppn</i>	<i>nmnn</i>	<i>pnpn</i>
vecteur	\vec{v}_7	\vec{v}_0	\vec{v}_1	\vec{v}_3	\vec{v}_2	\vec{v}_6	\vec{v}_4	\vec{v}_5
V_α	0	0	$\frac{2}{3} U_c$	$\frac{1}{3} U_c$	$-\frac{1}{3} U_c$	$-\frac{2}{3} U_c$	$-\frac{1}{3} U_c$	$\frac{1}{3} U_c$
V_β	0	0	0	$\frac{1}{\sqrt{3}} U_c$	$\frac{1}{\sqrt{3}} U_c$	0	$-\frac{1}{\sqrt{3}} U_c$	$-\frac{1}{\sqrt{3}} U_c$
V_γ	U_c	0	$\frac{1}{3} U_c$	$\frac{2}{3} U_c$	$\frac{1}{3} U_c$	$\frac{2}{3} U_c$	$\frac{1}{3} U_c$	$\frac{2}{3} U_c$

Tab(III.2) : Les vecteurs de tension de l'onduleur représentés dans le repère (α, β, γ) .

Les seize vecteurs de tension générés par l'onduleur sont illustrés sur la (fig.III.3.a), leurs projections sur le plan (α, β) donnent un hexagone (fig III.3.b).

Chapitre III : La modulation vectorielle tridimensionnelle (SVM 3D)

possède des valeurs bien déterminées (tableau2) ; la fig.(III.3).c montre aussi la position des vecteurs de commande mais sous des angles différents.

La fig(III.3) (b), présente la projection des vecteurs de commande dans sur le plan (α , β), c'est un hexagone limité par des vecteurs de commande qui appartiennent à cette couche (une valeur de V_γ bien déterminée).

Pour la couche où la valeur de V_γ est égale à zéro, on a le cas d'un équilibre de tension, on constate que c'est un hexagone limité par les six vecteurs de commande comme dans le cas d'un onduleur à trois bras.

Parmi les seize vecteurs, il existe deux vecteurs nuls : (v_0 (nnnn) et v_{15} (pppp)) Les quatorze vecteurs restants sont des vecteurs non nuls. Ils sont placés dans des couches comme suit :

- pour la couche $v_\gamma = \frac{1}{3}U_c$ l'emplacement des trois vecteurs (v_1, v_2, v_4),
- pour la couche $v_\gamma = \frac{2}{3}U_c$ l'emplacement des trois vecteurs (v_3, v_6, v_5),
- pour la couche $v_\gamma = U_c$ l'emplacement du vecteur v_7 ,
- pour la couche $v_\gamma = -U_c$ l'emplacement des trois vecteurs (v_{14}, v_{13}, v_{11}),
- pour la couche $v_\gamma = -\frac{2}{3}U_c$ l'emplacement des trois vecteurs (v_{12}, v_{10}, v_9),
- pour la couche $v_\gamma = -\frac{1}{3}U_c$, l'emplacement du vecteur v_8 .

III.1.2La commande vectorielle tridimensionnelle [Zhang 02]

La commande vectorielle est la méthode de commande d'un onduleur à quatre bras dans le cas du déséquilibre et en présence du fil du neutre qui est parcouru par un courant non nul. Cette technique consiste à détecter la position du vecteur de référence dans l'espace (V_α, V_β, V_0), et d'accorder à ce vecteur les trois vecteurs de commande les plus appropriés (c.à.d. les plus proche de ce vecteur de référence « vecteurs adjacents »)

III.1.3Détection de la position du vecteur de référence

Dans, la commande classique, celle de deux dimensions; le plan est divisé en six secteurs limités par les vecteurs de commande.

Dans la commande tridimensionnelle, l'espace est divisé en six prismes et chaque prisme en quatre tétraèdres.

III.1.3.1 Détection de prisme [Aiss 09]

Afin de déterminer les vecteurs de commande adéquats pour chaque vecteur de référence, on détermine alors sa position dans l'espace: prisme et tétraèdre adéquats. Donc, l'espace est divisé en six prismes comme le montre la figure ; chaque prisme contient six vecteurs non nuls et deux vecteurs nuls

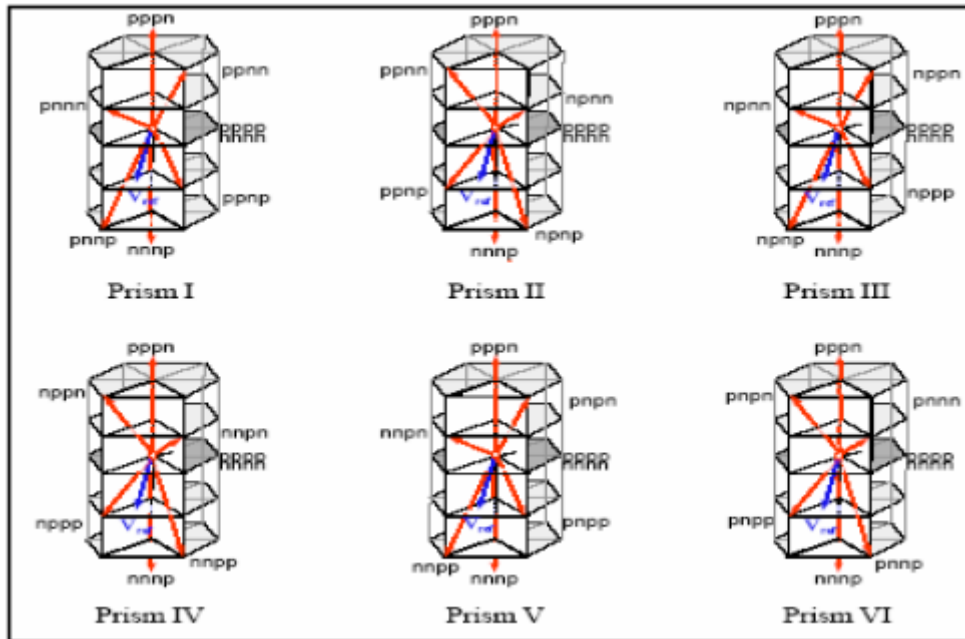


Fig.(III.4) :Vecteur tension de référence dans les différents prismes

La détermination des différents prismes est analogue à la méthode de détection des secteurs dans la commande vectorielle classique.

On divise le plan (β, α) en six secteurs égaux, chaque secteur fait un angle de 60° et on prend tout l'espace qui est couvert par ce secteur fig.(III.5)

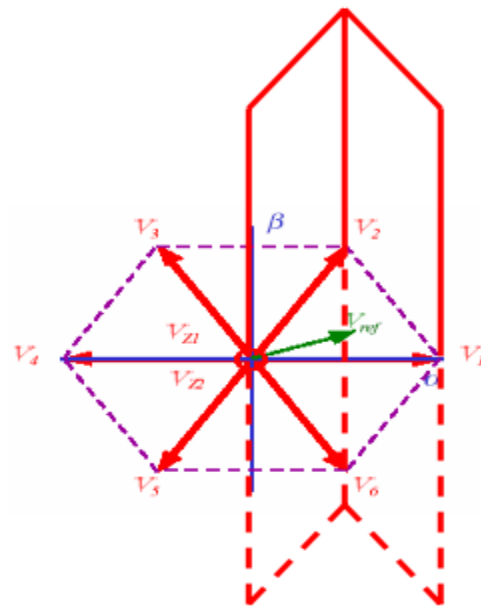


Fig.(III.5)Exemple de détection du prisme

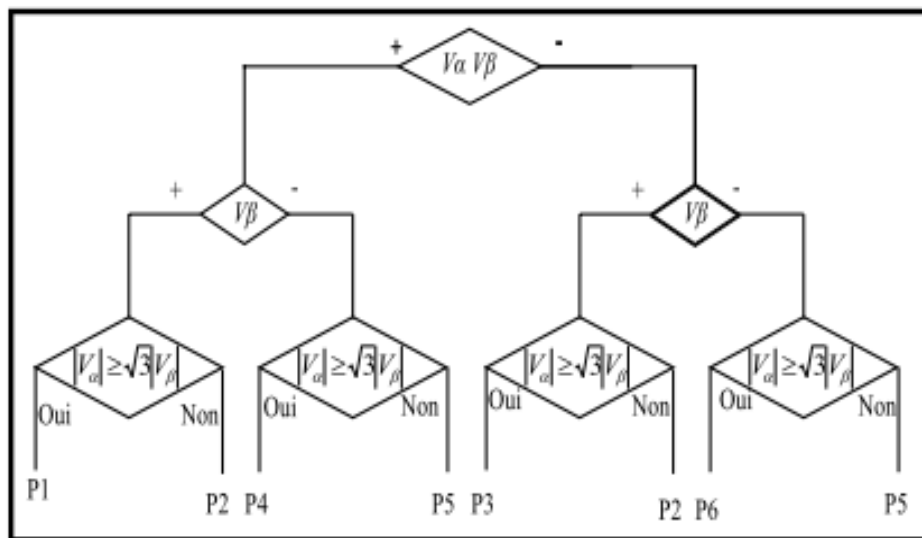


Fig.(III.6) Algorithme de détection des prismes

III.1.3.2 Détection de tétraèdre

La commande vectorielle tridimensionnelle s'effectue après la détermination de la position du vecteur de référence qui est représentée par le prisme qui contient six vecteurs non nuls , or cette représentation s'effectue dans un repère à trois dimensions qui est l'espace (α, β, γ) , donc trois vecteurs non nuls suffisent pour produire n'importe quel vecteur de cet espace, ce qui implique qu'on doit

Chapitre III : La modulation vectorielle tridimensionnelle (SVM 3D)

prendre à chaque fois trois vecteurs parmi les six du prisme donc une combinaison de :

$$C_6^3 = \frac{6!}{3!(6-3)!} = 20 \quad (\text{III.4})$$

Mais parmi ces 20 ensembles, il y'a des ensembles à rejeter comme ceux qui contiennent des vecteurs qui conduisent à une confusion et une mauvaise représentation du vecteur de référence par l'application de ces vecteurs de commande (par exemple, dans le 1^{er} prisme, on ne peut pas prendre le vecteur pppn qui conduit à $V_y > 0$ avec le vecteur nnpn qui conduit à $V_y < 0$).

Après cette opération de suppression des ensembles qui contiennent des vecteurs qui donne une mauvaise présentation de vecteur de référence, chaque prisme est constitué de quatre (04) tétraèdres, où chacun d'eux contient trois vecteurs de commande non nuls et deux vecteurs nuls comme le montre la figure (FigII.17). Sur cette figure, on a pris l'exemple du prisme n°1.

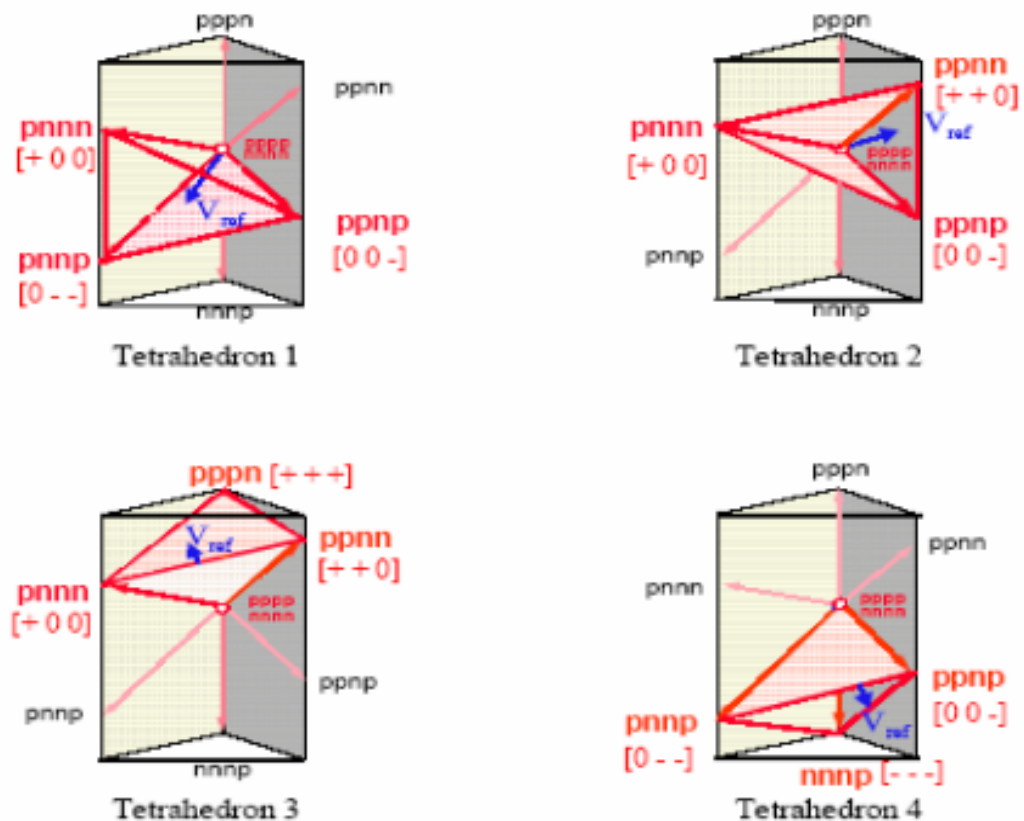


Fig.(III.7)Représentation des tétraèdres dans le premier prisme

Méthode de détections des tétraèdres

Il est très difficile de détecter dans quel tétraèdre le vecteur de référence $(V_\alpha, V_\beta, V_\gamma)$ se trouve dans l'espace (α, β, γ) . La seule méthode de les détecter est de passer aux composantes réelles de vecteurs de référence $V_{a_{ref}}, V_{b_{ref}}, V_{c_{ref}}$, et de voir le signe de ces vecteurs de référence afin de choisir le tétraèdre dont les vecteurs de commande correspondent et peuvent conduire à des vecteurs de références qui auront le même signe.

Exemple de choix de tétraèdre

On prend l'exemple du prisme 1, et le tétraèdre 1. Dans ce cas, les vecteurs pris en compte sont les vecteurs pnnn, pnpn, ppnp. Ces vecteurs provoquent :

$$\begin{cases} V_{af} \geq 0 \\ V_{bf} \leq 0 \\ V_{cf} \leq 0 \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Donc si on trouve le vecteur de référence dans le prisme 1, et nous avons les signes des tensions données précédemment, donc on choisira le tétraèdre 1.

Dans ce tableau, on donne les vecteurs de commande de chaque tétraèdre dans chaque prisme

Tétraèdre Prisme	1	2	3	4
I	$V_1 = pnnn$ $V_2 = pnp$ $V_3 = ppnp$ $V_a \geq 0, V_b \leq 0; V_c \leq 0$	$V_1 = pnnn$ $V_2 = ppnn$ $V_3 = ppnp$ $V_a \geq 0, V_b \geq 0; V_c \leq 0$	$V_1 = pnnn$ $V_2 = ppnn$ $V_3 = pppn$ $V_a \geq 0, V_b \leq 0; V_c \geq 0$	$V_1 = pnp$ $V_2 = ppnp$ $V_3 = nnp$ $V_a \leq 0, V_b \leq 0; V_c < 0$
II	$V_1 = ppnn$ $V_2 = ppnp$ $V_3 = npnn$ $V_a \geq 0, V_b \leq 0; V_c \leq 0$	$V_1 = ppnp$ $V_2 = npnn$ $V_3 = npnp$ $V_a \leq 0, V_b \geq 0; V_c \leq 0$	$V_1 = ppnn$ $V_2 = npnn$ $V_3 = pppn$ $V_a \geq 0, V_b > 0; V_c \geq 0$	$V_1 = ppnp$ $V_2 = npnp$ $V_3 = nnp$ $V_a \leq 0, V_b \leq 0; V_c < 0$
III	$V_1 = npnn$ $V_2 = npnp$ $V_3 = nppp$ $V_a \leq 0, V_b \geq 0; V_c \leq 0$	$V_1 = npnn$ $V_2 = nppn$ $V_3 = nppp$ $V_a \leq 0, V_b \geq 0; V_c > 0$	$V_1 = ppnn$ $V_2 = nppn$ $V_3 = pppn$ $V_a \geq 0, V_b > 0; V_c \geq 0$	$V_1 = npnp$ $V_2 = nppp$ $V_3 = nnp$ $V_a < 0, V_b \leq 0; V_c \leq 0$
IV	$V_1 = nppn$ $V_2 = nppp$ $V_3 = npnp$ $V_a \leq 0, V_b \geq 0; V_c \geq 0$	$V_1 = nppp$ $V_2 = nnpn$ $V_3 = nppp$ $V_a \leq 0, V_b \leq 0; V_c \geq 0$	$V_1 = nppn$ $V_2 = nnpn$ $V_3 = pppn$ $V_a \geq 0, V_b \geq 0; V_c > 0$	$V_1 = nppp$ $V_2 = nppp$ $V_3 = nnp$ $V_a < 0, V_b \leq 0; V_c < 0$
V	$V_1 = nnpn$ $V_2 = nppp$ $V_3 = pnp$ $V_a \leq 0, V_b \leq 0; V_c \geq 0$	$V_1 = nnpn$ $V_2 = pnpn$ $V_3 = pnp$ $V_a \leq 0, V_b \geq 0; V_c \geq 0$	$V_1 = nnpn$ $V_2 = pnpn$ $V_3 = pppn$ $V_a \geq 0, V_b \geq 0; V_c > 0$	$V_1 = nppp$ $V_2 = pnp$ $V_3 = nnp$ $V_a \leq 0, V_b < 0; V_c \leq 0$
VI	$V_1 = pnpn$ $V_2 = pppp$ $V_3 = pnnn$ $V_a \geq 0, V_b \leq 0; V_c \geq 0$	$V_1 = pppp$ $V_2 = pnnn$ $V_3 = pnp$ $V_a \geq 0, V_b \leq 0; V_c \leq 0$	$V_1 = pnpn$ $V_2 = pnnn$ $V_3 = pppn$ $V_a > 0, V_b \geq 0; V_c \geq 0$	$V_1 = pnp$ $V_2 = pnp$ $V_3 = nnp$ $V_a \leq 0, V_b < 0; V_c < 0$

Tab.(III.3)vecteurs de commande de chaque tétraèdre

III.1.3 Calcul des durées d'application des vecteurs de commande [aiss 09]

Après avoir détecté la position du vecteur de référence, ce qui implique les choix du prisme et du tétraèdre, on aura obtenu les trois vecteurs de commande adéquats. La question à poser maintenant est : comment appliquer ces vecteurs ?

La technique à faire est de diviser la période en 4 intervalles, et à chaque intervalle, appliquer un seul vecteur de commande et le temps restant, appliquer le vecteur zéro.

$$V_{ref} = d_1 v_1 + d_2 v_2 + d_3 v_3 + d_z v_z \quad (III.7)$$

$$d_z = 1 - d_1 - d_2 - d_3 \quad (\text{III.8})$$

Donc il faut faire une projection du vecteur de référence sur les vecteurs de commande adjacents et adéquats

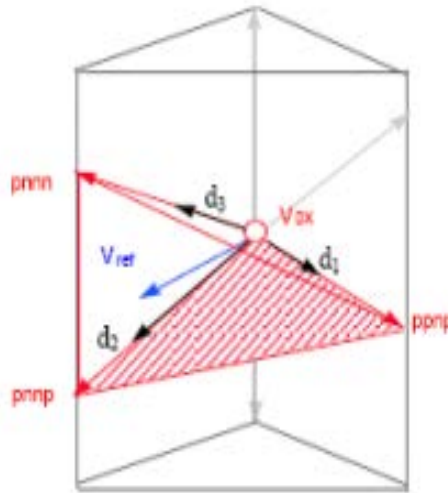


Fig.(III.8) Projections du vecteur référence sur les vecteurs adjacents

Tel que les durées sont déterminées par une projection de la référence sur les vecteurs de commande dans l'espace.

Cette projection est donnée par l'équation (III.9) où A est une matrice de projection spécifique à chaque position du vecteur de référence :

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{v_g} \cdot [A] \cdot \begin{bmatrix} V_{aref} \\ V_{bref} \\ V_{cref} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Par exemple, le cas où le vecteur de référence se trouve dans le premier tétraèdre du premier prisme, les vecteurs adjacents sont :

$$\vec{V}_1(pnnn) \cdot \vec{V}_2(pnp) \cdot \vec{V}_3(ppnp) \text{ et } \vec{V}_0(nnnn.pppp)$$

Tel que :

Où t_1 , t_2 , t_3 sont les temps d'application respectivement des trois vecteurs adjacents V_1 , V_2 , V_3 .

Le temps d'application du vecteur nul V_0 est déterminé par la relation suivante :

$$T_z = 1 - t_1 - t_2 - t_3$$

Chapitre III : La modulation vectorielle tridimensionnelle (SVM 3D)

T_z : représente la période de modulation.

Ainsi :

$$V_{ref}.T_z = t_1 \cdot \begin{bmatrix} V_{1\alpha} \\ V_{1\beta} \\ V_{1\gamma} \end{bmatrix} + t_2 \cdot \begin{bmatrix} V_{2\alpha} \\ V_{2\beta} \\ V_{2\gamma} \end{bmatrix} + t_3 \cdot \begin{bmatrix} V_{3\alpha} \\ V_{3\beta} \\ V_{3\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1\alpha} & V_{2\alpha} & V_{3\alpha} \\ V_{1\beta} & V_{2\beta} & V_{3\beta} \\ V_{1\gamma} & V_{2\gamma} & V_{3\gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1\alpha} & V_{2\alpha} & V_{3\alpha} \\ V_{1\beta} & V_{2\beta} & V_{3\beta} \\ V_{1\gamma} & V_{2\gamma} & V_{3\gamma} \end{bmatrix}^{-1} \cdot V_{ref}.T_z \quad (III.11)$$

En remplaçant V_1, V_2, V_3 par leurs valeurs, on trouve :

$$V_1 = 1000$$

$$V_2 = 1001 \Rightarrow \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{V_g}\right) \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & 0 & \frac{2}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3}V_g & -\frac{2}{3}V_g & \frac{-1}{3} \end{bmatrix}^{-1} \cdot V_{ref}.T_z \quad (III.12)$$

$$V_3 = 1101$$

Donc:

Puisque $V_{ref} = (V_{\alpha.ref}, V_{\beta.ref}, V_{\gamma.ref})$, on aura l'équation des temps de commutation donnée par:

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{V_g}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \cdot V_{ref}.T_z = \begin{bmatrix} V_{\alpha} + V_{\beta} \\ \frac{V_{\alpha}}{2} - \frac{\sqrt{3}V_{\beta}}{2} - V_{\gamma} \\ \sqrt{3}V_{\beta} \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

En appliquant les mêmes procédures sur les autres tétraèdres, nous obtenons les possibilités suivantes (matrice A de l'équation II.9) pour le calcul des temps d'application des vecteurs :

Chapitre III : La modulation vectorielle tridimensionnelle (SVM 3D)

Tétraèdre priseme	1	2	3	4
I	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
II	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} & 0 \\ -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$
III	$\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} & 0 \\ -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} & 0 \\ -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$
IV	$\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -1 & 0 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & -\sqrt{3} & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & -\sqrt{3} & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$
V	$\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -1 & 0 & -1 \\ \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$

VI	$\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3} & 0 \\ \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3} & 0 \\ \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
-----------	--	--	--	--

Tab.(III.4) La matrice A de projection de chaque secteur de travail

III.1.4. Algorithme général de la SVM 3D

On présente par la suite l'algorithme des différentes étapes de la commande vectorielle tridimensionnelle

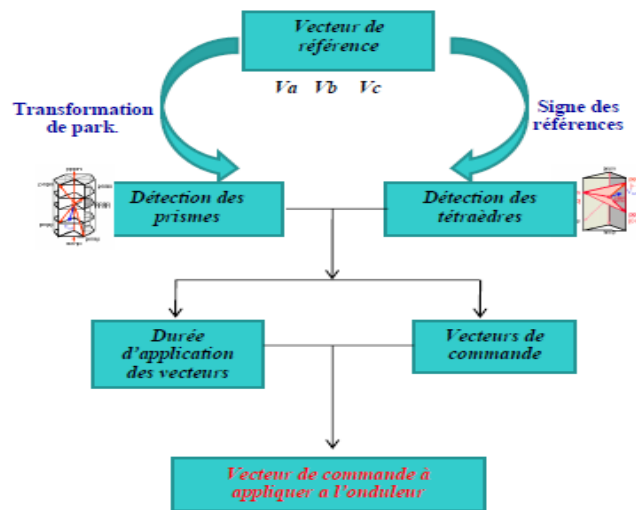


Fig.(III.9) Algorithme général de la SVM 3D

III.1.5 les résultats de simulation

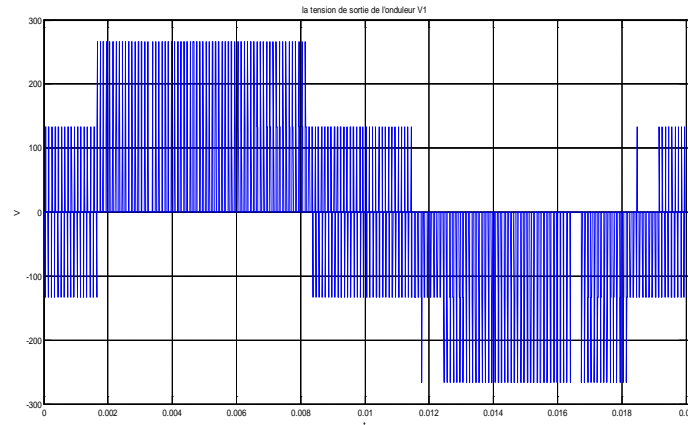


Fig.(III.10) la tension simple de sortie de l'onduleur

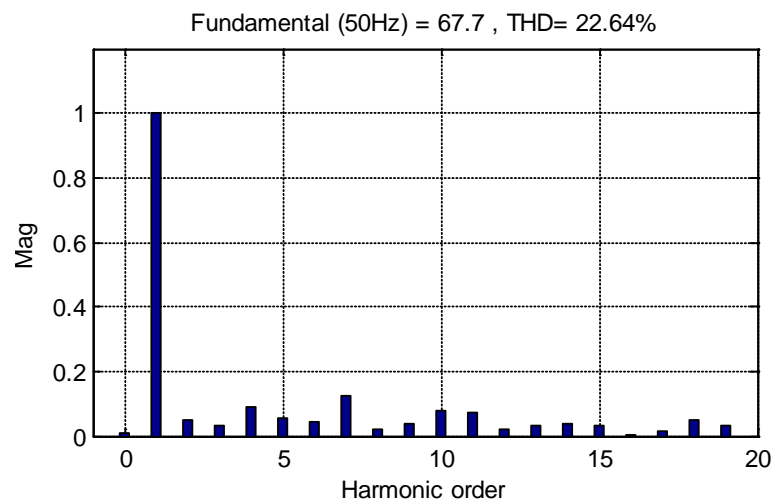


Fig.III.11 Spectre harmonique de la sortie d'onduleur deux niveaux

III.2 Description de l'onduleur trios niveaux à quatre bras

III.2.1 Description de l'onduleur à trois niveaux

L'onduleur à trois niveaux (Fig.III.12) est composé de trois bras, chaque bras ayant quatre interrupteurs bidirectionnels, réalisés par la mise en antiparallèle d'un transistor et une diode. Pour éviter le court-circuit de la source continue à l'entrée de l'onduleur, ou l'ouverture de la charge alternative à la sortie, on doit éviter de fermer ou d'ouvrir simultanément les quatre interrupteurs d'un bras. On suppose que l'onduleur à trois niveaux est de deux onduleurs à deux niveaux en série comme montre la fig. III.13 [Alal 09]

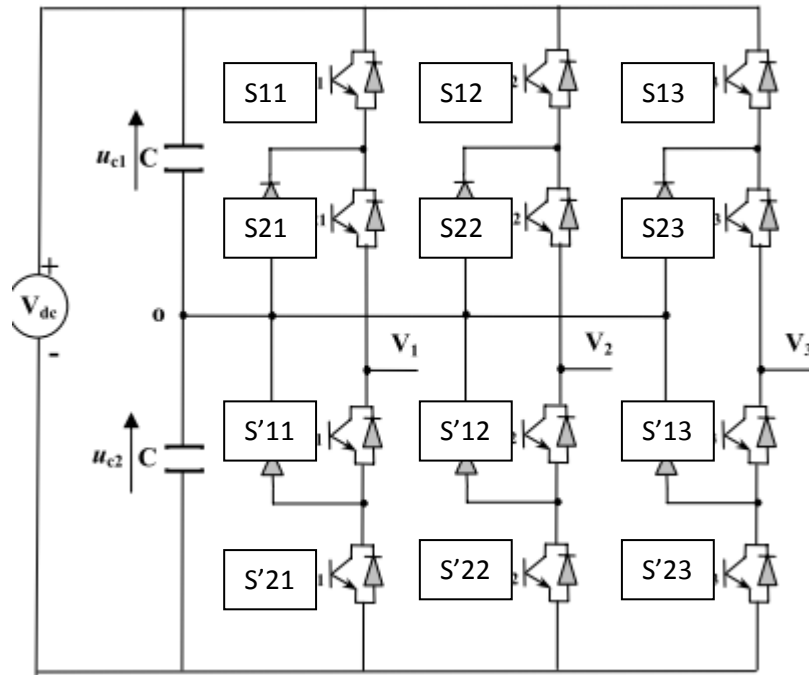


Fig.III.11 Onduleur à trois niveaux

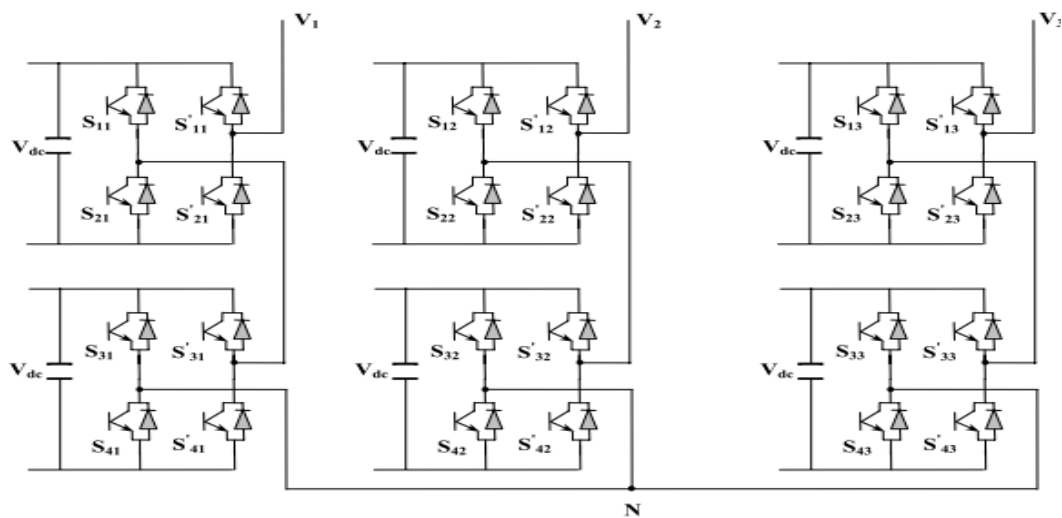


Fig.III.12 Cascade de deux onduleurs de deux niveaux

III.2.2 Fonctions de commutation

Nous avons deux fonctions de commutation F et $F1$,

F est la fonction de commutation des interrupteurs S_{ij} ($i=1,2 ; j=1,2,3$)

$F1$: la fonction de commutation des interrupteurs S'_{ij} ($i=1,2 ; j=1,2,3$)

$$F_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } S_{ij} \text{ fermé} \\ 0, & \text{si } S_{ij} \text{ ouvert} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Chapitre III : La modulation vectorielle tridimensionnelle (SVM 3D)

$$F1_{ij} = \begin{cases} 0, si & S_{ij} \text{ fermé} \\ -1, si & S_{ij} \text{ ouvert} \end{cases} \quad (III.15)$$

II.2.3 Tensions de sortie

La tension de sortie de l'onduleur à trois niveaux est la somme de deux tensions de deux onduleurs de deux niveaux

$$V_1 = V_{dc}/6 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

$$V_2 = V_{dc}/6 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

$$V_s = V_1 + V_2 \quad (III.18)$$

Pour déterminer la valeur de V1 et V2 ,il faut déterminer les états (x1,x2,x3) et (y1,y2,y3) avec la connaissance de vecteur de référence Vr.

Pour la détermination des états, il faut suivre tableau suivant :

X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
Sa (Vr1≥0)	Sb (Vr2≥0)	Sc (Vr3≥0)	S'a (Vr1<0)	S'b (Vr2<0)	S'c (Vr3<0)
0 (Vr1<0)	0 (Vr2<0)	0 (Vr3<0)	0 (Vr1≥0)	0 (Vr2≥0)	0 (Vr3≥0)

Tab. III.5 les états de commutation suivant le vecteur de référence

II.2.4 Commande de l'onduleur [aiss09]

On a suivi l'algorithme suivant :

- Choix du vecteur de référence
- Détection du prisme
- Détection du tétraèdre
- Détermination des vecteurs de commande donc les ordres de commutation des bras de l'onduleur
- Calcul des durées de commutation de chaque vecteur de commande

- Envoi de ces vecteurs de commande pour commander notre convertisseur

III.2.5 Résultats de simulation

Les paramètres de simulation :

Une tension de référence :

$$\begin{pmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{pmatrix} = V_{max} \begin{pmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{pmatrix} \quad \omega = 2\pi f$$

$$V_{max} = \sqrt{2} \cdot 220 \text{ volt}$$

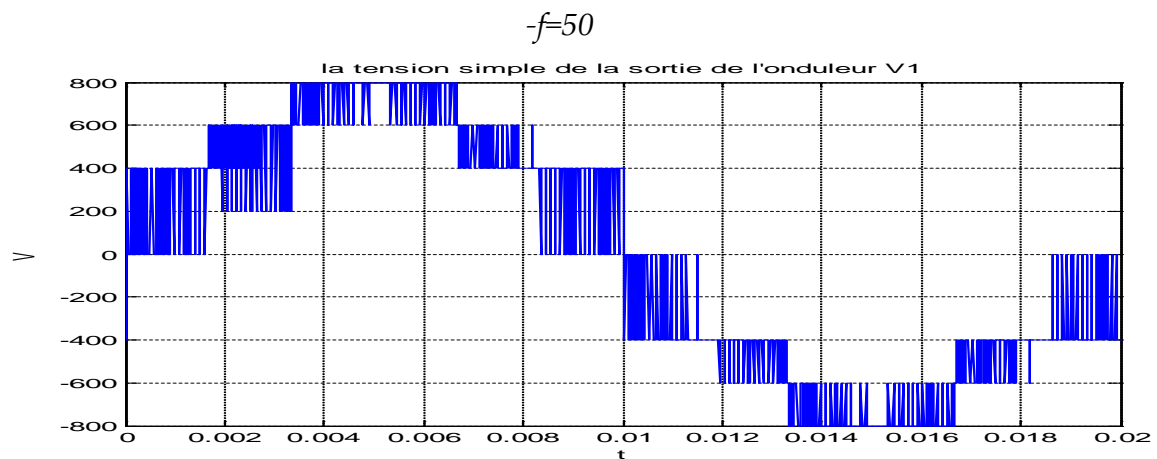


Fig. III.13 La tension de sortie de l'onduleur à trois niveaux

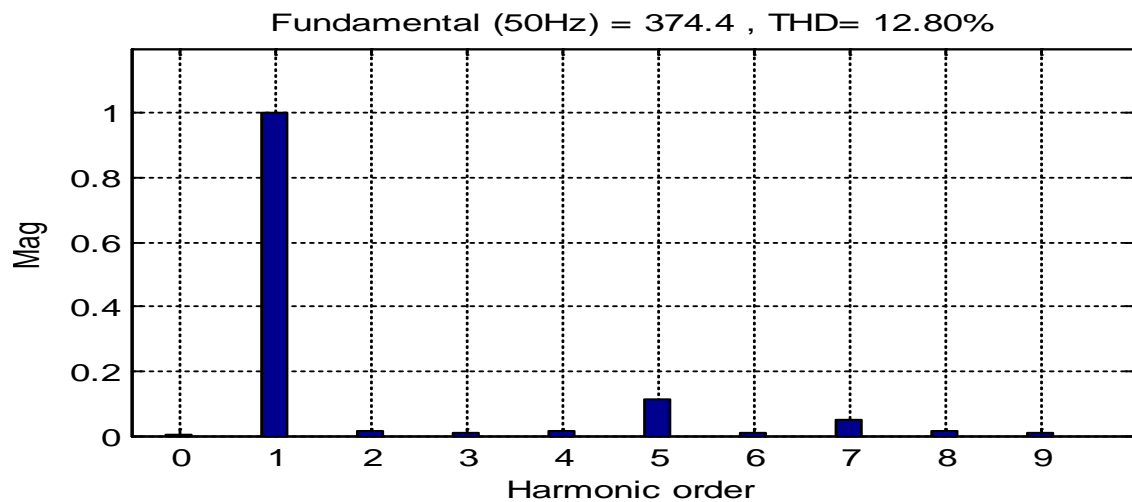


Fig.III.14 Spectre harmonique de la sortie d'onduleur

La tension de la sortie de l'onduleur est presque proche à la tension de référence, et le taux d'harmonique est diminué de 22,64% à 12.80 %.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué la modulation vectorielle tridimensionnelle sur les onduleurs à deux, et trois niveaux. Nous avons remarqué que la qualité du signal de sortie de l'onduleur s'améliore dans le cas des onduleurs multi niveaux par rapport à l'onduleur à deux niveaux. Néanmoins, l'algorithme de la modulation vectorielle se complique de plus en plus pour les onduleurs de niveaux plus élevés.

Chapitre IV :

Application de la SVM 3D sure le filtre actif série

IV.1 Introduction

L'objectif de recherche de ce chapitre est de contribuer à l'amélioration des performances de compensation des perturbations en tension à partir d'une structure de *filtre actif série*. En vue de dépolluer les réseaux électriques de toutes sortes de perturbation en courant et en tension.

Ce chapitre est divisé en deux parties :

La première est consacrée à la modélisation des différentes parties du système : le réseau électrique, la charge, ainsi que l'onduleur à quatre bras. Et sa filtre de sortie,

Dans la deuxième partie, on commencera par la simulation de l'onduleur avec sa commande, puis du filtre actif contrôlé par la commande vectorielle à trois dimensions, utilisé dans le cas du déséquilibre de la charge linéaire ou non linéaire.

A la fin, les résultats de cette simulation seront présentés et discutés.

IV.2 Structure générale du filtre actif série [Alal 02]

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.

Plusieurs structures de *filtre actif série* ont été proposées [ALALI]. La plus utilisée, présentée sur la Fig. IV.1, est composée d'une partie puissance et d'une partie contrôle-commande.

La partie puissance est constituée d'un onduleur de tension triphasé à commande MLI, d'éléments de stockage d'énergie avec un système d'alimentation DC, d'un filtre de sortie du deuxième ordre, et de trois transformateurs monophasés d'injection de tension. Le *filtre actif série* est protégé contre un court-circuit en aval côté charge par un système by-pass.

La partie contrôle-commande comporte l'identification des tensions perturbatrices, la régulation des tensions injectées et la commande des interrupteurs de l'onduleur, souvent en MLI tridimensionnelle, comme le montre la Fig. IV.1.

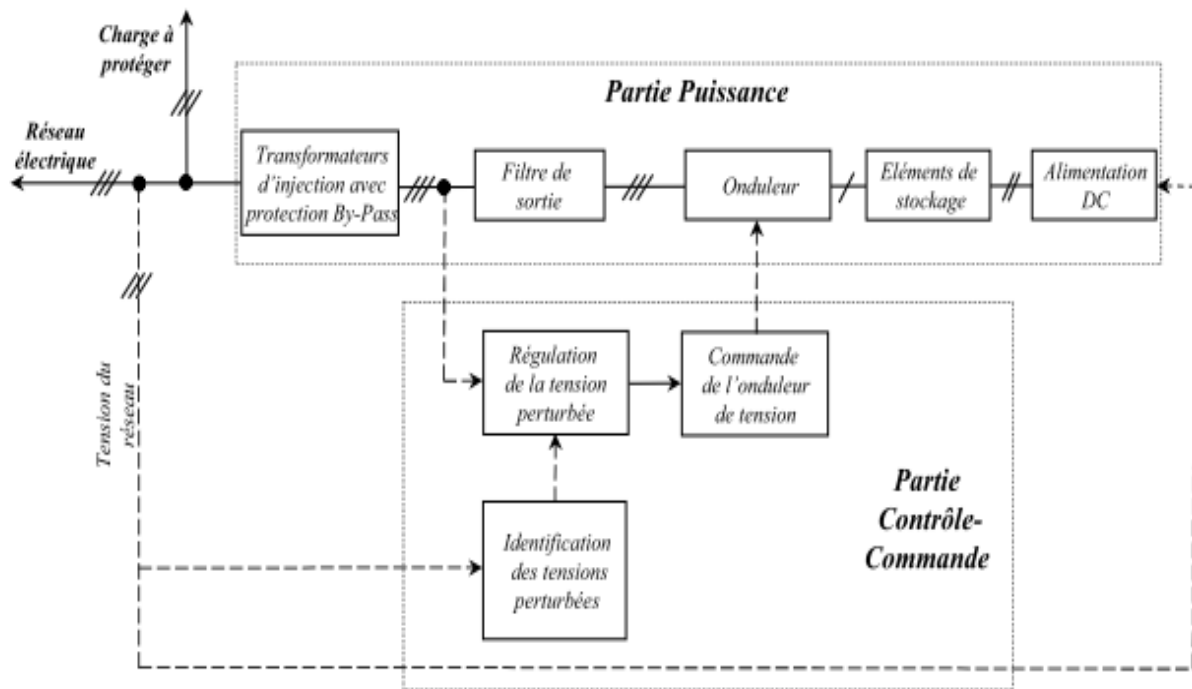


Fig. IV.1 : Structure générale du filtre actif série

Afin de mieux comprendre cette structure, les parties puissance et contrôle-commande vont être détaillées.

IV.2 partie puissance du filtre actif série

Dans ce paragraphe, on va détailler les éléments constitutifs de cette partie de la structure. Nous commencerons par une étude de l'onduleur en passant par le filtre de sortie et en terminant par les transformateurs d'injection de tension et la protection contre les défauts côté charge.

VI.2.1 Onduleur de tension [Aiss09]

Dans cette partie, on ne s'intéresse qu'à l'onduleur et à sa commande. La figure (IV .2) illustre le schéma global du système à simuler.

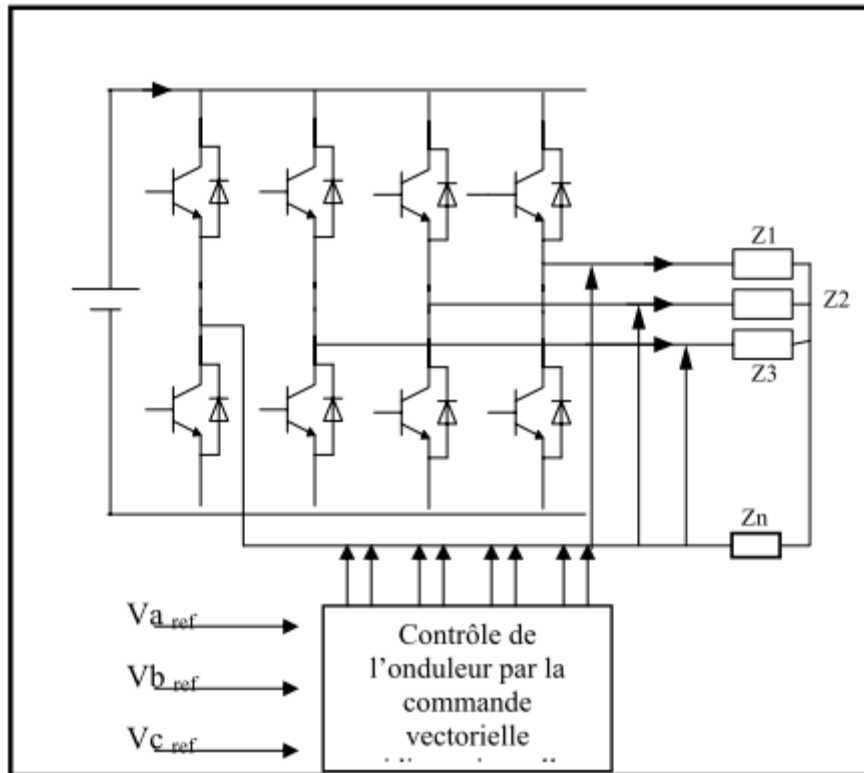


Fig IV. 2 Le schéma global de l'onduleur et de sa commande.

IV.2.2 Filtre de sortie [LALI 09]

Le filtre de sortie d'un filtre actif série est généralement un filtre passif du deuxième ordre (L_{sf} , R_{sf} , C_{sf}), comme le montre la Fig. IV.3. L'ensemble onduleur et filtre de sortie se comportant comme une source de tension, le filtre de sortie sert d'une part à atténuer les composantes dues aux commutations de l'onduleur, d'autre part à connecter le filtre actif au réseau électrique.

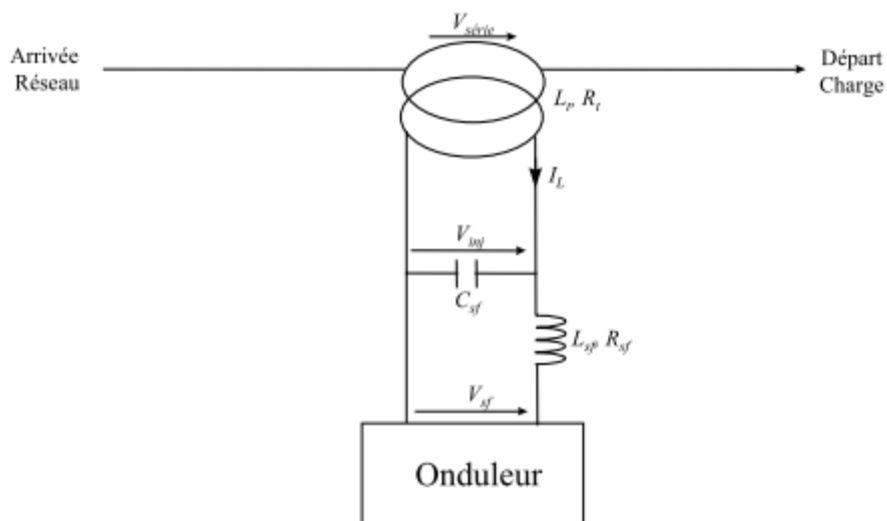


Fig. IV.3 : Schéma de modélisation du filtre de sortie

A partir de la Fig. IV.3, avec V_{sf} la tension de sortie de l'onduleur, V_{inj} la tension aux bornes du condensateur C_{sf} , et I_L le courant de la charge à protéger, les équations qui modélisent le filtre de sortie sont :

$$V_{inj}(S) = \frac{B_1(S)}{A(S)} \cdot V_{sf}(S) + \frac{B_2(S)}{A(S)} \cdot I_L(S) \quad (IV.1)$$

$$\begin{cases} A(S) = a_1 S^2 + a_2 S + a_3 \\ B_1(S) = b_0 \\ B_2(S) = (b_{21} S + b_{22}) \end{cases} \quad (IV.2)$$

Et :

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

$(B_1/A)(s)$ représente la fonction de transfert du filtre de sortie correspondant au système d'origine, et $(B_2/A)(s)$ la fonction de transfert correspondant au modèle de perturbation. Ces perturbations sont causées par le passage du courant de la charge à protéger I_L .

La fréquence de résonance f_{cs} du système d'origine est donnée par la relation (IV.4) :

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

Le filtre de sortie du deuxième ordre est dimensionné pour rejeter les composantes dues à la fréquence de commutation de l'onduleur qui vaut 12 kHz dans ce travail. Pour cela un rejet de -55 dB, permettant de négliger les composantes hautes fréquences passant du côté réseau électrique, est obtenu pour une fréquence de 500 Hz, comme le montre la Fig. IV.4.

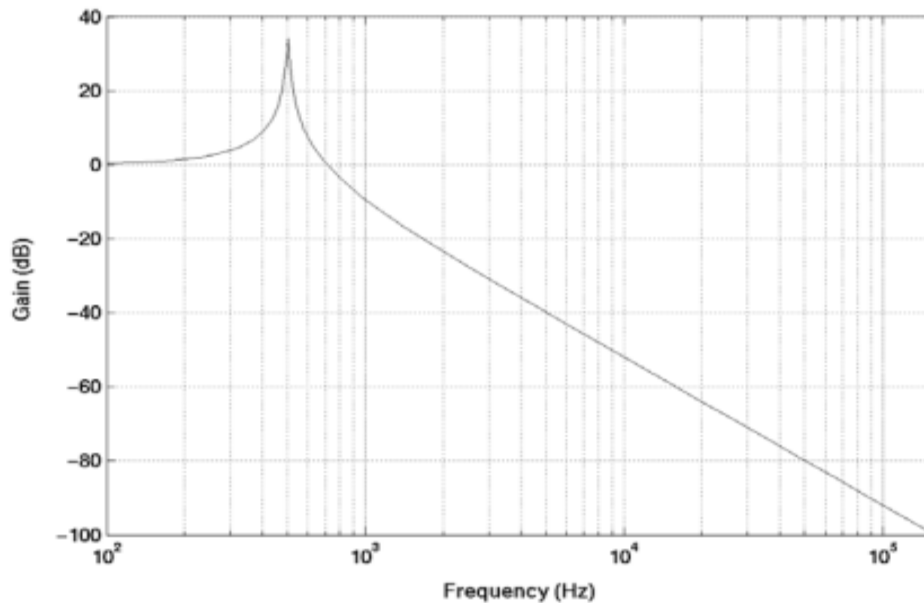


Fig. IV.4 : Diagramme représentant le gain du filtre de sortie

La résistance d'amortissement R_{sf} est choisie pour que le facteur de qualité Q , donné par l'équation (IV.5), soit $Q=50$.

IV.2.3 Transformateurs d'injection et protection du F.A.S [LALI 09]

Les transformateurs d'injection de tension (L_t, R_t) permettent d'injecter en série avec le réseau électrique et avec le taux de transformation souhaité la tension produite par l'onduleur, comme le montre la Fig. IV.3. Par conséquent, ces transformateurs, considérés comme des transformateurs de courant, permettent de réduire, par leurs taux de transformation, le courant de la charge traversant l'onduleur de tension. A cela s'ajoute que ces transformateurs, grâce à leurs caractéristiques magnétiques de saturation, contribuent à la protection du filtre actif série contre les défauts côté charge.

Les désavantages de l'emploi de ces transformateurs sont leurs coûts élevés et la chute de tension occasionnée par leurs inductances de fuite (L_t, R_t).

Dans ce travail, trois transformateurs d'injection de tension seront employés et dimensionnés pour supporter le courant de la charge à protéger et la tension maximale injectée au réseau électrique. Le taux de transformation sera unitaire.

Le filtre série est protégé contre un court-circuit en aval côté charge par un système by-pass, constitué par une impédance variante, par deux thyristors en antiparallèle en série avec une petite résistance, et par des transformateurs à circuit magnétique saturable.

IV.3 Partie contrôle-commande du filtre actif série

Dans ce paragraphe nous présenterons les trois principaux éléments de la partie contrôle- commande du filtre actif série : la commande de l'onduleur de tension, l'identification des tensions perturbatrices et la régulation des tensions injectées au réseau électrique.

IV.3.1 Commande de l'onduleur [Aiss09]

On a suivi l'algorithme suivant :

- Choix du vecteur de référence
- Détection du prisme
- Détection du tétraèdre
- Détermination des vecteurs de commande donc les ordres de commutation des bras de l'onduleur
- Calcul des durées de commutation de chaque vecteur de commande
- Envoi de ces vecteurs de commande pour commander notre convertisseur

La méthode utilisée pour contrôler le filtre actif série est une commande en tension, cependant, l'algorithme choisi donne des références tensions, pour nous avons utilisé des régulateurs.

IV.3.2 Identification des tensions perturbatrices

La méthode d'identification sert à calculer les tensions perturbatrices qui sont injectées par l'onduleur, en opposition de phase, pour dépolluer la tension aux bornes de la charge à protéger. Ces tensions perturbatrices représentent les tensions déséquilibrées et harmoniques, et les creux de tension.

Plusieurs méthodes d'identification ont déjà été proposées dans la littérature. La plupart des méthodes sont basées sur le calcul des puissances réelles et imaginaires instantanées, nécessitant une bonne connaissance du réseau électrique en présence d'harmoniques de tension.

IV.3 simulation du filtre actif série

IV.3.1 Modélisation du système

Le système est composé d'un réseau équilibré alimentant une charge linéaire ou non linéaire déséquilibrée et d'un filtre actif série. Le schéma général de l'ensemble du système simulé est donné par la figure suivante :

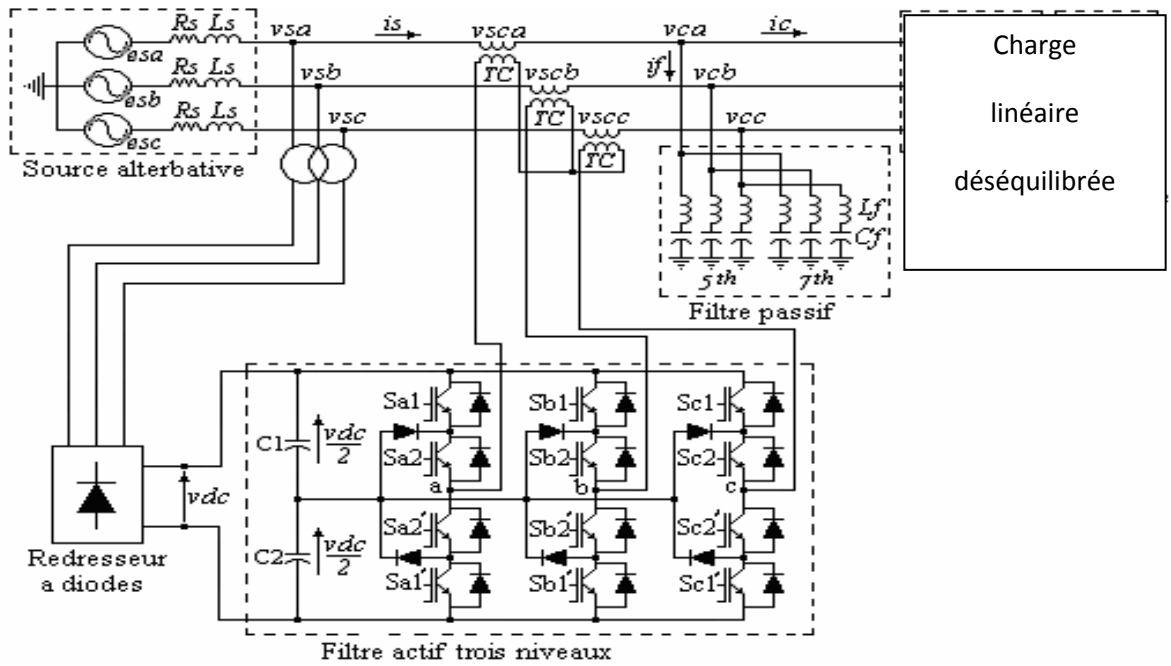


Fig. IV.5. Circuit de puissance du filtre actif série trois niveaux proposé

IV.3.2 Modélisation du réseau

Chaque phase du réseau est représentée par une f.e.m sinusoïdale en série avec une impédance (L_{cc} , R_{cc}), comme il est illustré sur la figure (IV.6)

$$\begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} = \sqrt{2}E \begin{pmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{pmatrix} \tag{IV.5}$$

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega \tag{IV.6}$$

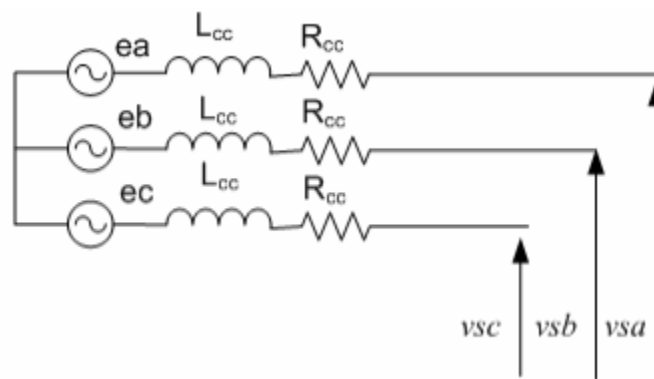


Fig.IV.6 Modèle électrique du réseau

IV.3.3 Filtrage d'une charge linéaire déséquilibrée

IV.3.3.1 Modélisation de la charge déséquilibrée

Dans notre application, le déséquilibre des courants est provoqué par une charge triphasée déséquilibrée connectée au réseau.

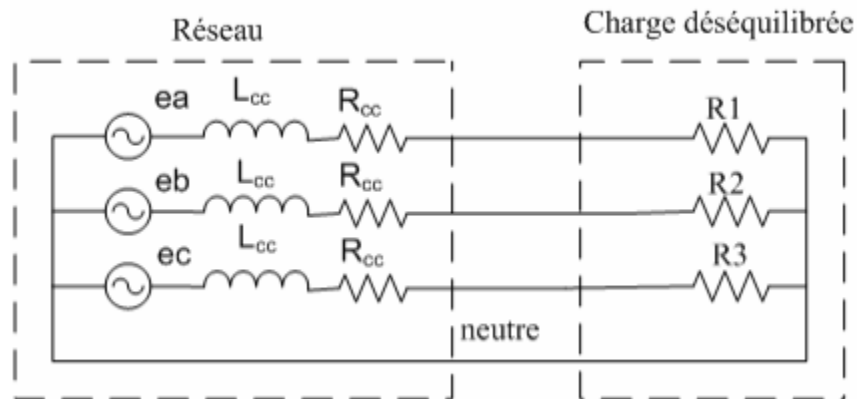


Fig.IV.7 Déséquilibre de la charge

➤ Les paramètres de simulation

Les tensions du réseau : $V_{a\text{eff}} = V_{b\text{eff}} = V_{c\text{eff}} = 220\text{V}$

La fréquence du réseau : $f = 50\text{Hz}$

L'impédance du réseau :

$R_{cc} = 1\text{m}\Omega$.

$L_{cc} = 0,2\text{mH}$

L'inductance du couplage

$L_f = 10\text{mH}$

La charge linéaire :

$R_1 = 100\Omega$. $L_1 = 0,1\text{mH}$

$R_2 = 50\Omega$. $L_2 = 0,1\text{mH}$

$R_3 = 80\Omega$. $L_3 = 0,1\text{mH}$

IV.3.3.2 Résultats de la simulation

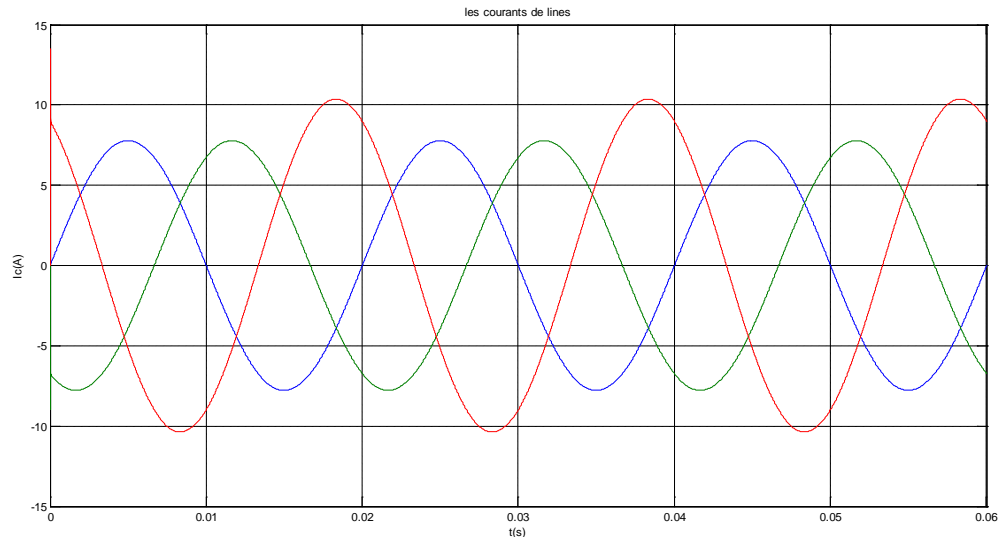


Fig.IV.8 Les courants de charge

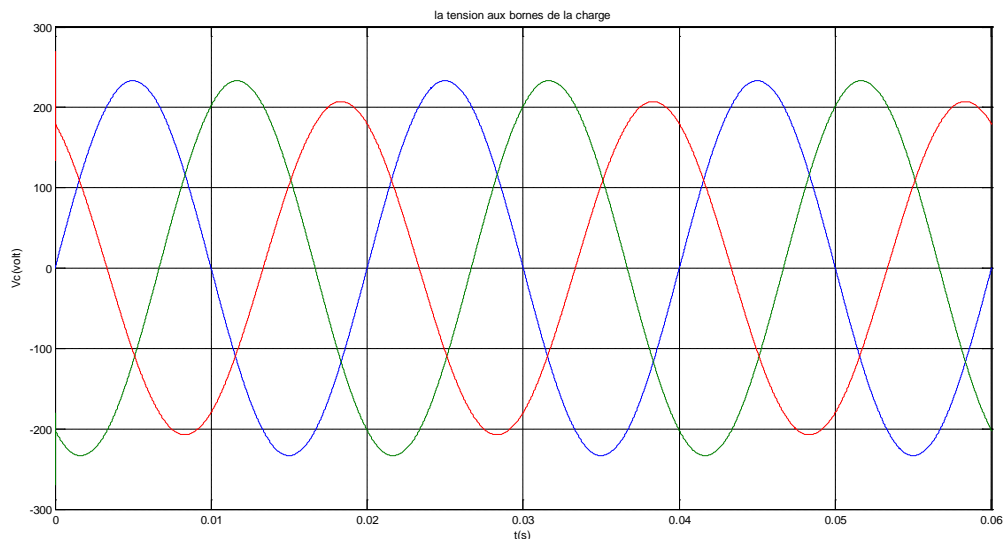


Fig.IV.9 Les tensions aux bornes de la charge

La figure IV.8 montre les courants de la source qui sont aussi les courants de la charge, et cela avant la compensation. On remarque dans la fig IV.9 que les tensions aux bornes de la charge sont déséquilibrées à la cause des courants de ligne.

IV.3.3.2.1 Compensation des tensions harmoniques

Dans ce qui suit, on entamera la compensation des tensions responsables du déséquilibre, afin que le réseau de distribution ne fournisse que des tensions équilibrées. Pour cela, la puissance de référence sera :

- Pour la puissance active : la référence sera que la puissance active harmonique
- Pour la puissance réactive : la référence sera que la puissance réactive harmonique

Donc le réseau électrique fournira le courant fondamental actif et réactif

Dans ce qui suit, on va déterminer les courants qui sont responsables de ce déséquilibre par la méthode la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

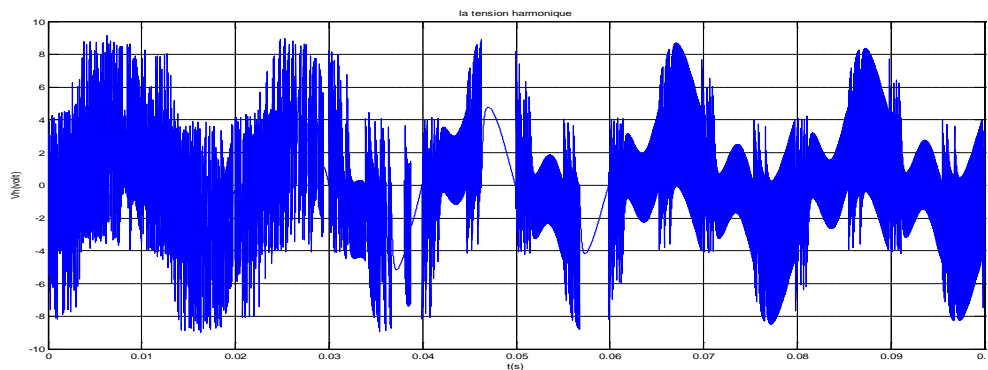


Fig.IV.10 la tension harmonique

- Cas d'onduleur deux niveaux

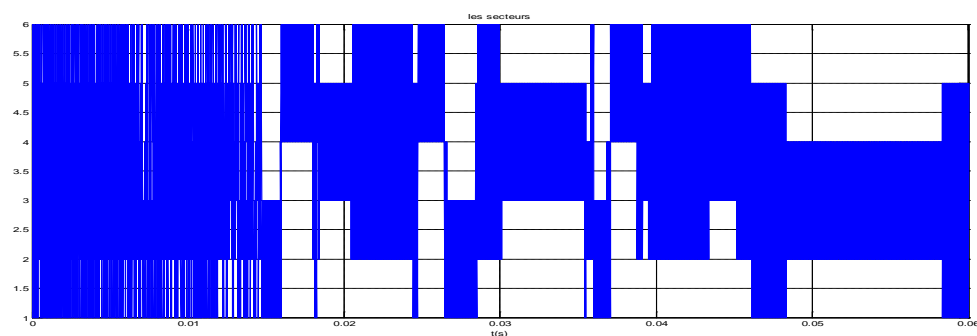


Fig.IV.11 Les prismes

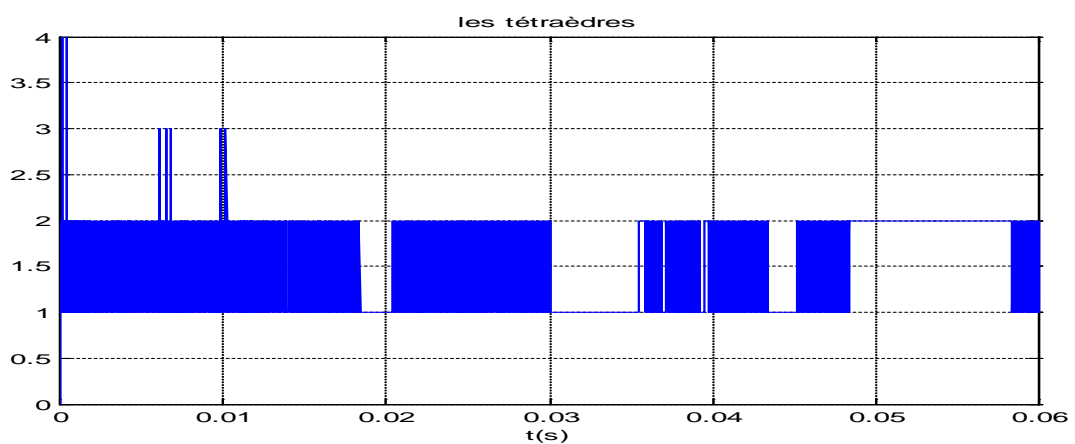


Fig.IV.12 Les tétraèdres

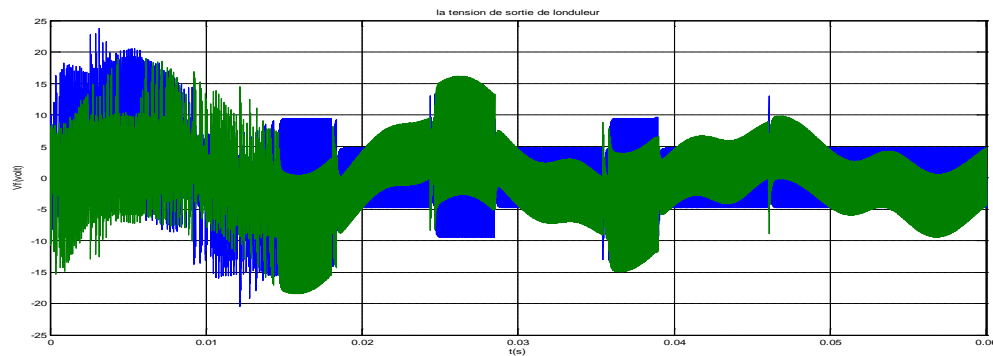


Fig.IV.13 La tension de sortie de l'onduleur

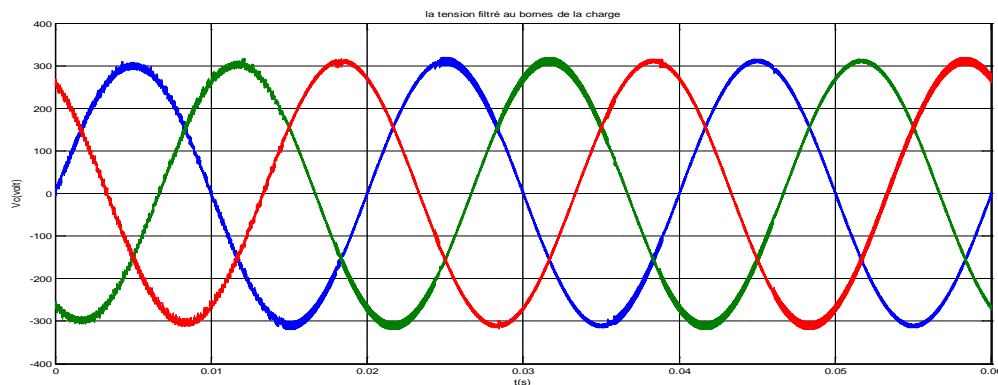


Fig.IV.14 La tension filtrée aux bornes de la charge

La Figure IV.14 montre qu'après l'application de la commande, les tensions de la charge qui étaient déséquilibrées deviennent équilibrées. Le filtre actif joue donc parfaitement son rôle de compensateur de déséquilibre.

- **Cas d'onduleur à trois niveaux**

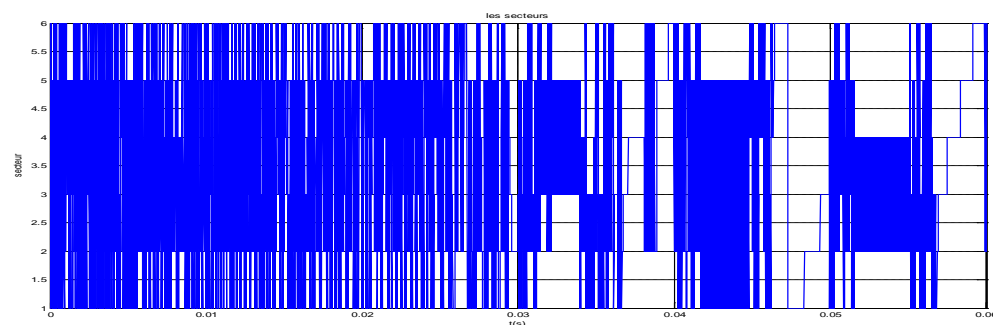


Fig.IV.15 les prismes

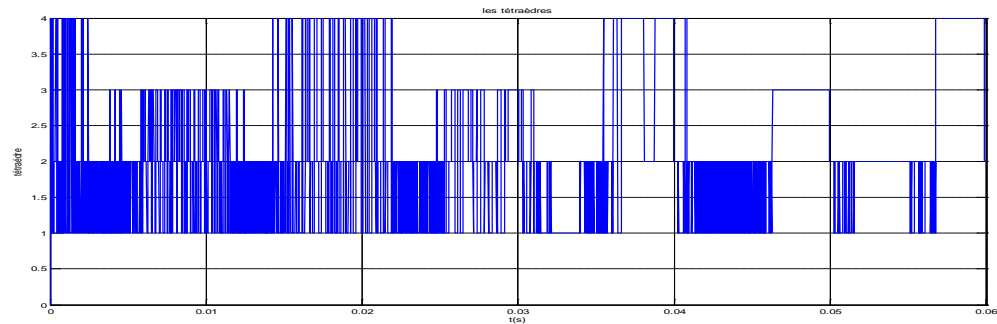


Fig.IV.16 les tétraèdres

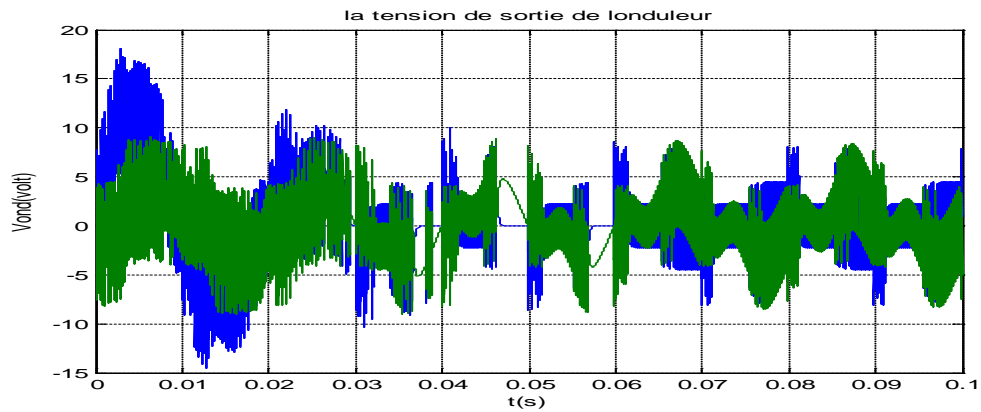


Fig.IV.17 la tension de la sortie d'onduleur

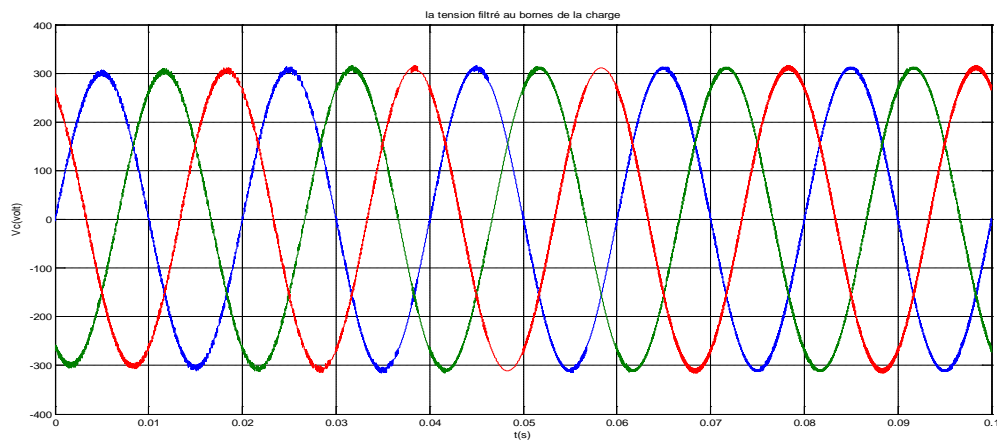


Fig.IV.18 la tension filtrée aux bornes de la charge

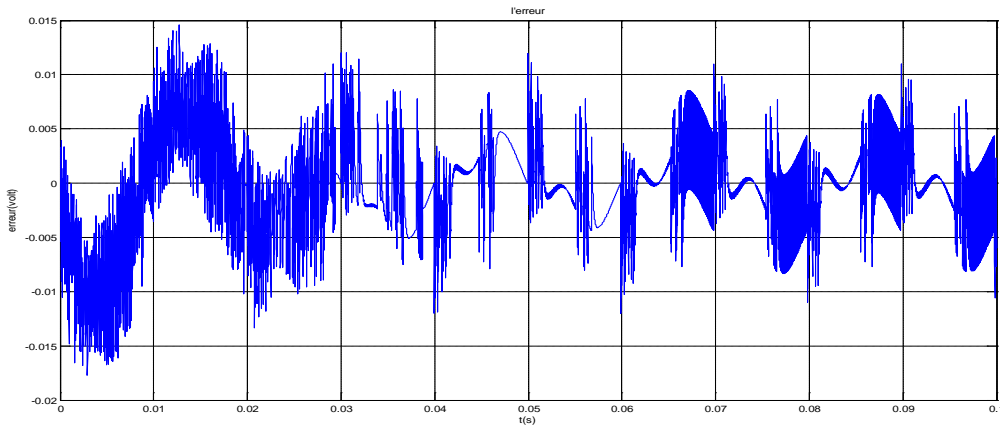


Fig.IV.19 l'erreur entre la tension harmonique et la sortie d'onduleur

La Figure IV.18 montre qu'après l'application de la commande, les tensions de la charge qui étaient déséquilibrées deviennent équilibrées. Le filtre actif joue donc parfaitement son rôle de compensateur de déséquilibre.

IV.3.4 Filtrage d'une charge non linéaire déséquilibrée

Le schéma du filtrage de la charge non linéaire est donné par la figure suivante (Fig.IV.14).

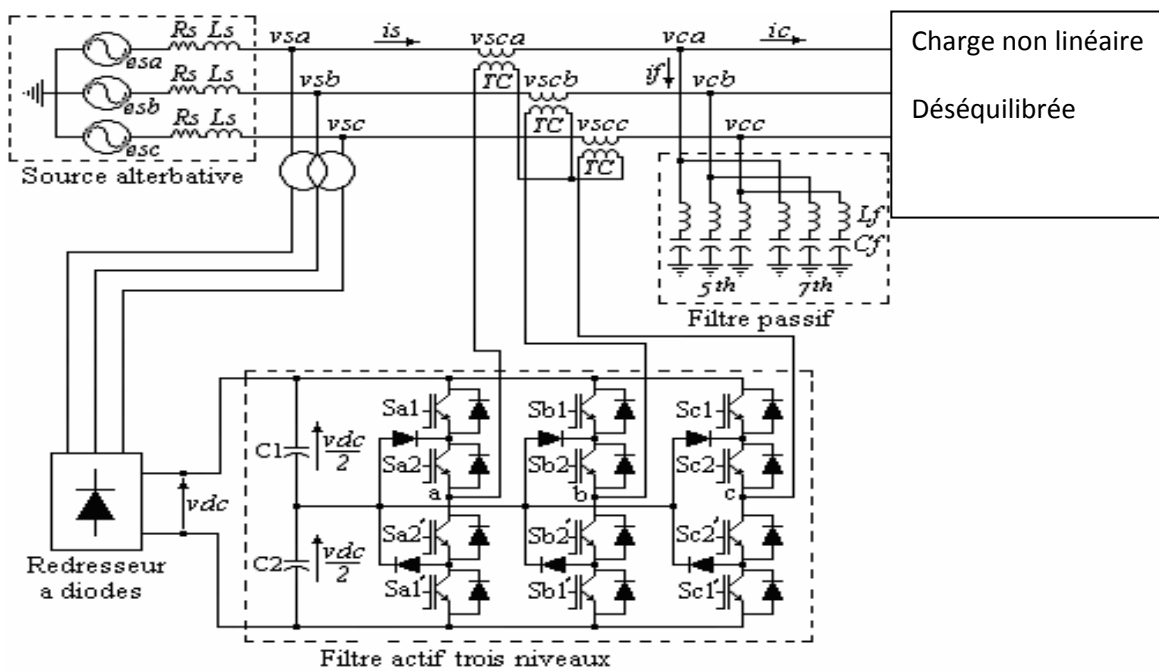


Fig.IV.20 Le schéma global du système

IV.3.4.1 La Charge

La charge non linéaire utilisée dans cette simulation est représentée par trois ponts redresseurs monophasés à diodes qui alimentent une charge déséquilibrée (R, L) comme le montre la figure (Fig.IV.15)

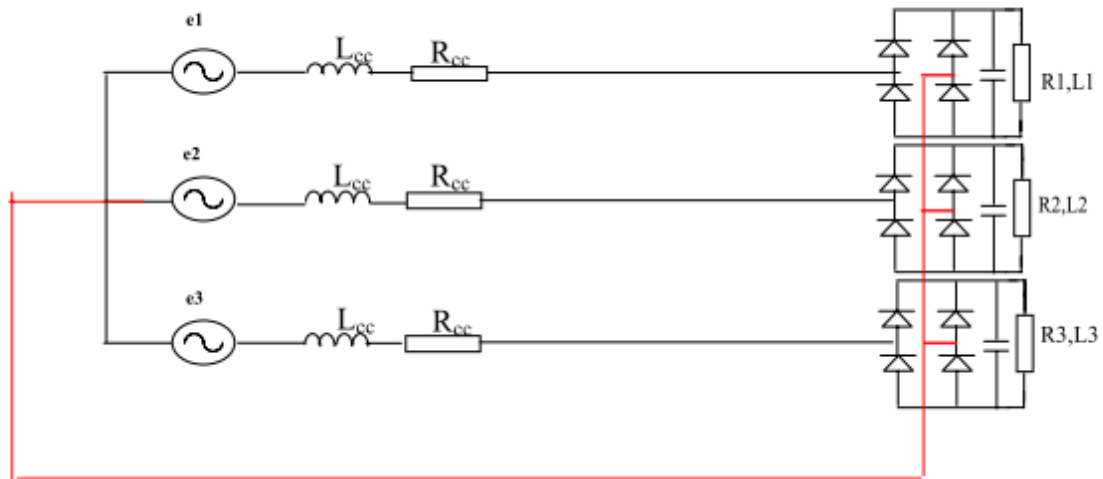


Fig.IV.21 La charge non linéaire déséquilibrée

Avec les paramètres suivants :

L'impédance du réseau :

$$R_{cc}=1\text{m}\Omega.$$

$$L_{cc}=0,2\text{mH}$$

Paramètre de la charge

$$R_1 = R_2 = 250 \Omega$$

$$R_3 = 100 \Omega$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = 100 \text{ mH}$$

$$C = 1000 \mu\text{F}$$

IV.3.4.3 Résultats de simulation

La figure IV.16 et 17 montrent les courants de charge de la charge et cela avant la compensation donc ces courants sont aussi les courants de source, donc la source d'énergie fournit un courant et une tension non linéaire et déséquilibré ce qui est nocif pour les équipements électriques sensibles

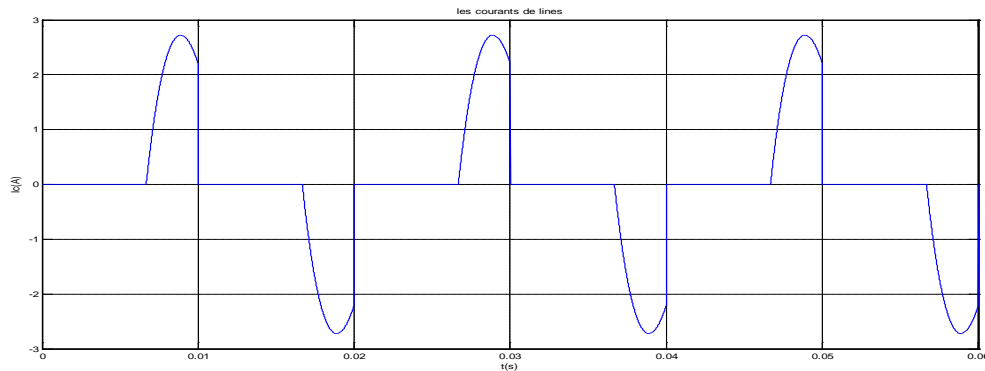


Fig.IV.22 Le courant de la charge

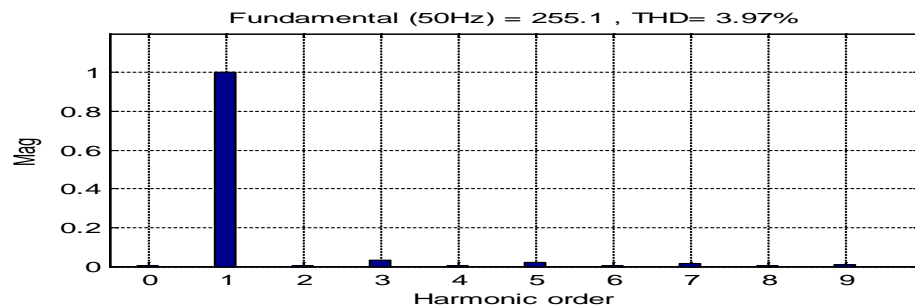
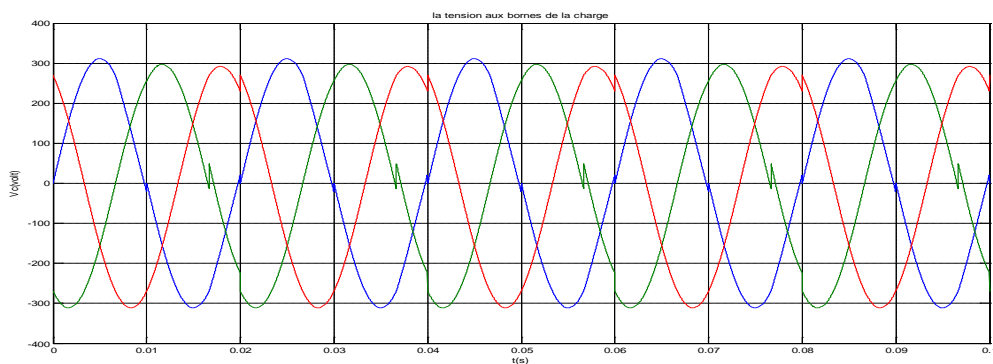


Fig.IV.23 les tensions aux bornes de la charge

IV.3.4.4 Compensation des tensions harmoniques

L'identification des tensions harmoniques de la charge nous donne les trois tensions harmoniques V_{ha} , V_{hb} et V_{hc} comme le montre la figure IV.18 et cela par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées)

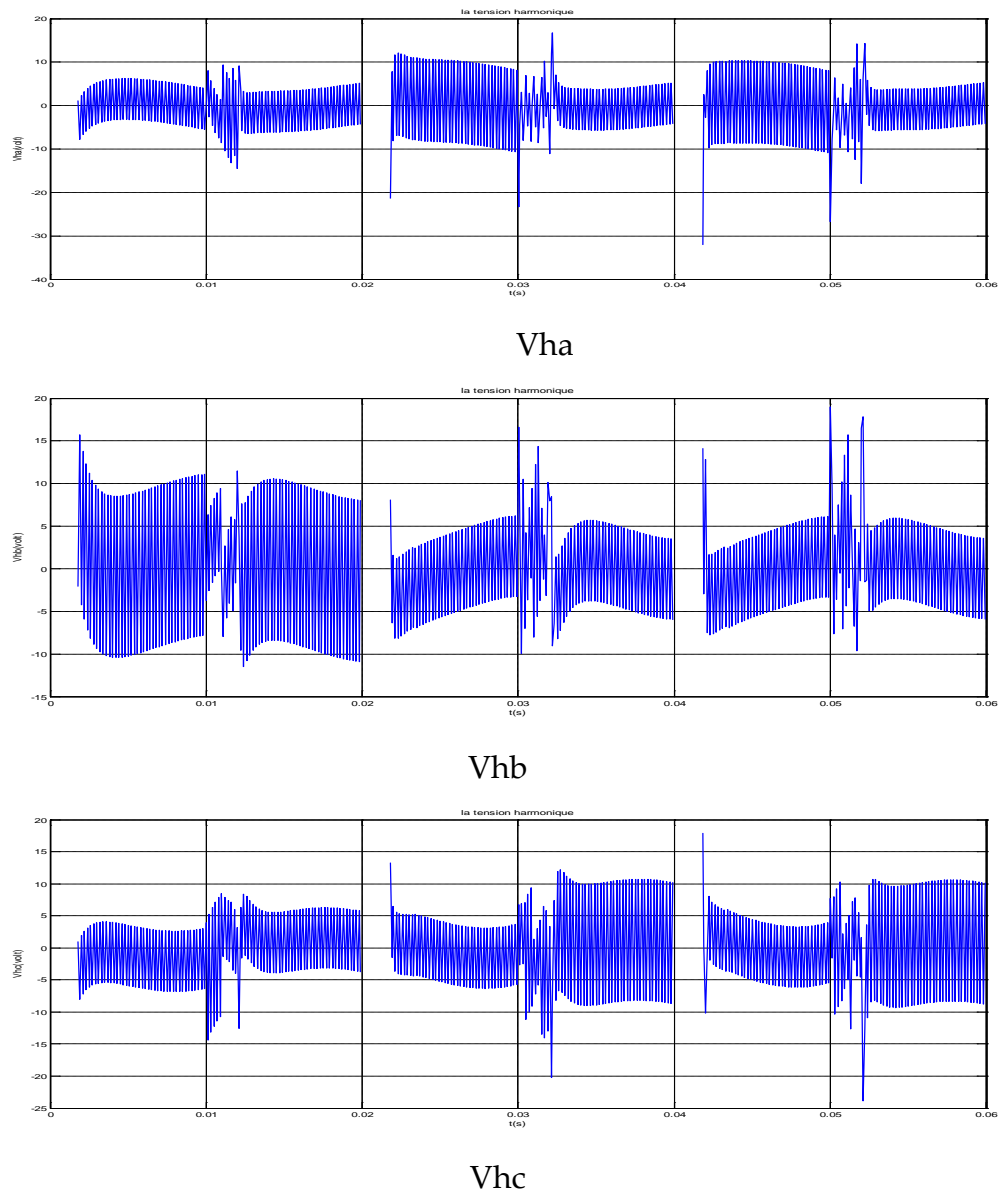


Fig.IV.24 tensions harmoniques de la charge

Les courants de la Figure IV.24 (tensions harmoniques) vont être pris comme vecteur de référence pour la commande vectorielle tridimensionnelle de filtre actif.

- **Cas d'onduleur à deux niveaux**

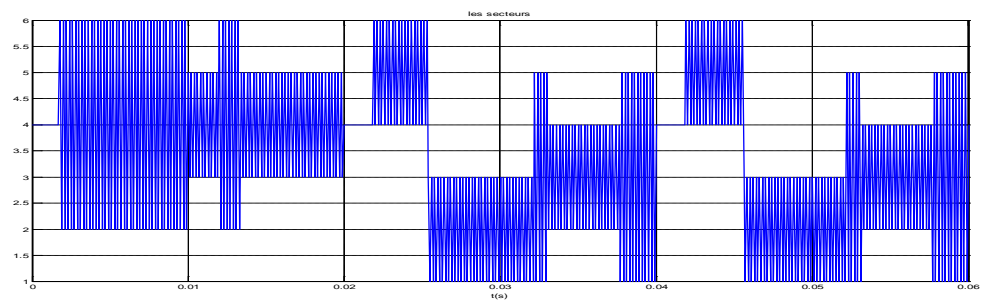


Fig.IV.25 Les prismes

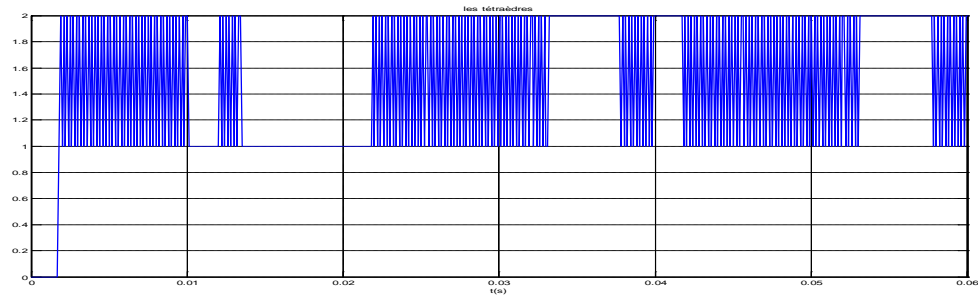


Fig.IV.26 Les tétraèdres

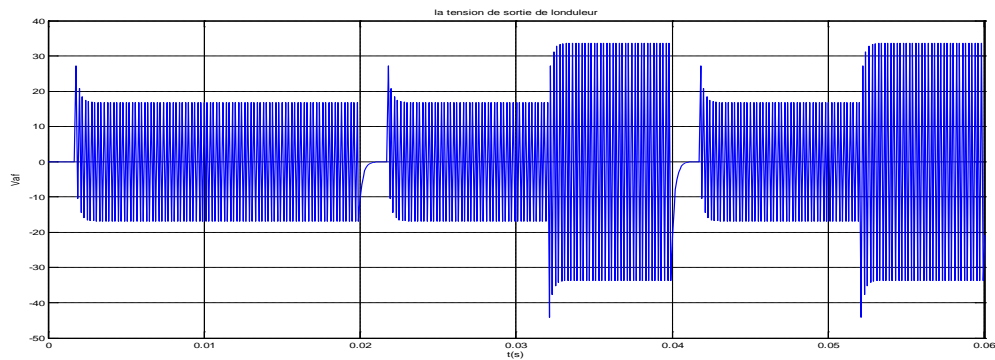
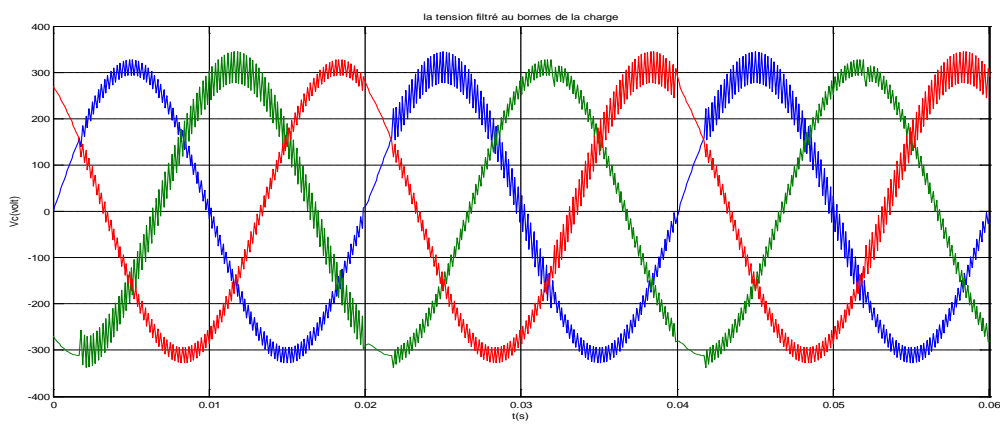


Fig.IV.27 la tension de sortie de l'onduleur



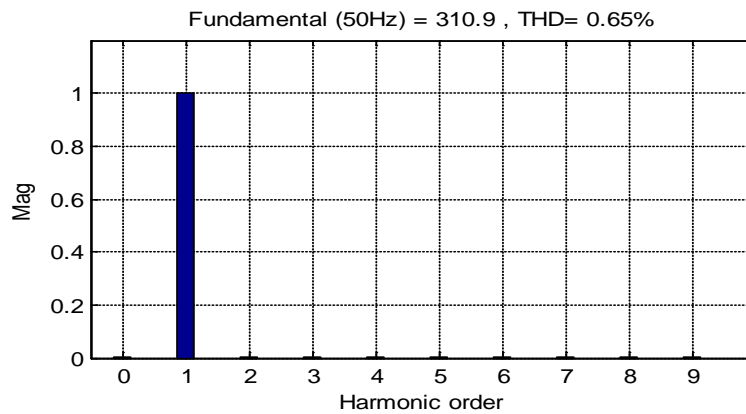


Fig.IV.28 La tension filtrée aux bornes de la charge

La fig.IV.28 montre que la tension de charge, elle est devenue équilibrée avec diminutions de THD(%) de 3.97 à 0.65%

- **Cas d'onduleur à trois niveaux**

On applique la commande SVM 3 D à l'instant 0.06s puis on présente les résultats. La figure IV.29 représente les tensions de l'onduleur, ces tensions vont compenser le déséquilibre et la non linéarité de la charge

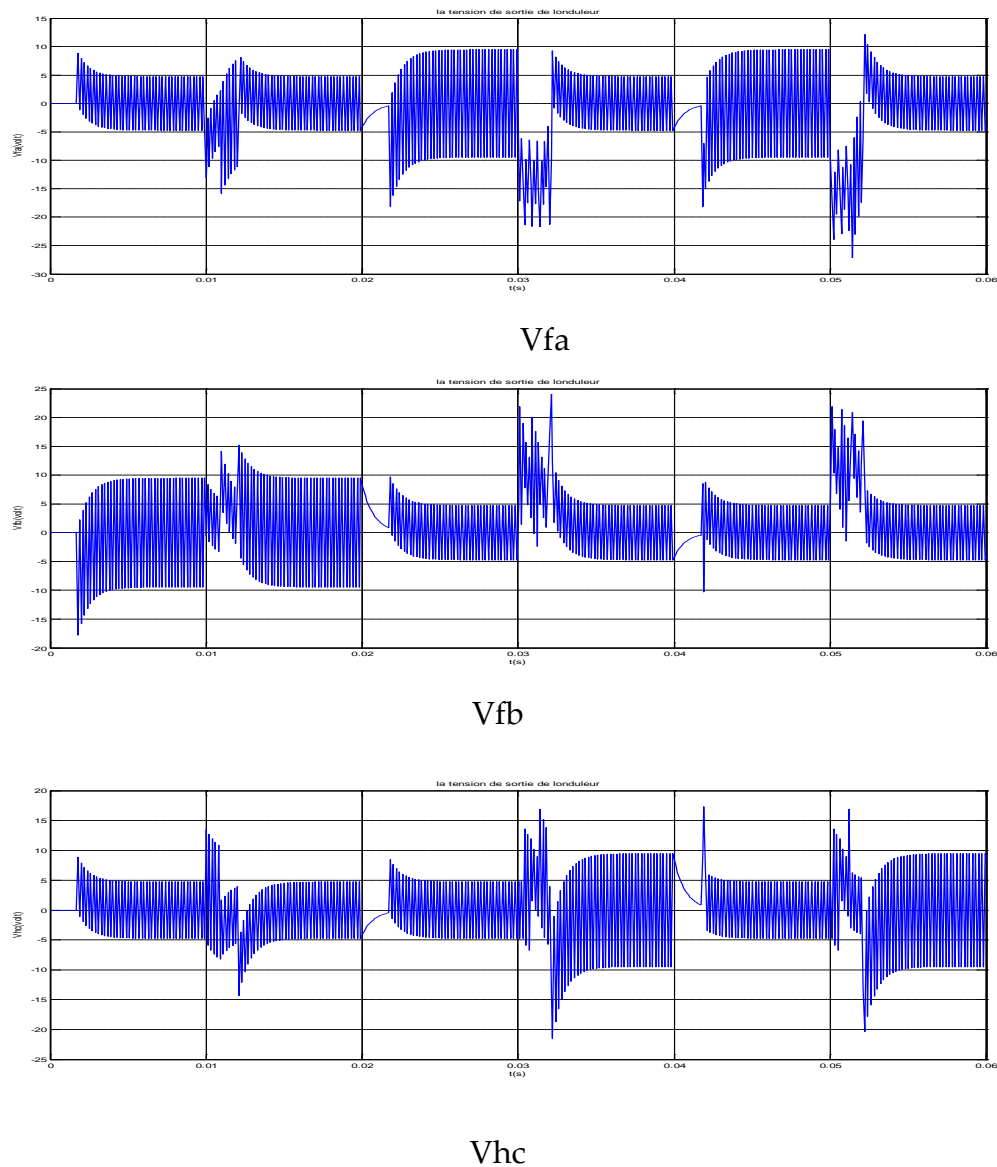


Fig.IV.29 Les tension de la sortie d'onduleur

Ces tensions de l'onduleur représentent en fait les tensions harmoniques de la charge et ils vont être injectés au réseau électrique pour rendre la source d'énergie la plus sinusoïdale possible (aux bornes de la charge).

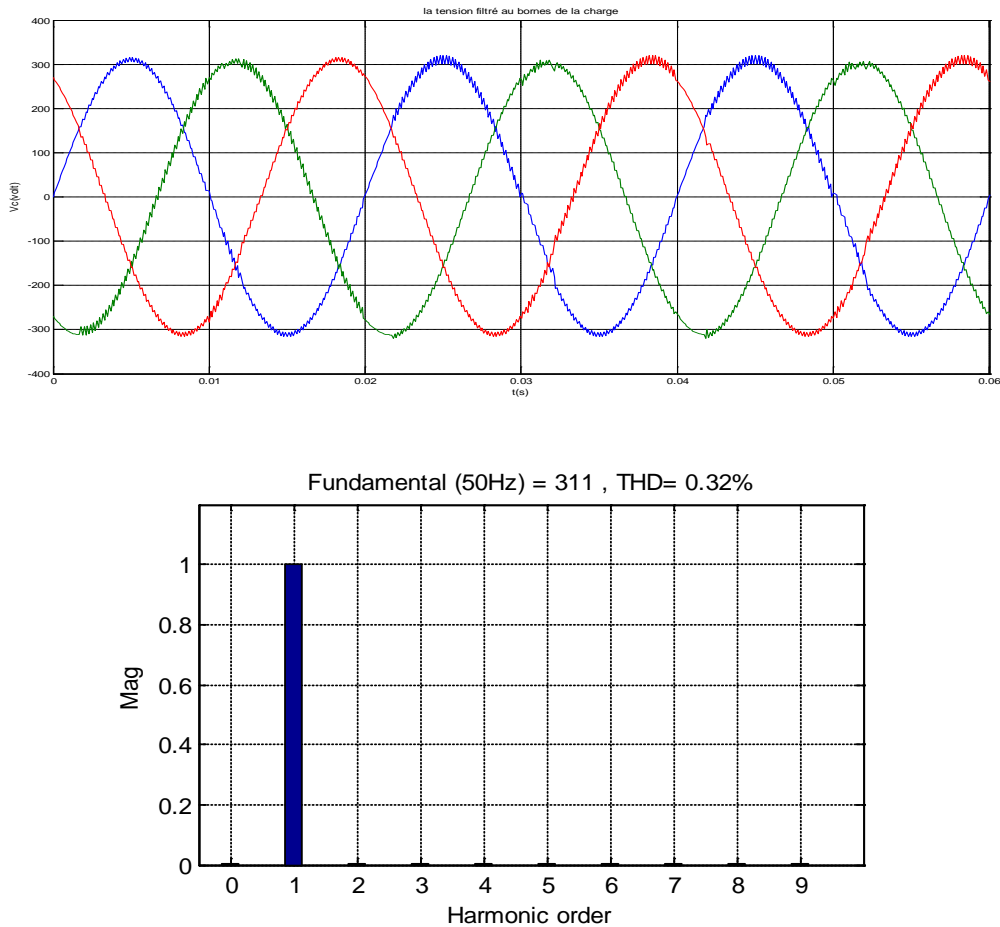


Fig.IV.30 La tension filtrée aux bornes de la charge

On remarque que la tension aux bornes de la charge devient équilibrée avec une diminution de THD(%) de 3.97% à 0.32%.

La Figure IV.30 montre qu'après l'application de la commande, les tensions aux bornes de la charge qui étaient déséquilibrées deviennent équilibrées. Le filtre actif joue donc parfaitement son rôle de compensateur de déséquilibre.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté la modélisation, en vue de la simulation, de l'ensemble du système constitué d'un réseau de distribution, d'une charge déséquilibrée linéaire ou non linéaire et un filtre actif série. Nous avons présenté les résultats de la simulation d'un onduleur deux niveaux et trois niveaux commandés par la SVM 3D avec une référence sinusoïdale et non sinusoïdale afin de valider cette commande.

Par la suite, un filtre actif a été présenté et modélisé, les résultats de la simulation de ce filtre contrôlé par la commande vectorielle tridimensionnelle dans le cas d'une charge linéaire ou non linéaire ont été présentés et discutés.

Enfin on peut conclure que la commande vectorielle tridimensionnelle est une méthode très efficace et peut donner des résultats très encourageants au régime déséquilibré.

Conclusion générale

Conclusion générale

De nos jours, la qualité de l'énergie est un domaine de la plus haute importance. À l'heure où l'économie des pays industrialisés repose sur leurs capacités à produire ou à acheter l'énergie, l'utilisation adéquate et sans perte inutile est capitale. Ce projet, bien que ne touchant qu'un de ces domaines de la qualité de l'énergie pourtant si vaste, a permis de faire un bref survol de la problématique liée à la perturbation et la pollution harmonique sur le réseau électrique ainsi que des différents moyens de mitigation utilisés.

Une bonne compréhension de la problématique des harmoniques, de leurs influences sur le réseau électrique, ainsi que des moyens de mitigation existant pour les minimiser est maintenant devenue essentielle pour tout ingénieur travaillant dans le domaine de l'électrotechnique.

Dans ce projet, nous avons étudié une stratégie de dépollution des réseaux électriques, appelée compensation actif série qui a vu son développement avec l'évolution des organes de l'électronique de puissance. Ces derniers nous permettent de concevoir des dispositifs appelés convertisseurs de puissance (onduleurs), permettant l'injection des tensions harmoniques dans le réseau. Par conséquent, la source fournira des tensions sinusoïdales.

Afin d'aborder cette étude, nous avons commencé par la structure de l'onduleur de tension à deux niveaux et à trois niveaux de structure NPC, et leurs modèles de connaissance sans a priori sur la commande, en utilisant la méthode de DESIGN associée au réseau de pétri. Ensuite, nous avons développé la modulation vectorielle à trois dimensions

Enfin, le dernier chapitre a montré notre conception de commande appliqué au compensateur actif série. Premièrement on a commandé on boucle fermé le compensateur actif sérié on résulte une amélioration de la forme de tension de charge et une diminution du taux de distorsion harmonique.

On conclue que un compensateur actif sérié avec la stratégie de commande tri dimensionnelle permet de diminuer le taux de distorsion harmonique et le déséquilibre de tension au niveau de la source d'alimentation. Mais, la formes des courant de charges restent toujours déséquilibrés et plaines d'harmoniques.

Pour ce la nous avons proposé un montage hybride (combinaison série-parallèle) pour améliorer la forme de courants de ligne.

Annexes

Dimensionnement du correcteur PI :

La fonction de transfert du correcteur PI est $C(p) = \frac{1 + pT_1}{pT_2}$

Où T_1 et T_2 sont deux constantes de temps à déterminer.

La fonction de transfert en boucle ouverte en négligeant la dynamique propre de l'onduleur à cinq niveaux est :

$$FTBO = C(p) \cdot \frac{1}{R_f + L_f \cdot p}$$

donc

$$FTBO = \frac{1 + pT_1}{pT_2} \cdot \frac{1/R_f}{1 + \frac{L_f}{R_f} \cdot p}$$

On choisit $T_1 = L_f / R_f$ pour compenser la dynamique propre du système.

La fonction de transfert en boucle fermée sera alors :

$$FTBF = \frac{1}{1 + R_f \cdot T_2 \cdot p} = \frac{1}{1 + \tau \cdot p} = \frac{ih}{ihref} \quad \text{avec } \tau = R_f \cdot T_2$$

On prend $\tau = T_1 / 10 \Rightarrow T_2 = \frac{T_1}{10 \cdot R_f}$

Ce choix permet d'améliorer le temps de réponse du système en boucle fermée.

Calcul des paramètres de régulateur PI du filtre de sortie

On utilise un régulateur PI conformément a la figure.

Il en résulte la fonction de transfert d'ordre trois de la boucle fermée :

$$\frac{V_{inj}}{V_{ref}} = \frac{K_i}{L_{sf} C_{sf}} \cdot \frac{1 + \frac{K_p}{K_i} s}{s^3 + \frac{R_{sf}}{L_{sf}} s^2 + \frac{K_i}{L_{sf} C_{sf}} s} \quad (A.1)$$

Les paramètres K_i et K_p sont calculés par la méthode de placement des pôles

Stratégie de placement de pôles :

La méthode de placement de pôles permet d'analyser l'influence du paramètre de système asservie à partir de la position des racines de l'équation caractéristique dans le plan complexe

A l'aide du placement des pôles, il est possible de trouver la valeur du paramètre correspondant à la position à la position optimal des pôles dans le plan complexe.

On a insérée un régulateur PI dans la boucle de régulation, le schéma structurel en boucle fermée est montre dans la figure 4

La fonction de transfert en boucle fermée est :

Annexe

$$\frac{V_{inj}}{V_{ref}} = \frac{K_i}{L_{sf} C_{sf}} \cdot \frac{1 + \frac{K_p}{K_i} s}{s^3 + \frac{R_{sf}}{L_{sf}} s^2 + \frac{K_i}{L_{sf} C_{sf}}} = \frac{N(s)}{D(s)} = P(s) \quad (A.2)$$

Avec :

$N(s)$: Le numérateur

$D(s)$: Le dénominateur, ou encore appelé équation caractéristique du système.

Le numérateur $D(s)$ de la fonction de transfert est un polynôme de troisième degré.

On choisit deux pôles complexes conjugués P_1 et P_2 et de troisième P_3 réelle pour obtenir un bon amortissement, la racine réelle égale à partie réelle des racines complexes (figure A.1)

On obtient :

$$\begin{cases} P_1 = -\rho + j\rho \\ P_2 = -\rho - j\rho \\ P_3 = -\rho \end{cases} \quad (A.3)$$

C'est-à-dire que le dénominateur est donné par :

$$D(s) = (s - P_1)(s - P_2)(s - P_3) \quad (A.4)$$

Par identification des termes des polynômes (équation A.3 et équation A.4), on obtient :

$$\begin{cases} K_p = 4L_{sf} C_{sf} \rho^2 - 1 \\ K_i = 2L_{sf} C_{sf} \rho^3 \end{cases} \quad (A.5)$$

Avec :

$$\begin{cases} L_{sf} = 500 \mu H \\ R_{sf} = 31 m\Omega \\ C_{sf} = 200 \mu F \end{cases}$$

Annexe

ρ	0	1	2	3	4	5	6	7
K_p	0.4	-0.6	0.6	2.6	5.4	9	13.4	18.6
K_i	0	0.4	3.2	10.8	25.6	50	86.4	137.2

Tableau : Choix de K_p et K_i

Pour chaque valeur de ρ les sons valeurs de K_p et K_i le régulateur PI et cabale de régulée et suivre les trois tensions harmonique injecté par onduleur.

Permes la valeur montrée dans le tableau précédant on utilise dans les valeurs suivant

$$\begin{cases} K_p = 2.6 \\ K_i = 10.8 \end{cases}$$

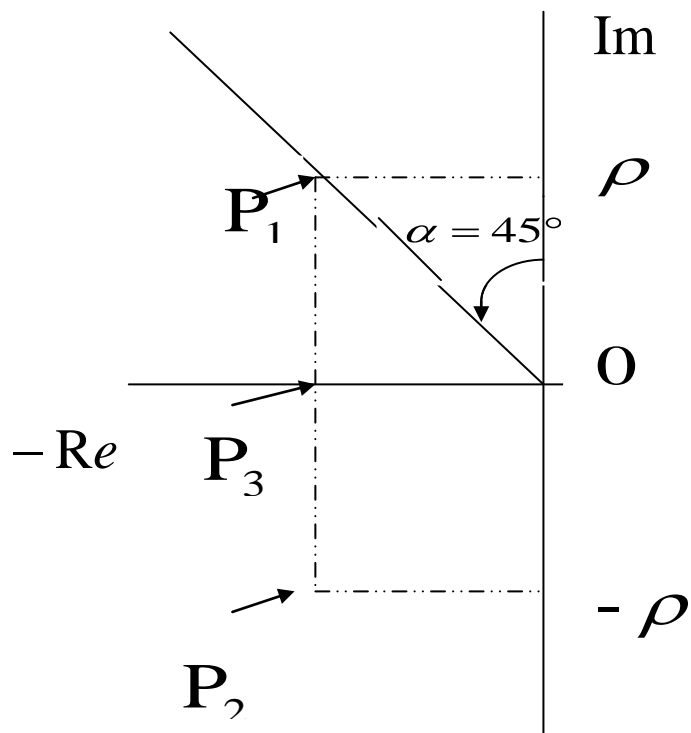


Figure A.1: stratégie de placement de pôles de $D(s)$

Bibliographie

Bibliographie

[AISS 09] AISSANI, **Mohamed**. « Commande numérique d'un convertisseur triphasé à quatre bras par MLI vectorielle à trois dimensions (application au filtrage actif) ».Mémoire Magister, EMP, Alger,2009.

[AKAGI 1] H.AKAGI, Y.KENZAWA, A.NABANE, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in tree-phase circuit", IPEC, Tokyo, 83, pp.1375-1384.

[AKAGI 2] AKAGI.H, NABAE.A, ATOH.S, "Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters", IEEE Ikans on Ind. Appl 22 (1986) 460-465.

[ALAL 02]M.A.ALALI, "Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques)", Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Strasbourg 12 Septembre 2002.

[Alex 04], Alexander Eigeles Emanuel "Summary of IEEE standard 1459: definition for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, balanced, or unbalanced conditions". IEEE transactions on industry application, vol.40.no.3,May/june 2004

[ALA 2000] M.A.E. Alali, S. Saadate, Y.A. Chapuis, F. Braun

« Energetic study of a shunt active conditioner compensating current harmonics, power factor and unbalanced », EPE-PEMC 2000, Kosic, Slovak Republic, vol. 5, pp. 211-216, September 2000.

[ALIOU 95]KAMEL ALIOUANE, "Contribution à l'étude du filtrage d'harmoniques des réseaux de distribution à l'aide de l'association de filtres actif et passif parallèle", Thèse de doctorat l'INP de lorraine, Nancy, 1995.

[BER 1] E.M. BERKOUK, BENROMDHANIE.Y, MANESSE.G, "High voltage rectifiers-multilevels inverters cascade. Application to asynchronous machine field oriented control"

Bibliographie

[BER 04] E.M.BERKOUK, S.AREZKI, " Modélisation et commande d'une MASDE alimentée par deux onduleurs cinq niveaux à structure NPC", Conférence National sur le génie électrique, Tiaret 2004

[BER 95] M. BERKOUK.E, "Contribution à la conduite des machines asynchrones monophasées et triphasées par des convertisseurs directs et indirects. Application aux gradateur et onduleurs multi niveaux", Thèse de doctorat, CNAM Paris, 1995

[Ber 99] S.Bernard, G, Escrivat , «Surcoûts engendrés par les harmoniques et économies réalisées grâce à la compensation active» REE N°5, Mai 1999,pp52-60.

[Bon 2000]] J. Bonal, G.Seguir « Entraînement électriques à vitesses variables » Technique et documentation.

[CHER 06] N .OULD CHERCHALI, "Analyse et commande d'un onduleur multiniveaux. Application a la machine asynchrone », Mémoire de Magister, Médéa 2006.

[DJAGH] H.DJEGHLOUD, H.BENALLA , " Application de la régulation Flou à un filtre actif parallèle a trois niveaux en MLI et en hystérésis "

[DJAF] DJAFFAR OULD ABDESLAM, "Techniques neuromimétique pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension", Thèse de doctorat, université de Haute Alsace, 2005.

[Hmi 10] Hmici, Khaira. «Commande d'un compensateur actif série à basse d'un onduleur à cinq niveaux.» Thèse Magistère, UHB Chlef, 2010.

[KETE 05] B.KETEM, N.MEHENI , "Application des onduleurs multi niveaux au filtrage actif des réseaux". Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique de l'USTHB, 2005

[LALIL 09] Djafer, LALILI. « MLI Vectorielle et Commande Non Linéaire du Bus Continu des Onduleurs Multi niveaux. Application à la Conduite de la Machine Asynchrone. ». Thèse Doctorat, ENP, Alger, 2009.

[LEOW] LEOW PEI LING, "SVM based hysteresis current controller for three phase active power filter " Master of Engineering University Technology Malaysia

Bibliographie

- [Ould 06] OULD ABDESLAM, D.WIRA, P.FLIELLER, D.AND MERCKLE, "Une nouvelle approche neuromimétique pour l'identification et la compensation des harmoniques dans les systèmes électriques.". International Conference on Electrical Engineering and its Applications, Sidi Bel-Abbes, Algeria, 2006
- [RDRIG 02] J.RDRIGUEZ, J S LAI, F Z PENG, " Multilevel inverter: A survey of topologies, controls and applications", IEEE Trans On Ind Electronics Vol 49, Aug 2002.
- [Seg 88] G.Seguir , « les convertisseurs de l'électronique de puissance : la conversion continu-alternatif », Technique et documentation.
- [TALH 04] Talha .a, «Etude de Différentes Cascades de l'Onduleur à Sept Niveaux à Structure NPC. Application à la Conduite d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », Thèse de Doctorat, ENP, 2004
- [Wa 92] Miao-Xin Wang , « Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel ». Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.
- [Xu 94] J. Xu , « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 20 Janvier 1994.
- [Zhang 02] : Richard Zhang, V. Himamshu Prasad, Dushan Boroyevich, Fred C. Lee, « Three-Dimensional Space Vector Modulation for Four-Leg Voltage-Source Converters” . IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 17, NO. 3, MAY 2002
- [Zhen 04] : Hou ZhenYi,Sun Jin, « Study on control strategy for three-phase four-leg inverter power supply», article IEEE, 2004.

Liste des figures

- Fig. I.1** : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage
- Fig. I.2** : Filtre passif résonnant
- Fig. I.3** : Filtre passif amorti
- Fig.I.4** : Convertisseurs à absorption sinusoïdale
- Fig I.5** : Filtre actif parallèle
- Fig I.6** : Filtre actif série
- Fig I.7** : Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)
- Fig I.8** : Filtre actif série et filtre passif parallèle
- Fig I.9** : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle
- Fig I.10** : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle
- Fig II.1:** Structure de l'onduleur triphasé à quatre bras
- Fig.II.2** : Les états de commutations de l'onduleur triphasé à quatre bras.
- Fig.II.3** : Représentation des vecteurs tension dans l'espace (α, β, γ) .
- Fig.II.4:** Vecteur tension de référence dans les différents prismes
- Fig.II.5** :Exemple de détection du prisme
- Fig.II.6** : Algorithme de détection des prismes
- Fig.II.7** :Représentation des tétraèdres dans le premier prisme
- Fig.II.8** : Projections du vecteur référence sur les vecteurs adjacents
- Fig.II.9** :Algorithme général de la SVM 3D
- Fig.II.10** :la tension simple de sortie de l'onduleur
- Fig.II.11** : Spectre harmonique de la sortie d'onduleur deux niveaux
- Fig.II.11** :Onduleur à trois niveaux
- Fig.II.12** :Cascade de deux onduleurs de deux niveaux
- Fig II.13** :La tension de sortie de l'onduleur à trois niveaux
- Fig.II.14** :Spectre harmonique de la sortie d'onduleur
- Fig. III.1:** Schéma de principe du filtre utilisé pour l'extraction des composantes harmoniques
- Fig.III.2** :Méthode d'extraction des tensions de références
- Fig. III.3:** la tension harmonique
- Fig. IV.1** : Structure générale du filtre actif série
- Fig IV. 2** : Le schéma global de l'onduleur et de sa commande.
- Fig. IV.3** : Schéma de modélisation du filtre de sortie
- Fig. IV.4** : Diagramme représentant le gain du filtre de sortie

Fig. IV.5. Circuit de puissance du filtre actif série trois niveaux proposé

Fig.IV.6 Modèle électrique du réseau

Fig.IV.7 Déséquilibre de la charge

Fig.IV.8 Les courants de charge

Fig.IV.9 :Les tensions aux bornes de la charge

Fig.IV.10 : la tension harmonique

Fig.IV.11 : Les prismes

Fig.IV.12 : Les tétraèdres

Fig.IV.13 : La tension de sortie de l'onduleur

Fig.IV.14 : La tension filtrée aux bornes de la charge

Fig.IV.15 : les prismes

Fig.IV.16 :les tétraèdres

Fig.IV.17 :la tension de la sortie d'onduleur

Fig.IV.18 :la tension filtrée aux bornes de la charge

Fig.IV.19 :l'erreur entre la tension harmonique et la sortie d'onduleur

Fig.IV.20 :Le schéma global du système

Fig.IV.21 :La charge non linéaire déséquilibrée

Fig.IV.22 :Le courant de la charge

Fig.IV.23 :les tensions aux bornes de la charge

Fig.IV.24 :tensions harmoniques de la charge

Fig.IV.25 :Les prismes

Fig.IV.26 : Les tétraèdres

Fig.IV.27 :la tension de sortie de l'onduleur

Fig.IV.28 : La tension filtrée aux bornes de la charge

Fig.IV.29 : Les tension de la sortie d'onduleur

Fig.IV.30 : La tension filtrée aux bornes de la charge