



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machines électriques

Réf. :

Présenté et soutenu par :
LEMAYNI Mohamed

Le : dimanche 24 juin 2018

Contrôle de puissance d'un redresseur MLI

Jury :

Mme TERKI Amel	MCA	Université de Biskra	Président
Mme ABDEDDAIM Sabrina	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Mme DERADJI BELLOUM Karima	MAA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2017/2018

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machines Electriques

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Contrôle de puissance d'un redresseur MLI

Présenté par :

LEMAYNI Mohamed

Avis favorable de l'encadreur :

ABDEDDAIM Sabrina

signature

Avis favorable du Président du Jury

TERKI Amel

Signature

Cachet et signature

Dédicace

*Je dédie Ce modeste travail a ceux qui m'ont mise au monde ; Mes très chers
parents ceux qui ont veillé sur moi pendant toutes ma vie*

Je tiens aussi à dédier ce travail

A mes sœurs

A mon frère

A mon très chère grande mère

Et a toute ma famille.

A tous mes amis.

*Et tous qui m'aimé et qui m'encourage et à toute personne qui ma aidé de
près ou loin et tous ceux que j'ai oubliés involontairement.*



Remerciement

J'exprime mes remerciements et ma profonde gratitude, avant tout au ALLAH qui m'a donné la force, la volonté et la patience durant mes années d'études et surtout pendant la réalisation de ce modeste travail.

Egalement, j'adresse avec mes agréables remerciements à M^{me} ABDEDAIEM Sabrina pour avoir accepté de m'encadrer, et m'orienter avec abnégation et m'avoir consacré une part de son précieux temps, et pour son expertise et son support tout au long de mon travail.

Je tiens à adresser mes vifs et sincères remerciements aux membres de jury et à tous les enseignants du département de biologie pour leur soutien.

Enfin, j'adresse avec mes plus vifs remerciements à toute ma famille et mes amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

SOMMAIRE

Dédicaces

Remerciements

Listes des figures

Liste des tableaux

Abréviation

INTRODUCTION GENERALE.....(1)

CHAPITRE I : QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

I.1 INTRODUCTION.....(3)

I.2 PROBLEMES LIES AUX HARMONIQUES(3)

I.2.1 Creux et coupures de tension(3)

I.2.2 Fluctuations de tension.....(4)

I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....(5)

I.2.4 Variation de fréquence.....(5)

I.2.5 Forme d'onde.....(6)

I.2.5.1 Harmoniques et inter-harmoniques.....(6)

I.2.5.2 Sources des harmoniques.....(6)

I.2.5.3 Caractérisation des perturbations harmoniques.....(6)

I.2.5.4 Conséquences néfastes des harmoniques.....(8)

I.3 NORMES ET REGLEMENTATIONS(10)

I.4 SOLUTION DE REDUCTION DES PERTURBATIONS.....(11)

I.4.1 Stratégies classiques.....(11)

I.4.1.1 Agir sur la structure de l'installation.....(11)

I.4.1.2 Transformateur à couplage spécial.....(11)

I.4.1.3 Inductances (selfs) série.....(12)

I.4.1.4 Filtrage passif.....(12)

I.4.1.4.1 Filtre résonant.....(12)

I.4.1.4.2 Filtre amorti.....(12)

I.4.2 Stratégies modernes.....(13)

I.4.2.1 Le Filtre actif parallèle (FAP)(13)

I.4.2.2 Le Filtre actif série (FAS)	(14)
I.4.2.3 La combinaison parallèle-série actifs.....	(15)
I.5 CONCLUSION.....	(16)

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES REDRESSEURS MLI

II.1 INTRODUCTION.....	(17)
II.2 REDRESSEURS MLI.....	(17)
II.3 STRUCTURE GENERALE DU REDRESSEUR MLI.....	(17)
II.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT EN REDRESSEUR MLI.....	(18)
II.4.1 Redresseur MLI de courants.....	(18)
II.4.2 Redresseur MLI de tensions.....	(19)
II.5 MODELISATION DU REDRESSEUR MLI.....	(19)
II.5.1 Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé.....	(24)
II.5.2 Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel fixes $\alpha\beta$..	(26)
II.5.3 Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel tournant (dq).....	(27)
II.6 LES TECHNIQUES DE COMMANDE MLI.....	(28)
II.6.1 MLI à Bande d'hystérésis.....	(28)
II.6.2 MLI à échantillonnage périodique.....	(29)
II.6.3 MLI à porteuse triangulaire.....	(29)
II.6.4 MLI vectorielle.....	(30)
II.7 CONCLUSION.....	(30)

CHAPITRE III : ETUDE ET SIMULATION DE DEUX COMMANDES

D'UN REDRESSEUR MLI

III.1 INTRODUCTION.....	(31)
III.2 COMMANDE A TENSION ORIENTE (VOC)	(31)
III.2.1 Boucle de régulation de tension du bus continu.....	(32)
III.2.2 Etude de la boucle des courants du coté alternatif.....	(33)
III.2.3 Résultats de simulation.....	(36)

III.3 COMMANDE EN COURANT	(41)
III.3.1 Configuration des circuits de contrôle	(41)
III.3.2 Résultats de simulation	(43)
III.4 Comparaison des deux commandes	(46)
III.5 CONCLUSION	(46)
CONCLUSION GENERAL	(47)
Annexes	(48)
Bibliographie	(49)

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I-1) : Creux et coupures de tension.....	(4)
Figure (I-2) : Variations rapides de la tension.....	(4)
Figure (I-3) : Déséquilibre des tension.....	(5)
Figure (I-4) : Fluctuation de la fréquence.....	(5)
Figure (I-5) : Diagramme de Fernel des puissances.....	(8)
Figure (I-6) : Branchement d'un filtre résonant.....	(12)
Figure (I-7) : Branchement d'un filtre amorti.....	(13)
Figure (I-8) : Filtrage actif parallèle.....	(13)
Figure (I-9) : Filtrage actif série.....	(14)
Figure (I-10) : Combinaison des filtres actifs série et parallèle.....	(15)

Chapitre II

Figure (II-1) : Schéma de principe du redresseur MLI.....	(18)
Figure (II-2) : Redresseur MLI de courant triphasé à deux niveaux.....	(19)
Figure (II-3) : Redresseur MLI de tension triphasé à deux niveaux.....	(20)
Figure (II-4) : schéma unifilaire d'un pont de redresseur connecté au réseau.....	(21)
Figure (II-5) : Pont redresseur.....	(21)
Figure (II-6) : Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.....	(22)
Figure (II-7) : présentations de vecteur de tension V_k	(23)
Figure (II-8) : Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans les coordonnées triphasées normales.	(26)
Figure (II-9) : Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans le système de coordonnées fixes $\alpha\beta$	(27)
Figure (II-10) : Schéma fonctionnel du redresseur MLI de tension dans le référentiel tournant dq.....	(28)
Figure (II-11) : principe de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis.....	(28)
Figure (II-12) : Modulateur MLI à échantillonnage périodique.	(29)
Figure (II-13) : Modulateur MLI à porteuse triangulaire.	(29)

Chapitre III

<i>Figure (III-1) : Schéma fonctionnel de la commande à tension orientée (VOC).</i>	(31)
<i>Figure (III-2) : Diagramme vectoriel pour le VOC.</i>	(32)
<i>Figure (III-3) : Modèle dynamique pour le circuit du bus continu.</i>	(32)
<i>Figure (III-4) : Schéma fonctionnel pour la boucle de réglage de tension du bus continu.</i>	(32)
<i>Figure (III-5) : Schéma fonctionnel pour le réglage du courant.</i>	(34)
<i>Figure (III-6) : Schéma de simulation.</i>	(36)
<i>Figure (III-7) : Bloc PLL.</i>	(37)
<i>Figure (III-8) : Bloc de transfer V_{abc}-V_{dq}.</i>	(37)
<i>Figure (III-9) : Bloc de transfer I_{abc}-I_{dq}.</i>	(37)
<i>Figure (III-10) Spectre harmonique pour le courant du réseau i_a.</i>	(38)
<i>Figure (III-11) Représentation du courant I_{abc}.</i>	(39)
<i>Figure (III-12) Allure de la tension aux bornes du bus continu V_{dc}.</i>	(39)
<i>Figure (III-13) Allure de courant I_d et I_{d_ref}.</i>	(40)
<i>Figure (III-14) Allure de courant I_q et I_{q_ref}.</i>	(40)
<i>Figure (III-15) Allure de courant de phase et la tension.</i>	(41)
<i>Figure (III-16) La commande du redresseur MLI.</i>	(42)
<i>Figure (III-17) Spectre harmonique pour le courant du réseau i_a.</i>	(43)
<i>Figure (III-18) Représentation du courant I_{abc}.</i>	(44)
<i>Figure (III-19) Tension de bus continue.</i>	(44)
<i>Figure (III-20) Allure de courant I_a et I_{a_ref}.</i>	(45)
<i>Figure (III-21) Allure de courant de phase et la tension.</i>	(45)

Liste des Tableaux

Chapitre II

Tableau (I-1) : Valeurs des niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques dans les réseaux d'énergie à basse tension (CEI 1000-2-4)(10)

Tableau (I-2) : Limites pour les émissions de courant harmonique (CEI 1000-3-2).....(11)

Chapitre II

Tableau (II .1) : les huit états possibles des interrupteurs.....(22)

Chapitre III

Tableau (III-1) : Les Avantages et les Inconvénients.....(46)

Abréviation

$d_p d_q$: Sorties des comparateurs à Hystérésis

i_{abc} : Courant instantané de phase du redresseur

ξ : Coefficient d'amortissement

\bar{e} : Vecteur de la tension de ligne

e : Tension instantanée de phase du réseau

\hat{e} : Tension instantanée de phase du réseau estimée

\bar{i} : Vecteur du courant de ligne

i : Courant instantané de phase du redresseur

i_{ref} : Courant de référence du redresseur

i_{dc} : Courant actif nécessaire pour charger le bus continu

i_{ch} : Courant de la charge non-linéaire

i_T : Courant dans les transistors

i_D : Courant dans les diodes antiparallèles

k_p : Paramètre proportionnel

i_{ref} : Paramètre intégrateur

p : Puissance active instantanée ou puissance réelle

p_{ref} : Puissance active instantanée de référence

q : Puissance réactive instantanée ou puissance imaginaire

q_{ref} : Puissance réactive instantanée de référence

v_c : Tension instantanée de phase de sortie des correcteurs (tension de référence)

v : Tensions instantanées de phase du redresseur

v_n : Tensions instantanées de phase par rapport au point neutre de la charge

C : Condensateur du bus continu

E : Tension de phase efficace du réseau

E_m : Tension de phase maximale du réseau

f_c : Fréquence de commutation

I : Courant efficace du réseau

I_m : Courant de ligne maximal du réseau

L : Inductance du filtre de raccordement

P_n : Puissance nominale

R : Résistance du filtre de raccordement

R_{ch} : Résistance de la charge continue du redresseur à prélèvement sinusoïdal

S : Puissance apparente

$S_{a,b,c}$: États de commutation des interrupteurs du convertisseur de tension

T : Période du signal de tension du réseau

T_i : Constante de temps intégrale du correcteur PI

T_n : Constante de temps du correcteur PI

U_{dc} : Tension instantanée du bus continu

U_{dc_ref} : Tension de référence du bus continu

Δ_i : Variation du courant

φ : Phase du courant

α : angle du vecteur de tension de référence

γ : Secteurs du Contrôle Direct de Puissance

INTRODUCTION GENERALE

L'électronique de puissance permet la conversion de l'énergie électrique disponible sous une forme donnée (alternative, continu) en une autre forme (alternative, continu) avec un rendement maximum. Le principal domaine d'application de ces convertisseurs de puissance est la commande des machines électriques. L'un des convertisseurs de puissance qui a été énormément utilisé est le pont redresseur. Cette structure qui convertit la tension d'une forme alternative en une forme continue a beaucoup évolué. Les premières topologies étaient basées sur l'utilisation des semi-conducteurs de type diode. Les diodes comme nous le savons sont des composants non commandables (ni à la fermeture ni à l'ouverture). Ce qui rend le fonctionnement d'un pont redresseur à diode très limité. Puis sont venues les ponts redresseurs à thyristors qui avaient la particularité d'être commandables. Cependant, le thyristor comme la diode, laisse passer le courant électrique dans un seul sens, de l'anode à la cathode. De plus, ce dernier ne conduira que si un courant minimum et positif est fourni à la gâchette. Ensuite le développement des semi-conducteurs de type *IGBT*. Les caractéristiques de ce dernier est qu'ils associent *MOS* et transistor bipolaire de puissance. Ils cumulent les avantages des deux sans totalement éliminer les inconvénients. De plus ils sont commandables en tension.

Ces convertisseurs de type pont redresseur qui sont raccordés aux réseaux électriques sont en constante progression. Cela n'est pas sans poser quelques problèmes au distributeur d'énergie électrique qui les voit comme étant des sources polluantes. Cette pollution est d'une part de type harmonique, car ils absorbent des courants non sinusoïdaux qui déforment la tension du réseau électrique, et d'autre part, ils consomment de la puissance réactive qui a pour conséquence de dégrader le facteur de puissance.

Beaucoup de méthodes de réduction de ces harmoniques existent, tel que les redresseurs *MLI* qui utilisent des *IGBT* comme convertisseur. Contrairement aux redresseurs non commandés, les redresseurs *MLI* offrent plusieurs possibilités, tel que :

1. Une consommation des courants proche de la sinusoïdale et le contrôle de la puissance réactive.
2. Un transfert bidirectionnel de la puissance.

Ainsi, notre étude portera sur l'essayant de minimiser les harmoniques de courant absorbé par ce convertisseur. Par conséquent, notre travail s'articulera sur trois chapitres.

Le premier chapitre portera sur les différents types de perturbations affectant le réseau électrique et qui ont des effets néfastes des harmoniques. En outre, nous avons montré les différentes solutions existantes pour la dépollution harmonique.

Viens le second chapitre portera sur une introduction sur la structure générale du redresseur MLI et sa modélisation. Les différentes techniques de commande MLI.

Le troisième et dernier chapitre présentera en détail la stratégie de commande que nous avons choisie pour le pont redresseur de tension à *MLI* et les résultats de simulation que nous avons obtenus.

CHAPITRE I : QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

I.1 INTRODUCTION

Le distributeur d'énergie électrique a pour objectif de fournir un système de tensions sinusoïdales triphasées équilibrées à l'ensemble des consommateurs. Cependant l'utilisation intensive des convertisseurs statiques a conduit à l'augmentation de la pollution harmonique dans les réseaux électriques et une consommation importante de la puissance réactive. Cette dégradation peut être créée aussi par des dysfonctionnements de matériels sur le réseau tel que la saturation des transformateurs, création de pertes supplémentaires dans les lignes de transport,..).

Ce chapitre a pour objectif d'étudier, les origines des perturbations électriques et leur effet sur les réseaux électriques. Ensuite, nous présentons les solutions classiques utilisées pour limiter cette pollution. Finalement, nous étudions les compensateurs actifs des harmoniques comme nouvelle solution qu'on peut utiliser dans de nombreux cas.

I.2 LES PERTURBATIONS ELECTRIQUES

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension caractérisée par sa fréquence, son amplitude et sa forme d'onde qui doit être sinusoïdale. La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations existantes en permanence ou pendant des instants de durées bien déterminées [1]. Ces perturbations sont classées comme suit :

I.2.1 Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution de son amplitude (entre 10% à 90% de la tension nominale) pendant un temps de 10 millisecondes jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus en général à des défauts dans les réseaux publics ou ceux des utilisateurs. Ils apparaissent aussi lors des manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une coupure de brève est une disparition totale de la tension pendant une courte durée qui n'excède par une minute. Ces coupures sont dues au fonctionnement du système de protection des réseaux aériens évitant ainsi des coupures longues.

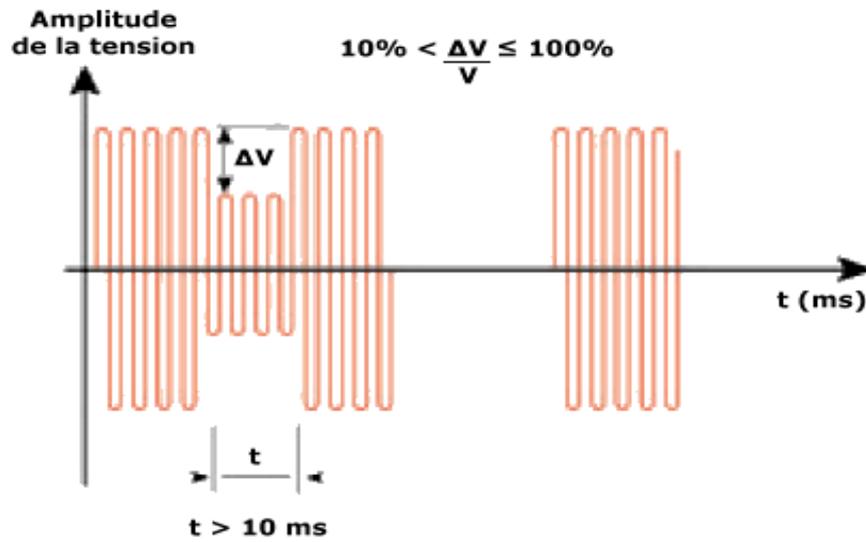


Figure (I-1) : Creux et coupures de tension

I.2.2 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension qui se produisent à des intervalles de temps de quelques centièmes de secondes.

L'amplitude de la tension doit se situer dans une bande de $\pm 10\%$ de sa valeur nominale.

Ces fluctuations entraînent des variations de flux lumineux pour les lampes à incandescence créant un papillotement de la lumière [2].

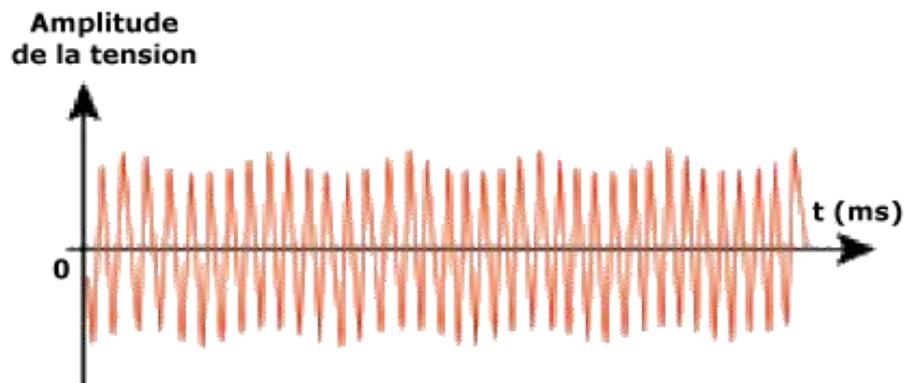


Figure (I-2) : Variations rapides de la tension.

I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

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 triphasé.

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation des courants non équilibrés dans les impédances du réseau.

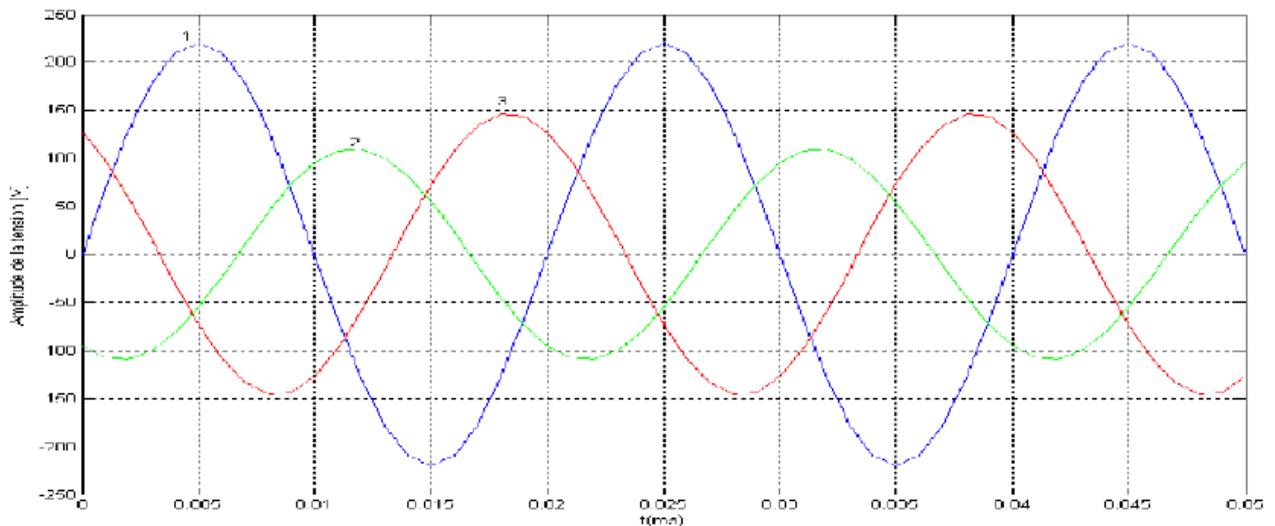


Figure (I.3) : Déséquilibre des tensions

I.2.4 Variation de fréquence

Les réseaux de distributions ou de transports ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ [3].

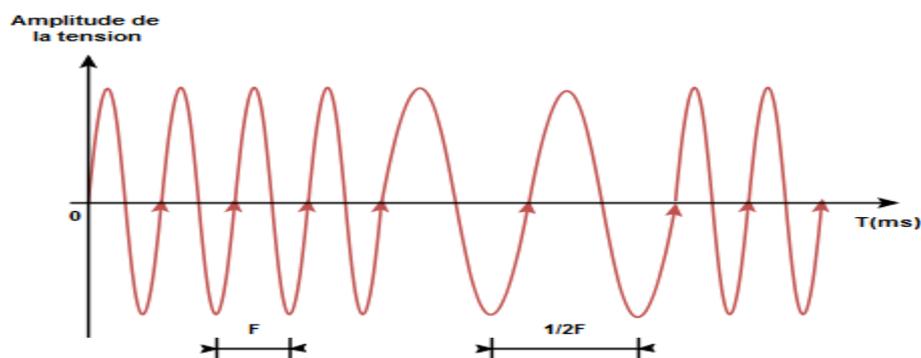


Figure (I.4) : Fluctuation de la fréquence

I.2.5 Forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits.

I.2.5.1 Harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont une superposition à l'onde fondamentale (50Hz) des ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entier du fondamental. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation intensive des convertisseurs statiques.

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau.

I.2.5.2 Sources des harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires, ou des charges déséquilibrées branchées au réseau. Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non sinusoïdal. Par la suite, nous nous restreindrons aux charges non-linéaires triphasées, qui consomment un courant périodique, de même période que celle de la tension.

I.2.5.3 Caractérisation des perturbations harmoniques :

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime harmonique. Le taux global de distorsion harmonique ou total harmonique distorsion en anglais (*THD*) et le facteur de puissance sont les plus employés pour déterminer les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive [1].

a. Le taux de distorsion harmoniques

Notre étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et/ou le courant absorbé par la charge contient des composantes harmoniques.

Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour déterminer le niveau de pollution harmonique sur les réseaux électriques.

Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée. Il est donné par l'expression suivante :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (I.1)$$

D'où I_1 est la valeur efficace du courant fondamental et I_h les valeurs efficaces des différentes harmoniques de courant.

b. Le facteur de puissance

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : Une puissance active P , une puissance réactive Q et une puissance déformante D . Son expression est donnée par l'équation suivante :

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

Les puissances réactive et active est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est dû aux harmoniques de courant.

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance F_P est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S .

En régime non sinusoïdal, les harmoniques créent une puissance déformante qui diminue le facteur de puissance. Tandis que, en régime sinusoïdal équilibré, la puissance déformante est nulle.

$$F_P = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.3)$$

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

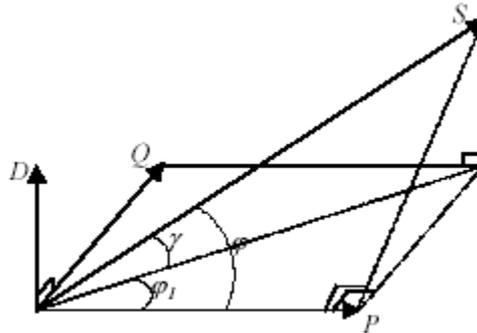


Figure (I.5) : Diagramme de Fernel des puissances

1.2.5.4 Conséquences néfastes des harmoniques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiés, on distingue deux sortes d'effets possibles :

- **les effets quasi-instantanés** : concernent certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de contrôle et régulation,...etc. La présence des harmoniques sur le réseau provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur crête de l'onde.
- **les effets à terme** : se rapportent essentiellement aux machines tournantes, aux transformateurs et aux condensateurs, ce qui se manifeste par des échauffements supplémentaires et l'augmentation du niveau sonore. Il en découle la destruction de matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique.

La liste suivante donne une idée de l'impact des harmoniques sur certains équipements à usage fréquent qui font partie intégrante du réseau électrique, tels que les :

- **alternateurs** : pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liées à l'augmentation de la valeur efficace du courant absorbé. Ces pertes

CHAPITRE I : QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE MLI

provoquent un échauffement supplémentaire et réduisent également le rendement de ces machines ;

- **câbles électriques** : pertes Joule supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques homopolaires et corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation de courants harmoniques pairs associés à une composante continue [4] .

La présence des harmoniques dans le réseau diminue aussi la capacité de transport en puissance active des lignes :

- **transformateurs** : ils sont les constituants les plus directement affectés par les courants harmoniques. Ces derniers produisent des pertes additionnelles dans les enroulements. Ces pertes ne sont pas seulement dues à l'effet Joule pelliculaire, mais aussi à des courants induits dans les bobinages, le noyau et les pièces métalliques par les composantes à hautes fréquences des champs de fuite [5].
- **moteurs à courant alternatif** : la déformation de la forme d'onde de la tension du réseau, due à l'interaction entre les courants harmoniques et l'impédance équivalente du réseau, influe sur le fonctionnement des machines électriques à courant alternatif en général et sur celui des moteurs asynchrones en particulier (pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements et pulsation du couple) [3].
- **condensateurs** : ils sont aussi très affectés par les courants harmoniques. Les condensateurs branchés en parallèle sur les réseaux pour la compensation de la puissance réactive (correction du facteur de puissance) ont des impédances d'autant plus faibles que la fréquence est élevée [6].

Les courants harmoniques se superposent au courant fondamental et causent des pertes supplémentaires qui peuvent excéder la capacité thermique des condensateurs et réduire considérablement leur durée de vie. De plus, des phénomènes de résonance peuvent survenir et soumettre les condensateurs à des surtensions, lesquelles sont susceptibles de les dégrader, voire de perforent leur isolation.

CHAPITRE I : QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE MLI

- **équipements à base d'électronique de puissance** : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension qui peut créer des faux passages par zéro (perte de synchronisation).
- **ordinateurs** : troubles fonctionnels liés à la distorsion de la tension du réseau ;
- **réseaux de télécommunication** : génération de bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication. Dans des cas particuliers, surtout lors de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable [4].

I.3 NORMES ET REGLEMENTATIONS

Pour éviter tous les problèmes générés par la présence des courants et des tensions harmoniques sur le réseau et pour le préserver de la pollution harmonique, les utilisateurs doivent respecter un certain nombre de normes qui sont résumées dans les tableaux (I-1) et (I-2).

Rangs impairs non multiples de 3		Rangs impairs multiples de 3		Rangs pairs	
Rang	Tension harmonique%	Rang	Tension harmonique%	Rang	Tension harmonique%
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+12.5/n$				

Tableau (I-1) : Valeurs des niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques dans les réseaux d'énergie à basse tension (CEI 1000-2-4)

Rang impair	Courant harmonique maximal autorisé (A)	Rang pair	Courant harmonique maximal autorisé (A)
3	2.3	2	1.08
5	1.17	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	8<=n<=40	
11	0.33		
13	0.21		
5<=n<=39	0.15*15/n		

Tableau (I-2) : Limites pour les émissions de courant harmonique (CEI 1000-3-2)

I.4 SOLUTION DE REDUCTION DES PERTURBATIONS HARMONIQUE

Plusieurs méthodes sont utilisées pour réduire la pollution harmonique dans les réseaux électriques, qui peuvent être classifiées comme suit :

I.4.1 Stratégies classiques

I.4.1.1 Agir sur la structure de l'installation

Eviter la connexion d'un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur tel que les redresseurs, si le pollueur est de forte puissance, il est souhaitable de l'alimenter par un autre transformateur [7] [8].

I.4.1.2 Transformateur à couplage spécial

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide d'un transformateur à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques [8] [9].

I.4.1.3 Inductances (selfs) série

Cette méthode est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés. Elle consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self a cependant une efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire.

I.4.1.4 Filtrage passif

Le filtrage est réalisé par la mise en parallèle avec l'impédance du réseau d'un circuit de très faible impédance par rapport à l'impédance du réseau à la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer. Le courant choisit le chemin le moins résistant et de ce fait l'harmonique sera dévié à travers ce dernier.

I.4.1.4.1 Filtre résonant

Le filtre résonant est constitué d'un condensateur monté en série avec une inductance. Ces éléments sont placés en dérivation sur l'installation et accordés sur un rang d'harmonique à éliminer. L'impédance de cet ensemble est très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte ainsi comme un court-circuit pour l'harmonique considéré.

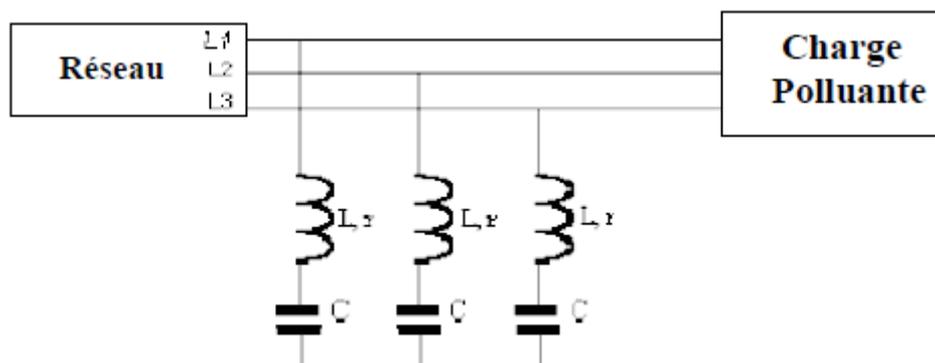


Figure (I-6) : Branchement d'un filtre résonant

I.4.1.4.2 Filtre amorti

Un filtre amorti est composé d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement.

Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées. On utilise souvent pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre et non une fréquence particulière, c'est un filtre passe haut.

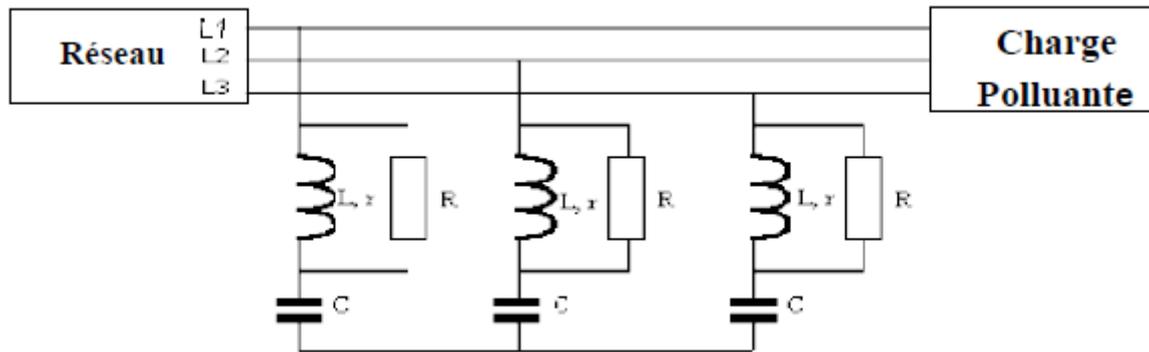


Figure (I-7) : Branchement d'un filtre amorti

I.4.2 Stratégies modernes

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs tels que les IGBTs, MOSFETs, commutant des puissances de plus en plus élevées à des fréquences plus importantes, a permis de trouver de nouvelles solutions aux problèmes de perturbations des réseaux. Les inconvénients des solutions classiques telle que le filtrage passif (antirésonance, surcharges et forte dépendance de l'environnement,...) ont conduit à la conception de nouvelles structures " auto-adaptatives " pour la suppression des harmoniques appelées filtres actifs.

Le principe du filtrage actif est d'injecter des courants (ou des tensions) harmoniques en opposition de phase avec les harmoniques que l'on désire compenser.

Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs :

- Le filtre actif parallèle (FAP) (shunt active filter) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle-série actifs : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

I.4.2.1 Le Filtre actif parallèle (FAP)

Il est aussi appelé compensateur shunt, connecté en parallèle sur le réseau de distribution (figure (I-3)). Il est souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques i_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau i_s soit sinusoïdal et en phase

CHAPITRE I : QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE MLI

avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure l'auto- adaptabilité, la fiabilité et la bonne performance.

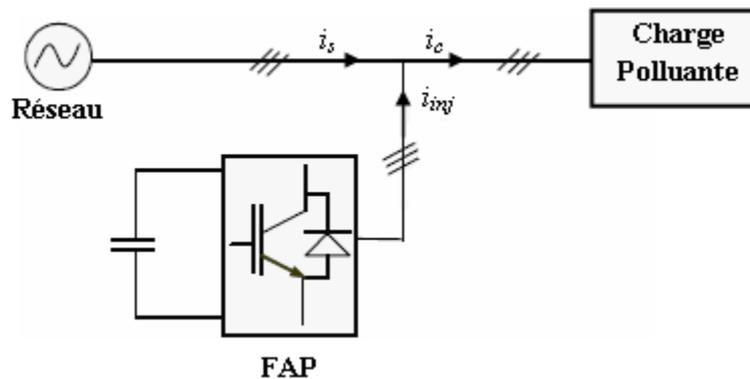


Figure (I-8) : Filtrage actif parallèle

I.4.2.2 Le Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau (figure (I-4)). Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre : elle ne permet pas, par exemple, de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

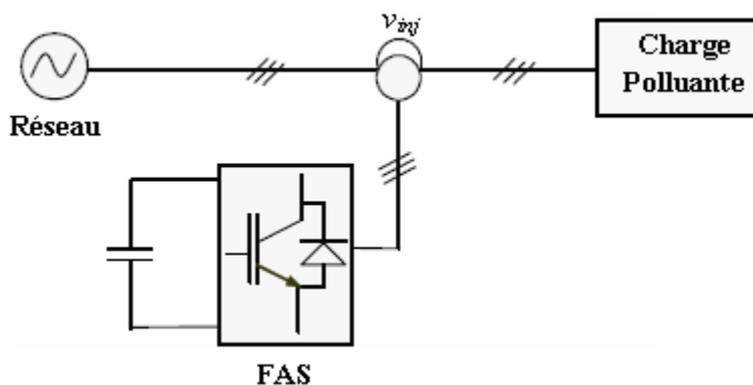


Figure (I-9) : Filtrage actif série

I.4.2.3 La combinaison parallèle-série actifs

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série.

Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle-série actifs ou Unified Power Quality Conditionner (UPQC).

L'UPQC possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série.

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

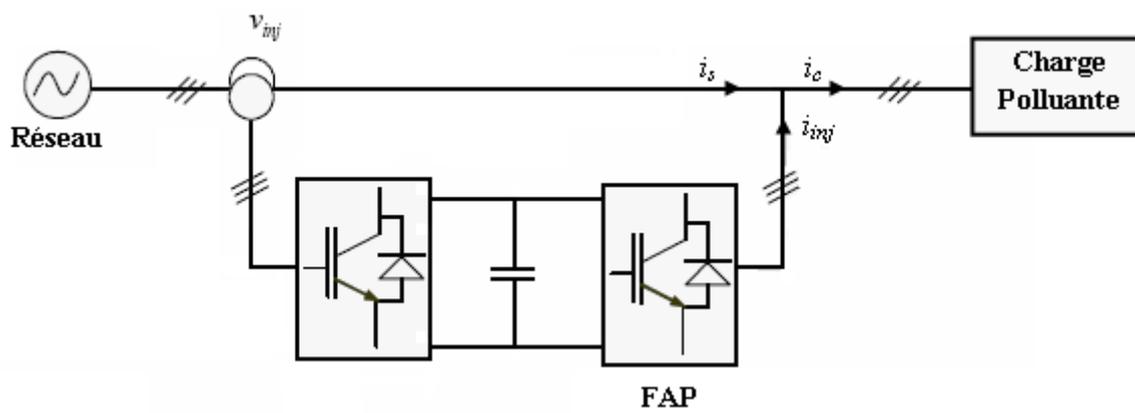


Figure (I-10) : Combinaison des filtres actifs série et parallèle

Il faut noter l'existence de plusieurs autres combinaisons mixtes de filtres actifs avec cette fois-ci les filtres passifs. Ces structures sont conçues dans le but d'optimiser le rapport performance/coût.

On peut citer trois configurations :

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

I.5 Conclusion :

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Lorsque la forme d'onde n'est plus sinusoïdale, on rencontre des 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.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de perturbations affectant le réseau électrique et qui ont des effets néfastes sur les équipements électriques. En outre, nous avons montré les différentes solutions existantes pour la dépollution harmonique.

**CHAPITRE II :
GENERALITES SUR LES
REDRESSEURS MLI**

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES REDRESSEURS MLI

II.1 INTRODUCTION

L'accroissement des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques de type redresseur a connu un essor important aussi bien sur le plan industriel que domestique. C'est ainsi que le réseau de distribution BT est le siège de perturbations importantes que le distributeur a du mal à enrayer. Sans précautions particulières ces convertisseurs sont polluants et absorbent des courants harmoniques qui ne sont pas sans effets sur l'onde de tension délivrée. Devant ce constat, il apparaît important de développer sur le plan industriel des dispositifs de filtrage actif au niveau curatif et une démarche préventive afin de concevoir des alimentations non-polluantes, c'est-à-dire dotées d'une structure et d'un dispositif de commande rendant le courant prélevé le plus sinusoïdal possible.

Dans ce contexte et depuis une dizaine d'années des convertisseurs statiques non-polluants à facteur de puissance élevé ont commencé à apparaître sur le marché concernant surtout la conversion AC/DC. En effet des changements ont été apportés sur les ponts redresseurs conventionnels modifiant leur structure ou leur système de commande afin de réduire leur injection de courants harmoniques dans le réseau. Ces nouveaux convertisseurs AC/DC se distinguent par leur structure et par la manière de gérer les courants absorbés, ils sont répertoriés sous l'appellation de redresseurs à absorption de courant sinusoïdal. Parmi ces structures, les plus répandues et les plus attractives se trouvent le redresseur MLI. Il est caractérisé par un comportement quasi résistif vis à-vis du réseau d'alimentation.

II.2 REDRESSEURS MLI :

Dans le souci de fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les redresseurs à MLI sont proposés comme solution avancé de dépollution des réseaux électriques. En effet, les redresseurs à MLI peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur [10][11].

II.3 STRUCTURE GENERALE DU REDRESSEUR MLI

La technologie employée consiste à modifier la structure interne du redresseur en remplaçant les thyristors par des interrupteurs entièrement commandés à l'ouverture et à la fermeture : transistor MOSFET pour les moyennes et petites puissances, transistors IGBT ou thyristor GTO pour les fortes puissances, en anti parallèle avec des diodes.

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES REDRESSEURS MLI

La Figure (II-1) montre le schéma de principe d'un redresseur MLI

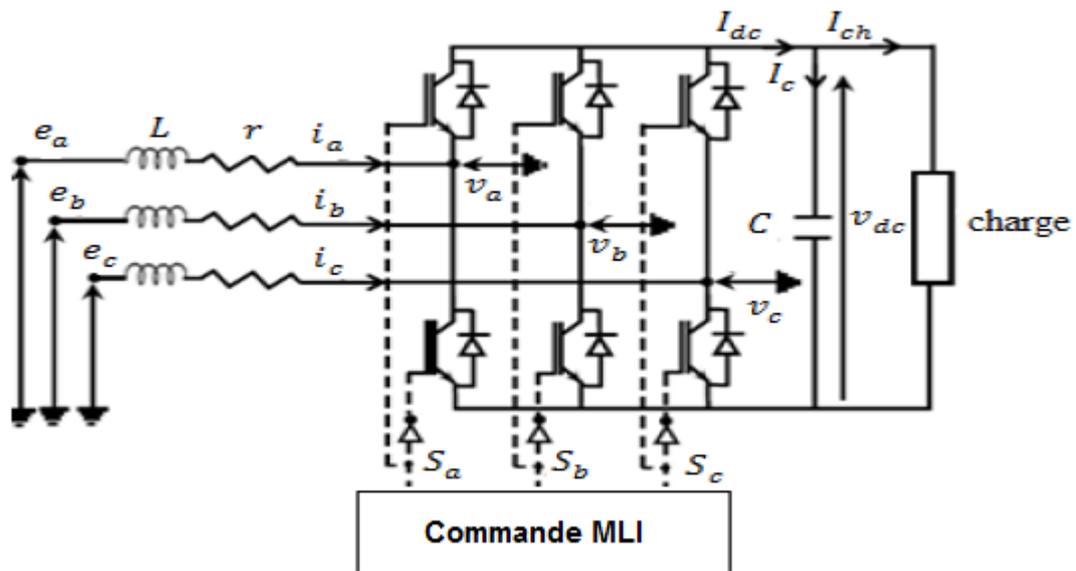


Figure (II-1) : Schéma de principe du redresseur MLI.

II.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT EN REDRESSEUR MLI :

La réversibilité en courant de l'onduleur MLI de tension autorise son fonctionnement en redresseur MLI de courant.

Il s'agit alors d'alimenter une charge (passive ou active) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant prélevé sur ce réseau étant sinusoïdale et éventuellement, en phase avec la tension. On peut donc, avec un redresseur MLI, obtenir un facteur de puissance très proche de l'unité.

On peut aussi régler, par le contrôle l'énergie réactive absorbée ou fournie. Toutefois, ce redresseur peut être à structure courant ou à structure tension [12].

II.4.1 Redresseur MLI de courants :

Un redresseur MLI de courants :

- Est alimenté par une source de courants sinusoïdaux.
- Débite sur un récepteur de tension continue.

Il a donc la structure d'un onduleur de tension comme le montre la figure I.3

Pour que l'entrée du redresseur soit alimentée par une source de courant, on y ajoute une inductance supplémentaire (c'est souvent l'inductance de fuite volontaire accrue du transformateur d'ordinaire placé entre le réseau et le redresseur) [10].

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES REDRESSEURS MLI

Dans le fonctionnement en redresseur MLI de courants, le réseau alternatif impose la valeur de la tension à l'entrée du convertisseur.

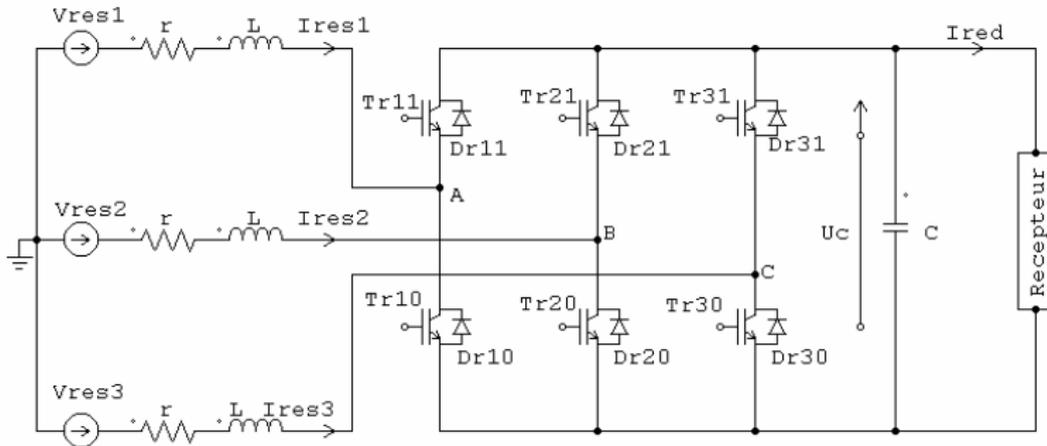


Figure (II-2) : Redresseur MLI de courant triphasé à deux niveaux.

La tension sur le bus continu est liée à la tension alternative et au coefficient de réglage de la MLI par la relation suivante :

$$V_1 = r \frac{U_c}{2\sqrt{2}} \implies U_c = \frac{2\sqrt{2}}{r} V_1 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- V_1 : la valeur efficace du fondamental des tensions alternative V_a, V_b, V_c à l'entrée du redresseur triphasé.
- U_c : tension sur le bus continu du redresseur.
- r : coefficient de réglage de la MLI est généralement compris entre 0 et 1.

Dans tous les cas et suivant la relation (II.1), en diminuant r on ne peut que rendre $U_c > 2\sqrt{2} V_1$.

Le redresseur MLI de courant ne peut fonctionner qu'en élévateur de tension continu.

II.4.2 Redresseur MLI de tensions :

Un redresseur MLI de tensions :

- Est alimenté par une source de tensions sinusoïdales,
- Débite sur un récepteur de courant continu.

Il a donc la structure d'un onduleur de courant comme le montre la figure II.3

On doit dériver des condensateurs entre les bornes d'entrée du convertisseur pour que celui-ci soit alimenté par une source de tensions. On désigne par C les capacités en triangle équivalentes.

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES REDRESSEURS MLI

A la sortie on ajoute une inductance de lissage à l'inductance du récepteur pour diminuer l'ondulation du courant de charge.

Dans le fonctionnement en redresseur de tension, la tension sur le bus continu est liée à la tension alternative et au coefficient de réglage r par la relation suivante :

$$U_c = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{1}{1-Lcw^2} V_1 r \cos \delta \quad (\text{II.2})$$

δ : est le déphasage entre le courant absorbé par le redresseur I'' et la tension du réseau V_{res} .
Par action sur r et δ on ne peut que réduire U_c par rapport à son maximum.

$$\frac{3V_1}{(1-Lcw^2)\sqrt{2}} \quad (\text{II.3})$$

On peut conclure que le redresseur MLI de tensions fonctionne en abaisseur de tension.

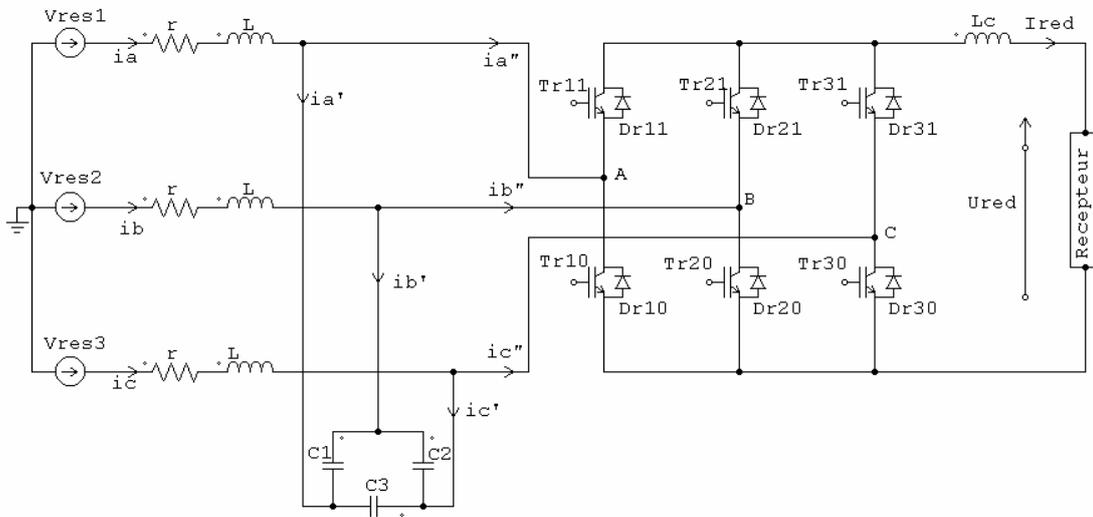


Figure (II-3) : Redresseur MLI de tension triphasé à deux niveaux.

II.5 MODELISATION DU REDRESSEUR MLI [1] :

La figure suivante présente le schéma unifilaire d'un pont de redresseur connecté au réseau, e est tension de la source et R, L sont les paramètres de la ligne, V est la tension d'entrée de redresseur.

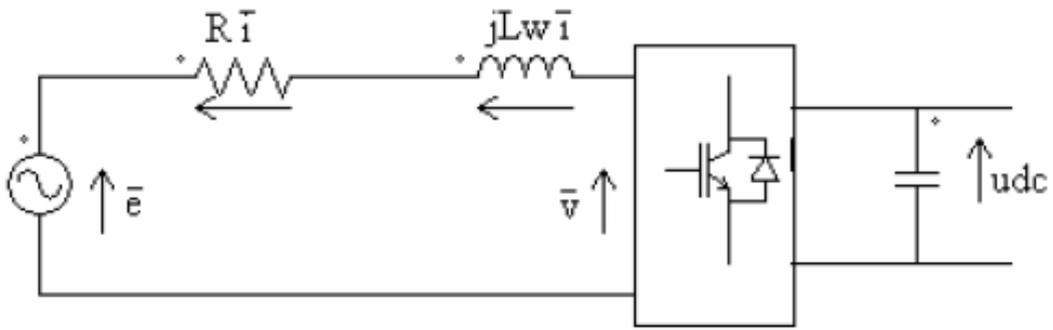


Figure (II-4) : schéma unifilaire d'un pont de redresseur connecté au réseau.

Le courant de ligne i est commandé par la chute de tension produite par l'inductance L , et la résistance R de la ligne et la tension d'entrée de redresseur V . Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors (thyristors) bipolaires antiparallèle avec des diodes

Figure II-5. Qui sont présentées comme des interrupteurs peuvent être commandées en ouverture '1' et en fermeture '0', et la tension d'entrée v est en fonction des états de ces interrupteurs.

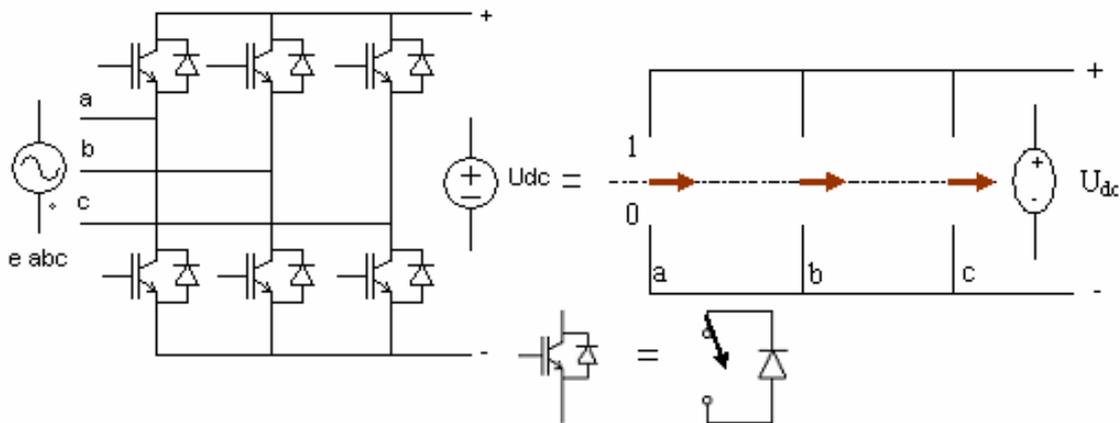


Figure (II-5) : Pont redresseur

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES REDRESSEURS MLI

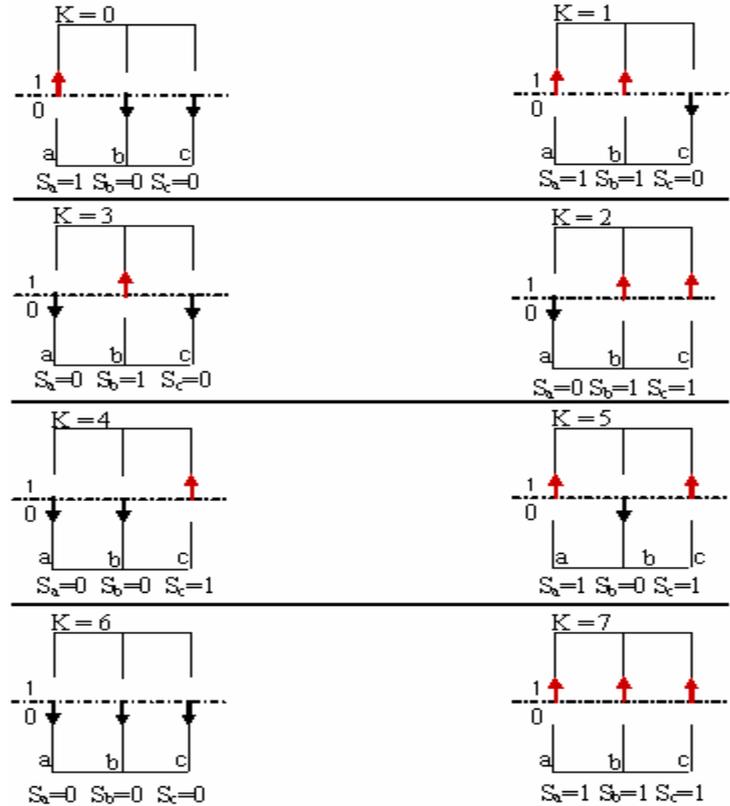


Figure (II-6) : Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI

K	S_a	S_b	S_c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
0	1	0	0	U_{dc}	0	$-U_{dc}$
1	1	1	0	0	U_{dc}	$-U_{dc}$
2	0	1	0	$-U_{dc}$	U_{dc}	0
3	0	1	1	$-U_{dc}$	0	U_{dc}
4	0	0	1	0	$-U_{dc}$	U_{dc}
5	1	0	1	U_{dc}	$-U_{dc}$	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

Tableau (II.1) : les huit états possibles des interrupteurs

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES REDRESSEURS MLI

De cette table on peut écrire la tension d'entrée redresseur d'une manière générale comme suit :

$$\begin{aligned}V_{ab} &= (S_a - S_b) U_{dc} \\V_{bc} &= (S_b - S_c) U_{dc} \\V_{ca} &= (S_c - S_a) U_{dc}\end{aligned}\tag{II.4}$$

D'où on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{aligned}V_a &= f_a U_{dc} \\V_b &= f_b U_{dc} \\V_c &= f_c U_{dc}\end{aligned}\tag{II.5}$$

Avec :

$$\begin{aligned}f_a &= \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} \\f_b &= \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} \\f_c &= \frac{2S_c - S_a - S_b}{3}\end{aligned}\tag{II.6}$$

On considère la relation (II.7) pour présenter les huit états possibles de la tension d'entrée V dans un plan complexe $\alpha\beta$ [1]:

$$v_{k+1} \begin{cases} (2/3) \\ v_7 = v_0 = 0 \end{cases} U_{dc} e^{-jk\pi/3} \text{ pour } k=0\dots5\tag{II.7}$$

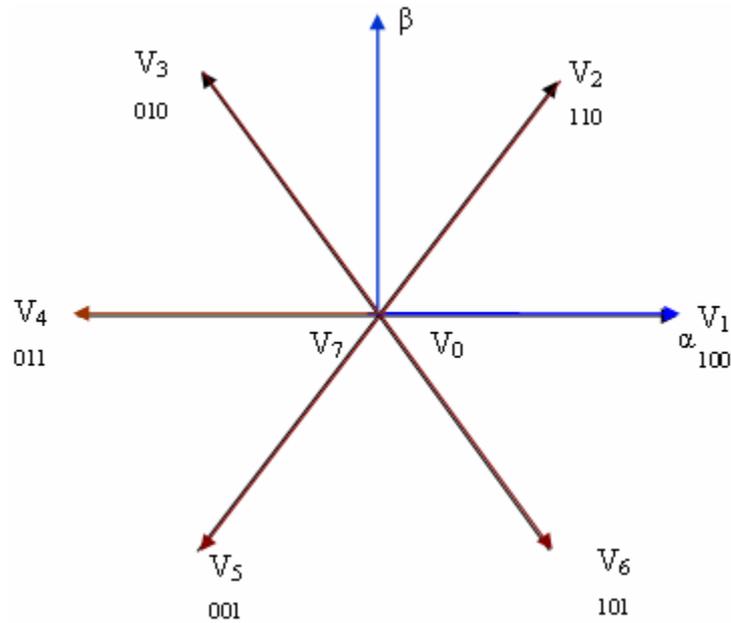


Figure (II-7) : présentations de vecteur de tension V_k

II.5.1 Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé

Les équations de tensions pour le système triphasé équilibré sans neutre peuvent être écrites comme Figure (II-4) :

$$\bar{e} = \bar{v}_1 + \bar{v} \quad (\text{II.9})$$

$$\bar{e} = \bar{R}i + L \frac{d\bar{i}}{dt} + \bar{v} \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Et la tension d'entrée du redresseur peut être écrite comme suit :

$$v_n = U_{dc} \left(S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad (\text{II.12})$$

Où $S_n=0$ ou 1 sont l'état des interrupteurs, où ($n=a, b, c$),

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_c \quad (\text{II.13})$$

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES REDRESSEURS MLI

Le courant dans la capacité peut aussi écrire

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (\text{II.14})$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (\text{II.15})$$

Aussi, le courant i_c est la somme du produit des courants de chaque phase par l'état de son interrupteur

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (\text{II.16})$$

Donc, le coté alternatif du redresseur

$$\begin{aligned} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a &= e_a - U_{dc} \left(S_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_a - U_{dc} \left(S_a - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b &= e_b - U_{dc} \left(S_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_b - U_{dc} \left(S_b - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c &= e_c - U_{dc} \left(S_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_c - U_{dc} \left(S_c - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \end{aligned} \quad (\text{II.17})$$

Où les tensions du réseau sont exprimé par

$$\begin{aligned} e_a &= E_m \sin wt \\ e_b &= E_m \sin \left(wt - \frac{2\pi}{3} \right) \\ e_c &= E_m \sin \left(wt + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

Le système d'équations (II.17) peut se résumer comme suit

$$\left(L \frac{d}{dt} + R \right) i_n = e_n - U_{dc} \left(S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad (\text{II.19})$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum_{n=a}^c i_n S_n - i_{ch} \quad (\text{II.20})$$

La combinaison des équations (II.18), (II.20) peut être représentée comme le schéma fonctionnel triphasé, qui montré dans la figure II.8.

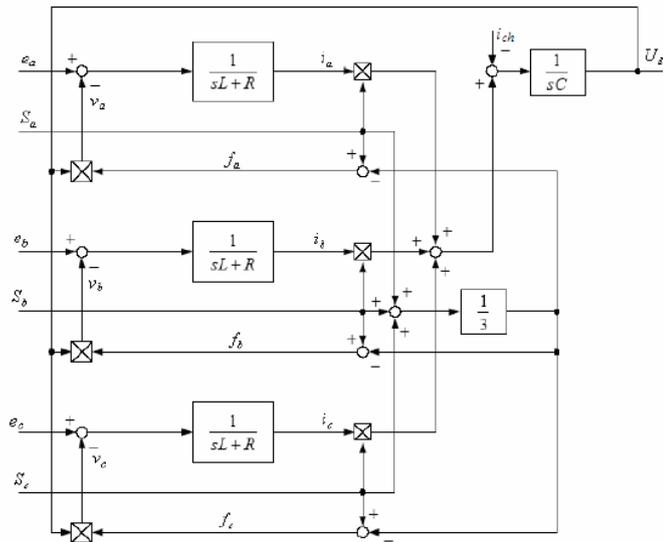


Figure (II-8) : Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans les coordonnées triphasées normales.

II.5.2 Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel fixe $\alpha\beta$.

Les équations de tensions dans le repère fixe $\alpha\beta$, sont obtenues par l'application des équations annexe (A.1), (II.7) et (II.15) et sont écrits comme :

$$Ri_\alpha + L \frac{di_\alpha}{dt} = e_\alpha - U_{dc} S_\alpha \quad (\text{II.21})$$

$$Ri_\beta + L \frac{di_\beta}{dt} = e_\beta - U_{dc} S_\beta \quad (\text{II.22})$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum_{k=\alpha}^{\beta} S_n i_n - i_{ch} = \frac{3}{2} (S_\alpha i_\alpha + S_\beta i_\beta) - i_{ch} \quad (\text{II.23})$$

Où :

$$S_\alpha = \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) ; S_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \quad (\text{II.24})$$

Un schéma fonctionnel dans le repère fixe $\alpha\beta$ est présenté dans la figure II.9.

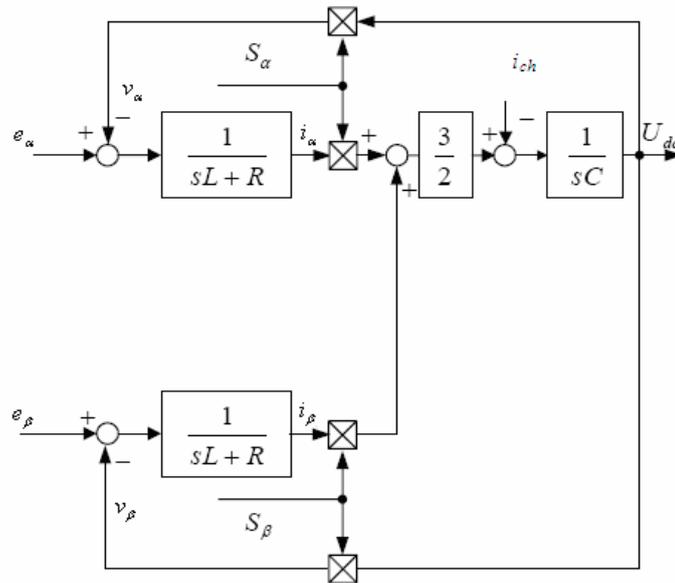


Figure (II-9) : Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans le système de coordonnées fixes $\alpha\beta$.

II.5.3 Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel tournant (dq)

Les équations dans le repère tournant $d-q$ sont obtenues à l'aide de la transformation de Park montre au annexe (A .1) :

$$e_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + \omega Li_q + v_d$$

$$e_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d + v_q$$

(II.25)

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} \sum_{k=d}^q S_n i_n - i_{ch} = (S_d i_d + S_q i_q) - i_{dc}$$

(II.26)

Où

$$S_d = S_\alpha \cos \omega t + S_\beta \sin \omega t ; S_q = S_\beta \cos \omega t - S_\alpha \sin \omega t$$

Un schéma fonctionnel dans le repère $d-q$ est présenté dans la figure II.10.

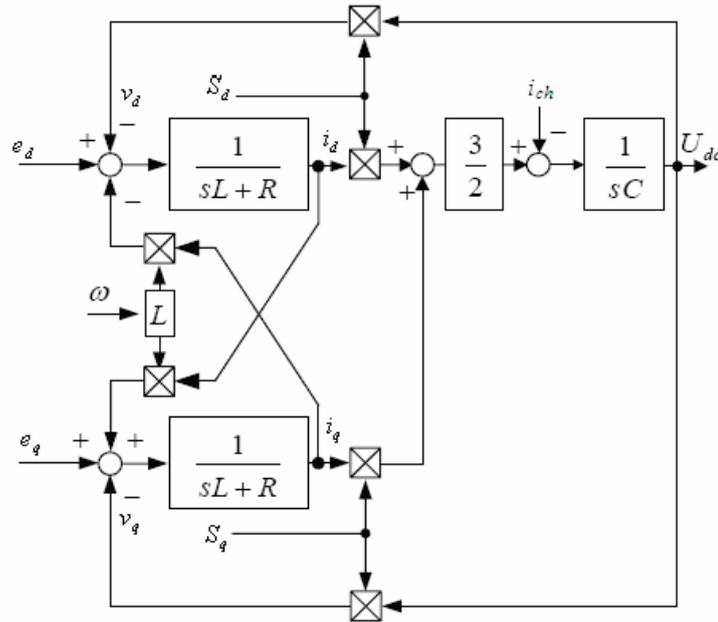


Figure (II-10) : Schéma fonctionnel du redresseur MLI de tension dans le référentiel tournant dq

II.6 LES TECHNIQUES DE COMMANDE MLI :

II.6.1 MLI à Bande d'hystérésis

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase.

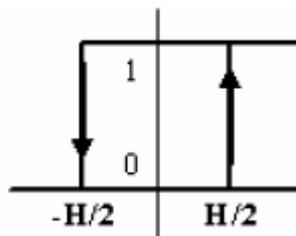


Figure (II-11) : principe de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis.

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la Figure II.11, l'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à $-H/2$, il se ferme si cette dernière est supérieure à $+H/2$, où H représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES REDRESSEURS MLI

maintenant comprise entre $-H/2$ et $+H/2$ (c à d, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas.

II.6.2 MLI à échantillonnage périodique

La méthode d'échantillonnage périodique permet aux semi-conducteurs constituant le filtre actif de commuter durant les transitions d'une horloge à onde carrée et à fréquence fixe (fréquence d'échantillonnage). Comme illustré à la Figure. II.12, ce type de commande est très simple à implanter dans la mesure où il ne nécessite qu'un comparateur et une bascule D type par phase. L'avantage principal de cette méthode est que le temps minimal entre les commutations est limité par la période d'échantillonnage de l'horloge. Cependant, la fréquence de commutation actuelle n'est pas clairement définie [12].

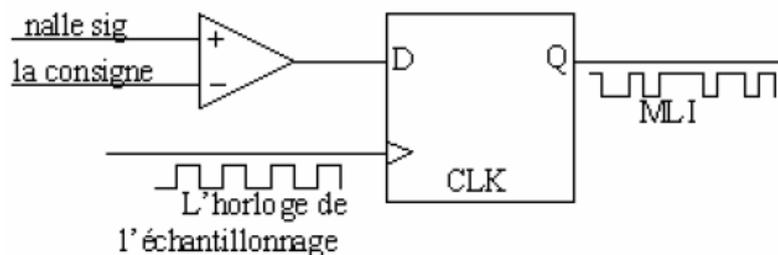


Figure (II-12) : Modulateur MLI à échantillonnage périodique.

II.6.3 MLI à porteuse triangulaire

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. L'erreur passe par un correcteur avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire.

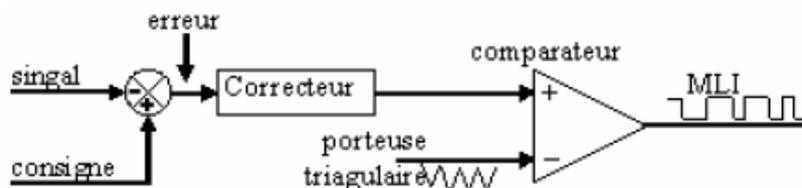


Figure (II-13) : Modulateur MLI à porteuse triangulaire.

II.6.4 MLI vectorielle

Dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et les temps d'application de ces vecteurs sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques. Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur.

La modulation vectorielle diffère, entre d'autres techniques par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de redresseur en même temps.

II.7 CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques une des techniques de commande des redresseurs MLI en se concentrant sur leurs principes de fonctionnement. Dans le prochain chapitre nous allons choisir deux commandes que nous allons étudier en détail avec une présentation des résultats de simulation obtenus.

CHAPITRE III :
ETUDE ET SIMULATION DE
DEUX COMMANDES D'UN
REDRESSEUR MLI

III.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons cité les différentes stratégies de commande utilisées pour les ponts redresseurs à commandés. Dans ce chapitre nous allons présenter en détail chaque partie constituant chacune des deux commandes que nous avons réalisées en simulation puis présenter les résultats de simulation obtenus.

III.2 COMMANDE A TENSION ORIENTE (VOC)

Le schéma synoptique de de la commande à tension orientée (VOC) d'un redresseur MLI est présenté sur la figure suivante :

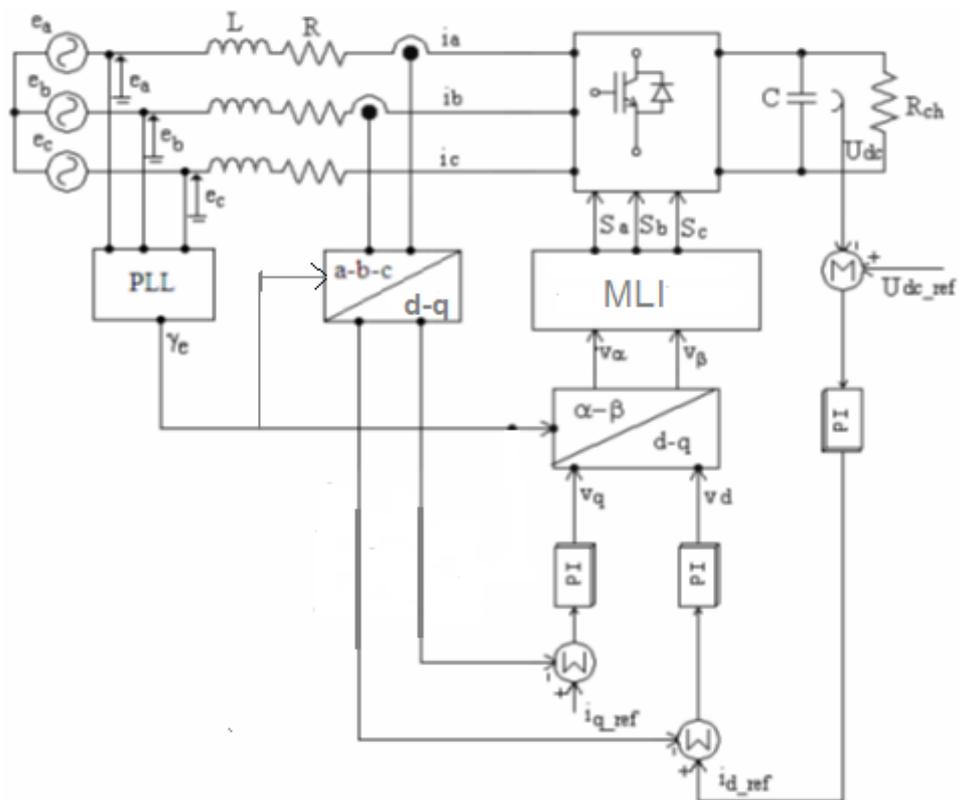


Figure (III-1) : Schéma fonctionnel de la commande à tension orientée (VOC).

Dans le système des coordonnées tournants ($d - q$), le vecteur courant du réseau \vec{i} a deux composantes perpendiculaire $\vec{i} = [i_d, i_q]$ (figure III.2) la composante i_q détermine la puissance réactive, tandis que i_d concerne au découlement de la puissance active. Ainsi les puissances réactive et active peuvent être commandées indépendamment.

CHAPITRE III : ETUDE ET SIMULATION DE DEUX COMMANDES D'UN REDRESSEUR MLI

La condition pour un facteur de puissance unitaire est obtenue quand le vecteur courant du réseau \vec{i} est aligné avec le vecteur tension du réseau \vec{e} , (figure II.2) en plaçant l'axe du système de coordonnées tournant sur le vecteur tension du réseau, un modèle dynamique simplifié peut être obtenu [14].

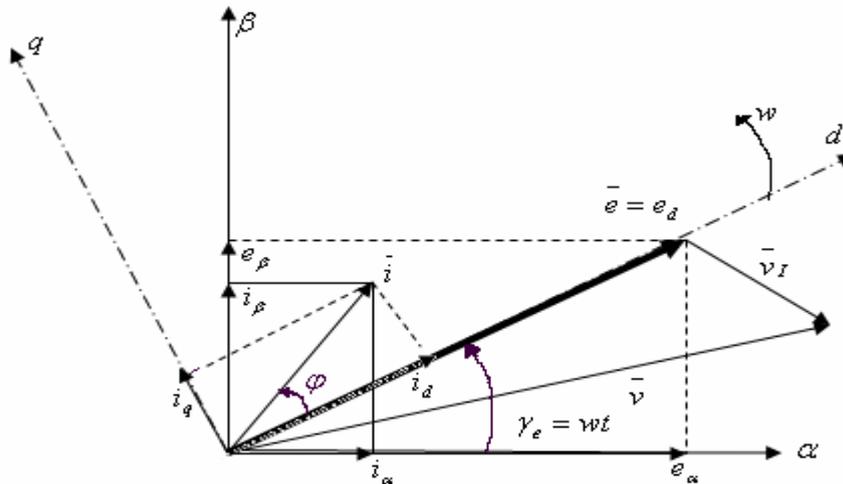


Figure (III-2) : Diagramme vectoriel pour le VOC

III.2.1 Boucle de régulation de tension du bus continu

Le modèle dynamique pour le circuit du bus continu aide sur le calcul de fonction de transfert de tension du bus continu, il est représenté par la figure III.4.

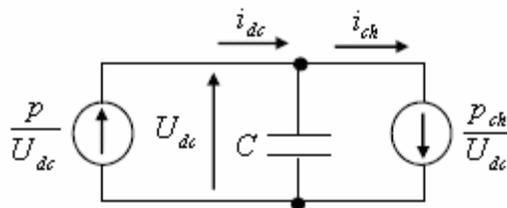


Figure (III-3) : Modèle dynamique pour le circuit du bus continu

La figure (III.4) représente le schéma fonctionnel pour la boucle de réglage de tension du bus continu :

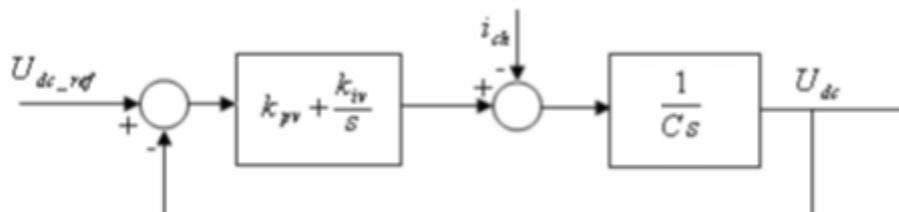


Figure (III-4) : Schéma fonctionnel pour la boucle de réglage de tension du bus continu.

Sachant que la fonction de transfert du régulateur *PI* est comme suite :

$$FT_{PI} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i S} \right) = K_P \left(\frac{1+T_i S}{T_i S} \right) \quad (III.1)$$

Et que la fonction de transfert de notre système est égale à :

$$G(s) = \frac{1}{R+L.S} = \frac{K}{1+T.s} \quad (III.2)$$

Avec $T = L/R$

Alors en utilisant la méthode de compensation de pôles pour : $G(s) = \frac{K/T}{1/T+S}$

Ce qui donne la fonction de transfert en boucle ouverte :

$$FTBO = \frac{K/T}{1/T+S} \cdot K_P \left(\frac{1+T_i S}{T_i S} \right) \quad (III.3)$$

Et la fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{\frac{Kp}{L}S + \frac{Kp}{LT_i}}{S^2 + \frac{(R+Kp)}{L}S + \frac{Kp}{LT_i}} \quad (III.4)$$

Par identification avec la fonction de transfert du second ordre qui est fonction de ξ et w_n donnée comme suite :

$$FTBF = \frac{2w_n \xi S + w_n^2}{S^2 + 2w_n \xi S + w_n^2} \quad (III.5)$$

Donc

$$Kp = 2\xi w_n \quad (III.6)$$

$$Ki = w_n^2 \quad (III.7)$$

III.2.2 Etude de la boucle des courants du coté alternatif

L'utilisation, des correcteurs PI dans un repère triphasé, présente des problèmes d'application. En effet, des composantes alternatives se retrouvent dans les erreurs à l'entrée des correcteurs PI. Ces grandeurs alternatives sont à l'origine d'erreurs statiques non compensées par les correcteurs PI. Pour résoudre ce problème, des transformées de Park dont le repère qui tourne à la fréquence des tensions du réseau sont utilisées. Ainsi les variables alternatives des courants sont transformées en composantes d'axe *d* et *q* continus dès lors que ces signaux ont la même

CHAPITRE III : ETUDE ET SIMULATION DE DEUX COMMANDES D'UN REDRESSEUR MLI

fréquence que le réseau. Cela exige la connaissance de l'angle de référence des tensions du réseau sera nécessaire pour le calcul des transformées [15].

Cependant, il y a un couplage entre les axes de la transformation de Park., donc une variation sur i_d provoque une variation sur i_q et l'inverse.

Les équations de tension dans le système de coordonnées tournant ($d-q$) sont :

$$e_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + v_d - \omega Li_q \quad (\text{III.8})$$

$$e_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + v_q + \omega Li_d$$

Le découplage entre l'axe d et q est réalisé par le variable h_d et h_q :

$$h_d = e_d - \omega Li_q - v_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} \quad (\text{III.9})$$

$$h_q = e_q - \omega Li_d - v_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt}$$

Où h_d et h_q sont les signaux de sortie des régulateurs de courant

Le système d'état découplé est présenté donc, par :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_d \\ h_q \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

Il est possible de commander indépendamment les composants du courant i_d et i_q par action sur h_d et h_q , ainsi, il est simple de dimensionner les régulateurs.

La figure III.5 présente le schéma fonctionnel pour le réglage du courant.

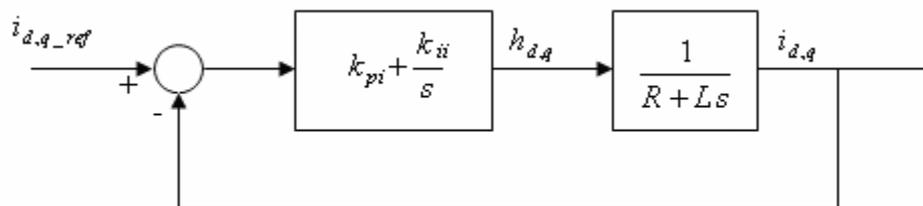


Figure (III-5) : Schéma fonctionnel pour le réglage du courant.

Dans ce cas, les contrôleurs de courants utilisés, sont de type PI. Les paramètres K_p et K_i sont calculés en fonction de temps de réponse et le coefficient d'amortissement.

Donc la fonction de transfert en boucle fermée de ce système s'écrit :

$$\frac{i_d}{i_{dref}} = \frac{i_q}{i_{qref}}$$

CHAPITRE III : ETUDE ET SIMULATION DE DEUX COMMANDES D'UN REDRESSEUR MLI

$$FTBF = \frac{k_p}{L} \frac{S + \frac{k_i}{k_p}}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \quad (\text{III.11})$$

Donc :

$$K_{pi} = 2\xi\omega_n L - R \quad (\text{III.12})$$

$$K_{ii} = L\omega_n^2 \quad (\text{III.13})$$

Où $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$ et ω_n dépend de temps de repense choisi

On prend $\omega_n = \omega_c / 5$, pour obtenir une régulation interne rapide [16].

Où $\omega_c = 2\pi f_c$ la pulsation de commutation.

f_c : Fréquence de commutation

III.2.3 Résultats de simulation

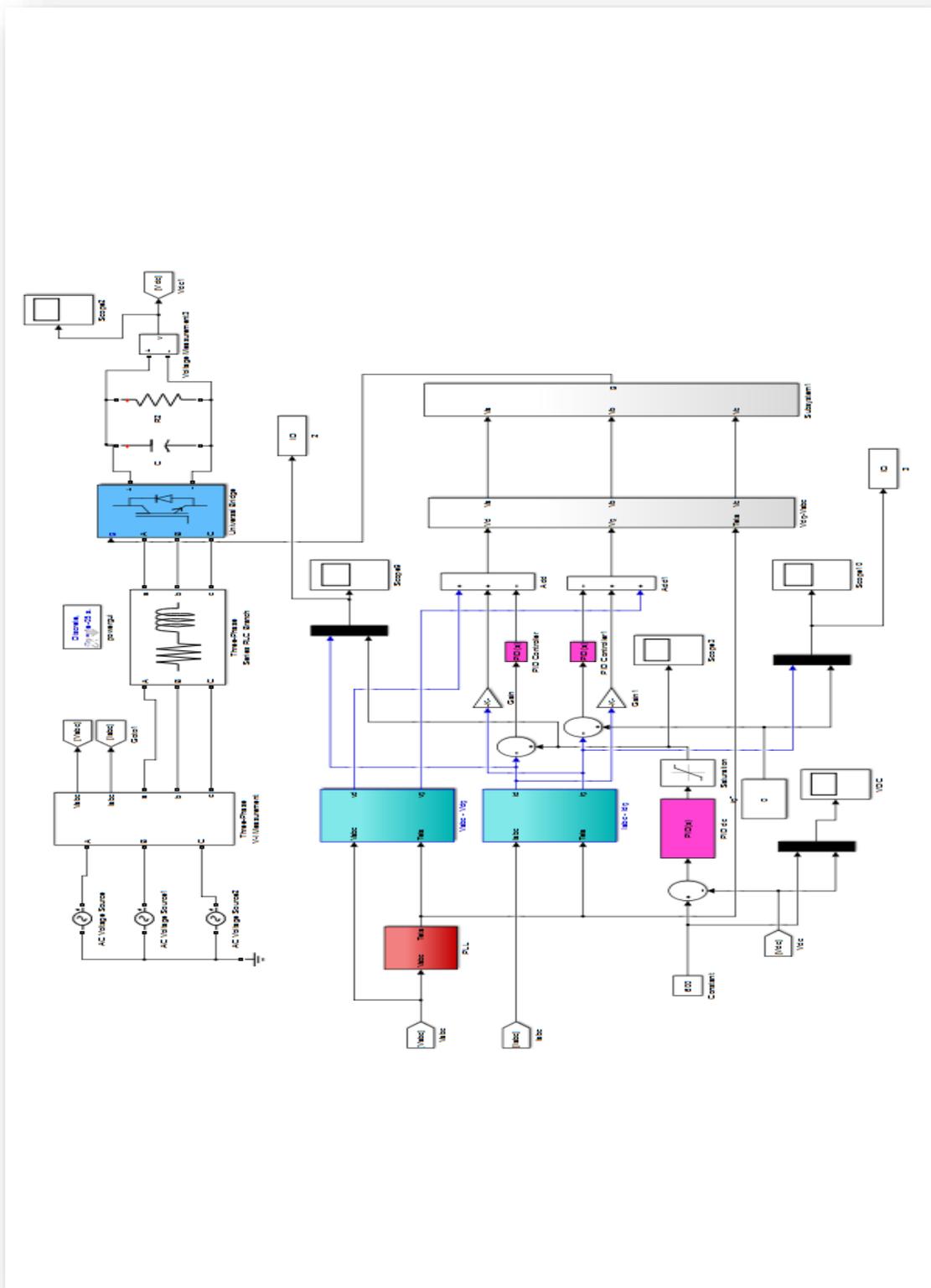


Figure (III-6) Schéma de simulation

CHAPITRE III : ETUDE ET SIMULATION DE DEUX COMMANDES D'UN REDRESSEUR MLI

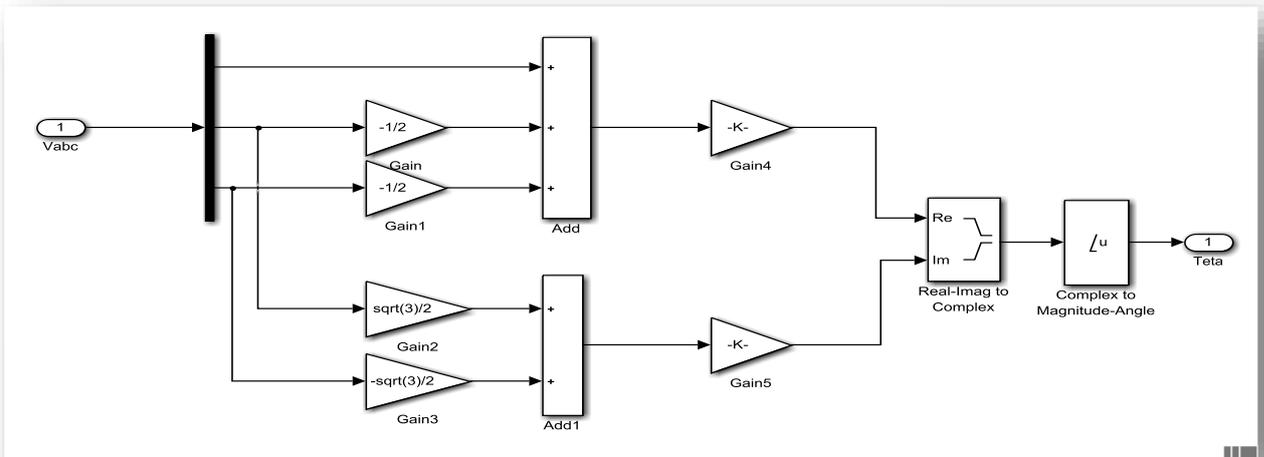


Figure (III-7) Bloc PLL

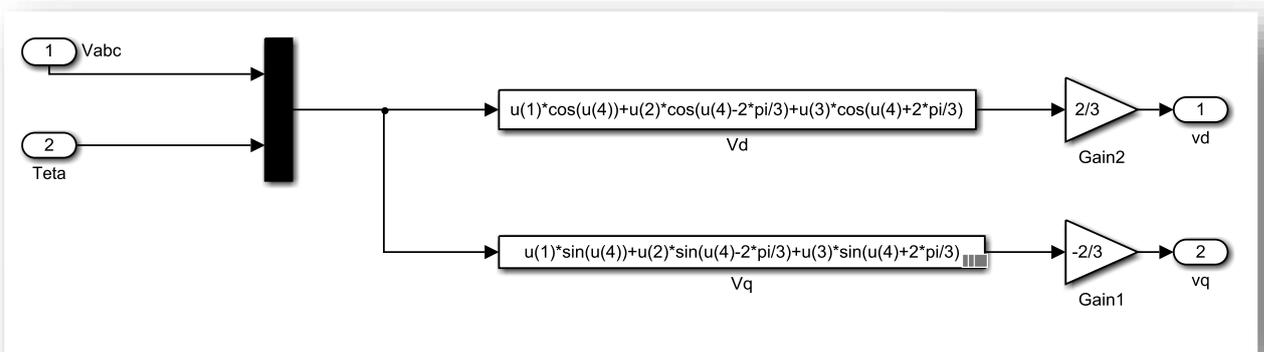


Figure (III-8) Bloc de transfer Vabc-Vdq

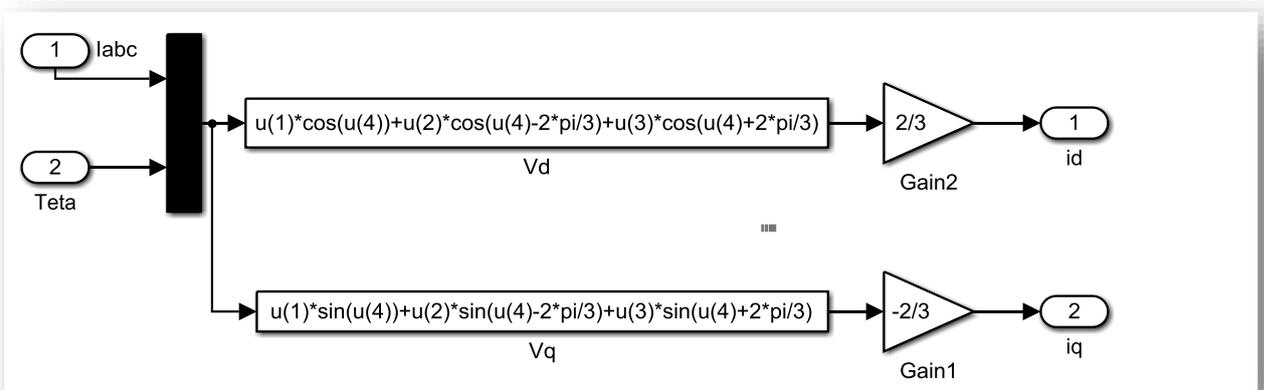


Figure (III-9) Bloc de transfer Iabc-Idq

CHAPITRE III : ETUDE ET SIMULATION DE DEUX COMMANDES D'UN REDRESSEUR MLI

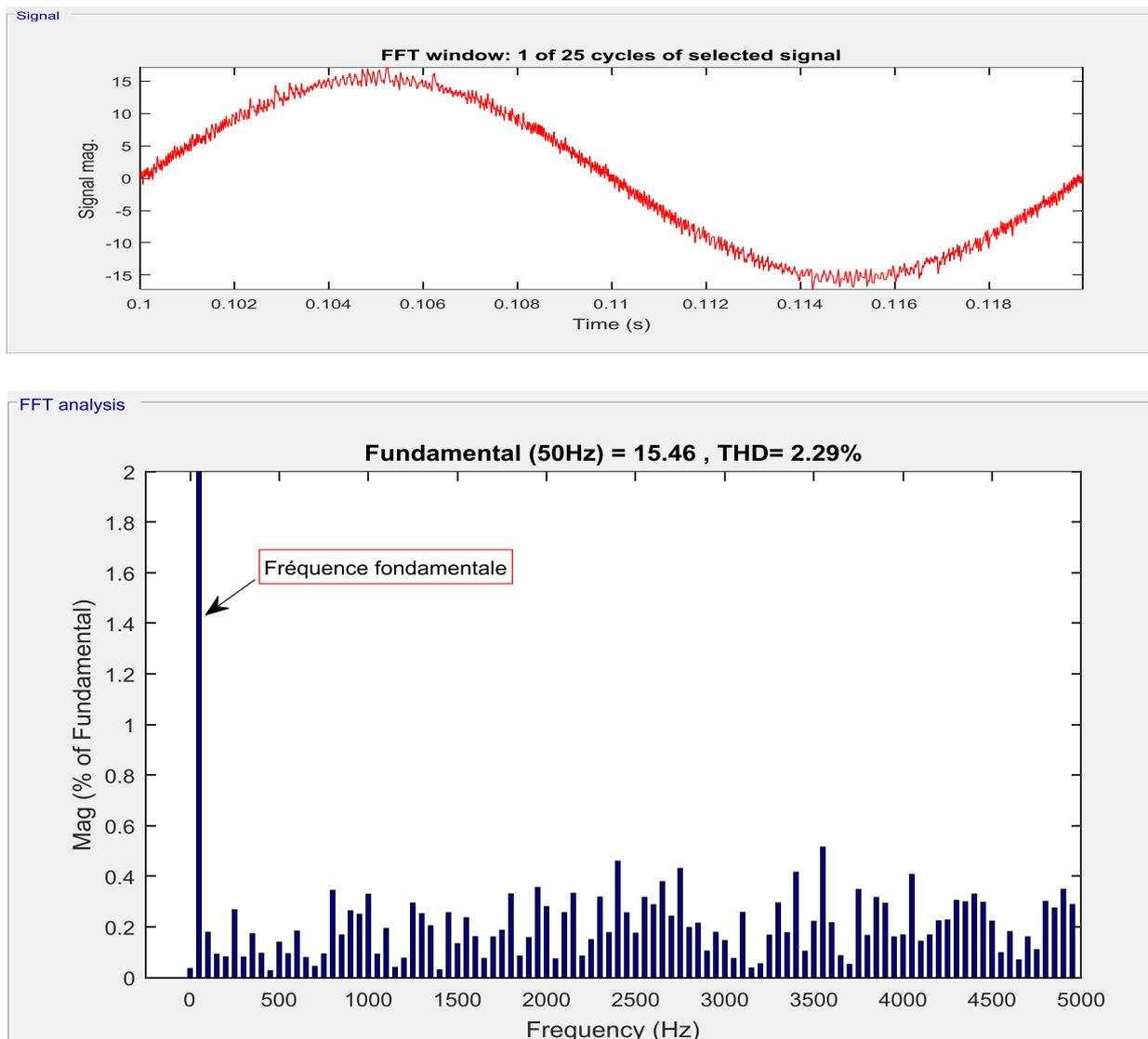


Figure (III-10) Spectre harmonique pour le courant du réseau i_a

On remarque sur la figure III.10, Le THD du courant est de 2.29% et représente une valeur acceptable.

CHAPITRE III : ETUDE ET SIMULATION DE DEUX COMMANDES D'UN REDRESSEUR MLI

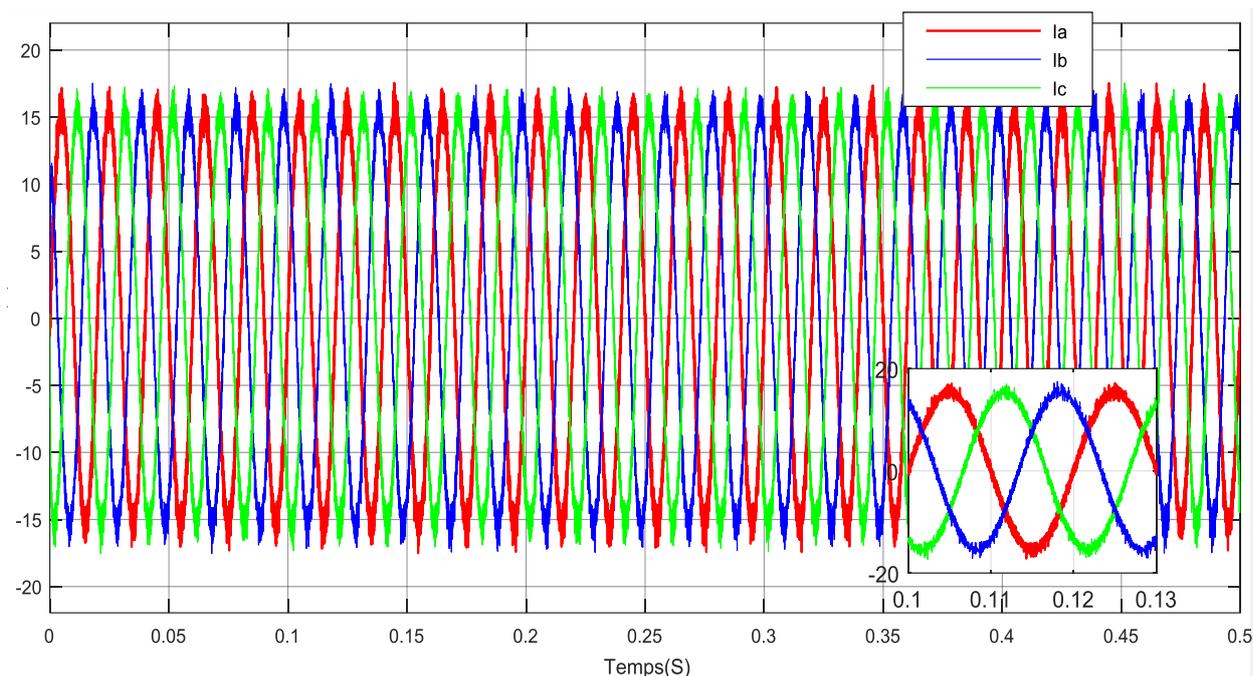


Figure (III-11) Représentation du courant I_{abc}

On remarque sur la figure III.11 l'allure des courants nous donne des courants sinusoïdaux.

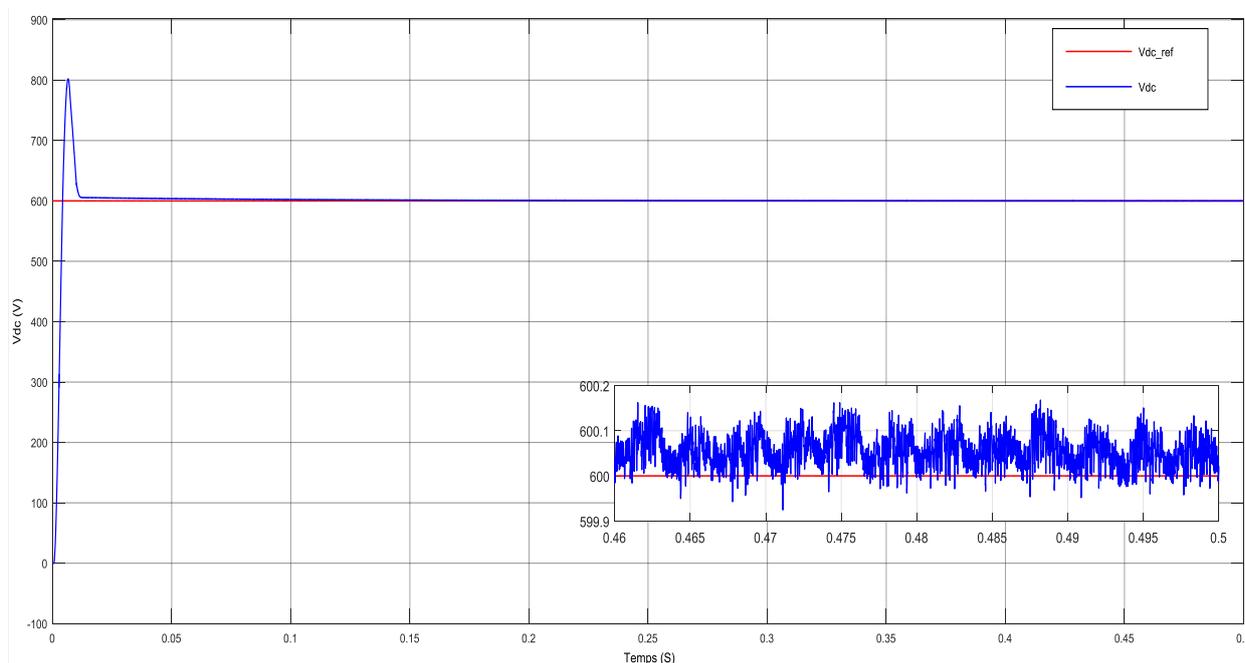


Figure (III-12) Allure de la tension aux bornes du bus continu V_{dc}

On remarque sur la figure III.12 que la de tension de bus continu, présente un léger dépassement, puis se stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande.

CHAPITRE III : ETUDE ET SIMULATION DE DEUX COMMANDES D'UN REDRESSEUR MLI

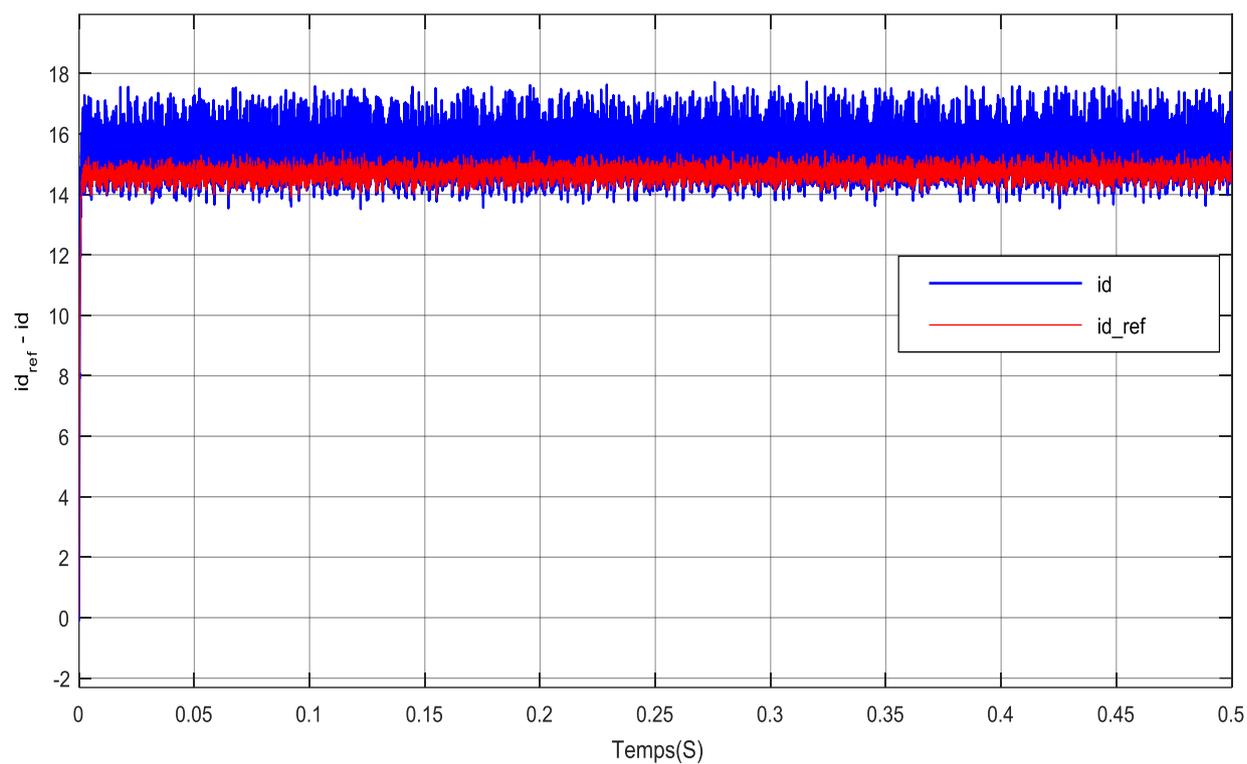


Figure (III-13) Allure de courant I_d et I_{d_ref}

On remarque sur la figure III.13 que le courant I_d suit le courant de référence I_{d_ref} .

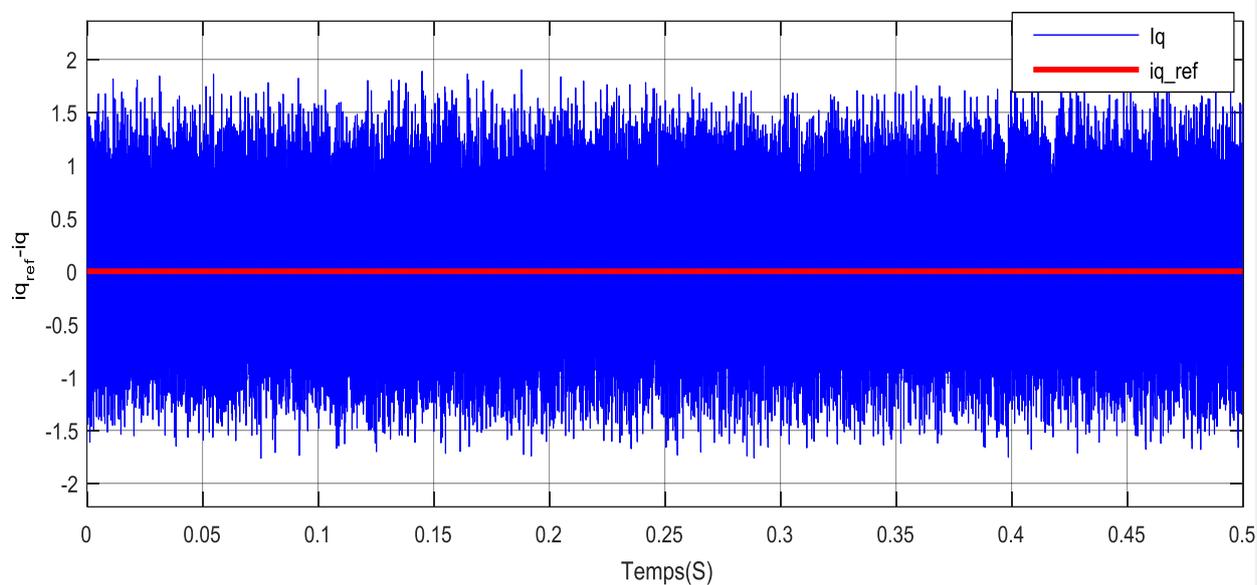


Figure (III-14) Allure de courant I_q et I_{q_ref}

On remarque sur la figure III.14 que le courant I_q suit le courant de référence I_{q_ref} .

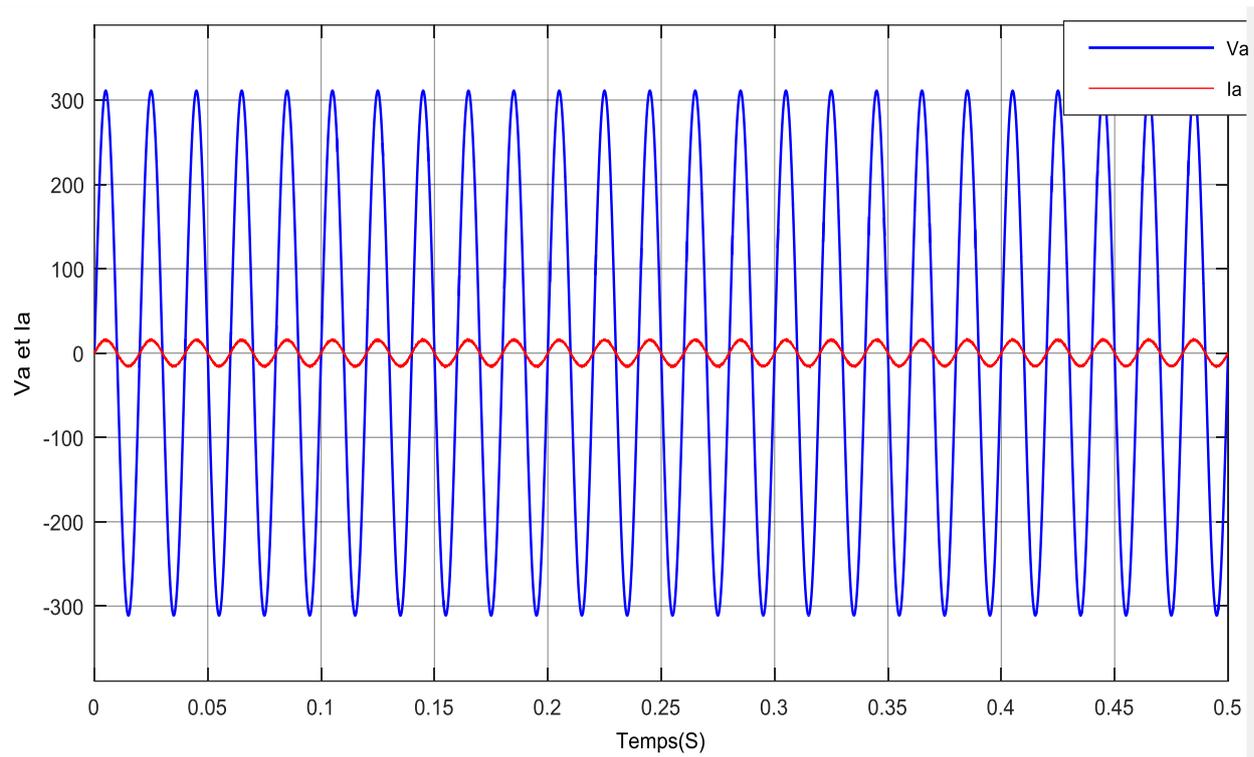


Figure (III-15) Allure de courant de phase et la tension

On remarque sur la figure III.15 le courant de phase et la tension sont en phase et ont une forme sinusoïdale.

III.3. COMMANDE EN COURANT

III.3.1 Configuration des circuits de contrôle

Le contrôle de la tension continue U_{dc} exige une boucle d'asservissement fermée. la tension continue U_{dc} est mesuré est comparé à une référence et le signal d'erreur obtenu à partir de cette comparaison est employé pour produire un forme d'onde pour la référence du courant. La référence devrait être une forme d'onde sinusoïdale avec la même fréquence que la tension d'entrée.

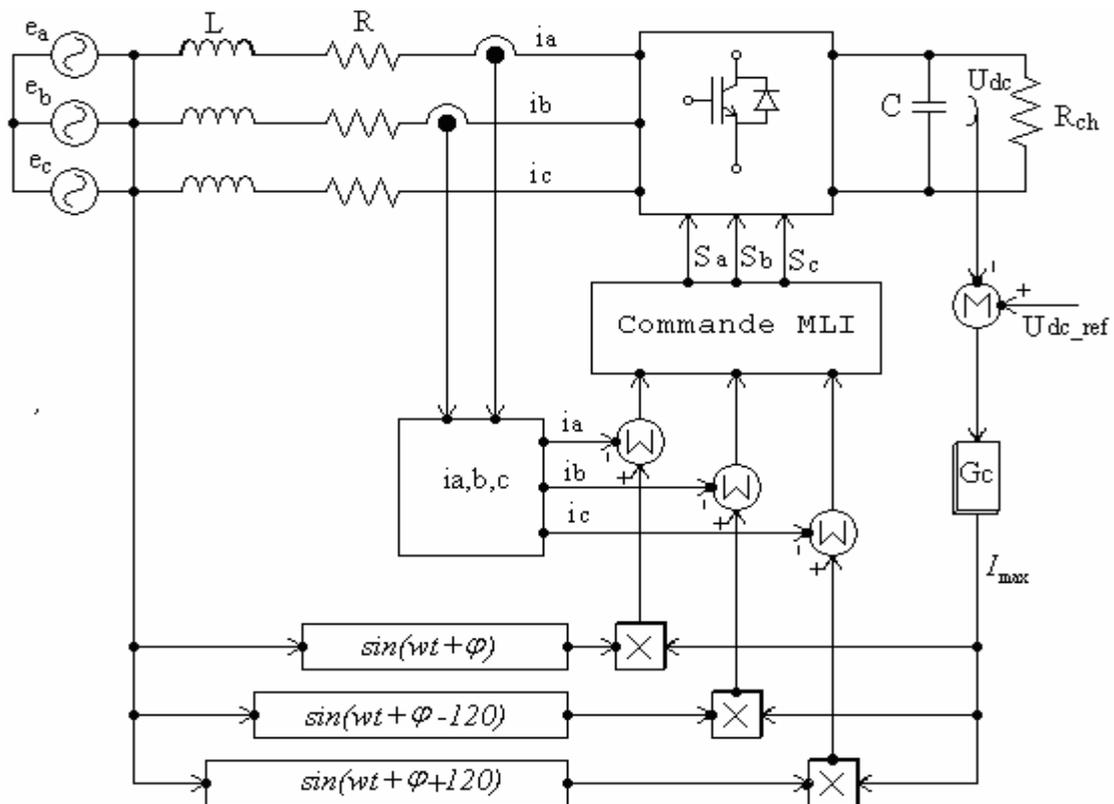


Figure (III-16) La commande du redresseur MLI.

Cette méthode de contrôle est montrée dans la figure III.16. Le contrôle est réalisé par la mesure des courants instantanés des phases i_a , i_b et i_c . En les forçant pour suivre des courants de référence sinusoïdaux i_{ref} . L'amplitude de la référence du courant I_{max} est évaluée par la sortie d'un régulateur de tension du bus continu selon l'équation suivante :

$$I_{max} = G_c \cdot (U_{dc_ref} - U_{dc}) \quad (III.14)$$

Où G_c est représenté un correcteur de type PI.

La forme d'onde sinusoïdale de la référence du courant est obtenue en multipliant I_{max} avec une fonction sinus, de même fréquence de la source, et avec angle de déphasage ($\varphi = 0$) désiré. De plus, la référence doit être synchronisée avec la source d'alimentation. Une fois que, la référence a été créée, la commande MLI est produite, par le régulateur utilisé, pour commuter les interrupteurs.

III.3.2 Résultats de simulation

Le redresseur MLI a été étudié par simulation sous Matlab/Simulink selon le schéma de la figure III.11, le courant a été commandé dans le repère abc par régulateurs à hystérésis.

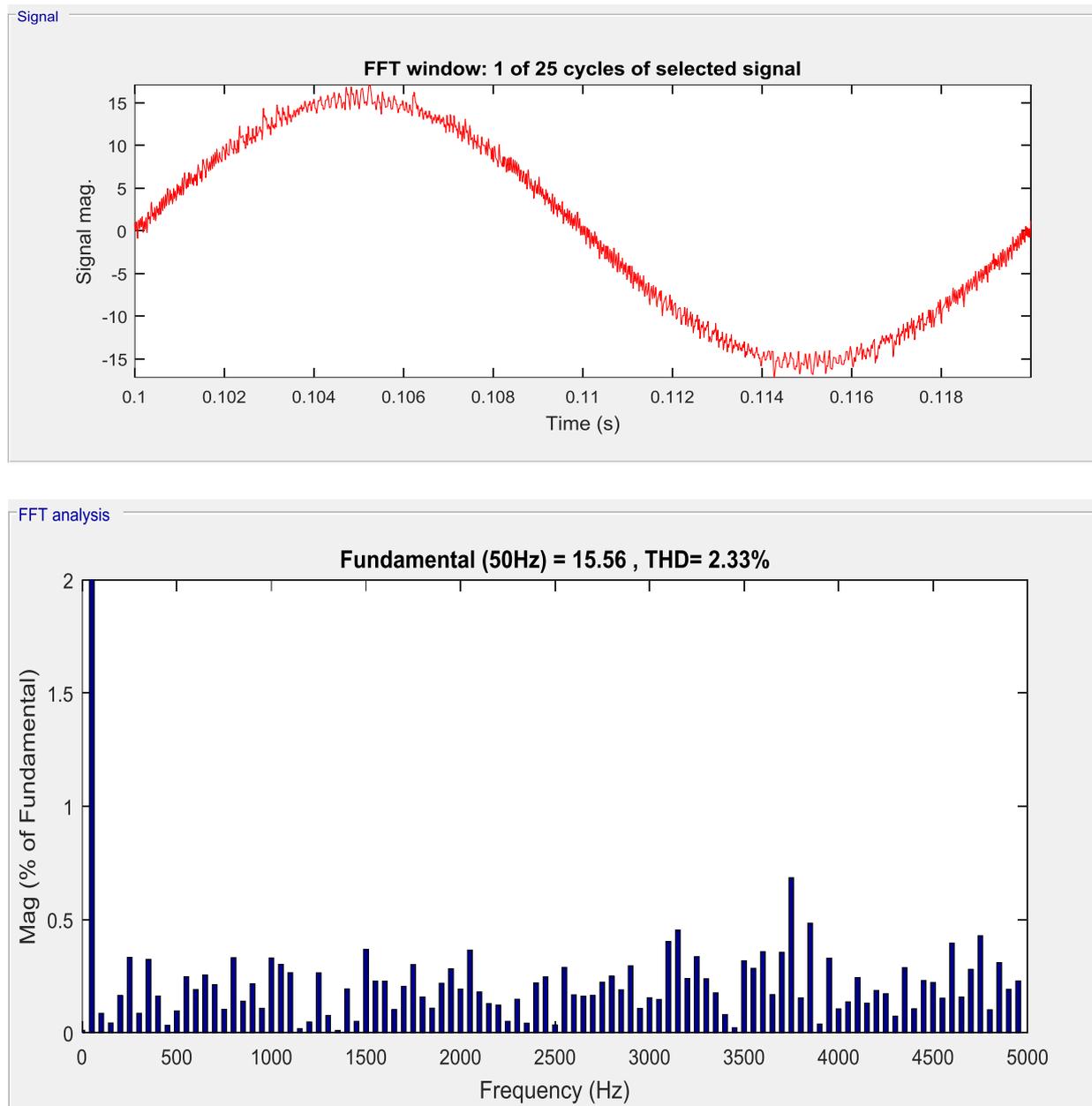


Figure (III-17) Spectre harmonique pour le courant du réseau i_a

On remarque sur la figure III.17, Le THD du courant est de 2.33% et représente une valeur acceptable.

CHAPITRE III : ETUDE ET SIMULATION DE DEUX COMMANDES D'UN REDRESSEUR MLI

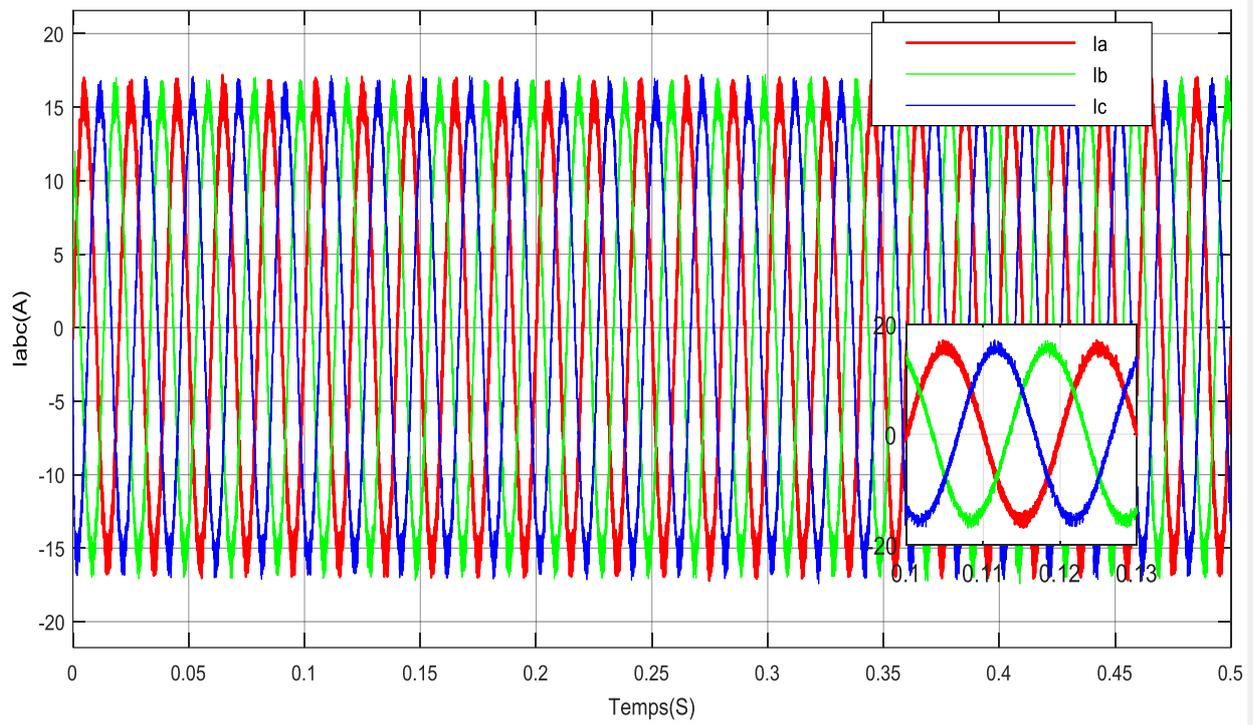


Figure (III-18) Représentation du courant I_{abc}

On remarque sur la figure III.18 l'allure des courants nous donne des courants sinusoïdaux.

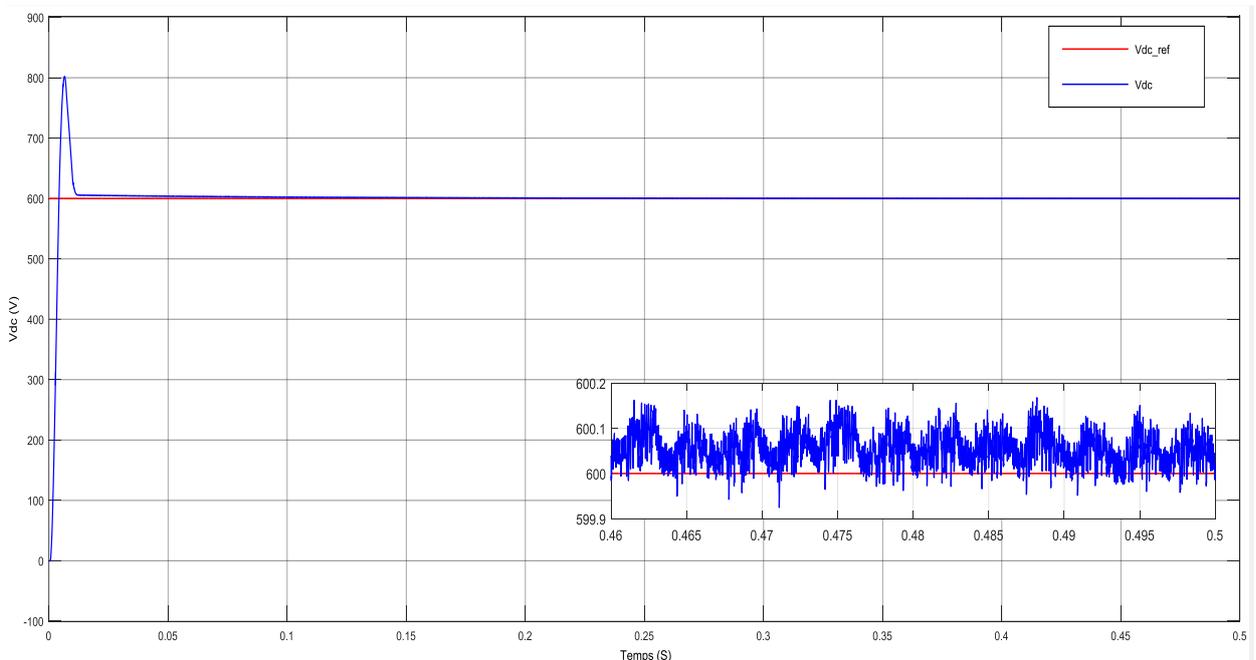


Figure (III-19) Tension de bus continue

On remarque sur la figure III.19 que la de tension de bus continu, présente un léger dépassement, puis se stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande.

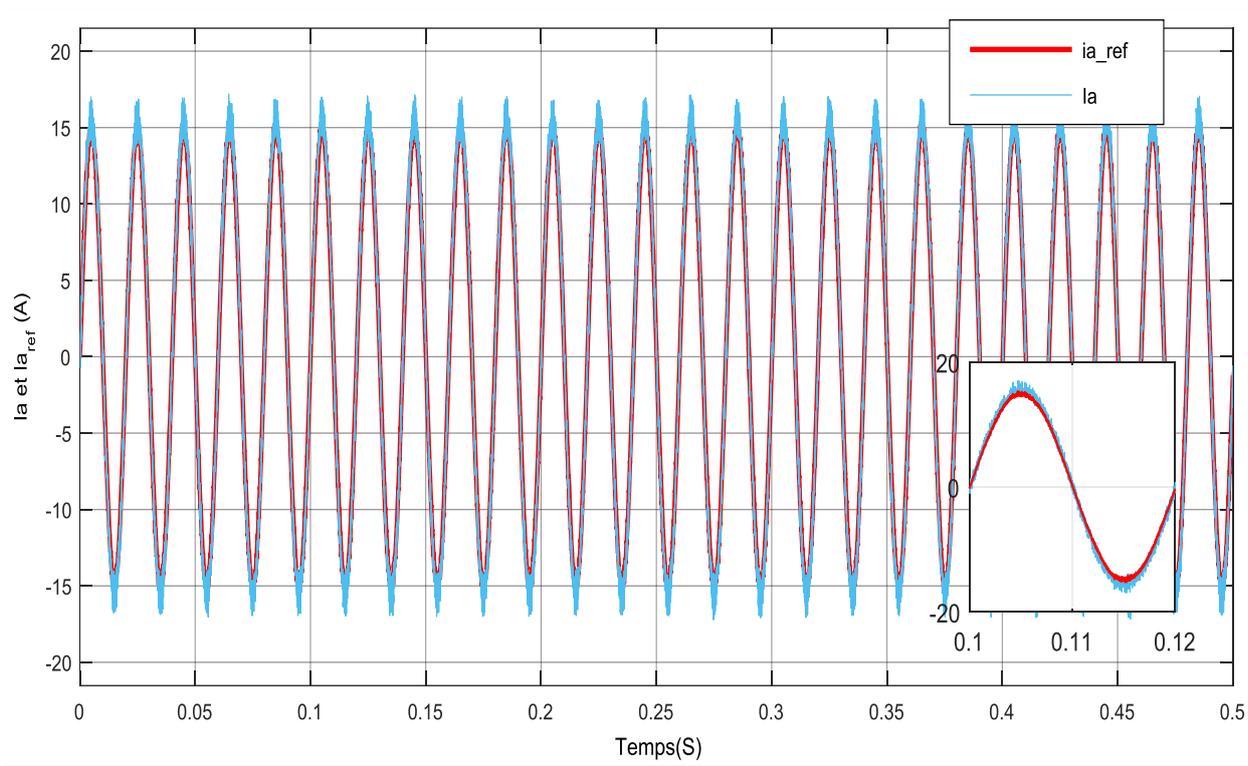


Figure (III-20) Allure de courant I_a et I_{a_ref}

On remarque sur la figure III.20 que le courant I_a suit le courant de référence I_{a_ref} avec une forme sinusoïdale.

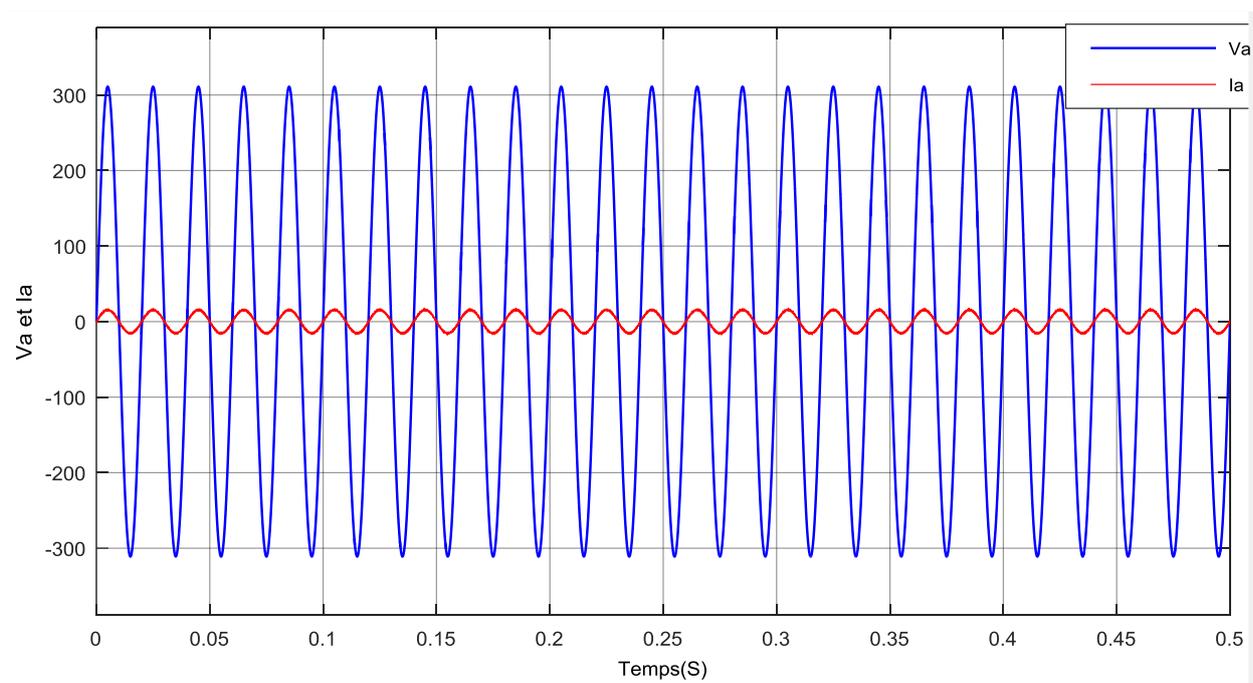


Figure (III-21) Allure de courant de phase et la tension

CHAPITRE III : ETUDE ET SIMULATION DE DEUX COMMANDES D'UN REDRESSEUR MLI

On remarque sur la figure III.21 le courant de phase et la tension sont en phase et ont une forme sinusoïdale.

III.4 Comparaison des deux commandes

Nous remarquons des simulations que les courants à l'entrée du pont redresseur donnent de moins bon résultats que la commande *VOC* malgré une tension aux bornes du bus continu qui est constant.

$$\text{THD (VOC)} < \text{THD (courant)}$$

<i>Techniques</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<i>VOC</i>	<ul style="list-style-type: none">❖ Filtre d'entrée de conception plus facile❖ Stratégies avancées de PWM peuvent être utilisés	<ul style="list-style-type: none">❖ Transformation de coordonnées et de découplage entre les composants actives et réactives est requise❖ Algorithme complexe
<i>Commande de courant</i>	<ul style="list-style-type: none">❖ réponse dynamique rapide❖ bonne précision❖ robustesse	<ul style="list-style-type: none">❖ Fréquence de commutation variable

Tableau (III-1) Les Avantages et les Inconvénients

III.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons étudié en détail chaque partie constituant les commandes *VOC* et en courant. Nous avons montré avec les simulations que la commande *VOC* donne les meilleurs résultats.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressées à étudier les différentes topologies et les circuits de commandes des ponts redresseurs à *IGBT* et/ou *MOSFET*. La raison de ce choix est due au fait qu'il présente des avantages, à savoir une commande en tension, une réversibilité en puissance et la possibilité de minimiser les harmoniques de courants, car comme nous le savons les ponts redresseurs sont en général considérés comme des charges non linéaires. De plus, les commandes ont été étudiées toutes des commandes numériques car ces dernières années les microcontrôleurs (*PIC* ou *DSPIC*) et *DSP* ont énormément évolué et leurs puissances de calcul ont également été améliorées. Cela a permis de développer des algorithmes plus compliqués qui seront facilement implémentables.

Ainsi, dans notre premier chapitre nous avons étudié les origines des perturbations électriques et leur effet sur les réseaux électriques. Puis, nous présentons les solutions classiques utilisées pour limiter cette pollution. Finalement, nous étudions les compensateurs actifs des harmoniques comme nouvelle solution qu'on peut utiliser dans de nombreux cas. Ensuite, nous avons présenté le second chapitre, ce chapitre porte sur la description des différentes commandes existant pour la commande des ponts redresseurs MLI, telles que l'échantillonnage périodique, la Bande d'hystérésis, la porteuse triangulaire, la commande en courant, la commande *VOC* et en courant. Dans le dernier chapitre, nous avons choisi de faire une étude détaillée des commandes *VOC* et en courant, en présentant les détails de chaque partie constituant ces commandes. Nous avons également présenté le calcul des régulateurs *PI* et que nous avons utilisé. Les simulations que nous avons réalisées avec les toolboxes *Simulink* et *SimPowerSystem* de *MATLAB* nous ont montré que la commande *VOC* discrète donne les meilleurs résultats par rapport aux autres commandes que nous avons étudiées.

Annexes

A.1 TRANSFORMATION DE COORDONNEES abc- $\alpha\beta$ et $\alpha\beta$ -dq

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}$$

A.2 Paramètres de Simulation

Condensateur du bus continu	C	1500e-6	F
Résistance du filtre de connections	r	0.05	Ω
Inductance du filtre de connections	L	2e-3	H
Tension du bus continu	Vdc	600	V
Résistance de charge	R	50	Ω
Tension efficace du réseau	e	$220\sqrt{2}$	V
Fréquence de tension du réseau	f	50	Hz

Bibliographie

- [1] **M. Alaa Eddin Alali** : « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension » thèse de doctorat l'Université Louis Pasteur – Strasbourg 2002
- [2] **P.Meynaud** : « Qualité de la tension dans les réseaux électrique – creux de tension, flicker et harmonique », Technique de l'ingénieur, traité génie électrique, D4260, pp.125, 1990.
- [3] **D.ould Abdeslam** : « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électrique, Application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électrique basse tension » Thèse de doctorat de l'université de HAUTE-ALSACE.
Décembre 2005.
- [4] **S. Nia Ahmed** : « Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Lorraine, 1996.
- [5] **G. Olivier** : « Electrotechnique », Presse Internationale Polytechnique, 2ème édition, 1999.
- [6] **M. Shafiee Khood** : « Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques », Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [7] **L. Benchaita** : « Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle – commande », Thèse de docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.
- [8] **D. Rivas, L. Moran, J. W. Dixon, J. R. Espinoza** : « Improving passive filter compensation performance with active techniques », IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 50, no. 1, pp. 161-170, Feb. 2003.
- [9] **C. Lotto, O. Lapierre, H. Pouliquen et S. Saadate** : « Filtrage actif des harmoniques en courant et en tension des réseaux électriques : Modélisation, Simulation numérique et expérimentation », Journal Physique III France, pp. 1433-2457, Dec. 1997.
- [10] **Guy Séguier** : « Electronique de puissance : Les fonctions de base et leurs principales Applications » 7eme édition Dunod 1999.
- [11] **P.Ladoux, G.Ollé** : « Compensation d'harmonique et de puissance réactive », publication Reselec 2002.

- [12] **M.Abdelmalek BOULAHIA** « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique », Thèse de magister en électrotechnique .Université de Constantine, Avril, 2009.
- [13] **C.BENHABIB** : « Improved Phase Locked Loop for Utility Grid Applications ».
- [14] **R. José, W. Juan.** « PWM Regenerative Rectifiers : State of the Art ». IEEE Trans. On Ind. Electronics, vol.52, pp.5-22, no. 1, February 2005.
- [15] **M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, F. Blaabjerg** : « Control in Power Electronics : Selected Problems ». Academic Press. 2002.
- [16] **S.L. SANJUAN.** « Voltage Oriented Control of Three-Phase Boost *PWM* Converters Design, simulation and implementation of a 3-phase boost battery charger ».
- [17] **P. Verdelho, G. D. Marques.** “DC Voltage Control and Stability Analysis of PWM Voltage Type Reversible Rectifiers”. IEEE Trans. on ind. Electronics, vol. 45, no. 2, pp .263- 273. April 1998.

Résumé

Le travail effectué dans cette mémoire présente l'étude de deux commandes numériques d'un pont redresseur à *IGBT*. Nous avons tout d'abord présenté les différentes stratégies de commandes pour le pont redresseur MLI, telles que l'échantillonnage périodique, la Bande d'hystérésis, la porteuse triangulaire, la commande en courant et la commande *VOC*. Puis une étude détaillée de la commande *VOC* et en courant ont été présentées. Nous avons terminé par une présentation des résultats de simulation de la commande *VOC* et la commande en courant dont la commande *VOC* donnée les meilleurs résultats avec une amélioration de la qualité du courant et de la tension.

Mots clés : IGBT, VOC, MLI

ملخص

يعرض العمل المنجز في هذه المذكرة دراسة عن التحكم الرقمي لمحول كهربائي (*IGBT*). حيث سنقوم أولاً بتقديم مختلف طرق التحكم بالمقوم الكهربائي (*MLI*) مثل التحكم في الحلقة التراجعية، التحكم في التيار المستمر، و التحكم *VOC*. ثم قدمت دراسة مفصلة عن التحكم *VOC* و التيار. ثم أنهينا هذا العمل بتقديم نتائج المحاكات للتحكم *VOC* والتحكم في التيار، حيث التحكم *VOC* يعطي أفضل النتائج مع تحسين جودة التيار والتوتر.

الكلمات المفتاحية : IGBT, VOC, MLI