

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث 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 électriques**

Réf:.....

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

MASTER

Thème

Etude et simulation des différents montages
redresseurs

Présenté par :

Houili Mouhamed

Hamza SidAli

Soutenu le : Septembre 2020

Devant le jury composé de :

Mr Ben Alia Khaled

Pr

Président

Mr Golea Amar

Pr

Encadreur

Mr Benchouia Mohamed Toufik

Pr

Examineur

Année universitaire: 2019 / 2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث 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 électriques**

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

MASTER

Thème

Etude et simulation des différents montages redresseurs

Présenté par :

Houili Mouhamed

Hamza SidAli

Avis favorable de l'encadreur :

Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث 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 électriques**

Thème :

Etude et simulation des différents montages redresseurs

Proposé par : **Golea Amar**

Dirigé par : **Golea Amar**

Remerciements

Nous remercions tout d'abord le grand Dieu pour l'achèvement de ce mémoire.

Nous remercions Monsieur GOLIA AMAR, notre encadreur, pour ses conseils et suggestions avisés qui nous aidés à mener à bien ce travail, et d'avoir rapporté à ce mémoire ces remarques et conseils.

Nous remercions également le président et les membres du jury d'avoir accepté de juger nos travaux.

Nous remercions également tous mes professeurs pour la formation, en particulier ceux qui travaillent dans la discipline GE

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma chère mère

A mon cher père

A mon frère et mes sœurs

A mon cher grand père A ma chère grande mère

A toute la famille houili et tous les amis.

Houili Mouhamed

Je dédie ce travail à ma chère mère et à mes frères et mes sœurs qui m'ont

apporté un soutien moral. Je le dédie également à mon cousin mohamed saghir

et à mon ami Imam barakat, qui m'ont fourni assistance et idées pour ce

mémoire.

Hamza sidali

Résumé :

L'utilisation des convertisseurs statiques tels que les redresseurs, impose l'absorption d'un courant non sinusoïdal du réseau alternatif, donc riche en harmoniques. Ce type de courant provoque de nombreux inconvénients ; parmi ceux-ci : une distorsion locale de la tension du réseau alternatif à travers les impédances de ligne, une augmentation des pertes en ligne, une importante consommation de la puissance réactive et par conséquent l'obtention d'un mauvais facteur de puissance.

Le traitement de ces harmoniques, revient à exiger aux consommateurs pollueurs de réduire à des valeurs acceptables, les taux d'harmoniques qu'ils injectent dans le réseau.

Il existe plusieurs solutions pour limiter la propagation et l'effet des courants harmoniques dans les réseaux électriques.. Parmi celles-ci, l'utilisation de dispositifs tel que filtre actif, filtre passif.

L'objectif de ce travail est l'étude et simulation des différents montages des redresseurs qui permet de diminuer la distorsion du courant à l'entrée du convertisseur et de compenser la consommation de la puissance réactive, ce qui conduit à une amélioration du facteur de puissance en ligne.

ملخص :

إن استخدام المحولات الساكنة مثل المقومات يفرض امتصاص تيار غير جيبى من شبكة التيار المتردد، وبالتالي فهي غنية بالتوافقيات. هذا النوع من التيار يسبب العديد من العيوب. من بينها : تشويه محلي لجهد شبكة التيار المتردد عبر ممانعات الخط ، وزيادة خسائر الخط ، واستهلاك كبير للطاقة التفاعلية وبالتالي الحصول على عامل قدرة سيئ.

ترقى معالجة هذه التوافقيات إلى مطالبة المستهلكين الملوثين بتقليل المستويات التوافقية التي تحقن في الشبكة إلى قيم مقبولة.

توجد عدة حلول للحد من انتشار وتأثير التيارات التوافقية في الشبكات الكهربائية. من بين هذه ، استخدام الأجهزة مثل مرشح نشط ، مرشح سلبي.

الهدف من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة تجميعات المقومات المختلفة التي تجعل من الممكن تقليل تشوه التيار عند إدخال المحول والتعويض عن استهلاك الطاقة الارتكاسية ، مما يؤدي إلى تحسين معامل الاستطاعة في الخط

Remerciements	5
Dédicaces	6
Résumé :	7
Liste des abréviations et symboles :	10
Introduction générale :	1
Chapitre I :	3
1.1 Introduction :	3
1.2. Domaines d'utilisations	3
1.2.1. Quelques applications usuelles	3
1.3. Redressement non commandé PD3 (à diodes)	4
1.3.1. Principe de fonctionnement du PD3	4
1.3.2. Etude des tensions	4
1.3. 3. Etude des courants	4
1.3.4. Etude du redresseur avec charge résistive	5
1.3.5. Etude du redresseur avec une charge inductive	8
1.4. Redressement commandé PD3 (à Thyristors)	11
1.4.1 Principe de fonctionnement	11
1.4.2. Etude des tensions	11
1.4. 3. Etude des courants	11
I.4.4. Charge résistive	11
1-4.5. Charge inductive	14
1-5. Données de simulation	16
1.6.Normes	16
1.7Conclusion	17
Chapitre 2	18
2.1 INTRODUCTION	18
2.2 REDRESSEUR A COMMANDE MLI:	18
2.2.1LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT:	19
2.3LES TECHNIQUES DE COMMANDE MLI:	20
2.3.1 MLI à bande d'hystérésis :	20
2 .4.2 Structure du contrôle de courant par hystérésis	21
2.4.3Simulation de la commande par hystérésis	22
2.5 MLI à porteuse triangulaire	25
2.5.1Simulation de la commande MLI à porteuse triangulaire	26
2.6 Conclusion	29

Chapitre 3	31
3.1 INTRUCTION.....	31
3.2 Redresseur à 12pulsations	31
3.3 Redresseur à 18 pulsations.....	37
3.4 Redresseur à 24pulsations	41
3.5 Conclusion	45
Chapitre 4 :	46
4.1 INTRUCTION.....	46
4.2 Redresseur 6 phases (12pulsations).....	46
4.2.1Montage.....	46
4.2.2 Résultats de simulation.....	49
4.3 Redresseur 9 phases (18pulsations).....	53
4.3.1 Montage.....	53
4.3.2Resultat de simulation	56
4.4 Redresseur 12 phases (24pulsations).....	60
4.4.1 Montage.....	60
4.4.2 Résultats de simulation.....	63
4.5 Comparaison de performances des redresseurs à 12, 18 et 24pulsations	67
4.5.1 Comparaison des THDs de tension et de courant à l'entrée.....	67
4.5.2 Comparaison de la tension DC de sortie	67
4.5.3 Comparaison du facteur de puissance à l'entrée	67
4.6 Conclusion.....	68
Conclusion générale :	69
Annexe 1:	70
Annexe 2 :	71
Bibliographie :.....	72

Liste des abréviations et symboles :

PD3 : pont de diode en triphasé

MW : milliwatts.

GW : gigawatts.

D1, D2, D3, D4, D5 et D6 : les diodes.

V1, V2 et V3 : Tensions de source

THD : Taux de Distorsion Harmonique.

R : Résistance

L : Inductance.

I1 courant de la source de la phase 1

GTO : Le thyristor à extinction par la gâchette, en anglais *Gate Turn-Off Thyristor*.

IGBT : Le transistor bipolaire à grille isolée, en anglais *Insulated Gate Bipolar Transistor*

MLI: Modulation de Largeur d'Impulsion

V_c : tension aux bornes du condensateur de redresseur

Δi : la largeur de la bande d'hystérésis

Chapitre 1 :

Figure 1- 1 Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec une charge résistive	5
Figure 1- 2 Allure des signaux entrée et sortie de la tension du redresseur PD3	7
Figure 1- 3 Allure de signal du courant de la source I_1 du redresseur PD3.....	7
Figure 1- 4 Analyse spectrale du courant I_1	7
Figure 1- 5 Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec une charge inductive	9
Figure 1- 6 Allure du signal du courant de la source I_1 d'un redresseur PD3 avec une charge inductive	9
Figure 1- 7.....	10
Figure 1- 8 Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à thyristor (commandé).....	12
Figure 1- 9 Allure des signaux de tension entrée et sortie du redresseur PD3 commandé (V_1, V_2, V_3 sont les tensions de la source)	12
Figure 1- 10 Allure du signal du courant de la source I_1 du redresseur PD3 commandé	12
Figure 1- 11 Analyse spectrale du courant I_1 de la source d'un redresseur PD3 commandé	13
Figure 1- 12 Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à thyristor (commandé) avec une charge inductive.....	14
Figure 1- 13 Allure de signal du courant de la source I_1 d'un redresseur PD3 commandé avec une charge purement inductive.	14
Figure 1- 14 Analyse spectrale du courant I_1 de la source d'un redresseur commandé avec une charge inductive.....	15

Chapitre2 :

Figure 2- 1 topologie de base d'un redresseur de tension	19
Figure 2- 2 Principe de contrôle du courant par hystérésis	20
Figure 2- 3 Principe de génération des ordres de commande.....	21
Figure 2- 4 Commande par hystérésis avec boucle de tension.....	21
Figure 2- 5 Evolution de v_a et i_a	22
Figure 2- 6 Evolution de V_c	22
Figure 2- 7 Ondulation de V_c	23
Figure 2- 8 Evolution de i_a avec i_{aref}	23
Figure 2- 9 Ondulation de i_a	24
Figure 2- 10 Evolution de v_{ea}	24
Figure 2- 11 Régulation en courant et en tension du redresseur MLI triphasé.....	26
Figure 2- 12 Evolution de i_a avec V_a	26
Figure 2- 13 Evolution de V_c	27
Figure 2- 14 Ondulation de V_c	27
Figure 2- 15 Evolution de i_a avec i_{aref}	27
Figure 2- 16 Ondulation de i_a	28
Figure 2- 17 Evolution de V_{ea}	28

Chapitre 3 :

Figure 3- 1 Montage redresseur à 12 pulsations.....	31
Figure 3- 2 Formes d’ondes de la tension de sortie d’un redresseur à 12 pulsations, les tensions de sortie	32
Figure 3- 3 Mise en parallèle de deux ponts triphasés double alternance	33
Figure 3- 4 Formes d’ondes de la tension de l’inductance d’interphase $V_L(t)$ et la tension de charge $V_{ch}(t)$	34
Figure 3- 5 Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ au primaire du transformateur d’entrée du montage redresseur à 12 pulsations.....	35
Figure 3- 6 Montage redresseur à 18 pulsations.....	37
Figure 3- 7 Formes d’ondes de la tension de sortie d’un redresseur à 18 pulsations et la tension ligne-ligne $v(t)$ d’une phase à l’entrée	38
Figure 3- 8 Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$ et $I_c(t)$ au primaire du transformateur d’entrée du montage redresseur à 18 pulsations.....	39
Figure 3- 9 Montage redresseur à 24 pulsations.....	41
Figure 3- 10 Formes d’ondes de la tension de sortie d’un redresseur à 24 pulsations et la tension ligne-ligne $v(t)$ d’une phase à l’entrée	42
Figure 3- 11 Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$ et $I_c(t)$ au primaire du transformateur d’entrée du montage redresseur à 24 pulsations.....	43

Chapitre 4 :

Figure 4- 1 Diagramme SPS d’un montage redresseur à 12 pulsations	46
Figure 4- 2 Transformateur triphasé en configuration YYD- (a) Paramètres. (b) Connexion des enroulements	47
Figure 4- 3 Paramètres des blocs redresseurs à 6 pulsations.....	47
Figure 4- 4 Inductance interphase couplée du modèle SPS 12 pulsations	48
Figure 4- 5 Paramètres du bloc de l’inductance d’interphase couplée	49
Figure 4- 6 Forme d’onde de la tension de la charge à la sortie du redresseur 12 pulsations	49
Figure 4- 7 Forme d’onde du courant de la charge à la sortie du redresseur 12 pulsations.....	50
Figure 4- 8 Formes d’ondes des tensions à l’entrée du redresseur 12 pulsations.....	50
Figure 4- 9 Formes d’ondes des courants à l’entrée du redresseur 12 pulsations	50
Figure 4- 10 Les blocs de mesure du montage redresseur .(a) Mesures à l’entrée.(b) Mesures à la sortie	51
Figure 4- 11 Spectre des tensions au primaire du transformateur	52
Figure 4- 12 Spectre des courants au primaire du transformateur.....	53
Figure 4- 13 Diagramme SPS d’un montage redresseur à 18 pulsations	54
Figure 4- 14 Les transformateurs ZigZag-Y du montage redresseur à 18 pulsations.(a) Paramètres d’un transformateur à déphasage de 20° (identiques pour 40° et 60°). (b) Configuration des enroulements.	55
Figure 4- 15 Inductance interphase couplée du modèle SPS 18 pulsations	55
Figure 4- 16 Paramètres du bloc de l’inductance d’interphase couplée	56
Figure 4- 17 Forme d’onde de la tension à la sortie du redresseur 18 pulsations.....	57
Figure 4- 18 Forme d’onde du courant à la sortie du redresseur 18 pulsations.....	57

Liste des figures

Figure 4- 19 Formes d'ondes des tensions à l'entrée du redresseur 18 pulsations	57
Figure 4- 20 Formes d'ondes des courants à l'entrée du redresseur 18 pulsations	58
Figure 4- 21 Les blocs de mesure du montage redresseur.(a) Mesures à l'entrée. (b) Mesures à la sortie	58
Figure 4- 22 Contenus harmoniques au primaire du transformateur du redresseur 18 pulsations- Spectre de tension.....	60
Figure 4- 23 Contenus harmoniques au primaire du transformateur du redresseur 18 pulsations- Spectre du courant	60
Figure 4- 24 Diagramme SPS d'un montage redresseur 24 pulsations	61
Figure 4- 25 Les transformateurs Zig-Zag-Y du redresseur à 24 pulsations. Paramètres d'un transformateur à déphasage de 15° (identiques pour 30° , 45° et 60°). (b) Configuration des enroulements.	61
Figure 4- 26 Inductances couplées d'interphase du modèle SPS 24 pulsations	62
Figure 4- 27 Paramètres du bloc de l'inductance d'interphase couplée	63
Figure 4- 28 Forme d'onde de la tension de sortie du redresseur 24 pulsations	63
Figure 4- 29 Forme d'onde du courant à la sortie du redresseur 24 pulsations.....	64
Figure 4- 30 Formes d'ondes des tensions à l'entrée du redresseur 24 pulsations.....	64
Figure 4- 31 Formes d'ondes des courants à l'entrée du redresseur 24 pulsations.	64
Figure 4 - 32 Les blocs de mesure du montage redresseur (a) Mesures à l'entrée. (b) Mesures à la sortie.....	65
Figure4- 33 Contenus harmoniques au primaire du transformateur du redresseur 24 pulsations. Spectre de tension.....	66
Figure 4- 34 Contenus harmoniques au primaire du transformateur du redresseur 24 pulsations. Spectre de courant	66

Liste des tableaux :

Chapitre1 :

Tableau 1- 1 Les valeurs efficaces des courants harmoniques et leurs amplitudes par rapport au fondamental en %.....	8
Tableau 1- 2 Les valeurs efficaces des courants harmoniques et leurs amplitudes par rapport au fondamental en %.....	10
Tableau 1- 3 Les valeurs efficaces des courants harmoniques et leurs amplitudes par rapport au fondamental en %.....	13
Tableau 1- 4 Les valeurs efficaces des courants harmoniques et leurs amplitudes par rapport au fondamental en %.....	15
Tableau 1- 5 Les données des composants utilisés dans la simulation.	16
Tableau 1- 6 Limites des composantes harmoniques en tension dans les réseaux d'énergie à bas courant (CEI 1000-3-2)	16
Tableau 1- 7 Limites des composantes harmoniques en tension dans les réseaux d'énergie à basse tension (CEI 1000-2-4).....	17

Chapitre2 :

Tableau 2- 1 comparaison entre hystérésis et MLI sinus-triangle.....	29
--	----

Chapitre 3 :

Tableau 3- 1 Principaux harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 12 pulsations.	36
Tableau 3- 2 Principaux harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 18 pulsations	40
Tableau 3- 3Principaux harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 24 pulsations	44

Chapitre 4 :

Tableau 4- 1 Variables à l'entrée et à la sortie du redresseur 12 pulsations	51
Tableau 4- 2 Les harmoniques de tension et de courant à l'entrée du redresseur 12pulsations.....	52
Tableau 4- 3 Variables à l'entrée et à la sortie du redresseur 18 pulsations	59
Tableau 4- 4 Les harmoniques de tension et de courant à l'entrée du redresseur 18 pulsations.....	59
Tableau 4- 5 Les harmoniques de tension et de courant à l'entrée du redresseur 18 pulsations.....	65
Tableau 4- 6 Les harmoniques de tension et de courant à l'entrée du redresseur 24 pulsations.....	66
Tableau 4- 7 Comparaison des performances des redresseurs	67

Introduction générale :

L'électronique de puissance est la partie du génie électrique qui traite des modifications de la présentation de l'énergie électrique. Pour cela elle utilise des convertisseurs statiques à semi-conducteurs. Grâce aux progrès sur ces composants et sur leur mise en œuvre, l'électronique de puissance a pris une importance considérable dans tout le domaine de l'électricité industrielle [1].

Les structures de convertisseurs et les techniques de conversion de puissance dépendent intrinsèquement de la nature des sources reliées au convertisseur. Il existe quatre types de convertisseurs: les redresseurs (AC/CC), les hacheurs (DC/DC), les onduleurs (DC/AC) ; les gradateurs (AC /AC).

La conversion alternative / continue est utilisée dans une très large plage de puissance :

on peut citer comme exemples d'application :

- La commande des moteurs à courant continu
- chargeur de téléphone portable
- L'excitation des alternateurs.

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 [2].

Pour réduire ces harmoniques et ainsi améliorer la qualité de l'énergie, il existe plusieurs solutions, parmi elles : les filtres passifs. Le filtrage passif consiste à piéger les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés. Les performances des filtres passifs sont limitées en termes de réduction de la pollution harmonique. Les inconvénients proviennent de la limitation en puissance, de l'encombrement, du coût des composants passifs ainsi que du circuit résonant qu'ils forment [3]. C'est pourquoi la solution des filtres actifs s'est

largement développée. Ces filtres actifs ont pour principal objectif de compenser les courants harmoniques injectés dans le réseau. L'utilisation des filtres actifs permet d'éviter les inconvénients majeurs des filtres passifs, qui sont le risque de résonance et la possibilité de surcharge.

Les inconvénients des filtres passifs et des filtres actifs classiques peuvent être simultanément limités en utilisant le redresseur MLI et redresseur polyphasé à diode qui assure le facteur de puissance plus élevé et faible taux de distorsion harmonique.

Le travail présenté comporte quatre chapitres organisés comme suite :
Dans le premier chapitre, nous étudions les redresseurs (commandé et non commandé), en présentant la modélisation du redresseur à diode et à thyristor, comme charge non linéaire.

Le second chapitre est consacré à l'étude et la simulation du redresseur MLI à deux types de commande considérés (par hystérésis et par MLI) par détermination des régulateurs (ou correcteurs) nécessaires pour garantir une absorption sinusoïdale du courant en ligne et maintenir une tension à la sortie du redresseur presque constante. L'analyse de son fonctionnement par simulation (sous Psim) pour les deux types de commande considérés permet de suivre l'évolution temporelle des différentes grandeurs d'entrée et de sortie.

Dans le troisième chapitre nous allons étudier les différents montages redresseurs ayant un nombre de pulsations élevé, ce qui permet d'obtenir à la sortie une tension continue peu ondulée avec un minimum de filtrage et un faible taux d'harmonique à l'entrée.

La configuration générale des trois montages redresseurs étudiés comporte un transformateur polyphasé à l'entrée suivi de plusieurs ponts redresseurs (6 pulses) connectés en parallèle à la sortie. Un ou plusieurs transformateurs d'interphase sont utilisés pour réduire les harmoniques de courant au primaire du transformateur. Dans la littérature, cette configuration est appelée « Transformer Rectifier Unit » (TRU en abrégé).

Le dernier chapitre est réservé au calcul des inductances d'interphase et la simulation des montages redresseurs à 6 phases, 9 phases et 12 phases et les résultats de simulation des modèles SPS des redresseurs multiphasés seront comparés entre eux.

Finalement nous terminerons avec une conclusion générale.

Chapitre 1 :

1.1 Introduction :

Les montages redresseurs, souvent appelés simplement redresseurs, sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion alternatif-continu. Alimentés par une source de tension alternative monophasée ou polyphasée, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie. On utilise un redresseur chaque fois que l'on a besoin de continu alors que l'énergie électrique est disponible en alternatif. Comme c'est sous cette seconde forme que l'énergie électrique est presque toujours générée et distribuée [4], les redresseurs ont un très vaste domaine d'applications.

Les redresseurs à diodes, ou redresseurs non contrôlés, ne permettent pas de faire varier le rapport entre la ou les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie. De plus, ils sont irréversibles, c'est-à-dire que la puissance ne peut aller que du côté alternatif vers le côté continu. Les redresseurs à thyristors, ou redresseurs contrôlés, permettent, pour une tension alternative d'entrée fixée, de faire varier la tension continue de sortie. Ils sont de plus réversibles ; lorsqu'ils assurent le transfert de puissance du côté continu vers le côté alternatif, on dit qu'ils fonctionnent en onduleurs non autonomes [5].

Dans ce chapitre, nous allons aborder une étude théorique d'un redresseur PD3 commandé et non commandé. Pour la validation des résultats théoriques, nous avons utilisé le programme PSIM. Les résultats obtenus sont interprétés en comparant avec les résultats théoriques. On termine ce chapitre une conclusion.

1.2. Domaines d'utilisations

La conversion alternative / continue est utilisée dans une très large plage de puissance :

- De quelques mW (milliwatts) pour les alimentations de petits ensembles électroniques (chargeur de téléphone portable).
- A plusieurs GW (gigawatts) pour l'interconnexion de réseaux de distribution d'énergie électrique de phases différentes.

1.2.1. Quelques applications usuelles

- Alimentation des structures électroniques sous tension continue de bas niveau (3,3 à 15V) à partir du réseau 50Hz en HIFI, télévision, électroménager.
- Recharge des accumulateurs d'appareils nomades (téléphone, ordinateur portable...).
- Entraînement des machines à courant continu à vitesse variable.
- Electrolyse en industrie électrochimique. [3]

1.3. Redressement non commandé PD3 (à diodes)

1.3.1. Principe de fonctionnement du PD3

Les tensions V_1 , V_2 et V_3 sont des tensions entre phases et neutre (tensions simples) de valeur efficace V . Si les enroulements sont montés en étoile, en utilisant le neutre se sont alors les tensions simples qui sont utilisées, ce qui fait perdre l'intérêt du triphasé. Les diodes D_1 , D_3 et D_5 qui sont à cathode commune conduisent lorsqu'elles sont soumises au potentiel le plus élevé. Les diodes D_2 , D_4 et D_6 qui sont à anode commune conduisent que si elles sont soumises au potentielle plus faible. Supposons que nous avons le système triphasé suivant :

$$\begin{cases} V_1 = V_m \sin \theta \\ V_2 = V_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_3 = V_m \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (1-1)$$

Tel que

$$V(\theta) = V_m \sin(\theta) \quad (1-2)$$

Et

$$V_m = \sqrt{2}V \quad (1-3)$$

1.3.2. Etude des tensions

La tension redressée U_c est périodique de période $T/3$.

1) **La valeur moyenne de la tension de sortie U_{cmoy} :**

$$U_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t).dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V(t).dt = \frac{V_m}{\pi} = V_m \quad (1-4)$$

2) **Valeur efficace de la tension de sortie U_{ceff} :**

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t).dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V^2(t).dt} = \frac{\sqrt{6}.V_m}{2} \quad (1-5)$$

1.3.3. Etude des courants

1) La valeur de courant I_{max} est égale à la valeur du courant redressé.

$$I_{max} = I_c \quad (1-6)$$

1.3.4. Etude du redresseur avec charge résistive

Le montage de loin le plus utilisé est le montage en pont, ou parallèle double PD3 dit aussi montage en pont de Graëtz triphasé.

La figure suivante représente le schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé (PD3) à diode avec une charge résistive.

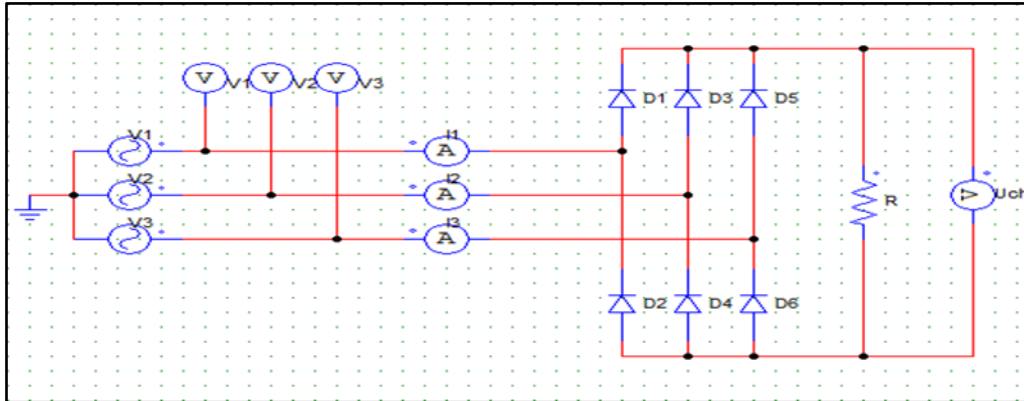


Figure 1- 1 Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec une charge résistive

Etude théorique

La décomposition en série de Fourier du signal périodique de période 2π de la figure (1-3) donne les résultats suivant :

$$I_1(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{n=\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (1-7)$$

$$a_0 = \frac{1}{2T} \int_0^T I_a(t) dt \quad (1-8)$$

$$a_n = \frac{1}{2T} \int_0^T I_1(t) \cos(n\omega t) dt \quad (1-9)$$

$$b_n = \frac{1}{2T} \int_0^T I_1(t) \sin(n\omega t) dt \quad (1-10)$$

$I_1(t)$ est impaire donc $a_0 = a_n = 0$ puisque ;

$$a_o = \frac{1}{2T} \int_0^T I_1(t) dt = \frac{1}{2T} \left(\int_{\frac{5T}{12}}^{\frac{5T}{12}} I_d dt + \int_{\frac{11T}{12}}^{\frac{11T}{12}} -I_d dt \right) = 0 \quad (1-11)$$

$$a_n = \frac{I_d}{2T} \left(\int_{\frac{5T}{12}}^{\frac{5T}{12}} \cos(n\omega t) dt \right) = 0 \cos(n\omega t) dt \int_{\frac{11T}{12}}^{\frac{11T}{12}} - \quad (1-12)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (1-13)$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} I_d \sin(n\omega t) d\omega t + \frac{1}{T} \int_{\frac{7T}{12}}^{\frac{11T}{12}} (-I_d) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (1-14)$$

Après le calcul on trouve :

$$b_n = \frac{2I_d}{n\pi} (1 - (-1)^n \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right)) \quad (1-15)$$

$$b_n = \begin{cases} 0 & \text{Si } n \text{ pair} \\ \frac{4I_d}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) & \text{Si } n \text{ impair} \\ 0 & \text{Si } n \text{ multiple de 3} \end{cases}$$

Alors:

$$i_l(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_d}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin(n\omega t) \quad (1-16)$$

Les résultats de simulation :

Dans cette partie on utilise le logiciel PSIM pour simuler le montage de la figure (1-1).

Les allures obtenues sont représentées dans les figures suivantes :

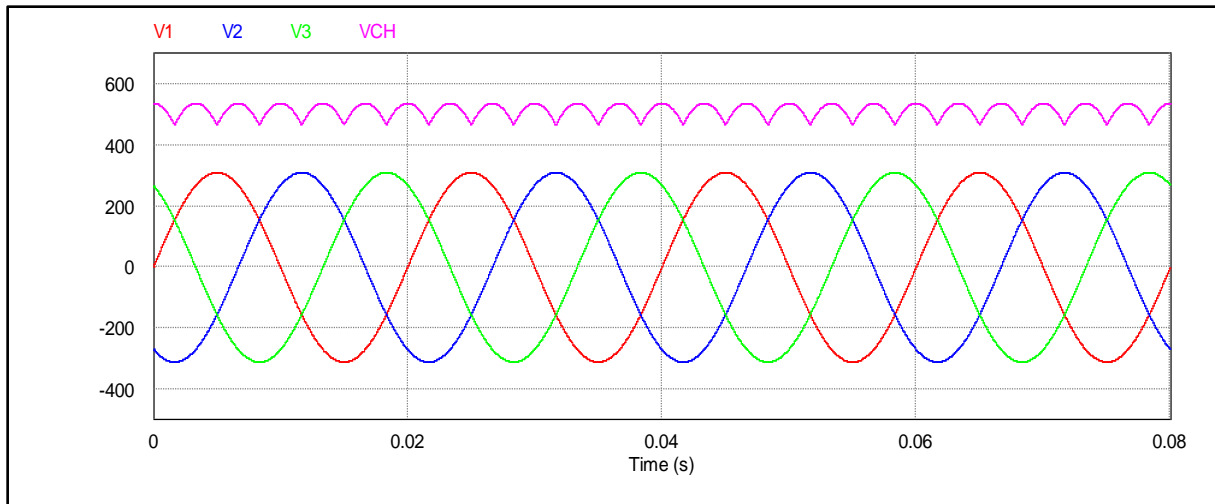


Figure 1- 2 Allure des signaux entrée et sortie de la tension du redresseur PD3

V1, V2 et V3 sont les tensions de la source. Uch : la tension redressée à la sortie du redresseur.

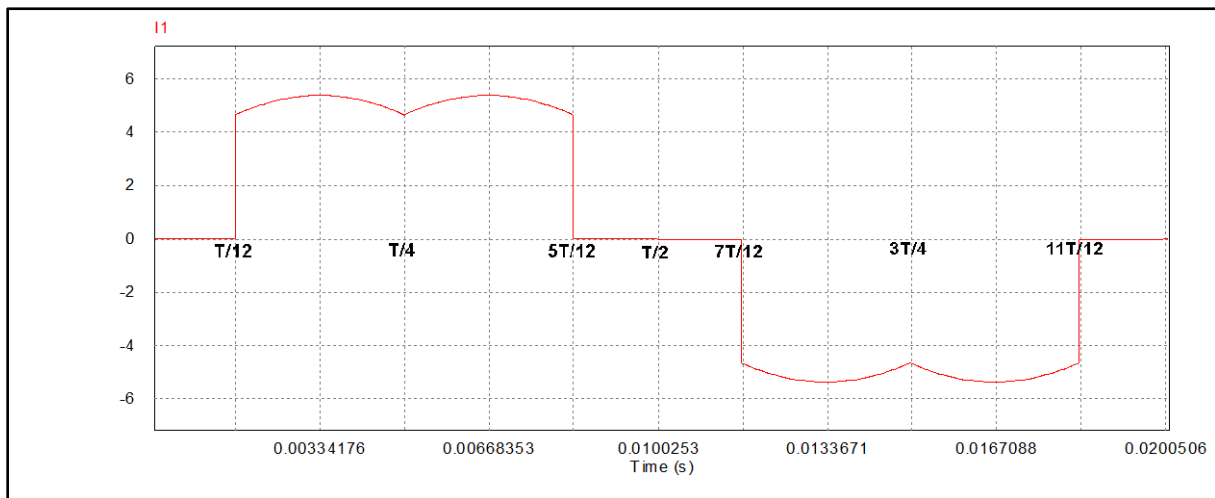


Figure 1- 3 Allure de signal du courant de la source I1 du redresseur PD3

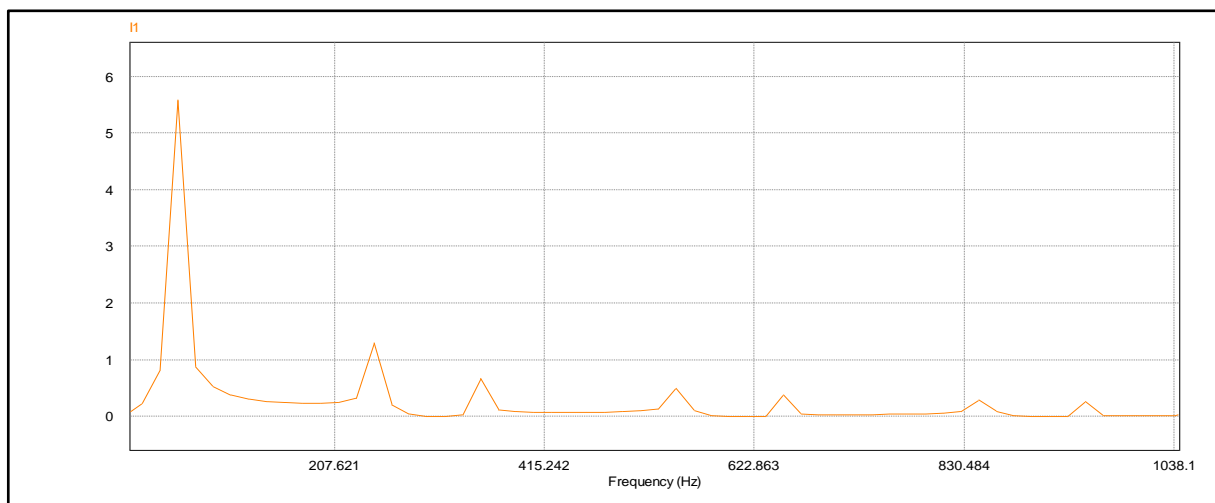


Figure 1- 4 Analyse spectrale du courant I1

A partir des résultats de la figure (1-4), on trace le tableau suivant qui représentent les valeurs du courant efficace phase 1 de la source, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Tableau 1- 1 Les valeurs efficaces des courants harmoniques et leurs amplitudes par rapport au fondamental en %.

Rang	Valeur efficace (A)	Amplit. harmoniques/Fond(%)
1	5.75	100
3	0	0
5	1.147	19.94
7	0.684	11.8
9	0	0
11	0.346	6.01
13	0.353	6.13
15	0	0
17	0.253	4.4
19	0.193	3.35

Le THD du courant réseau dans ce cas est de l'ordre de :

$$\text{THD}\% = 30.78\%$$

Interprétation les résultats

Les résultats de simulation sont pratiquement en concordance avec les résultats théorique. Les résultats de simulation du montage de la figure (1-1), montrent que le courant de la source est très riche en harmonique de rang $(2k+1, k=2, \dots, 50)$. Les harmoniques de rang pair et les multiples de 3 sont nuls, car le système est triphasé équilibré. Le THD global de l'ordre de 30% qui est relativement élevé. La fréquence des ondulations de la tension redressée est 6 fois celle du réseau (300 Hz).

1.3.5. Etude du redresseur avec une charge inductive

On remplace la charge résistive par une charge inductive (R-L), comme présenter par la figure (1-5) suivante :

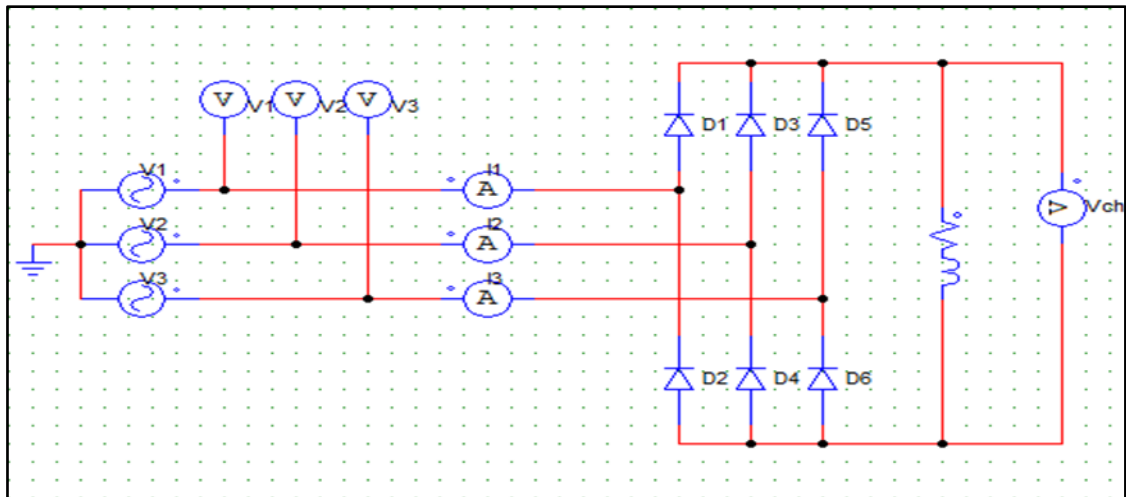


Figure 1- 5 Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec une charge inductive

1.3.6 Etude théorique

Dans cette partie on a étudié le cas d'un régime permanent .L'étude théorique est pratiquement la même que l'étude du montage redresseur PD3 associé à une charge résistive.

Résultats de simulation

Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes (figure 1.6 et figure 1.7). Le tableau 1.2 représente les valeurs efficaces des courants harmoniques, ainsi que leurs amplitudes par rapport à l'amplitude du fondamental. Le THD calculé à partir du tableau est de l'ordre de 31%

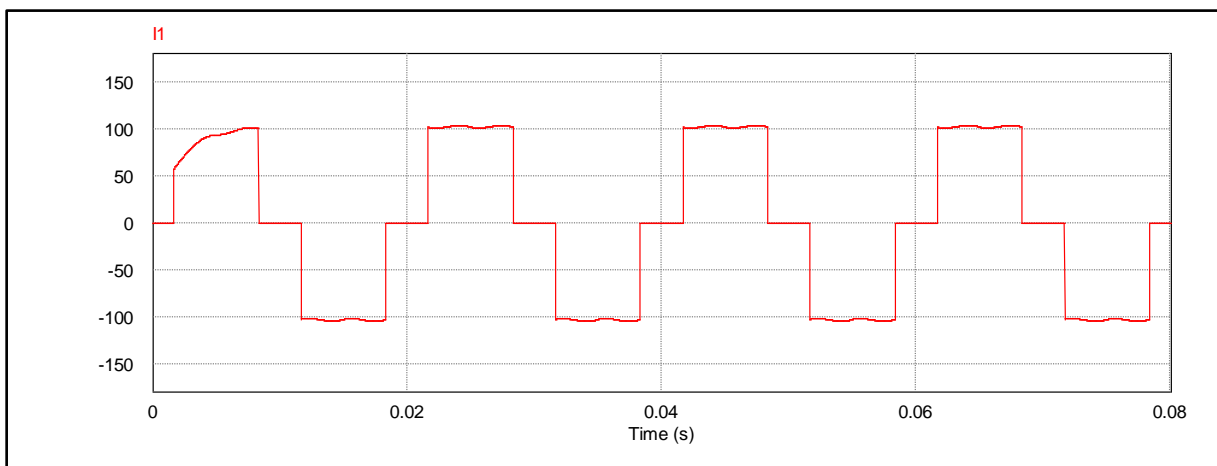


Figure 1- 6 Allure du signal du courant de la source I1 d'un redresseur PD3 avec une charge inductive

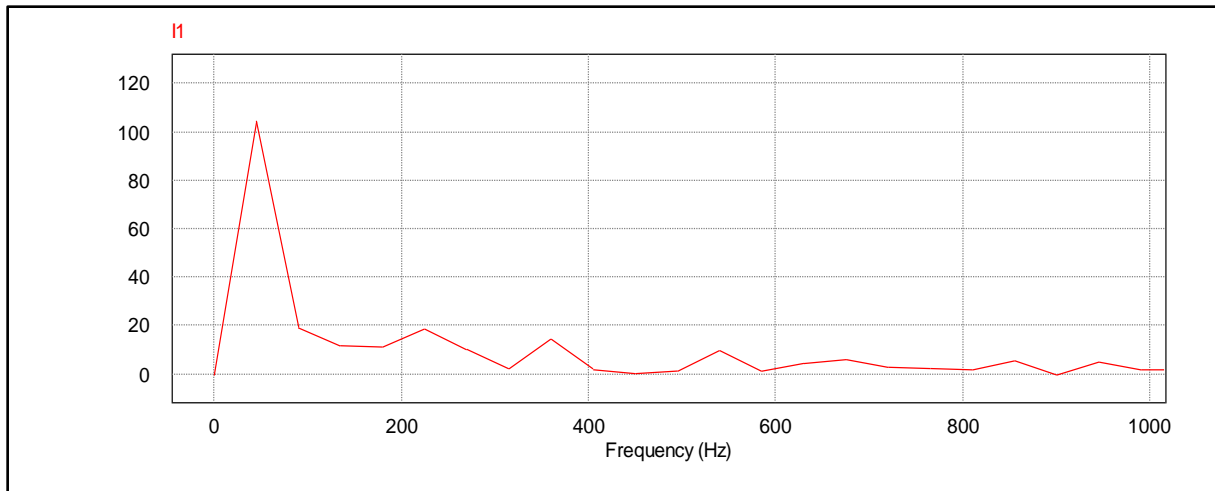


Figure 1- 7

A partir des résultats de la figure (1-7) on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace de la phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Tableau 1- 2 Les valeurs efficaces des courants harmoniques et leurs amplitudes par rapport au fondamental en %..

Rang	Valeur efficace (A)	Amplit. harmoniques/Fond. (%)
1	103.59	100
3	0	0
5	18.47	17.82
7	14.31	13.8
9	0	0
11	9.37	9
13	5.9	5.6
15	0	0
17	5.26	5
19	4.92	4.7

Le THD du courant réseau dans ce cas est de l'ordre de :

$$\text{THD}\% = 31.06$$

Interprétation des résultats de simulation

Les résultats obtenus sont pratiquement en concordance avec les résultats obtenus dans le cas d'une charge résistive. Les résultats de la simulation du montage de la figure (1-5), montrent

l'allure du courant de la source qui est très riche en harmoniques de rang $(2k+1, k=2, \dots, 50)$, ainsi qu'on a obtenus un THD ; avec toujours les harmoniques de rang pair et multiples de 3 sont nuls. Le THD global est de l'ordre de 31%, comparable avec celui de la charge résistive.

1.4. Redressement commandé PD3 (à Thyristors)

1.4.1 Principe de fonctionnement

Le pont PD3 à 6 thyristors est alimenté par une source triphasée sinusoïdale équilibrée. Les thyristors fonctionnent avec un retard à l'amorçage d'angle α . Il y a en permanence et un seul thyristor conducteur parmi T1, T2 et T3 d'une part, et un et un seul parmi T4, T5 et T6 (figure 1.8).

1.4.2. Etude des tensions

La tension redressée U_c est périodique de période $T/3$.

- ❖ La valeur moyenne de la tension de sortie U_{cmoy} :

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par l'expression suivante

$$U_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t).dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V(t).dt = V_m \cdot \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot \cos(\alpha) \quad (1-17)$$

1.4.3. Etude des courants

- ❖ La valeur maximale du courant I_{max} est égale à la valeur du courant redressé I_c

$$I_{max} = I_c \quad (1-18)$$

1.4.4. Charge résistive

La figure (1-8) présente le schéma de simulation d'un redresseur pont de Graëtz triphasé PD3 à thyristor (commandé) avec une charge résistive. La figure montre le schéma de puissance associé au schéma de commande. Le THD calculé à partir du tableau est de l'ordre de

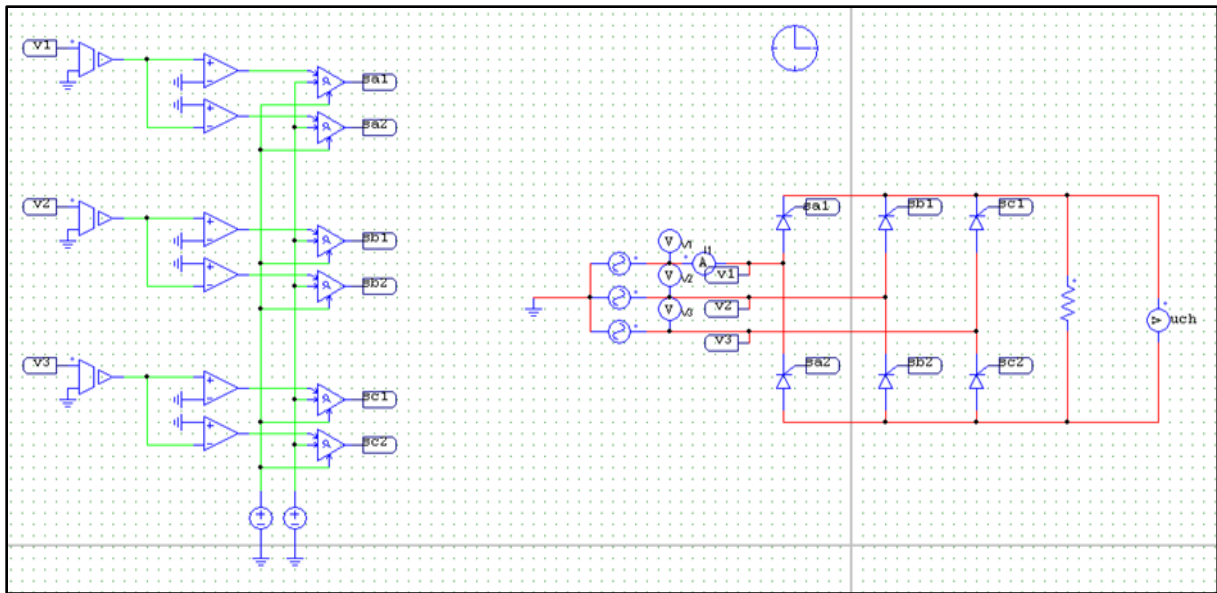


Figure 1- 8 Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à thyristor (commandé)

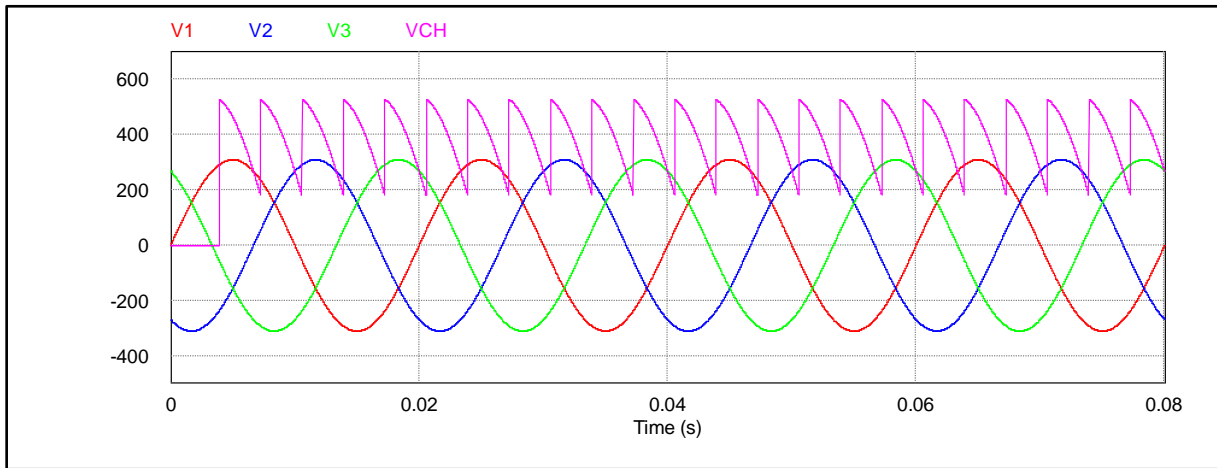


Figure 1- 9 Allure des signaux de tension entrée et sortie du redresseur PD3 commandé (V1,V2,V3 sont les tensions de la source)

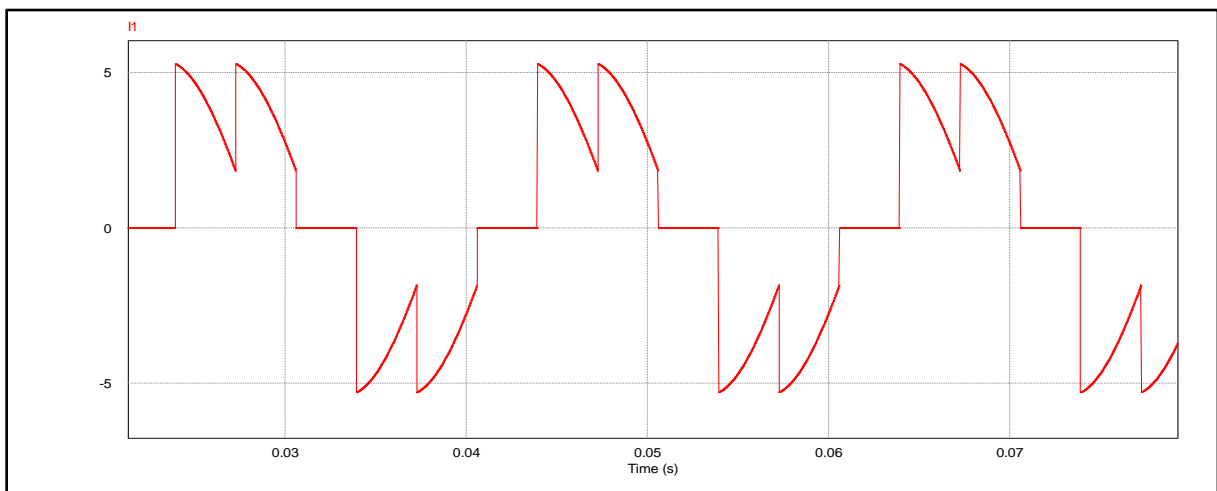


Figure 1- 10 Allure du signal du courant de la source I1 du redresseur PD3 commandé

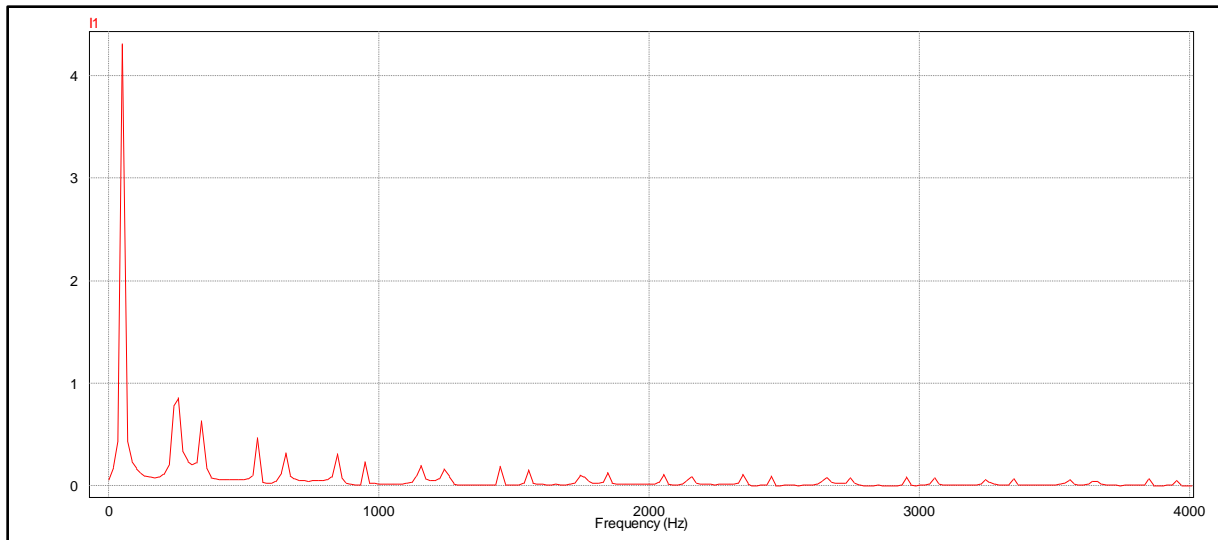


Figure 1- 11 Analyse spectrale du courant I1 de la source d'un redresseur PD3 commandé

A partir des résultats de la figure (1-11) on trace le tableau suivant qui représentent les valeurs du courant efficace de la phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Tableau 1- 3 Les valeurs efficaces des courants harmoniques et leurs amplitudes par rapport au fondamental en %.

Rang	Valeur efficace (A)	Amplit. harmoniques/Fond. (%)
1	4.3	100
3	0	0
5	0.9	20.93
7	0.61	14.18
9	0	0
11	0.46	10.6
13	0.339	7.8
15	0	0
17	0.32	7.4
19	0.29	6.7

Le THD du courant réseau dans ce cas est de l'ordre de :

THD%= 40.19%

Interprétation

On remarque que le courant de la source est très riche en harmonique de rang $(2k+1, k=2, \dots, 50)$. Le THD global est de l'ordre de 40% , proche des THD trouvés auparavant. L'allure du courant du réseau est légèrement différente à celle associée au redresseur non commandé ; ceci est due à l'effet de l'angle de retard à l'amorçage.

1-4.5. Charge inductive

Dans ce cas on remplace la charge résistive par une charge inductive et on simule le montage de la figure (1-12) :

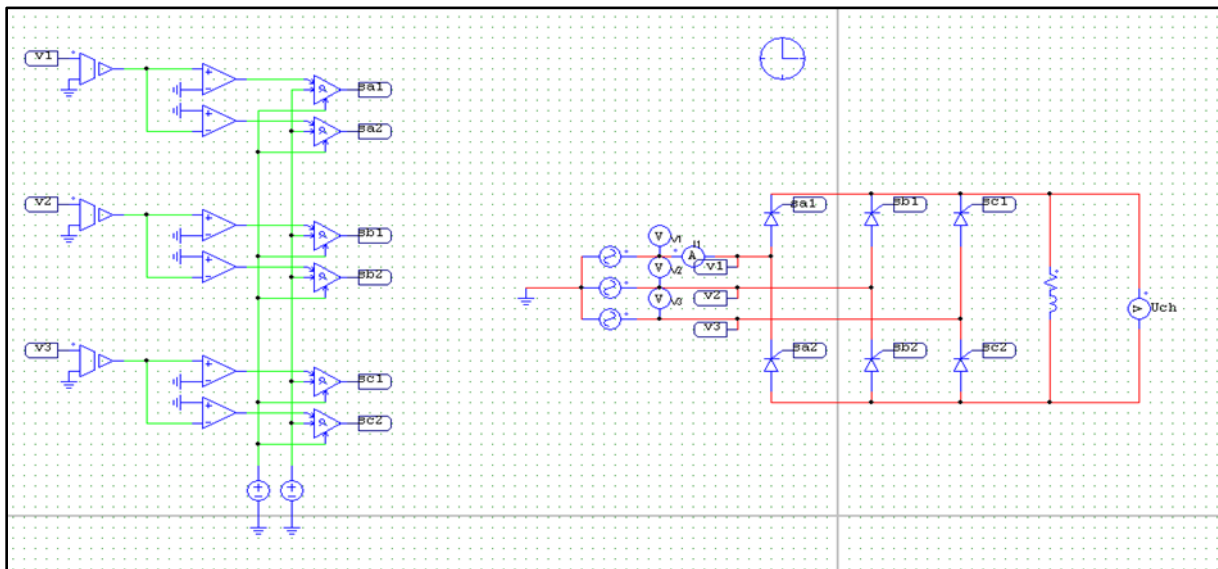


Figure 1- 12 Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à thyristor (commandé) avec une charge inductive

Les allures des différentes grandeurs obtenues de la simulation de la figure (1-12) sont représentées par les figures 1-13 et 1-14 suivantes :

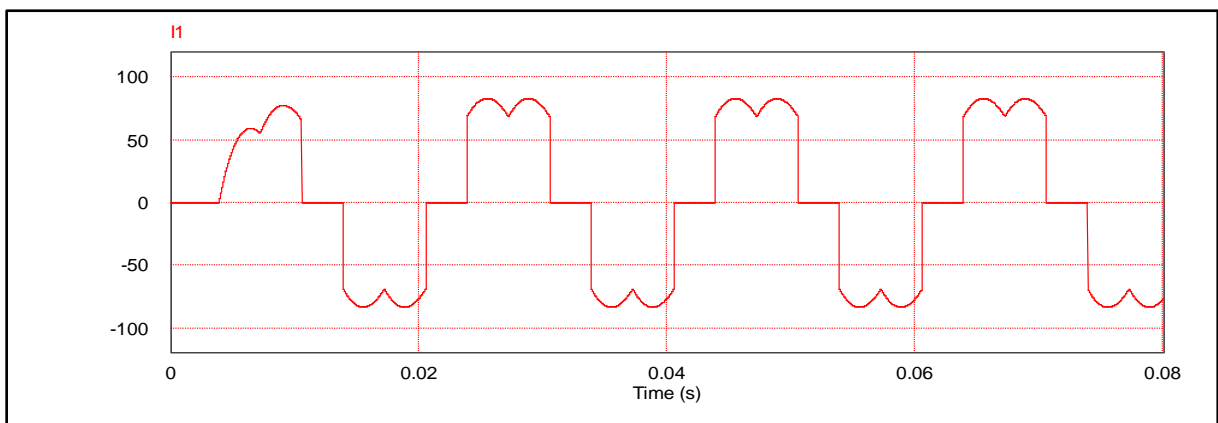


Figure 1- 13 Allure de signal du courant de la source I_1 d'un redresseur PD3 commandé avec une charge purement inductive.

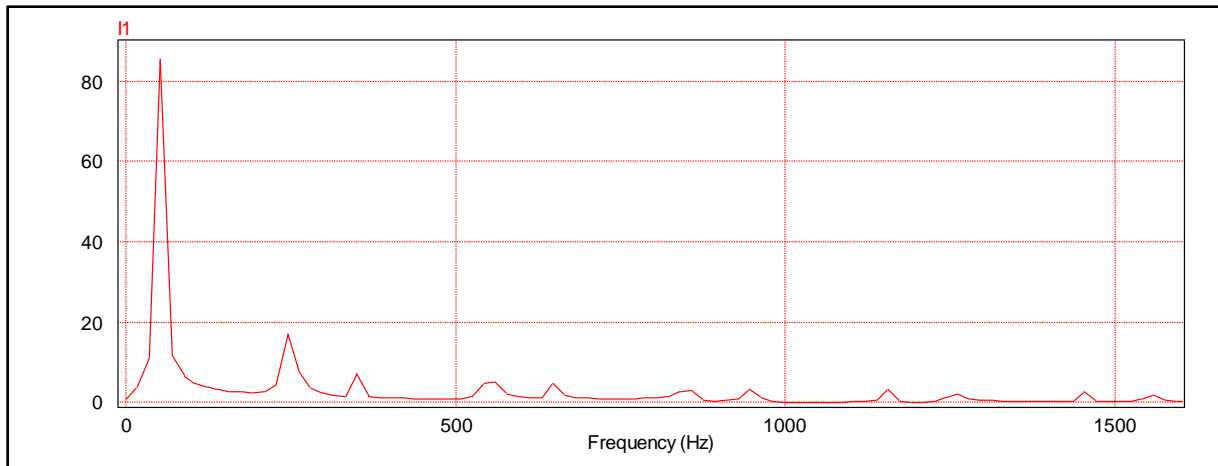


Figure 1- 14 Analyse spectrale du courant I1 de la source d'un redresseur commandé avec une charge inductive

A partir des résultats de la figure (1-14), on trace le tableau suivant qui représente les valeurs la courante efficace phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Tableau 1- 4 Les valeurs efficaces des courants harmoniques et leurs amplitudes par rapport au fondamental en %

Rang	Valeur efficace (A)	Amplit.harmoniques/Fond. (%)
1	85.5	100
3	0	0
5	16.4	19.15
7	6.76	7.9
9	0	0
11	5.03	5.8
13	4.78	5.5
15	0	0
17	3.18	3.7
19	3.24	3.7

Le THD du courant réseau dans ce cas est de l'ordre de :

THD%= 30.7%

Interprétation

Les mêmes remarques on les trouve ici, le courant de la source est très riche en harmoniques de rang $(2k+1, k=2, \dots, 50)$. Le THD global calculé à partir du tableau I.4 est de l'ordre de 30%.

1-5. Données de simulation

Les valeurs des éléments caractérisant l'ensemble du réseau électrique, ainsi que la charge utilisée (résistive et inductive), sont regroupées dans le tableau 1-5

Tableau 1- 5 Les données des composants utilisés dans la simulation.

Réseau électrique
$V_s = 220 \text{ V}$; $f = 50 \text{ Hz}$,
Charge résistive
$R_{ch} = 100 \Omega$.
Charge inductive
$R_{ch} = 5 \Omega$, $L_{ch} = 10\text{mH}$.
La commande du Thyristor $\alpha = 70^\circ$.

1.6.Normes

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-6) et (I-7). [6]

Tableau 1- 6 Limites des composantes harmoniques en tension dans les réseaux d'énergie à bas courant (CEI 1000-3-2)

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<K< 40	0.23*8/K
11	0.33		
13	0.21		
5<K<39	0.15*15/K		

Tableau 1- 7 Limites des composantes harmoniques en tension dans les réseaux d'énergie à basse tension (CEI 1000-2-4)

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/K				

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les structures des convertisseurs AC/DC triphasés commandés et non commandés, tout en donnant leur principe de fonctionnement, leur étude théorique et les résultats de simulation associés à chaque cas.

Les résultats de simulation montrent que les harmoniques de rang 5 et 7 sont non négligeables et le THD global est élevé dans les deux cas. Par conséquent, on peut améliorer le THD en minimisant les perturbations harmoniques dans le système. Le deuxième chapitre sera consacré aux redresseurs multiphasés dont le but est d'améliorer la forme d'onde du courant du réseau, minimiser les harmoniques côté réseau et améliorer la qualité de la tension redressée, en minimisant leur taux d'ondulations.

Chapitre 2

2.1 INTRODUCTION

L'avènement de l'électronique de puissance a eu un impact majeur sur le monde industriel au cours des dernières décennies. Cet avènement s'est produit par l'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance tels les thyristors, les triacs, les GTO, les IGBT ou les transistors de forte puissance. Ces composantes ont permis le développement de convertisseurs statiques de grande puissance qui permettent la conversion de la puissance électrique d'une forme quelconque à une autre forme. Ces convertisseurs apportent un progrès considérable au niveau des procédés industriels.

L'utilisation de ces convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique participe à détériorer la "qualité" du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux, les paragraphes suivants présentent une synthèse des redresseurs à commande MLI, qui sont classés comme une solution de ce problème.

2.2 REDRESSEUR A COMMANDE MLI:

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée.

Il y a deux manières de mettre en application des redresseurs MLI ; comme redresseur à source de courant, et redresseur à source de tension

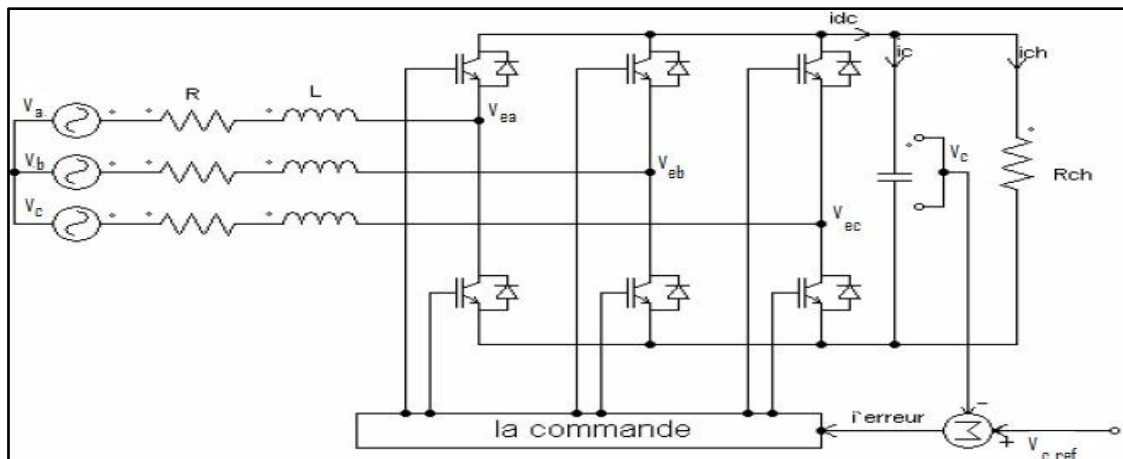


Figure 2- 1 topologie de base d'un redresseur de tension

Les redresseurs de tension sont de plus loin extensivement utilisés et en raison de la dualité des deux topologies.

2.2.1 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT:

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée, comme montré dans la figure II.1. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu V_c est mesurée et comparée avec une référence V_{c-ref} , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu V_c mesurée aux bornes du condensateur C .

Quand le courant i_{ch} est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande de plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement plus de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand i_{ch} devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande au block de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative.

La commande MLI non seulement peut contrôler la puissance active, mais également la puissance réactive, ce type de redresseur permet la correction du facteur de

puissance. En outre, les formes d'onde des courants de la source peuvent être maintenu comme presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion de la source.

2.3 LES TECHNIQUES DE COMMANDE MLI:

2.3.1 MLI à bande d'hystérésis :

Le contrôle du courant par hystérésis (Hystérésis Current Control : HCC) consiste à maintenir le courant dans une bande enveloppant sa référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation aux interrupteurs. La figure (II.2) illustre le principe de contrôle du courant par hystérésis à bande fixe à deux niveaux. La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit l'ordre de commande du bras correspondant du pont

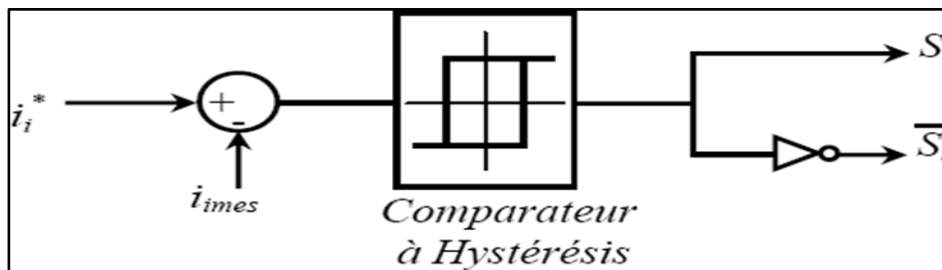


Figure 2- 2 Principe de contrôle du courant par hystérésis

Cette technique de contrôle fait partie des commandes non linéaires parce qu'elle fonctionne en tout ou rien. Elle est bien connue et présente de gros avantages au niveau de la robustesse et de la simplicité de mise en œuvre. Elle possède un temps de réponse rapide en régime dynamique, une stabilité et une précision satisfaisante et de plus limite automatiquement le courant. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis qui détermine l'erreur sur les courants. La fréquence de commutation bien malgré qu'elle reste inconnue et variable, la technique de régulation par bande hystérésis est une des méthodes les plus appropriées pour les différentes applications de redresseur contrôlés en courant telles que les entraînements électriques et les filtres actifs. Le principe de génération des ordres de commande est représenté sur la figure (II.), où ΔI est la largeur de la bande hystérésis.

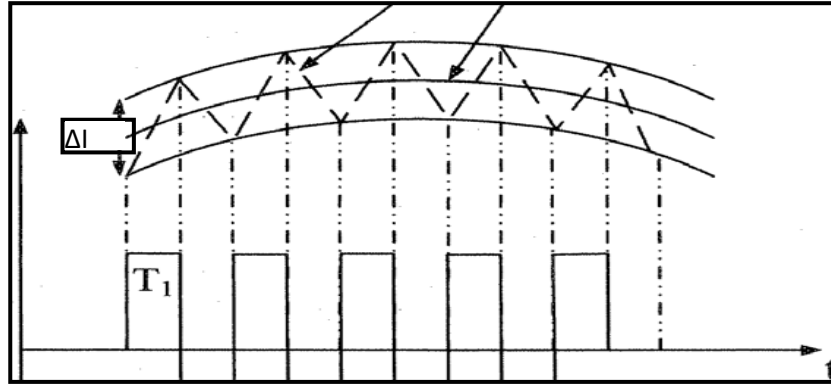


Figure 2- 3 Principe de génération des ordres de commande

2.4.2 Structure du contrôle de courant par hystérésis

La structure globale du contrôle par hystérésis des courants prélevés sur le réseau par un pont redresseur de tension triphasé à *MLI* est présentée sur la figure (II.4). Les trois courants à l'entrée du pont sont contrôlés à l'aide de trois comparateurs à hystérésis à bande fixe. L'ensemble des trois sorties de ces comparateurs détermine les ordres de commande des interrupteurs constituant le pont. En effet, la détermination des instants de commutation suit la logique suivante:

$$\begin{cases} i^* - i = \frac{\Delta I}{2} \Rightarrow Si = 1 \\ i^* - i = -\frac{\Delta I}{2} \Rightarrow Si = 0 \end{cases} \quad i = a, b, c$$

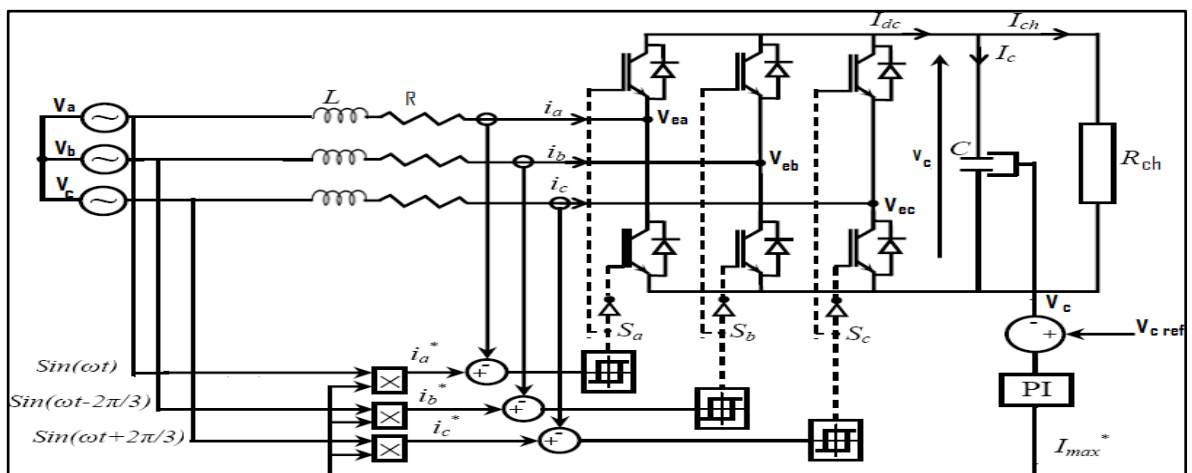


Figure 2- 4 Commande par hystérésis avec boucle de tension

2.4.3 Simulation de la commande par hystérésis

Le Schéma de simulation dans l'annexe 1

Les résultats de simulation sont élaborés sous le programme PSIM. Les résultats sont représentés par les figures suivantes.

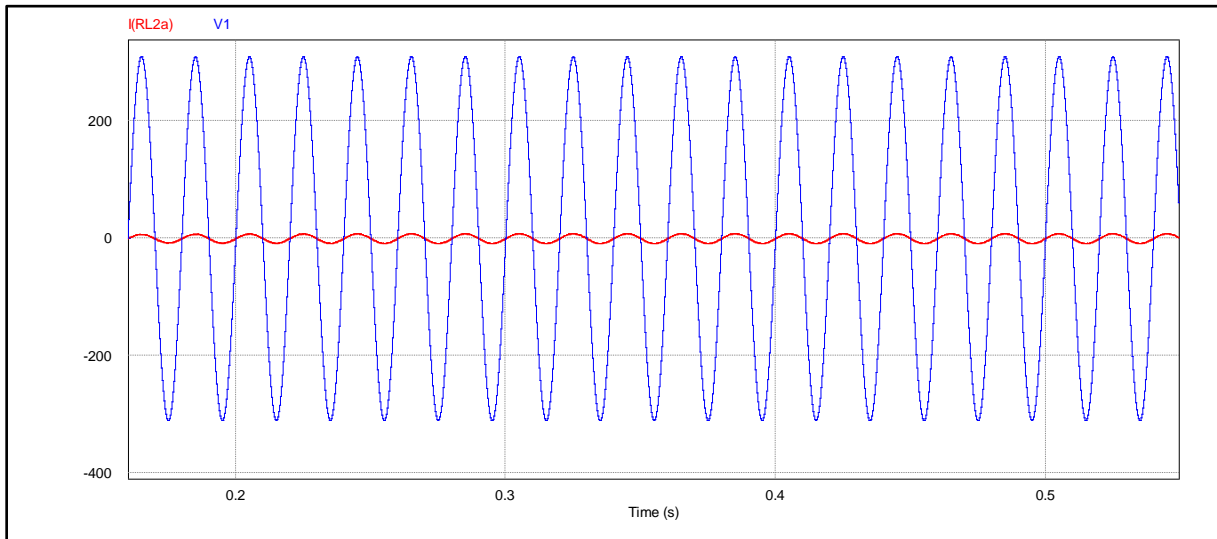


Figure 2- 5 Evolution de v_a et i_a

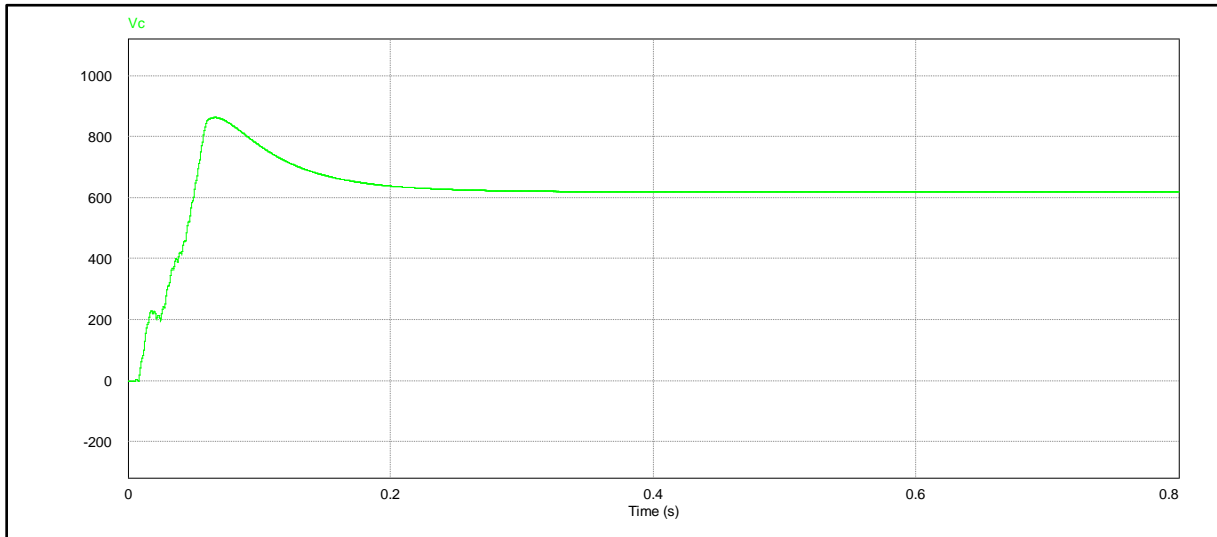


Figure 2- 6 Evolution de V_c

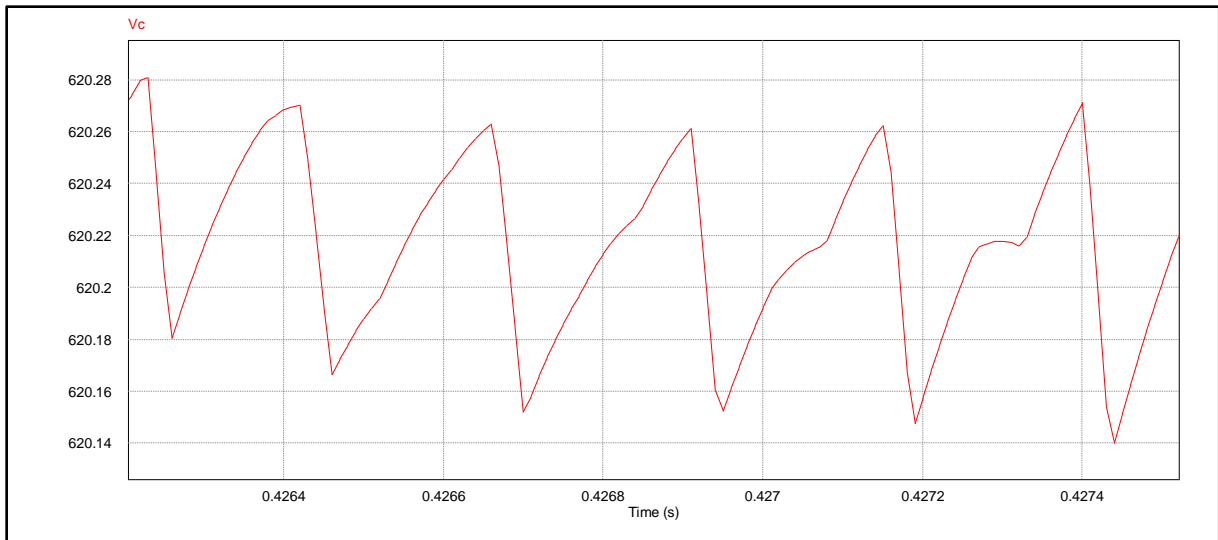


Figure 2- 7 Ondulation de V_c

$$V_{cmax} = 620.28 \text{ V} ; V_{cmin} = 620.18 \text{ V} \rightarrow \Delta V_c = 0.10 \text{ V}$$

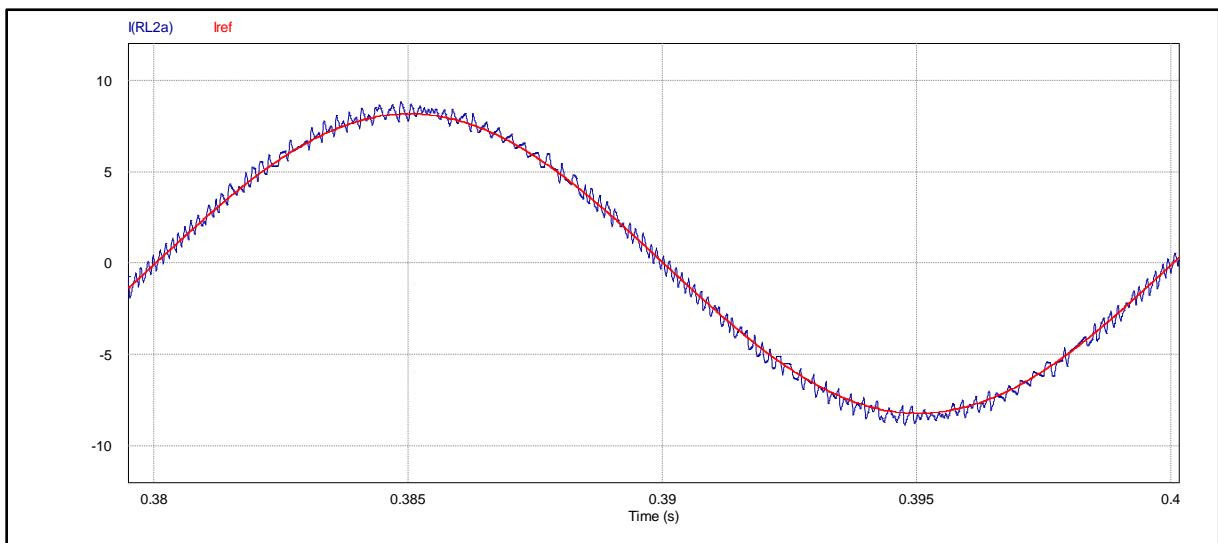


Figure 2- 8 Evolution de i_a avec i_{aref}

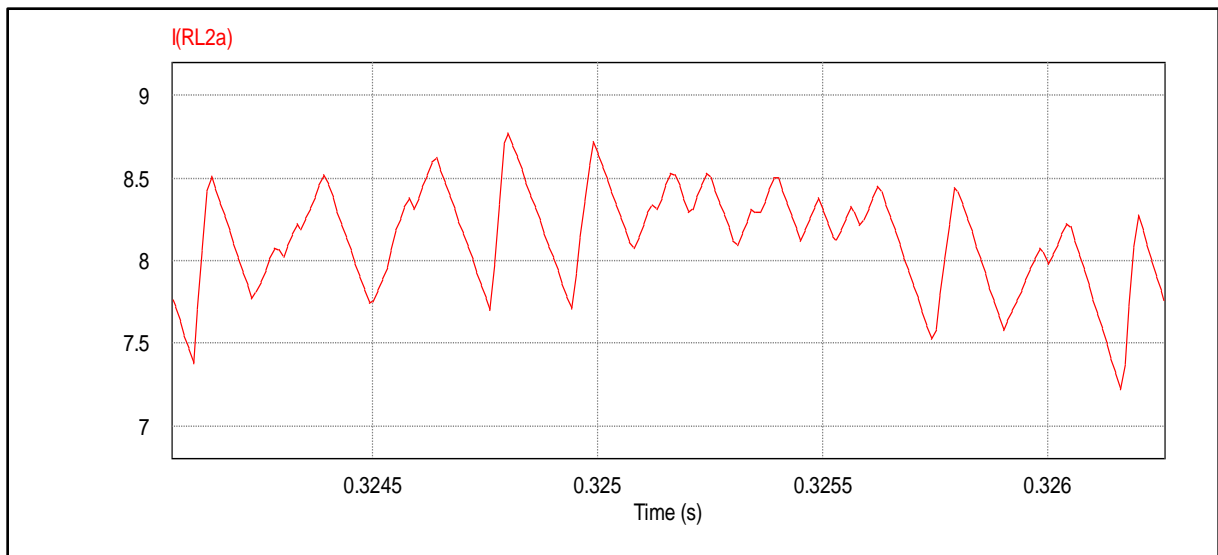


Figure 2- 9 Ondulation de i_a

$$i_{a \max} = 8.5 \text{ A} ; i_{a \min} = 7.5 \text{ A} \rightarrow \Delta i_a = 1 \text{ A}$$

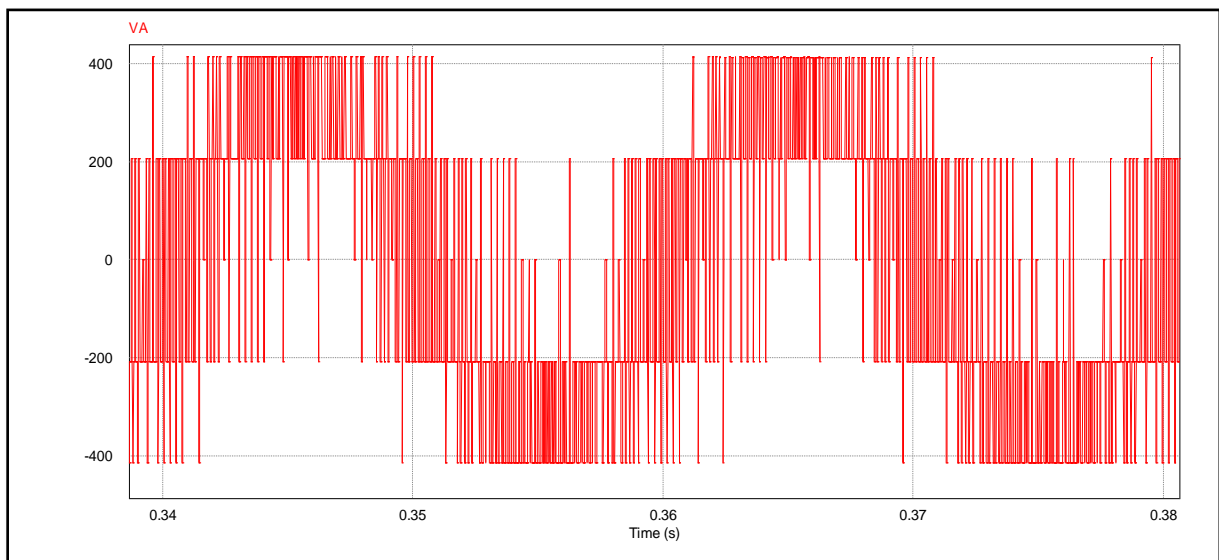


Figure 2- 10 Evolution de v_a

Le facteur de puissance dans ce cas est de l'ordre de 0.9988.

Le taux de distorsion d'harmoniques du courant d'entrée i_a dans ce cas est : THD = 4.69 %

Interprétation des résultats de simulation

Nous remarquons que :

- la tension et le courant du réseau sont en phase (figure II-5). Donc le facteur de puissance est presque unitaire et la consommation de la puissance réactive est pratiquement nulle.
- la tension du bus continu tend vers la valeur désirée après un court régime transitoire (figure II-6).
- le courant du réseau i_a suit le courant de référence i_{refa} dans une bande Δi (bande hystérésis), avec une fréquence variable (figure II-8).
- le taux de distorsion d'harmoniques est dans les limites tolérables.
- la tension aux bornes de l'inductance présente la différence entre la tension simple sinusoïdale du réseau triphasé et celle à l'entrée du redresseur qui est une onde MLI (figure II-10).

2.5 MLI à porteuse triangulaire

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

La technique de commande sinus-triangle telle qu'elle est définie peut permettre un réglage par les deux paramètres suivants:

L'indice de modulation $m = \frac{f_p}{f_m}$

Le coefficient de réglage $= \frac{V_m}{V_p}$, V_m et V_p étant respectivement les valeurs maximales de

la modulante et de la porteuse respectivement.

Le schéma de régulation est représenté par la figure 2-11.

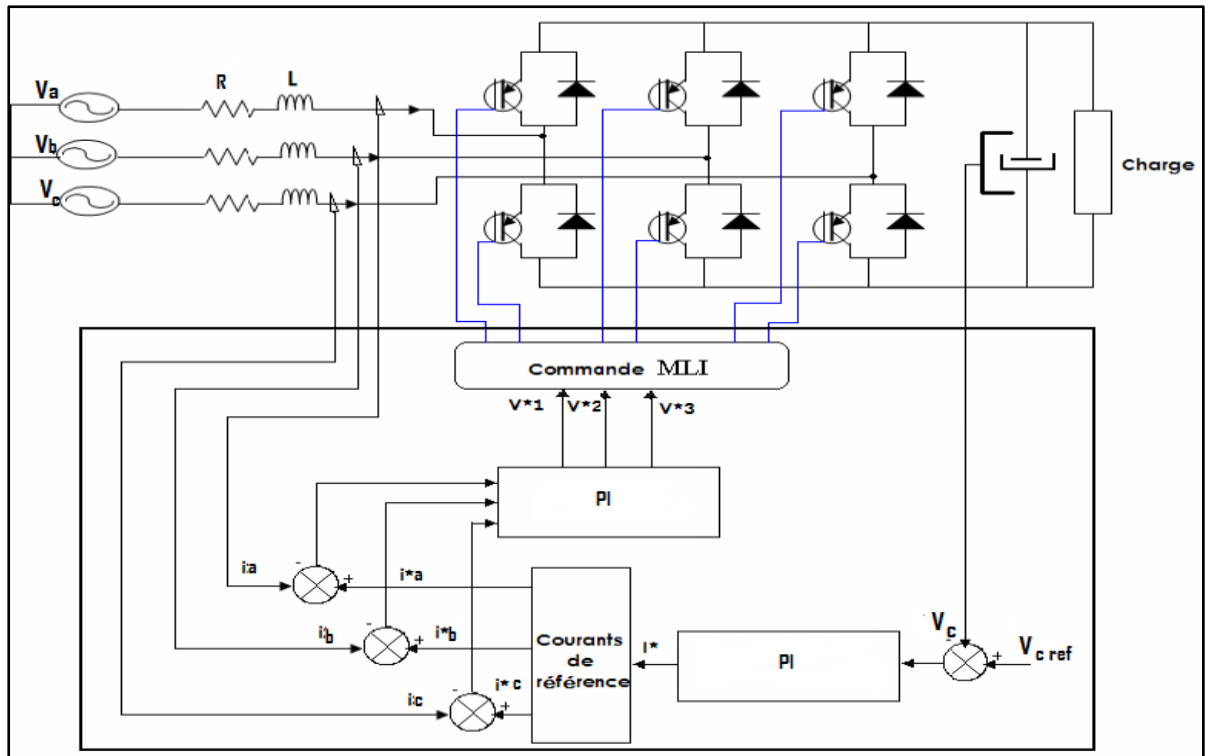


Figure 2- 11 Régulation en courant et en tension du redresseur MLI triphasé

2.5.1 Simulation de la commande MLI à porteuse triangulaire

Le Schéma de simulation dans l'annexe 1

Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes.

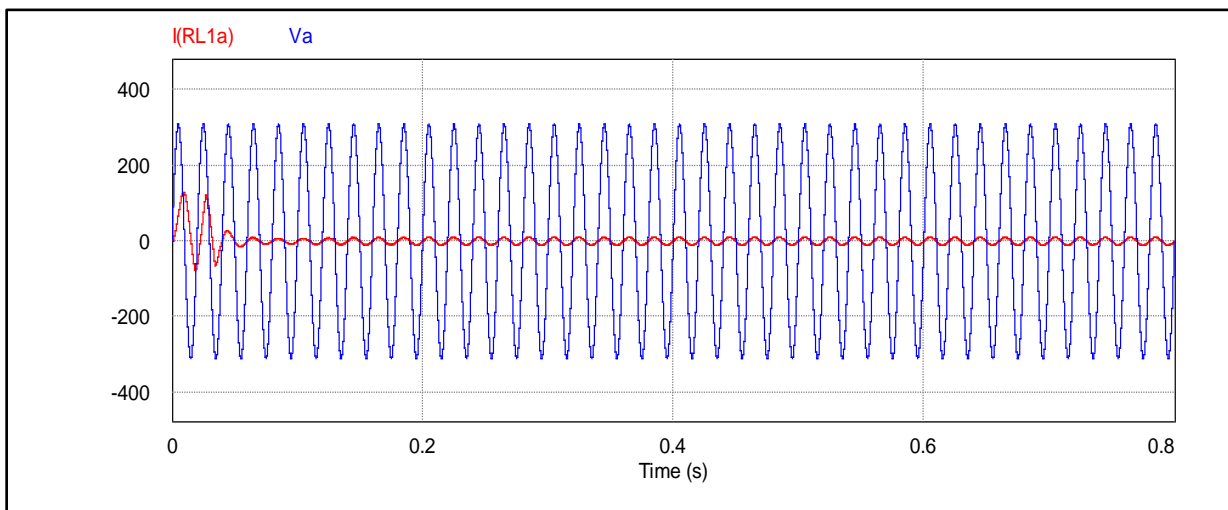


Figure 2- 12 Evolution de i_a avec V_a

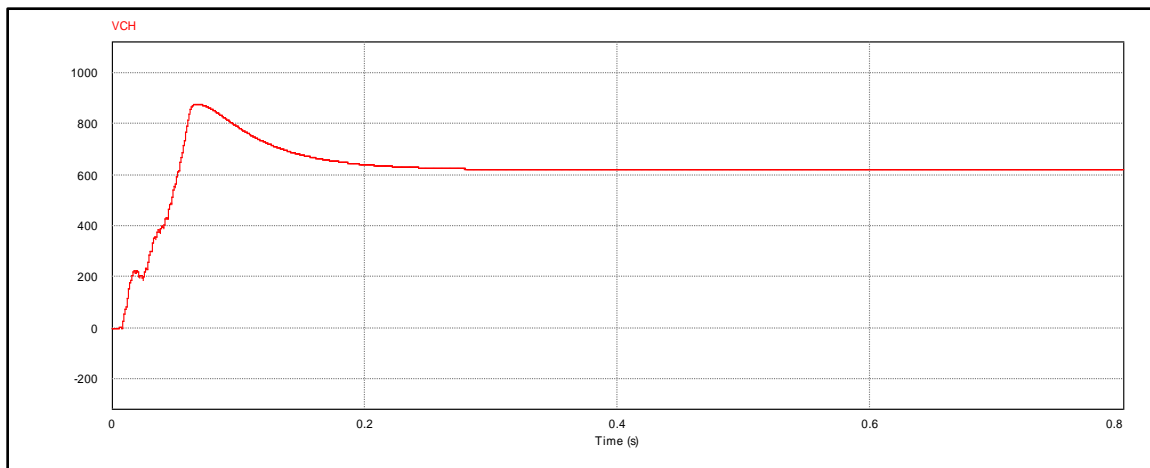


Figure 2- 13 Evolution de Vc

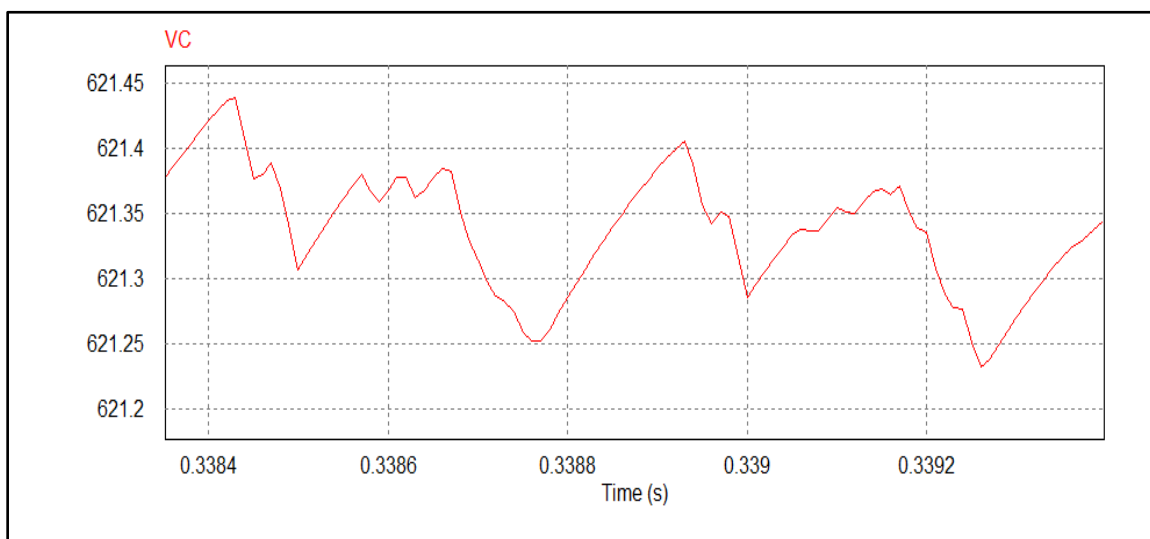


Figure 2- 14 Ondulation de Vc

$v_{cmax} = 621,44 \text{ V} ; v_{cmin} = 621,3 \text{ V} \rightarrow \Delta v_c = 0,14 \text{ V}$

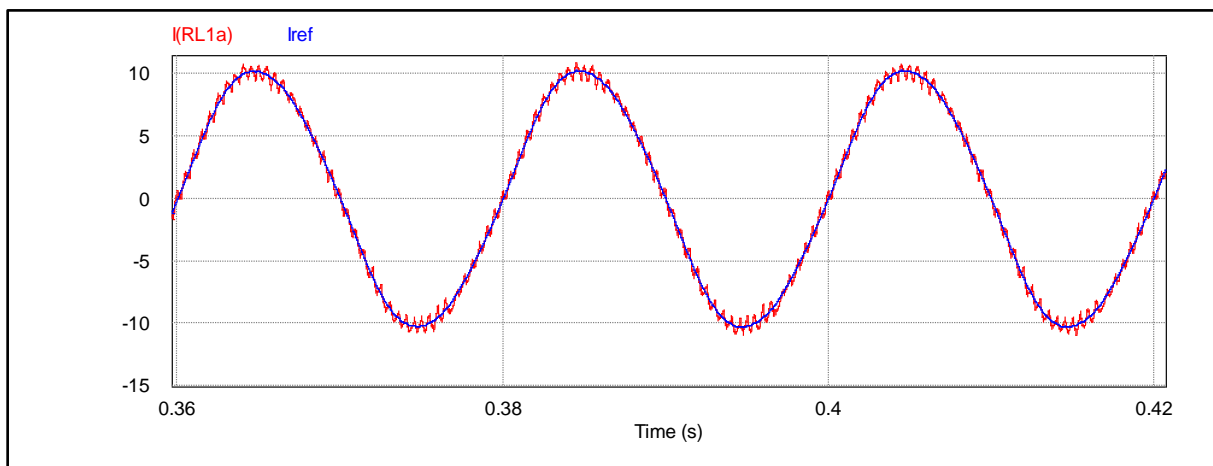


Figure 2- 15 Evolution de ia avec iaref

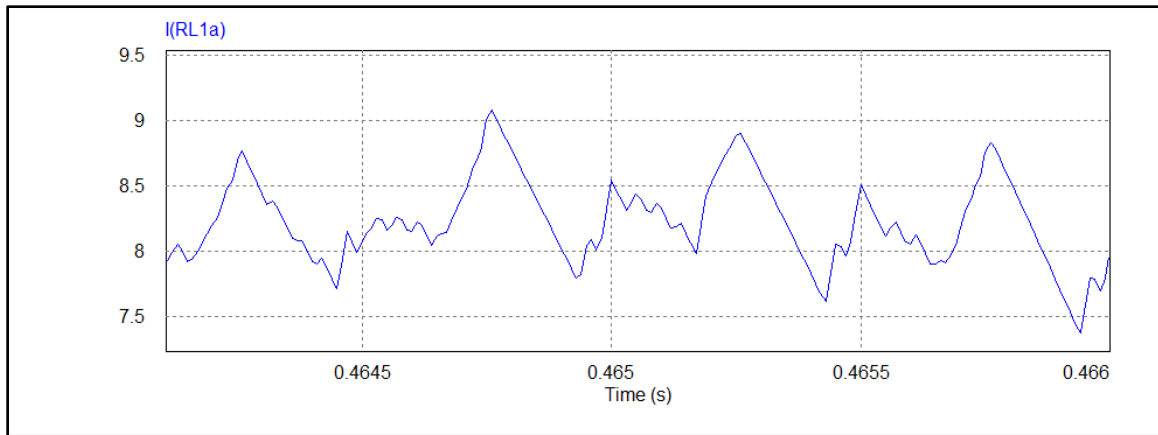


Figure 2- 16 Ondulation de i_a

$$i_{a \max} = 7.6 \text{ A} ; i_{a \min} = 8.8 \text{ A} \rightarrow \Delta i_a = 1.2 \text{ A}$$

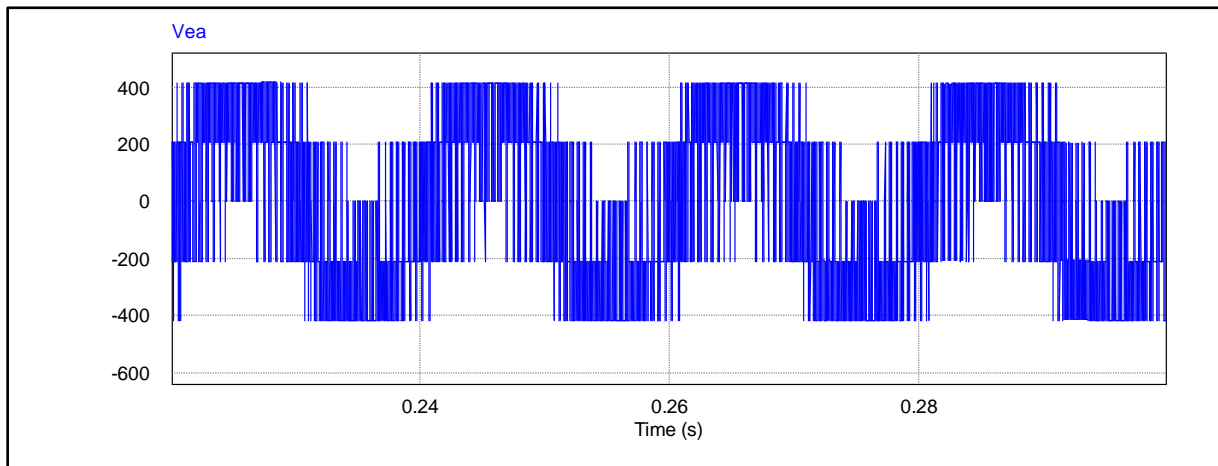


Figure 2- 17 Evolution de V_{ea}

Le facteur de puissance dans ce cas est de l'ordre de 0.9979.

Le taux de distorsion d'harmoniques du courant d'entrée i_a dans ce cas est : THD = 5.84 %

Le tableau suivant présente une comparaison entre les différents paramètres caractéristiques pour les deux types de commandes :

Tableau 2- 1 comparaison entre hystérésis et MLI sinus-triangle

Type de commande	Commande par Hystérésis	Commande par MLI sinus-triangle
Paramètres caractéristiques		
PF	0.9988	0.9979
THD (%) de i_a	4.69	5.84
Δi_a (A)	1	1.2
ΔV_c (V)	0.1	0.14

Interprétations des résultats :

Nous pouvons remarquer pour la commande par MLI sinus-triangle, ce qui suit :

- le courant d'entrée est quasi-sinusoïdal et en phase avec la tension d'entrée.
- le facteur de puissance est très amélioré et il est presque unitaire.
- le taux de distorsion harmonique du courant d'entrée il dépasse légèrement 5% ce qui confirme l'absorption sinusoïdale de courant pour ce type de redresseur.
- le tableau comparatif précédent montre que les paramètres caractéristiques obtenus pour la commande par hystérésis sont légèrement meilleurs que ceux obtenus pour la commande MLI sinus-triangle.

2.6 Conclusion

L'objet de ce chapitre était de présenter la modélisation et le contrôle par hystérésis et MLI (à porteuse triangulaire) d'un redresseur MLI à absorption sinusoïdale. La première partie a été consacrée au redresseur à hystérésis, en donnant le schéma de régulation, le principe de fonctionnement et les résultats de simulation. La deuxième partie a été consacrée au redresseur MLI sinus-triangle, en donnant sa topologie, ainsi que les résultats de simulation.

- la commande par hystérésis : malgré sa grande robustesse, sa rapidité et la simplicité de son implantation dans les systèmes, la commande par hystérésis présente certains inconvénients. En effet, la génération d'une fréquence de commutation variable rend difficile la localisation des fréquences harmoniques que l'on souhaite éliminer. Outre ce fonctionnement à fréquence libre est susceptible d'introduire des nuisances sonores et de bruyantes interférences entre les phases surtout dans le cas des systèmes triphasés à point neutre isolé.
- la commande par MLI : malgré la diversité de ses techniques et leur grande habilité à éliminer les harmoniques non désirés et de fonctionner à fréquence fixe, la commande MLI est imparfaite. En effet, le contenu harmonique généré par une onde MLI entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, pertes Joule et pertes par courants de Foucault). Elle génère dans les machines tournantes des oscillations de couple, des bruits acoustiques et des résonances électromécaniques.

Chapitre 3

3.1 INTRODUCTION

Les redresseurs polyphasés à diodes considérés dans ce travail sont à 6 phases, 9 phases et 12 phases qui produisent à la sortie une tension continue ayant des ondulations de fréquence égale à respectivement 12, 18 et 24 fois la fréquence d'alimentation.

Ces montages redresseurs sont constitués généralement de plusieurs redresseurs triphasés à 6 pulsations alimentés par une source à 6 phases, 9 phases ou 12 phases qui est obtenue par la connexion appropriée des bobinages d'un transformateur (ou autotransformateur) ayant plusieurs secondaires. Les sorties des redresseurs à 6 pulsations sont connectées en parallèle à la charge.[9]

3.2 Redresseur à 12pulsations

La figure 3-1 montre le schéma d'un montage redresseur à 12 pulsations qui est constitué de deux redresseurs à 6 pulsations dont les sorties sont connectés en parallèle à la charge par l'entremise des inductances d'interphase.

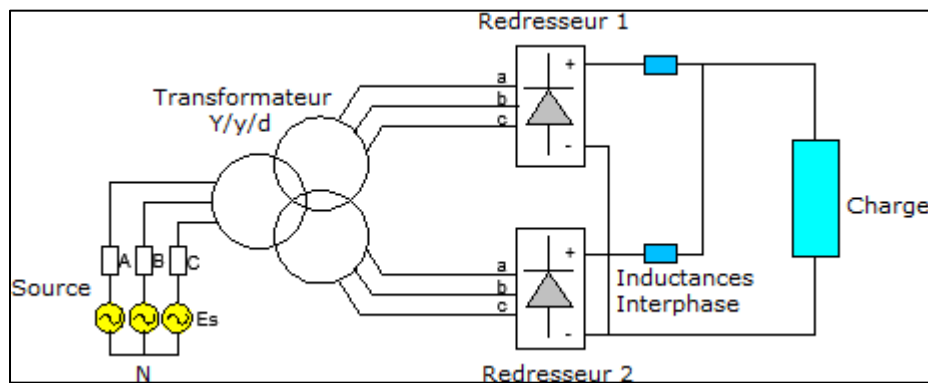


Figure 3- 1 Montage redresseur à 12 pulsations

La figure 3-2 montre la tension de sortie du redresseur V_{ch} avec une charge résistive. Cette tension est la superposition des tensions de sortie des deux ponts à 6 pulsations. À cause du déphasage de 30° entre les deux tensions de sortie, la fréquence des ondulations dans la tension V_{ch} est égale à 12 fois la fréquence de la source.

La figure 3-2 présente la tension de sortie du redresseur à 12 pulsations, les tensions DC des ponts 1 et 2 du montage et la tension ligne-ligne de référence $v(t)$ à l'entrée.

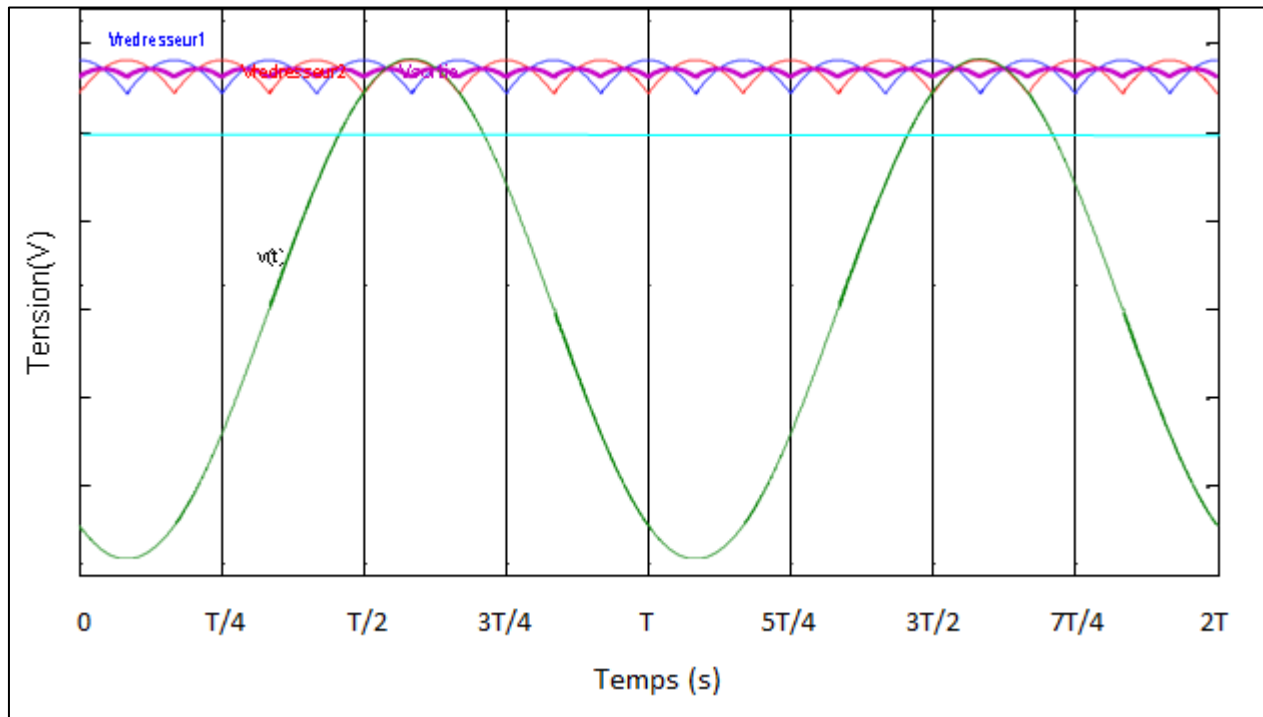


Figure 3- 2 Formes d'ondes de la tension de sortie d'un redresseur à 12 pulsations, les tensions de sortie des redresseurs 1 et 2 et la tension ligne-ligne $v(t)$ d'une phase à l'entrée

Puisque les deux sorties continues sont connectées en parallèle, la tension moyenne à la charge est égale à la tension moyenne d'un redresseur à 6 pulsations: $V_{\text{moy}} = 1.35V_{\text{rms}}$, où V_{rms} est la valeur efficace de la tension ligne-ligne aux secondaires.

Les inductances d'interphase sont utilisées pour limiter le courant de circulation entre les deux redresseurs et pour réduire les harmoniques des courants aux secondaires. Ces inductances sont généralement couplées pour améliorer leur effet.

La figure 3-3 montre un schéma de connexion parallèle de deux ponts redresseurs à 6 pulsations. Ce schéma est utilisé dans le calcul du courant de circulation et des ondulations de la tension à la charge.

Avec l'hypothèse que l'ondulation du courant de charge est négligeable par

rapport à l'ondulation dans les ponts, on peut écrire: $v_{d1} = v_L + v_{d2}$. Alors, la tension aux bornes de l'inductance d'interphase sera égale à: $v_L = v_{d1} - v_{d2}$. On aura aussi : $i_{L1} = -i_{L2}$.

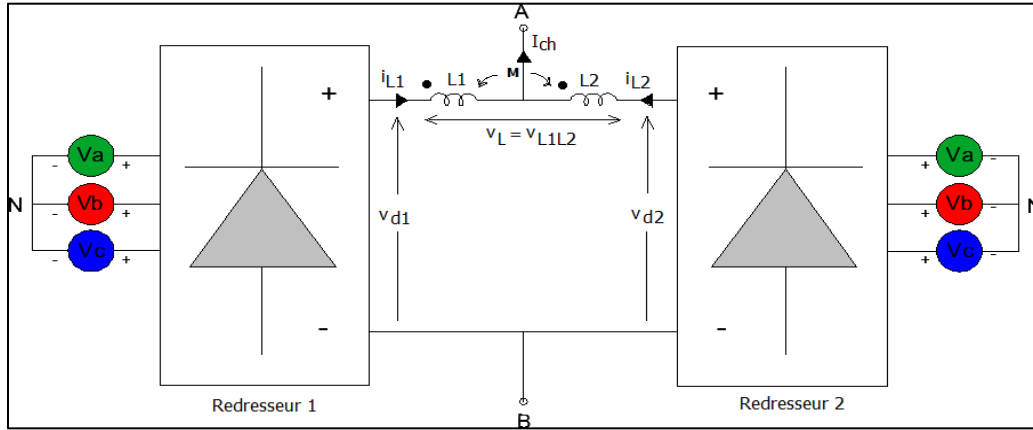


Figure 3- 3 Mise en parallèle de deux ponts triphasés double alternance

On peut écrire:

$$V_{d1} - V_{d2} = L_1 \frac{d(i_{L1} - i_{L2})}{dt} + M \frac{d(i_{L1} - i_{L2})}{dt} \quad (3-1)$$

$L_1 = L_2$ et l'inductance mutuelle M est presque de même valeur parce qu'on suppose que le couplage magnétique entre les inductances d'interphase est toujours parfait.

$$V_1 = 2L_1 \frac{d(i_{L1} - i_{L2})}{dt} = 4L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = L \frac{di_{L1}}{dt} \quad (3-2)$$

On peut constater que la valeur effective de l'inductance d'interphase est égale à 4 fois l'inductance propre de chaque bobine.

À la sortie des redresseurs, le courant de charge est égal à $I_{ch} = I_{L1} + I_{L2}$. Les tensions efficaces des deux ponts sont égales: $V_{rms} = V_{rms1} = V_{rms2}$.

Rappelons que les tensions v_{d1} et v_{d2} sont déphasées de 30° l'une par rapport à l'autre et les tensions v_{d1} et v_{d2} peuvent être exprimées en séries de Fourier en fonction de leurs tensions ligne–ligne efficaces [] :

$$V_{d1} = \sqrt{2}V_{rms1} \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \left(1 - \sum_{n=6,8,18\dots}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{6} \cos n\left(\omega t - \frac{\pi}{12}\right) \right) \quad (3-3)$$

$$V_{d2} = \sqrt{2}V_{rms2} \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \left(1 - \sum_{n=6,8,18\dots}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{6} \cos n\left(\omega t + \frac{\pi}{12}\right) \right) \quad (3-4)$$

La tension aux bornes de l'inductance d'interphase est égale à

$$V_L = V_{d1} - V_{d2} = \sqrt{2}V_{rms} \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \left(1 - \sum_{n=6,8,18\dots}^{\infty} \frac{4}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{6} \sin \frac{n\pi}{12} \sin n\omega t \right) \quad (3-5)$$

Comme la sixième harmonique est dominante, on peut considérer que la tension d'interphase est approximativement égale à sa sixième harmonique:

$$V_L = V_{d1} - V_{d2} = \frac{12}{35\pi} \sqrt{2}V_{rms} \sin 6\omega t \quad (3-6)$$

L'amplitude de la tension d'interphase est donc : $V_{L \text{ crête}} = \frac{12}{35\pi} \sqrt{2}V_{rms}$. On peut exprimer

cette valeur en fonction de la tension moyenne de charge ($V_{moy} = 1.35V_{rms}$) :

$$V_{L \text{ crête}} = 0.115V_{moy} \quad (3-7)$$

La figure 3-4 montre les formes d'ondes de la tension de l'inductance d'interphase et la tension de charge [19].

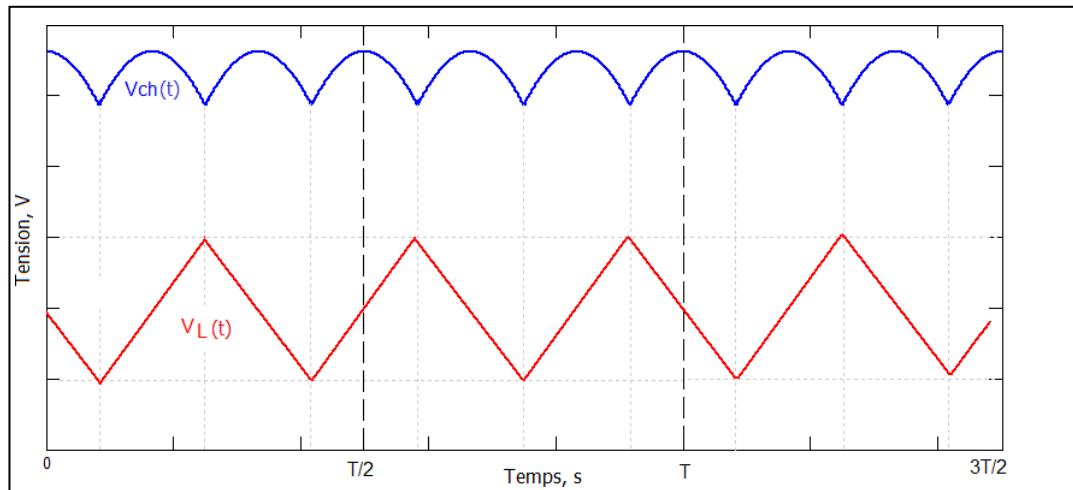


Figure 3-4 Formes d'ondes de la tension de l'inductance d'interphase $V_L(t)$ et la tension de charge $V_{ch}(t)$.

On peut remarquer que la tension de l'inductance d'interphase V_L est de forme triangulaire et sa fréquence est égale à 50% de la fréquence de la tension redressée. Pour calculer la valeur de l'inductance d'interphase couplée on utilise les expressions équivalentes suivantes []:

$$I_{L1 \text{ crête}} = \frac{V_L \text{ crête}}{2\pi(6f)(4L_1)} \quad (3-8)$$

$$\Delta I_{L1} = \frac{\Delta V_L}{2\pi(6f)(4L_1)} \quad (3-9)$$

Où L_1 est l'inductance d'interphase du pont 1, f est la fréquence de la source, $V_{L\text{crête}}$ est l'amplitude de la tension aux bornes de l'inductance d'interphase, $I_{L1 \text{ crête}}$ est l'amplitude du courant dans l'inductance d'interphase 1, ΔV_L est l'ondulation de la tension aux bornes de l'inductance d'interphase et ΔI_{L1} est l'ondulation du courant dans l'inductance d'interphase 1.

La figure 3-5 montre les formes d'ondes des courants au primaire du transformateur.

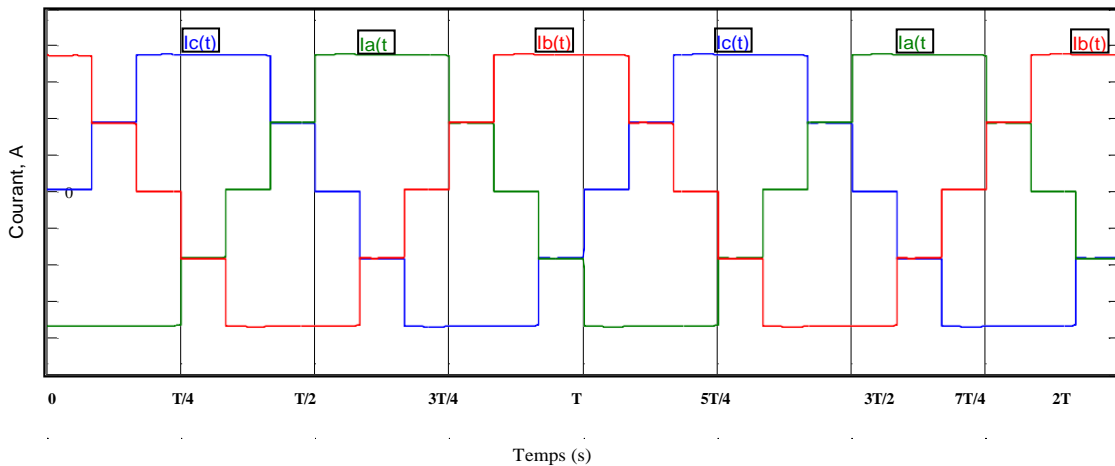


Figure 3- 5 Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ au primaire du transformateur d'entrée du montage redresseur à 12 pulsations

Le courant $i_a(t)$ à l'entrée peut être décomposé en série de Fourier :

$$i_a(t) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{\text{moy}} [\cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) + \dots] \quad (3-10)$$

où I_{moy} est le courant continu dans la charge.

On peut constater que les harmoniques de courant dans un redresseur à 12 pulsations sont d'ordre $12k \pm 1$ (11, 13, 23, 25,...).

Les valeurs efficaces des principaux harmoniques de courant sont données dans le tableau 3-1.

Tableau 3-1 Principaux harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 12 pulsations.

I_1	I_{11}	I_{13}	I_{23}	I_{25}
$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{moy}$	$\frac{3\sqrt{2}}{11\pi} I_{moy}$	$0 \frac{3\sqrt{2} I_{moy}}{13\pi}$	$\frac{3\sqrt{2}}{23\pi} I_{moy}$	$\frac{3\sqrt{2}}{25\pi} I_{moy}$
$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_s$	$\frac{3\sqrt{2}}{11\pi} I_s$	$\frac{3\sqrt{2}}{13\pi} I_s$	$\frac{3\sqrt{2}}{23\pi} I_s$	$\frac{3\sqrt{2}}{25\pi} I_s$
I_1	$\frac{1}{11} I_1$	$\frac{1}{13} I_1$	$\frac{1}{23} I_1$	$\frac{1}{25} I_1$

La valeur efficace du courant $i_a(t)$ peut être calculée en fonction des valeurs efficaces des harmoniques:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I^2} = \sqrt{I^2 a \left[1 + \frac{1}{5^2} + \frac{1}{7^2} + \frac{1}{11^2} + \frac{1}{13^2} + \dots \right]} = 1.001011 I_1 \quad (3-11)$$

On déduit le taux de distorsion harmonique total THDi de courant à l'entrée:

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} = 0.152 \quad (3-12)$$

Le facteur de puissance à l'entrée du redresseur est donné par la relation suivante:

$$PF = \frac{V_{moy} \times I_{moy}}{\sqrt{3} \times V_{rms} \times I_{rms}} \quad (3-13)$$

Où $V_{rms} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} V_{moy}$ et $I_{rms} = 1.001011 I_1 = 1.001011 \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{2}\pi} I_{moy}$

On déduit :

$$PF = \frac{1}{1.001011} = 0.989 \quad (3-14)$$

3.3 Redresseur à 18 pulsations

La figure 3-6 montre le schéma d'un montage redresseur à 18 pulsations qui est constitué de trois redresseurs à 6 pulsations dont les sorties sont connectés en parallèle à la charge par l'entremise des inductances d'interphase.

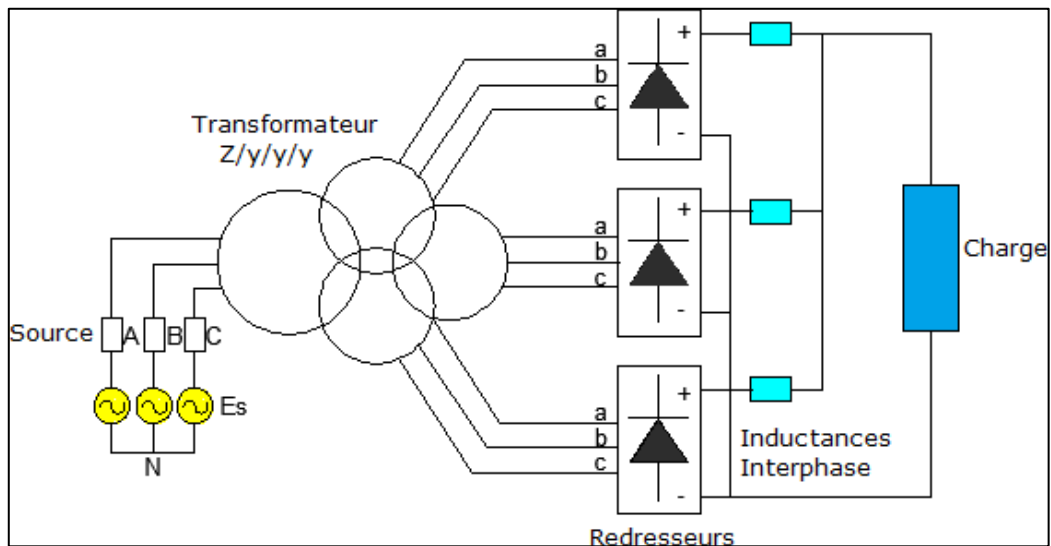


Figure 3- 6 Montage redresseur à 18 pulsations

À l'entrée, un transformateur avec trois secondaires en connexion Y est utilisé. Le primaire comporte 5 bobinages (par phase) connectés en configuration zigzag de façon appropriée pour créer un déphasage de 20° entre les trois redresseurs.

La figure 3-7 montre les tensions de sortie des trois redresseurs à 6 pulsations et la tension de sortie globale qui est la superposition des trois tensions de sortie. A cause du déphasage de 20° entre ces trois tensions, la fréquence des ondulations dans la tension V_{ch} est égale à 18 fois la fréquence de la source.

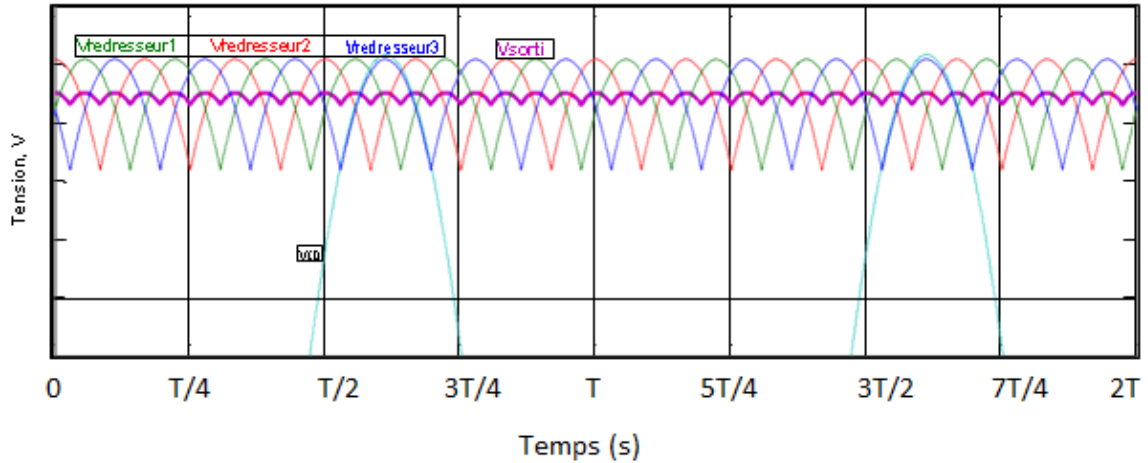


Figure 3-7 Formes d'ondes de la tension de sortie d'un redresseur à 18 pulsations et la tension ligne-ligne $v(t)$ d'une phase à l'entrée

Puisque les trois sorties continues sont connectées en parallèle, la tension moyenne aux bornes de la charge est égale à la tension moyenne d'un redresseur à 6pulsations, donnée par.

$$V_{\text{moy}} = 1.35 V_{\text{rms}} \quad (3-15)$$

Où V_{rms} est la valeur efficace de la tension ligne-ligne aux secondaires.

Les inductances d'interphase sont utilisées pour limiter le courant de circulation entre les redresseurs et pour réduire les harmoniques des courants aux secondaires. Ces inductances sont généralement couplées pour améliorer leur effet.

Rappelons que les tensions v_{d1} , v_{d2} et v_{d3} sont déphasées de 20° l'une par rapport à l'autre et les tensions v_{d1} , v_{d2} et v_{d3} peuvent être exprimées en séries de Fourier en fonction de leurs tensions

ligne–ligne efficace []:

$$V_{d1} = \sqrt{2} V_{\text{rms}} \frac{9}{\pi} \sin \frac{\pi}{9} \left(1 - \sum_{n=9,18,\dots}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{6} \cos n \left(\omega t - \frac{\pi}{18} \right) \right) \quad (3-16)$$

$$V_{d2} = \sqrt{2} V_{\text{rms}} \frac{9}{\pi} \sin \frac{\pi}{9} \left(1 - \sum_{n=9,18,\dots}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{6} \cos n \left(\omega t + \frac{\pi}{18} \right) \right) \quad (3-17)$$

$$V_{d3} = \sqrt{2} V_{\text{rms}} \frac{9}{\pi} \sin \frac{\pi}{9} \left(1 - \sum_{n=9,18,\dots}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{6} \cos n \left(\omega t + \frac{\pi}{18} \right) \right) \quad (3-18)$$

La tension aux bornes de l'inductance d'interphase pour les trois redresseurs est égale à

$$V_L = V_{d1} - V_{d2} = V_{d2} - V_{d3} \quad (3-19)$$

On peut utiliser v_{d1} et v_{d2} .

$$V_L = V_{d1} - V_{d2} = \sqrt{2}V_{rms} \frac{9}{\pi} \sin \frac{\pi}{9} \left(1 - \sum_{n=9,18,\dots}^{\infty} \frac{4}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{6} \sin \frac{n\pi}{18} \sin n\omega t \right) \quad (3-20)$$

Comme la neuvième harmonique est dominante, on peut considérer que la tension d'interphase est approximativement égale à sa neuvième harmonique:

$$V_L = V_{d1} - V_{d2} = \frac{9}{20\pi} \sin(20^\circ) \sqrt{2} V_{rms} \sin(9\omega t) \quad (3-21)$$

L'amplitude de la tension d'interphase est donc : $V_{L \text{ crête}} = \frac{9}{20\pi} \sin(20^\circ) \sqrt{2} V_{rms}$. On peut exprimer

Cette valeur en fonction de la tension moyenne de charge ($V_{moy} = 1.35V_{rms}$)

$$V_{L \text{ crête}} = 0.05132V_{moy} \quad (3-22)$$

La figure 3-8 montre les formes d'ondes des courants au primaire du transformateur.

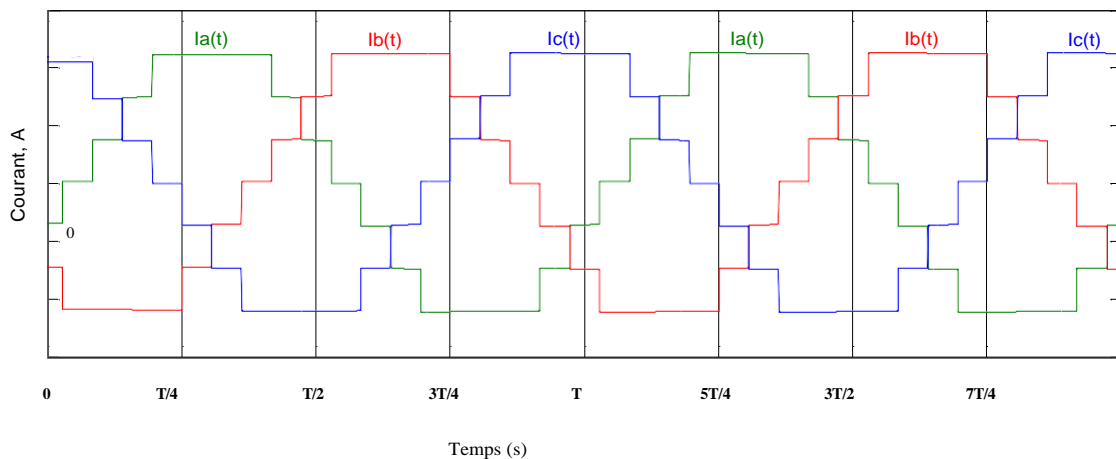


Figure 3- 8 Courants $i_a(t)$, $i_b(t)$ et $i_c(t)$ au primaire du transformateur d'entrée du montage redresseur à 18 pulsations

Le courant $i_a(t)$ à l'entrée peut être décomposé en série de Fourier:

$$I(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy} \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{17} \cos(17\omega t) + \frac{1}{19} \cos(19\omega t) + \dots \right] \quad (3-23)$$

Où I_{moy} est le courant continu dans la charge.

On peut constater que les harmoniques de courant dans un redresseur à 18 pulsations sont d'ordre $18k \pm 1$; (17, 19, 35, 37, ...).

Les valeurs efficaces des principaux harmoniques de courant sont données dans le tableau suivant :

Tableau 3- 2 Principaux harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 18 pulsations

I_1	I_{15}	I_{19}	I_{35}	I_{37}
$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{moy}$	$\frac{3\sqrt{2}}{15\pi} I_{moy}$	$\frac{3\sqrt{2}}{19\pi} I_{moy}$	$\frac{3\sqrt{2}}{35\pi} I_{moy}$	$\frac{3\sqrt{2}}{37\pi} I_{moy}$
$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_s$	$\frac{3\sqrt{2}}{15\pi} I_s$	$\frac{3\sqrt{2}}{19\pi} I_s$	$\frac{3\sqrt{2}}{35\pi} I_s$	$\frac{3\sqrt{2}}{37\pi} I_s$
I_1	$\frac{1}{15} I_1$	$\frac{1}{19} I_1$	$\frac{1}{35} I_1$	$\frac{1}{37} I_1$

La valeur efficace du courant $i_a(t)$ peut être calculée en fonction des valeurs efficaces des harmoniques:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I^2} = \sqrt{I^2 a \left[1 + \frac{1}{11^2} + \frac{1}{13^2} + \frac{1}{23^2} + \frac{1}{25^2} + \dots \right]} = 1.00388 I_1 \quad (3-24)$$

On déduit le taux de distorsion harmonique totale THDi de courant à l'entrée:

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} = 0.08819 \quad (3-25)$$

Le facteur de puissance à l'entrée du redresseur est donné par la relation suivante:

$$PF = \frac{V_{moy} \times I_{moy}}{\sqrt{3} \times V_{rms} \times I_{rms}} \quad (3-26)$$

Où $V_{rms} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} V_{moy}$ et $I_{rms} = 1.00388 I_1 = 1.003881 \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy}$

On déduit :

$$PF = \frac{1}{1.001011} = 0.99613 \quad (3-27)$$

3.4 Redresseur à 24 pulsations

La figure 3-9 montre le schéma d'un montage redresseur à 24 pulsations qui est constitué de quatre redresseurs à 6 pulsations dont les sorties sont connectés en parallèle à la charge par l'entremise des inductances d'interphase.

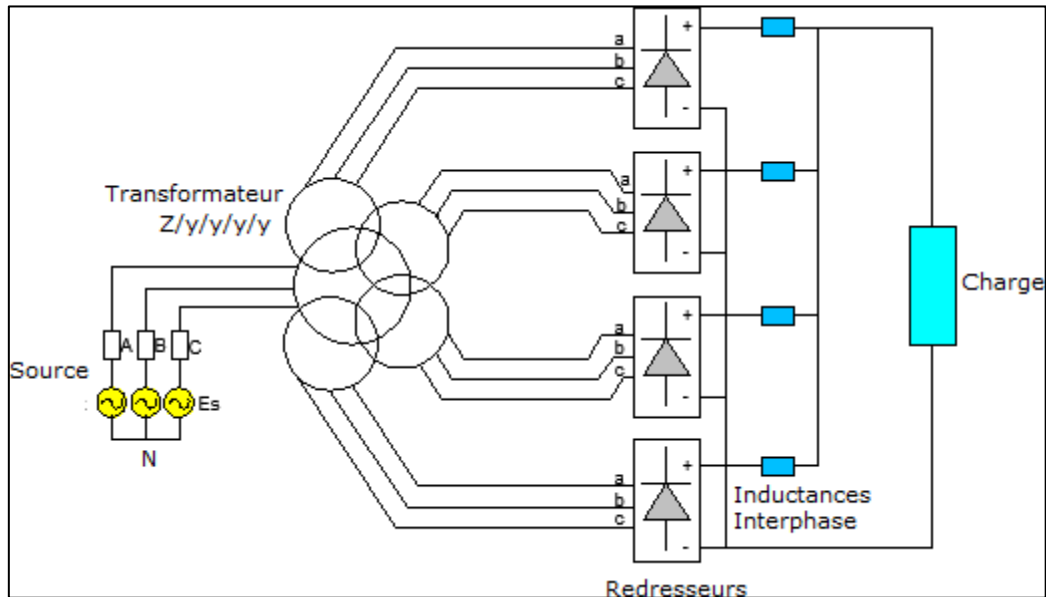


Figure 3- 9 Montage redresseur à 24 pulsations

À l'entrée, un transformateur avec quatre secondaires en connexion Y est utilisé. Le primaire comporte 7 bobinages (par phase) connectés en configuration zigzag de façon appropriée pour créer un déphasage de 15° entre les quatre redresseurs.

La figure 3-10 montre la tension de sortie du redresseur et les tensions des quatre redresseurs. Cette tension est la superposition des tensions de sortie des quatre ponts à 6 pulsations. A cause du déphasage de 15° entre les quatre tensions de sortie, la fréquence des ondulations dans la tension V_{ch} est égale à 24 fois la fréquence de la source.

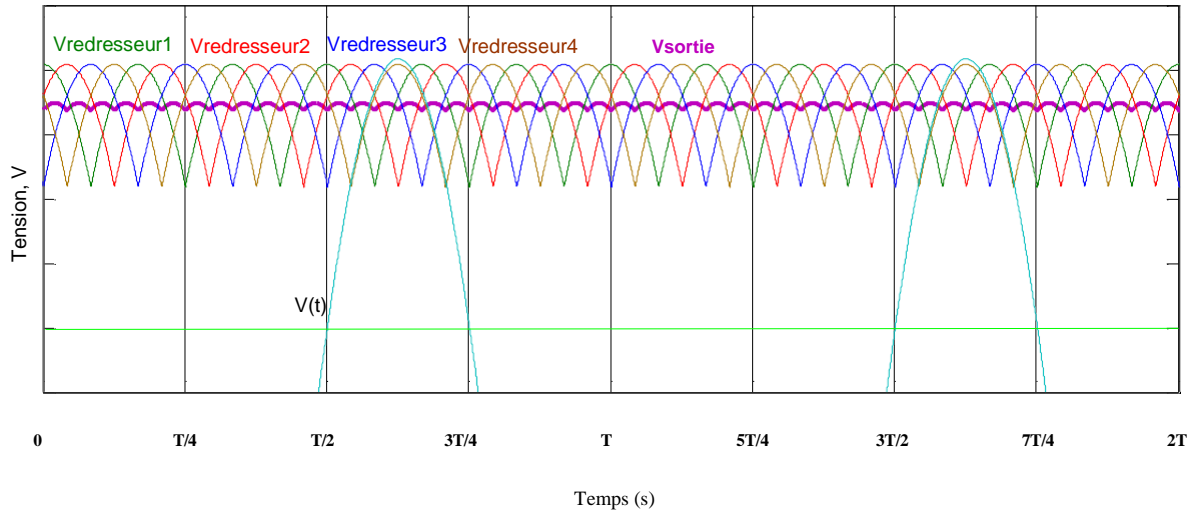


Figure 3- 10 Formes d’ondes de la tension de sortie d’un redresseur à 24 pulsations et la tension ligne-ligne $v(t)$ d’une phase à l’entrée

Puisque les quatre sorties continues sont connectées en parallèle, la tension moyenne aux bornes de la charge est égale à la tension moyenne d’un redresseur à 6 pulsations:

$$V_{\text{moy}} = 1.35 V_{\text{rms}} \quad (3-28)$$

où V_{rms} est la valeur efficace de la tension ligne-ligne aux secondaires.

Les inductances d’interphase sont utilisées pour limiter le courant de circulation entre les redresseurs et pour réduire les harmoniques des courants aux secondaires. Ces inductances sont généralement couplées pour améliorer leur effet.

Rappelons que les tensions v_{d1} , v_{d2} , v_{d3} et v_{d4} sont déphasées de 15° l’une par rapport à l’autre et les tensions v_{d1} , v_{d2} , v_{d3} et v_{d4} peuvent être exprimées en séries de Fourier en fonction de leurs tensions ligne–ligne efficaces []:

$$V_{d1} = \sqrt{2} V_{\text{rms}} \frac{12}{\pi} \sin \frac{\pi}{12} \left(1 - \sum_{n=12,24,\dots}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{12} \cos n \left(\omega t - \frac{7.5\pi}{180} \right) \right) \quad (3-29)$$

$$V_{d2} = \sqrt{2} V_{\text{rms}} \frac{12}{\pi} \sin \frac{\pi}{12} \left(1 - \sum_{n=12,24,\dots}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{12} \cos n \left(\omega t + \frac{7.5\pi}{180} \right) \right) \quad (3-30)$$

$$V_{d3} = \sqrt{2} V_{\text{rms}} \frac{12}{\pi} \sin \frac{\pi}{12} \left(1 - \sum_{n=9,18,\dots}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{12} \cos n \left(\omega t + \frac{22.5\pi}{180} \right) \right) \quad (3-31)$$

$$V_{d4} = \sqrt{2} V_{\text{rms}} \frac{12}{\pi} \sin \frac{\pi}{12} \left(1 - \sum_{n=9,18,\dots}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{12} \cos n \left(\omega t + \frac{37.5\pi}{180} \right) \right) \quad (3-32)$$

La tension aux bornes de l’inductance d’interphase pour les trois redresseurs est égale à

$$V_L = V_{d1} - V_{d2} = V_{d2} - V_{d3} = V_{d3} - V_{d4} \quad (3-33)$$

On peut utiliser v_{d1} et v_{d2} .

$$V_L = V_{d1} - V_{d2} = \sqrt{2}V_{rms} \frac{12}{\pi} \sin \frac{\pi}{12} \left(1 - \sum_{n=9,18,\dots}^{\infty} \frac{4}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{12} \sin \frac{7.5\pi}{180} \sin n\omega t \right) \quad (3-34)$$

Comme la neuvième harmonique est dominante, on peut considérer que la tension d'interphase est approximativement égale à sa neuvième harmonique :

$$V_L = V_{d1} - V_{d2} = \frac{48}{148\pi} \sin(15^\circ) \sqrt{2} V_{rms} \sin(12\omega t) \quad (3-35)$$

L'amplitude de la tension d'interphase est donc : V_L $V_{L \text{ crête}} = \frac{48}{148\pi} \sin(15^\circ) \sqrt{2} V_{rms}$. On peut exprimer Cette valeur en fonction de la tension moyenne de charge ($V_{moy} = 1.35V_{rms}$)

$$V_{L \text{ crête}} = 0.02897V_{moy} \quad (3-36)$$

La figure 3-11 montre les formes d'ondes des courants au primaire du transformateur.

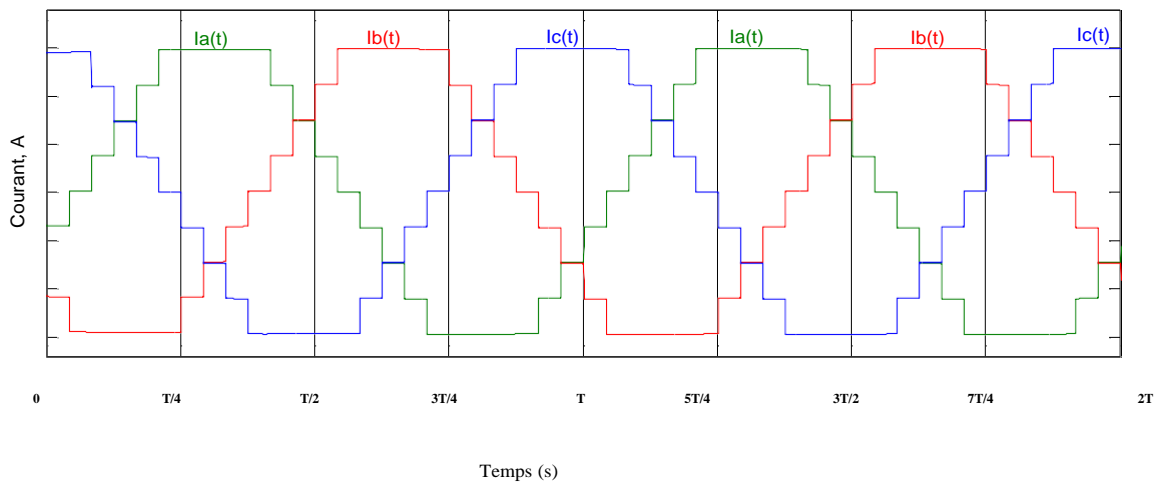


Figure 3- 11 Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$ et $I_c(t)$ au primaire du transformateur d'entrée du montage redresseur à 24 pulsations

Le courant $i_a(t)$ à l'entrée peut être décomposé en série de Fourier:

$$I(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy} \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{23} \cos(23\omega t) + \frac{1}{25} \cos(25\omega t) + \dots \right] \quad (3-37)$$

où I_{moy} est le courant continu dans la charge.

On peut constater que les harmoniques de courant dans un redresseur à 24 pulsations

sont d'ordre $24k \pm 1$ (23, 25, 47, 49, ...).

Les valeurs efficaces des principaux harmoniques de courant sont données dans le tableau suivant :

Tableau 3- 3Principaux harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 24 pulsations

I₁	I₂₃	I₂₅	I₄₇	I₄₉
$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{moy}$	$\frac{3\sqrt{2}}{23\pi} I_{moy}$	$\frac{3\sqrt{2}}{25\pi} I_{moy}$	$\frac{3\sqrt{2}}{47\pi} I_{moy}$	$\frac{3\sqrt{2}}{49\pi} I_{moy}$
$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_s$	$\frac{3\sqrt{2}}{23\pi} I_s$	$\frac{3\sqrt{2}}{25\pi} I_s$	$\frac{3\sqrt{2}}{47\pi} I_s$	$\frac{3\sqrt{2}}{49\pi} I_s$
I₁	$\frac{1}{23} I_1$	$\frac{1}{25} I_1$	$\frac{1}{47} I_1$	$\frac{1}{49} I_1$

La valeur efficace du courant $i_a(t)$ peut être calculée en fonction des valeurs efficaces des harmoniques:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I^2} = \sqrt{I^2 a \left[1 + \frac{1}{11^2} + \frac{1}{13^2} + \frac{1}{23^2} + \frac{1}{25^2} + \dots \right]} = 1.002177I_1 \quad (3-38)$$

On déduit le taux de distorsion harmonique totale THDi de courant à l'entrée:

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} = 0.0660 \quad (3-39)$$

Le facteur de puissance à l'entrée du redresseur est donné par la relation suivante:

$$PF = \frac{V_{moy} \times I_{moy}}{\sqrt{3} \times V_{rms} \times I_{rms}} \quad (3-40)$$

Où $V_{rms} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} V_{moy}$ et $I_{rms} = 1.002177I_1 = 1.002177 \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy}$

On déduit :

$$PF = \frac{1}{1.001011} = 0.99783 \quad (3-41)$$

3.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux redresseurs polyphasés ayant performances convenables pour le réseau d'alimentation électrique. Les redresseurs considérés comportent 6 phase, 9phase et 12 phase.

Les caractéristiques de ces montages sont étudiées théoriquement, la problématique considérée est liée à la réduction des courants harmoniques dans le processus de conversion de l'énergie AC/DC.

Les valeurs efficaces, les formes d'ondes et les spectres harmoniques à l'entrée ainsi que les valeurs moyennes et les ondulations à la sortie sont très approximatives.

Chapitre 4 :

4.1 INTRUCTION

Dans ce chapitre, les modèles de trois montages redresseurs polyphasés (6 phases, 9 phases et 12 phases) sont réalisés en utilisant Simulink à travers des blocs de SimPowerSystems (SPS). La simulation de ces montages permet d’obtenir leurs principales caractéristiques qui seront comparées avec les résultats de l’étude théorique du chapitre 3.

4.2 Redresseur 6 phases (12pulsations)

4.2.1Montage

La figure 4-1 montre le diagramme SPS d’un montage redresseur 6 phases (12 pulsations) qui fournissent une tension DC de 513 V à une charge résistive de 100Ω. La source AC possède des caractéristiques typiques (220/3800 V, 50 Hz.).

Les détails du bloc « 12 pulses Transformer Rectifier Unit 10 kVA » sont présentés à la figure 4.1. Le transformateur d’entrée est du type YYΔ avec les deux secondaires connectés à deux ponts redresseurs 6 pulsations qui sont reliés en parallèle à la charge DC. Deux inductances d’interphase couplées sont utilisées pour limiter le courant de circulation entre les deux redresseurs.

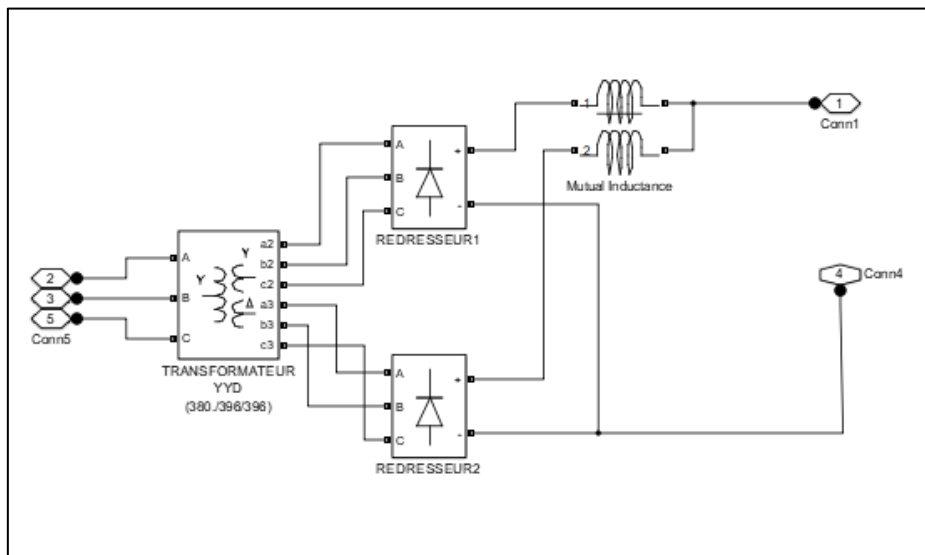


Figure 4- 1 Diagramme SPS d’un montage redresseur à 12 pulsations

Le rapport du transformateur YYD est ajusté à 1.0131 pour fournir à la sortie la tension continue de 513V. Les paramètres du transformateur d’entrée sont montrés à la figure 4-2.

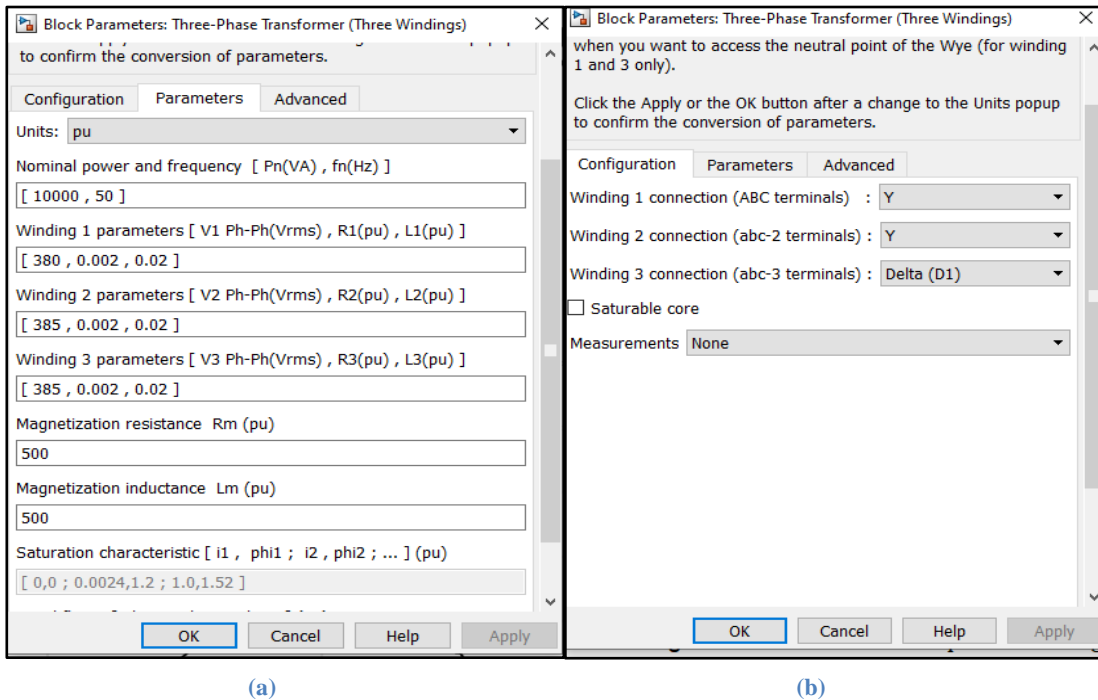


Figure 4- 2 Transformateur triphasé en configuration YYD- (a) Paramètres. (b) Connexion des enroulements

Les paramètres des blocs redresseurs à 6 pulsations sont présentés à la figure 4-3.

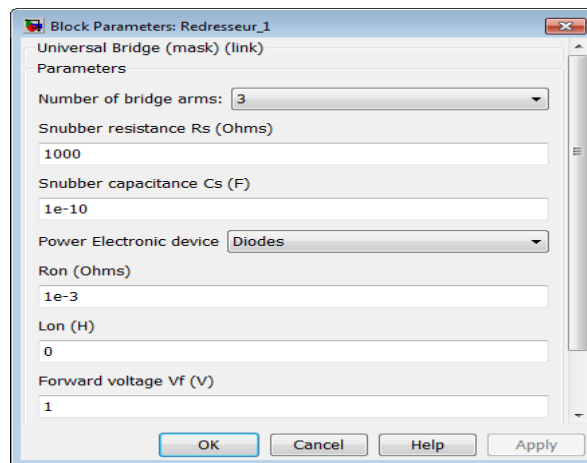


Figure 4- 3 Paramètres des blocs redresseurs à 6 pulsations

La figure 4-4 montre les inductances d'interphase couplées pour le montage SPS redresseur 12 pulsations.

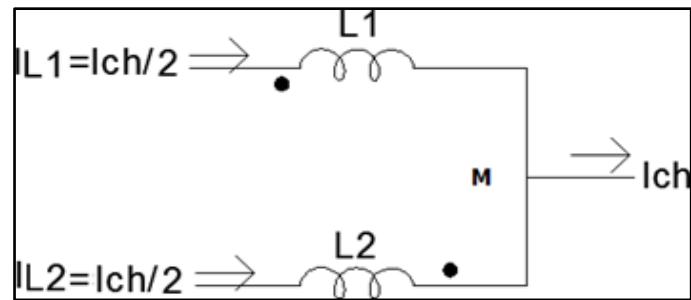


Figure 4- 4 Inductance interphase couplée du modèle SPS 12 pulsations

Les inductances couplées L_1 et L_2 sont calculées pour obtenir une ondulation maximale du courant de circulation égale à 10% du courant nominal de sortie ($\%I_{ch} = 0.513$ A). On suppose que les amplitudes des ondulations de courants ΔI_{L1} et ΔI_{L2} sont égales.

Avec $V_{moy} = 513$ V on peut calculer $V_{Lcrête} = 0.115 \times 513 = 58.995$ V.

$$I_{L1crête} = \frac{V_{Lcrête}}{2\pi(6 \times 50)(4L_1)} \quad (4-1)$$

L'ondulation de la tension à 6x50 Hz dans l'inductance d'interphase est $\Delta V_L = 117.99$ V.

On calcule l'inductance d'interphase L_1 avec l'équation

$$\Delta I_{L1} = \Delta I_{L2} = \frac{I_{ch}\%}{2} = \frac{\Delta V_L}{2\pi(6 \times 50)(4L_1)} \quad (4-2)$$

$$\frac{0.513}{2} = \frac{117.99}{2\pi(6 \times 50)(4L_1)} \quad (4-3)$$

Donc, l'inductance d'interphase L_1 du pont 1 est: $L_1 \approx 0.0608$ H. Dans le montage du modèle SPS, ces inductances sont: $L_1 = L_2 = 0.0608$ H et l'inductance mutuelle M est presque de même valeur.

Les paramètres du bloc de l'inductance d'interphase sont présentés à la figure 4.5.

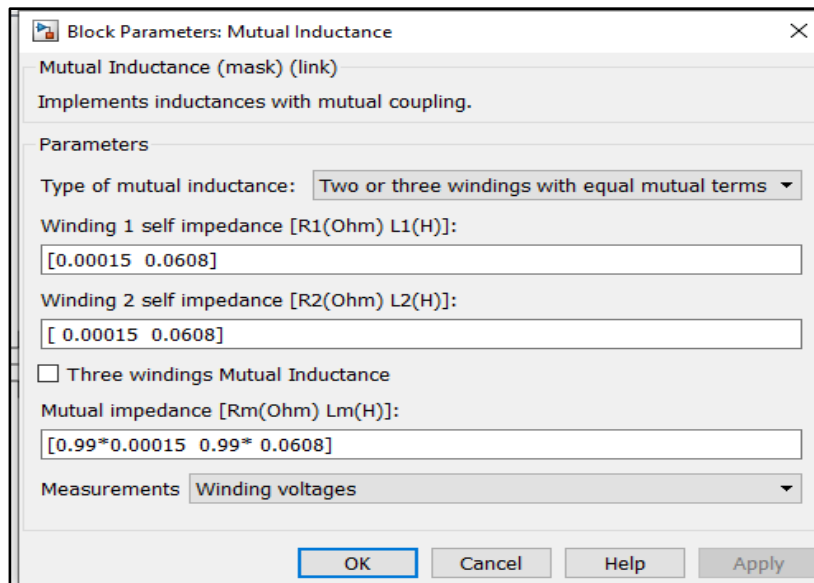


Figure 4- 5 Paramètres du bloc de l'inductance d'interphase couplée

4.2.2 Résultats de simulation

- **Formes d'ondes à la sortie**

Les formes d'ondes DC à la sortie sont montrées à la figure 4-6 et la figure 4-7

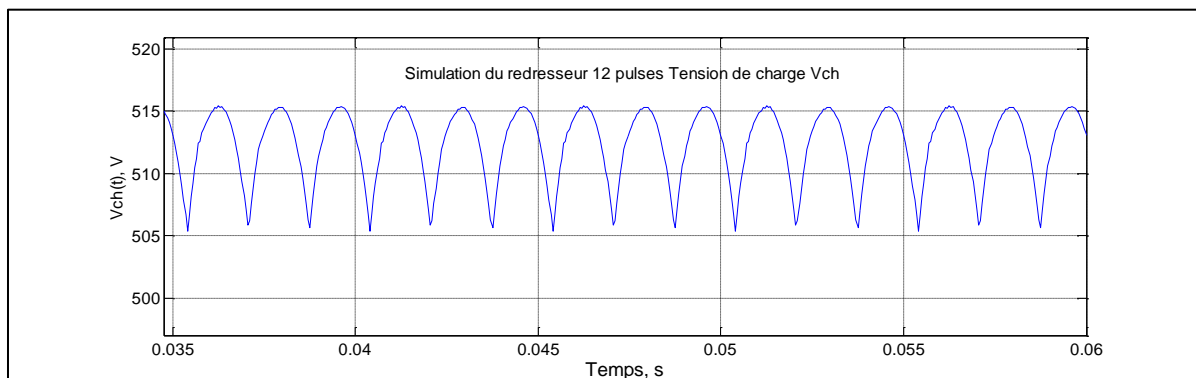


Figure 4- 6 Forme d'onde de la tension de la charge à la sortie du redresseur 12 pulsations

On remarque que l'ondulation de la tension DC est de l'ordre de 10V sur la courbe de V_{ch} .

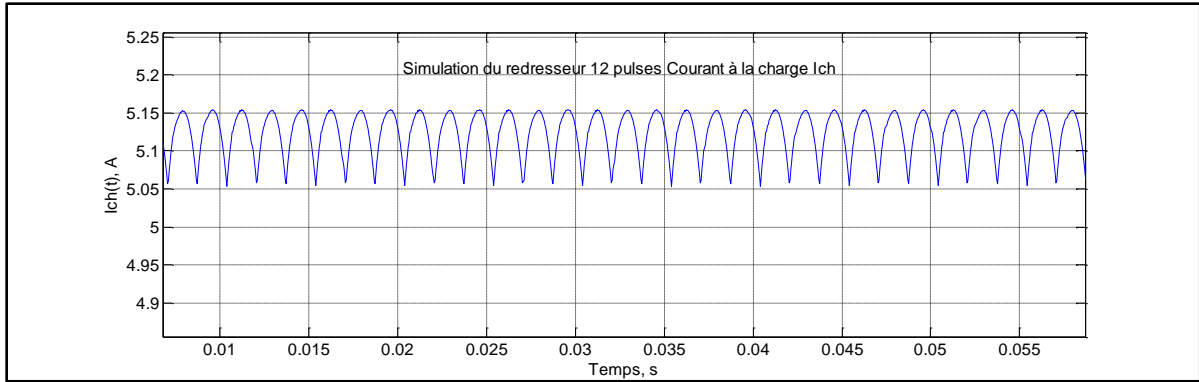


Figure 4- 7 Forme d'onde du courant de la charge à la sortie du redresseur 12 pulsations

- **Formes d'ondes de tension et de courant à l'entrée**

La figure 4-8 et la figure 4-9 présentent respectivement les formes d'ondes des tensions ligne-neutre $v_a(t)$, $v_b(t)$ et $v_c(t)$ et les courants de ligne $i_a(t)$, $i_b(t)$ et $i_c(t)$ au primaire du transformateur pour une charge de 100Ω .

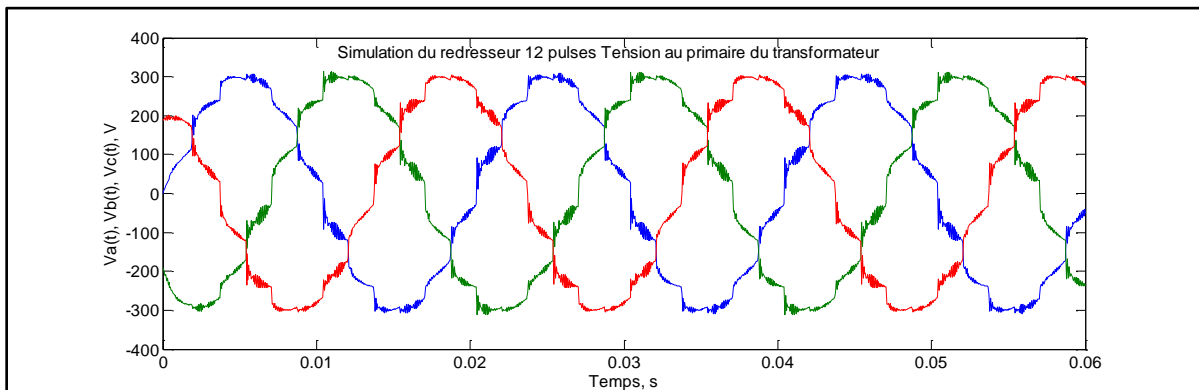


Figure 4- 8 Formes d'ondes des tensions à l'entrée du redresseur 12 pulsations

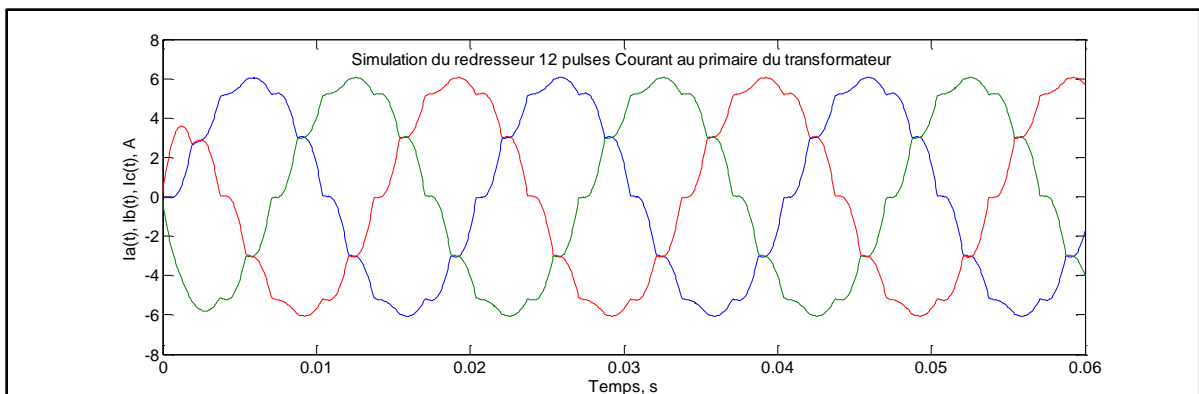


Figure 4- 9 Formes d'ondes des courants à l'entrée du redresseur 12 pulsations

Le facteur d'ondulation de la tension DC est calculé par la relation suivante:

$$FO = [V_{chac}(rms)/V_{moy}] \times 100\% \quad (4-4)$$

Où $V_{chac} (rms)$ est la valeur efficace des ondulations et V_{moy} est la valeur moyenne de la tension de sortie.

• **Performance du montage redresseur 12 pulsations en fonction de la charge**

Les différentes variables du montage redresseur (tensions, courants, puissances, facteur de puissance) sont obtenues à l'aide des blocs de mesure connectés à l'entrée et à la sortie comme montrés à la figure 4.10.

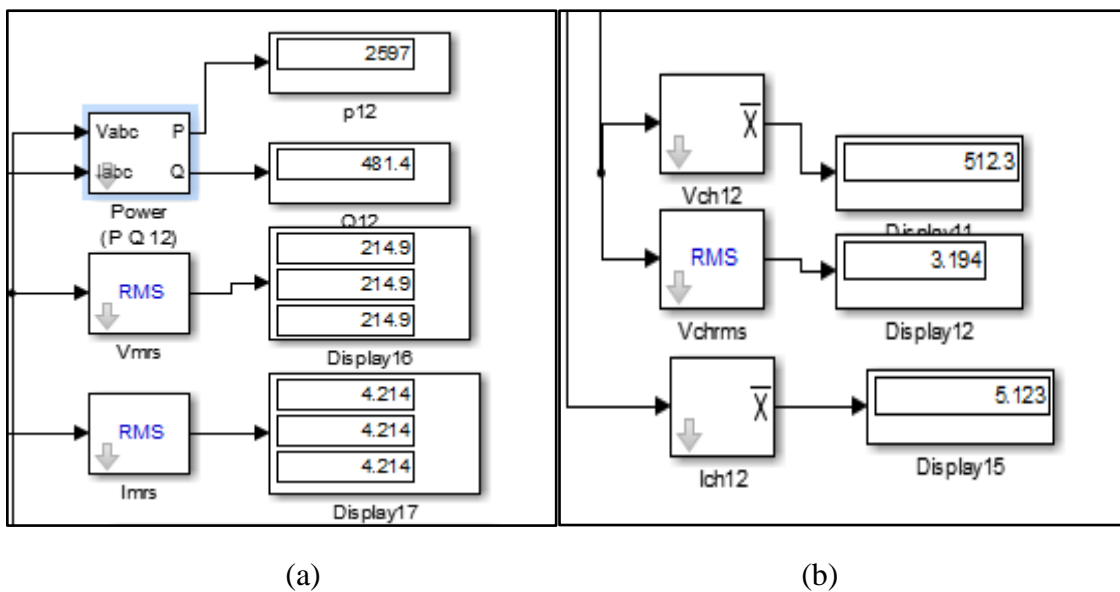


Figure 4- 10 Les blocs de mesure du montage redresseur .(a)Mesures à l'entrée.(b)Mesures à la sortie

La charge DC a une valeur nominale de 100Ω . Les variables à l'entrée et à la sortie du redresseur 12 pulsations sont présentées au tableau 4.1

Tableau 4- 1 Variables à l'entrée et à la sortie du redresseur 12 pulsations

Redresseur 6 phases (12 pulsations)		
Charge	100Ω	
Entrée	V_a [V]	214.9
	I_a [A]	4.21
	S [VA]	2641.2
	P [W]	2597
	Q [VAR]	481.4
	FP	0.983
	V_{moy} [V]	512.8

Sortie	I_{moy} [A]	5.128
	$V_{chac (rms)}$ [V]	1.907
	FO_v [%]	0.37

- **Harmoniques de tension et de courant à l'entrée**

Les harmoniques des tensions et des courants à l'entrée du redresseur (au primaire du transformateur) pour une charge de 100Ω , obtenues avec la fonction FFT de MATLAB, sont présentés au tableau 4.2.

Tableau 4- 2 Les harmoniques de tension et de courant à l'entrée du redresseur 12pulsations

Redresseur 6 phases (12 pulsations)								
Ordre	h_1	$h_{11} (\%I_1)$	$h_{13} (\%I_1)$	$h_{23} (\%I_1)$	$h_{25} (\%I_1)$	$h_{35} (\%I_1)$	$h_{37} (\%I_1)$	THD (%)
Harmoniques de tension	302.8V	5.03	3.89	1.92	1.74	1.18	1.09	8.59
Harmoniques de courant	5.947 A	5.28	3.45	0.96	0.80	0.38	0.33	6.45

La figure 4-11 et la figure 4-12 montrent respectivement les spectres de tension et de courant à l'entrée du redresseur 12 pulsations. On reconnaît les harmoniques d'ordre $12k \pm 1$ comme prévu par la théorie.

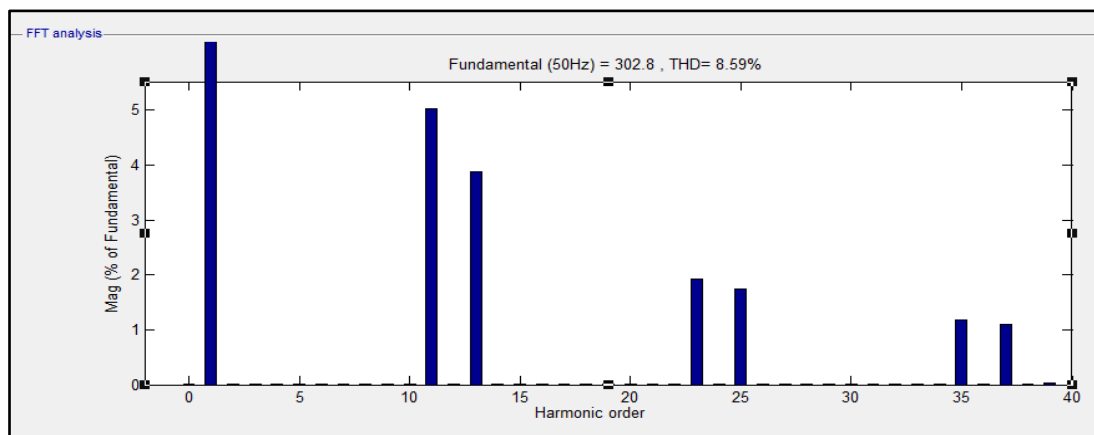


Figure 4- 11 Spectre des tensions au primaire du transformateur

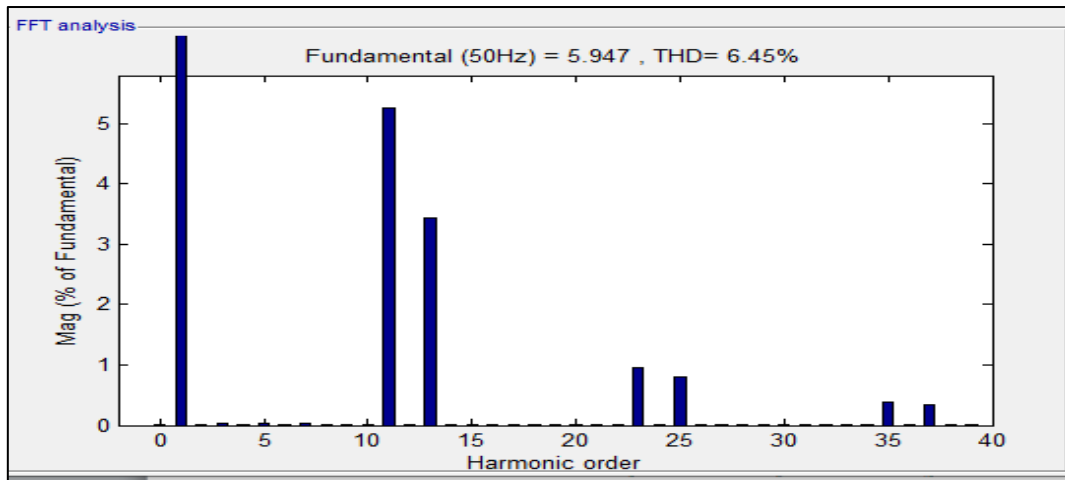


Figure4- 12 Spectre des courants au primaire du transformateur

4.3 Redresseur 9 phases (18pulsations)

4.3.1 Montage

La figure 4-13 montre le diagramme SPS d'un montage redresseur 9 phases (18 pulsations) qui fournissent une tension DC de 513 V à une charge résistive de 100Ω. La source AC possède des caractéristiques typiques (220/380 V, 50 Hz,)

Les détails du bloc « 18 pulses Transformer Rectifier Unit 10 kVA » sont présentés à la figure 4-13. Le transformateur d'entrée est composé de trois transformateurs du type Zig-Zag- Y avec les primaires connectés en série. Les secondaires avec les déphasages respectifs de 20°, 40° et 60° sont connectés à trois ponts redresseurs 6 pulsations qui sont reliés en parallèle à la charge DC. Trois inductances d'interphase couplées sont utilisées pour limiter le courant de circulation entre les ponts redresseurs.

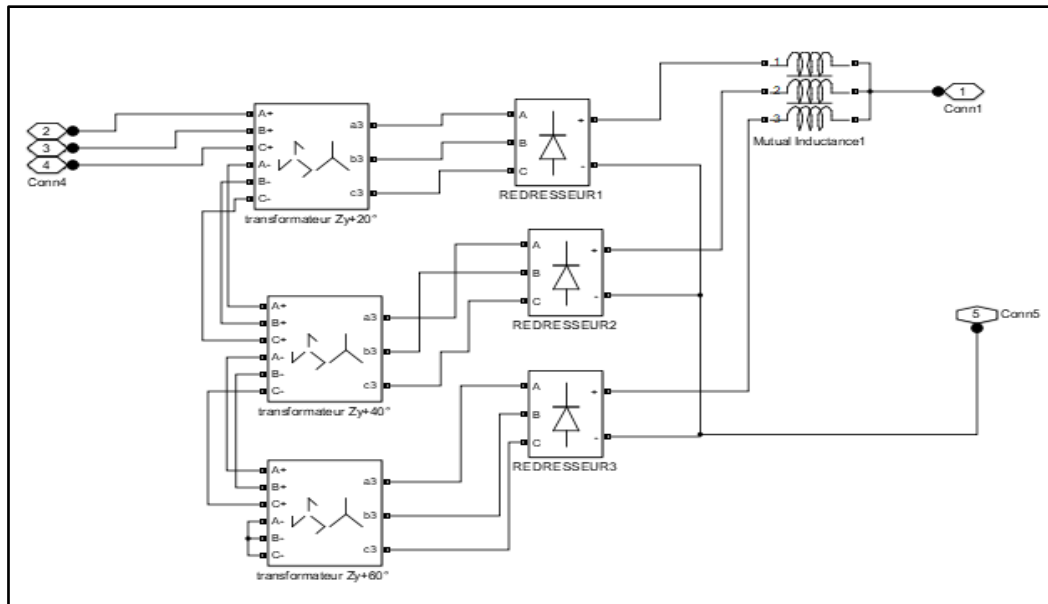
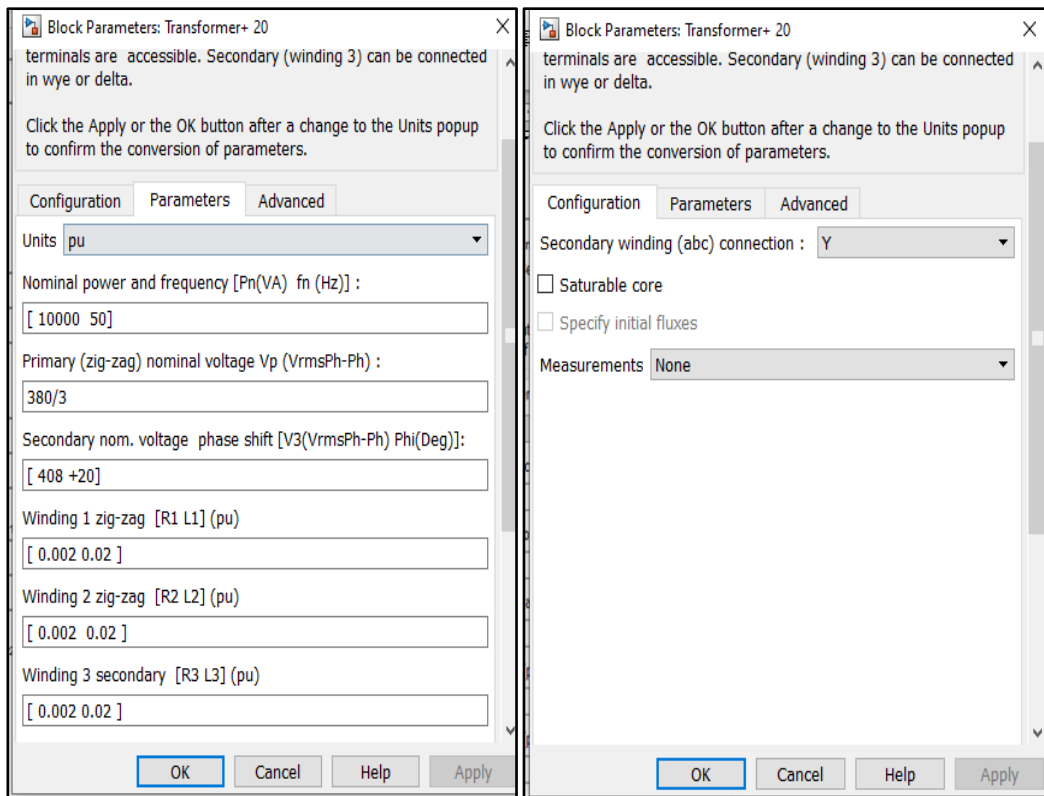


Figure 4- 13 Diagramme SPS d'un montage redresseur à 18 pulsations

Détails du bloc du TRU.

Les rapports des transformateurs ZigZag-Y sont ajustés à 1.073 pour fournir à la sortie la tension continue de 513 V. Les paramètres des transformateurs d'entrée sont montrés à la figure 4-14.



(a)

(b)

Figure 4- 14 Les transformateurs ZigZag-Y du montage redresseur à 18 pulsations.(a) Paramètres d'un transformateur à déphasage de 20° (identiques pour 40°et60°).(b) Configuration des enroulements.

La figure 4-15 montre les inductances d'interphase couplées pour le montage SPS redresseur 18 pulsations.

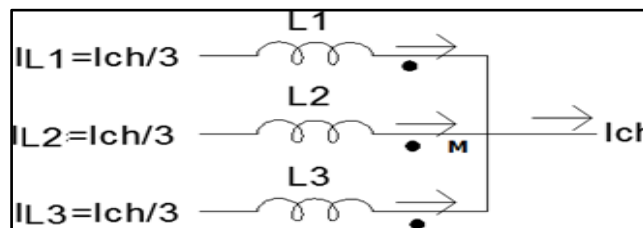


Figure 4- 15 Inductance interphase couplée du modèle SPS 18 pulsations

Les inductances couplées L_1 , L_2 et L_3 sont calculées pour obtenir une ondulation maximale du courant de circulation égale à 10% du courant nominal de sortie ($\%I_{ch} = 0.513A$). On suppose que les amplitudes des ondulations de courants ΔI_{L1} , ΔI_{L2} et ΔI_{L3} sont égales.

Avec $V_{moy} = 513 V$ on peut calculer $V_{Lcrête} = 0.05132 \times 513V = 26.3V$. L'inductance d'interphase peut être calculée avec l'équation suivante:

$$I_{L1crête} = \frac{V_{L1crête}}{2\pi(9 \times 50)(9L_1)} \quad (4-5)$$

L'ondulation de la tension à $9 \times 50 Hz$ dans l'inductance d'interphase est $\Delta V_L = 52.63 V$

On réécrit l'équation en fonction de l'ondulation de la tension de l'inductance d'interphase:

$$\Delta I_{L1} = \Delta I_{L2} = \Delta I_{L3} = \frac{I_{ch}\%}{2} = \frac{\Delta V_L}{2\pi(9 \times 50)(9L_1)} \quad (4-6)$$

$$\frac{0.513}{2} = \frac{52.63}{2\pi(9 \times 50)(9L_1)} \quad (4-7)$$

Donc, l'inductance d'interphase L_1 du pont 1 est: $L_1 \approx 0.0083H$. Dans le montage du modèle SPS ces inductances sont : $L_1 = L_2 = L_3 = 0.0083H$ et l'inductance mutuelle est presque de même valeur.

Les paramètres du bloc de l'inductance d'interphase sont présentés à la figure 4-16.

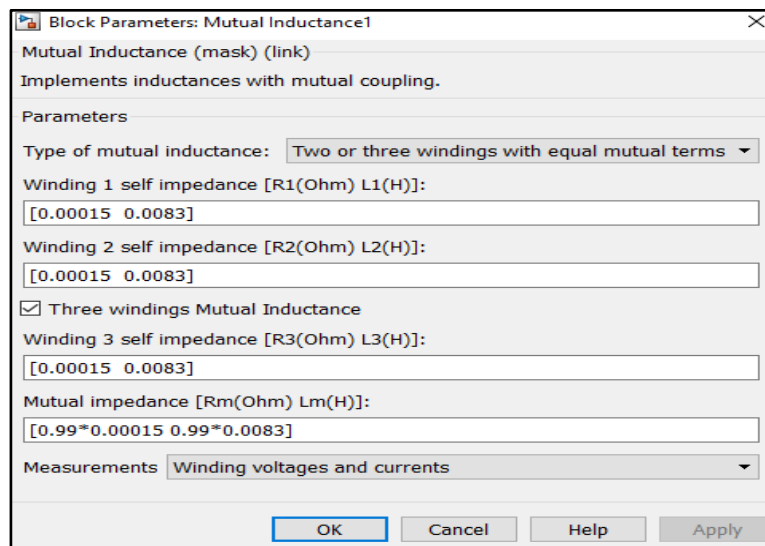


Figure 4- 16 Paramètres du bloc de l'inductance d'interphase couplée

4.3.2 Resultat de simulation

- **Formes d'ondes de tension à la sortie**

Les formes d'ondes DC à la sortie sont montrées aux figures 4-17 et 4-18.

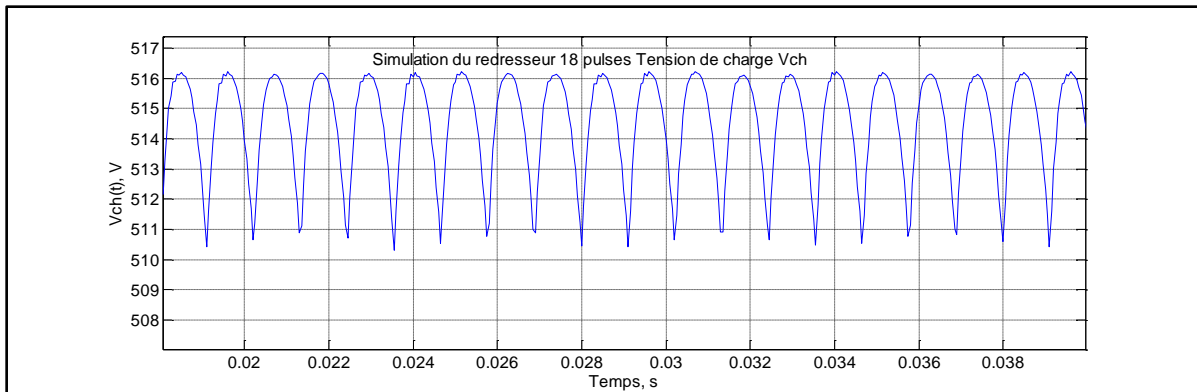


Figure 4- 17 Forme d'onde de la tension à la sortie du redresseur 18 pulsations

On remarque que l'ondulation de la tension DC est de l'ordre de 5V sur la courbe de V_{ch}

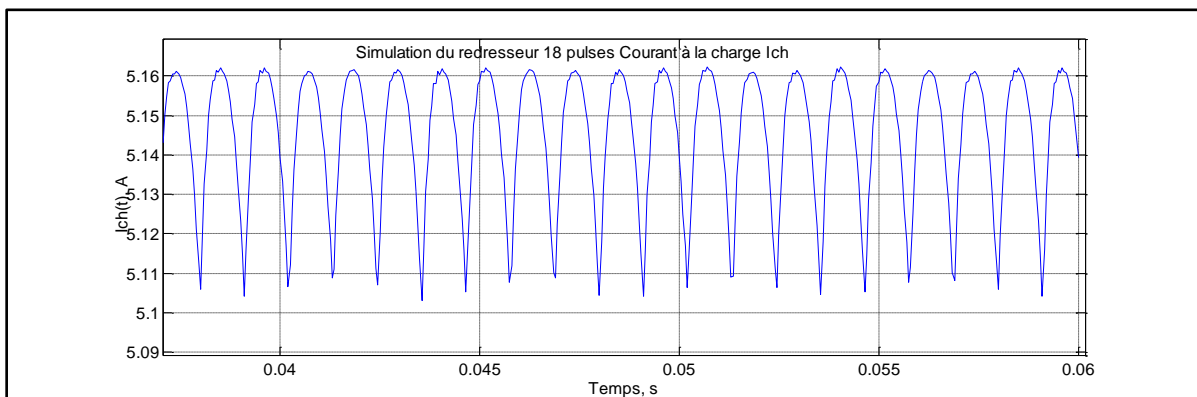


Figure 4- 18 Forme d'onde du courant à la sortie du redresseur 18 pulsations

- **Formes d'ondes de tension et de courant à l'entrée**

La figure 4-19 et la figure 4-20 représentent respectivement les formes d'ondes des tensions ligne-neutre $v_a(t)$, $v_b(t)$ et $v_c(t)$ et des courants de ligne $i_a(t)$, $i_b(t)$ et $i_c(t)$ à l'entrée AC pour une charge de 100Ω .

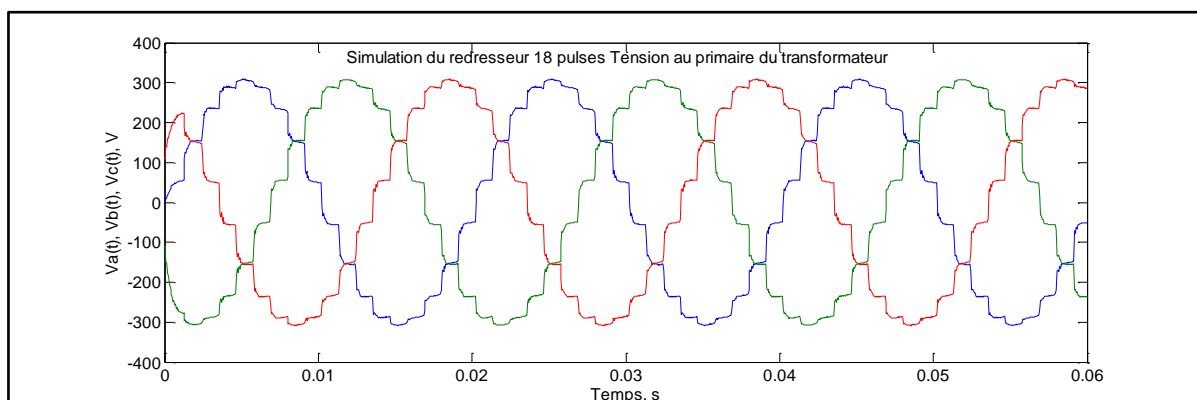


Figure 4- 19 Formes d'ondes des tensions à l'entrée du redresseur 18 pulsations

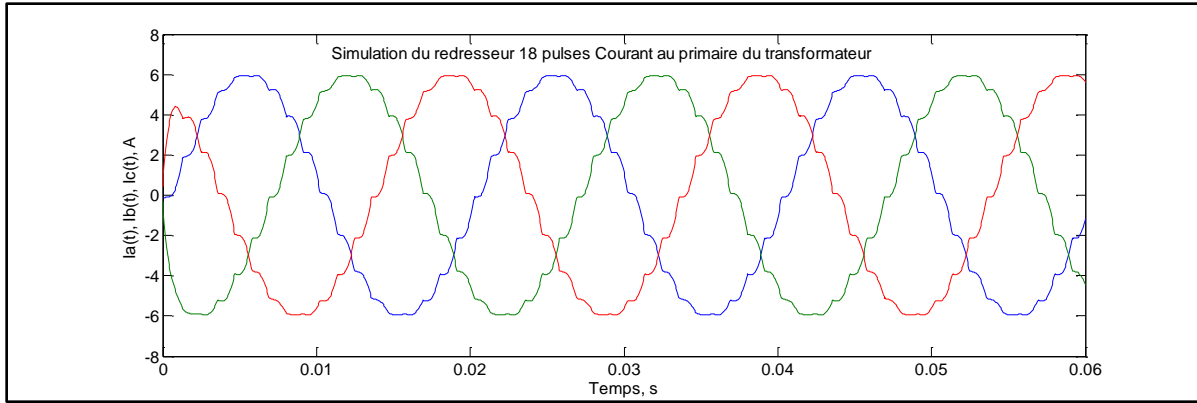


Figure 4- 20 Formes d’ondes des courants à l’entrée du redresseur 18 pulsations

- **Performance du montage redresseur 18 pulsations**

Les différentes variables du montage redresseur (tensions, courants, puissances, facteur de puissance) sont obtenues à l’aide des blocs de mesure connectés à l’entrée et à la sortie comme montrés à la figure 4-21.

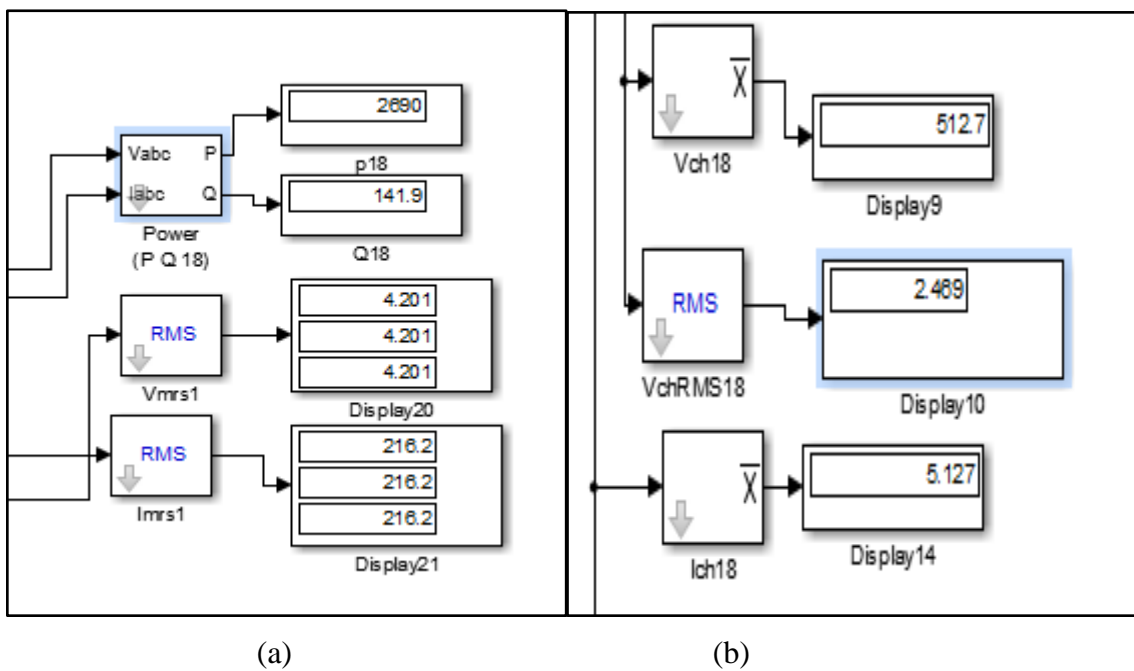


Figure 4- 21 Les blocs de mesure du montage redresseur.(a) Mesures à l’entrée. (b) Mesures à la sortie

La charge DC a une valeur nominale de 100 Ω. Les variables à l’entrée et à la sortie du redresseur 18 pulsations sont présentées au tableau 4-3.

Tableau 4- 3 Variables à l'entrée et à la sortie du redresseur 18 pulsations

Redresseur 12 phases (24 pulsations)		
Charge	100Ω	
Entrée	V_a [V]	216.2
	I_a [A]	4.201
	S [VA]	2693.7
	P [W]	2690
	Q [VAR]	141.9
	FP	0.9986
Sortie	V_{moy} [V]	512.7
	I_{moy} [A]	5.127
	$V_{chac (rms)}$ [V]	2.469
	FO_v [%]	0.4

- **Harmoniques de tension et de courant à l'entrée**

Les harmoniques des tensions et des courants à l'entrée du redresseur (au primaire du transformateur) pour une charge de 100Ω, obtenus avec la fonction FFT de MATLAB, sont montrés au tableau 4-4.

Tableau 4- 4 Les harmoniques de tension et de courant à l'entrée du redresseur 18 pulsations

Redresseur 9 phases (18 pulsations)						
Ordre	h_1	$h_{17} (\%I_1)$	$h_{19} (\%I_1)$	$h_{35} (\%I_1)$	$h_{37} (\%I_1)$	THD (%)
Harmoniques de tension	304.9 V	5	4.16	1.81	1.68	7.58
Harmoniques de courant	5.977 A	3.39	2.52	0.59	0.51	4.32

Les figures 4-22 et 4-23 présentent respectivement les spectres de tension et de courant à l'entrée du redresseur 18 pulsations. On reconnaît les harmoniques d'ordre $18k \pm 1$ comme prévu par la théorie.

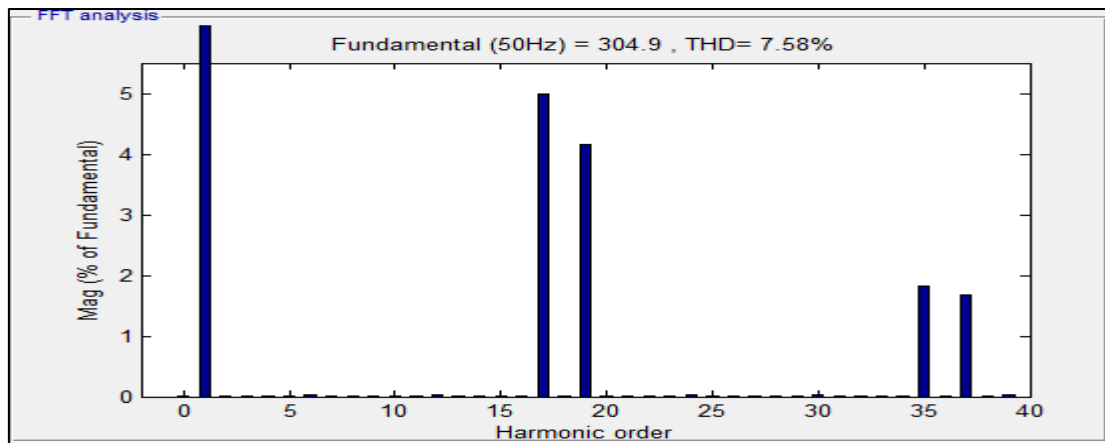


Figure 4- 22 Contenus harmoniques au primaire du transformateur du redresseur 18 pulsations- Spectre de tension

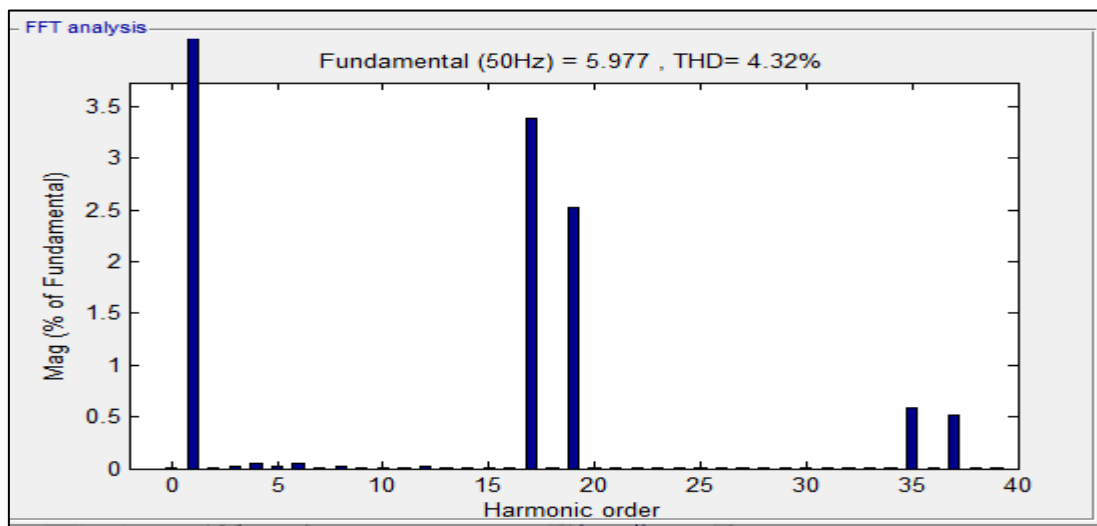


Figure 4- 23 Contenus harmoniques au primaire du transformateur du redresseur 18 pulsations- Spectre du courant

4.4 Redresseur 12 phases (24pulsations)

4.4.1 Montage

La figure 4-24 montre le diagramme SPS d'un montage redresseur 12 phases (24 pulsations) qui fournit une tension DC de 513 V à une charge résistive de 100 Ω. La source AC possède les caractéristiques typiques (220 /380 V, 50 Hz).

Les détails du bloc « 24 pulses Transformer Rectifier Unit 10 kVA » sont présentés à la figure 4-24. Le transformateur d'entrée est composé de quatre transformateurs du type Zig-Zag-Y avec les primaires connectés en série. Les secondaires avec les déphasages respectifs de 15°, 30°, 45° et 60° sont connectés à quatre ponts redresseurs 6 pulsations qui sont reliés en parallèle à la charge DC. Quatre inductances d'interphase couplées sont

utilisées pour limiter le courant de circulation entre les ponts redresseurs.

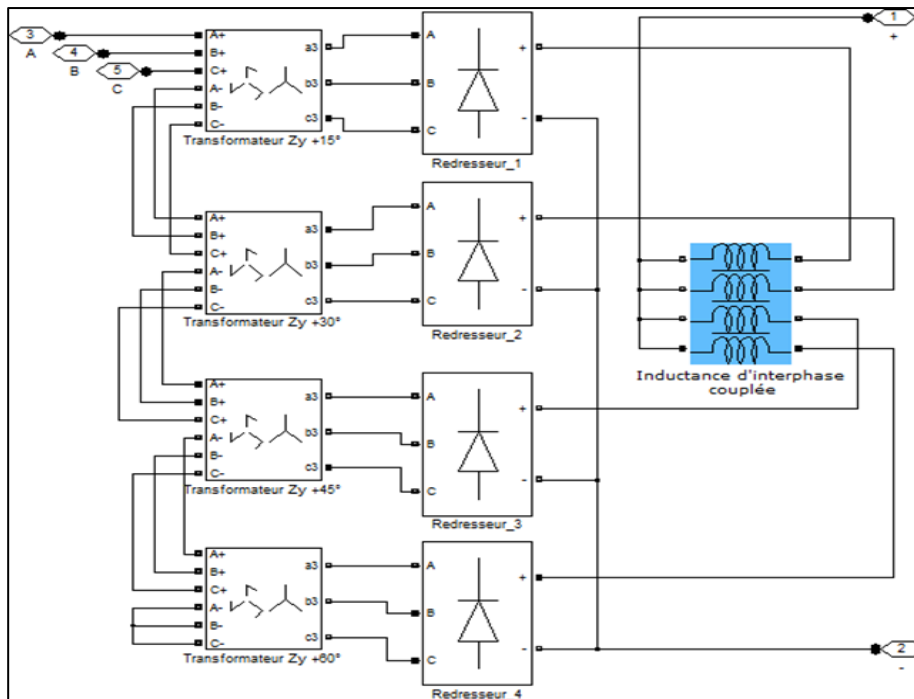


Figure 4- 24 Diagramme SPS d'un montage redresseur 24 pulsations

Les rapports des transformateurs Zig-Zag-Y sont ajustés à 1.073 pour fournir à la sortie la tension continue de 513 V à pleine charge. Les paramètres des transformateurs d'entrée sont montrés à la figure 4-25.

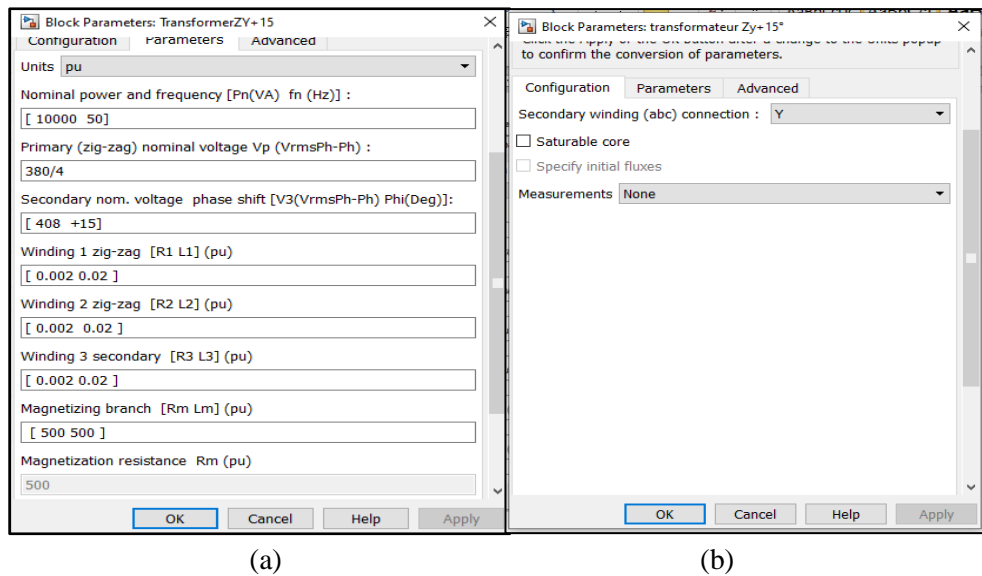


Figure 4- 25 Les transformateurs Zig-Zag-Y du redresseur à 24 pulsations. Paramètres d'un transformateur à déphasage de 15° (identiques pour 30°, 45° et 60°).(b) Configuration des enroulements.

La figure 4-26 montre les inductances d'interphase couplées pour le montage SPS redresseur 24 pulsations.

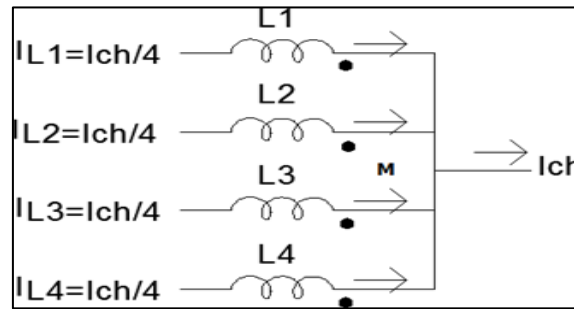


Figure 4- 26 Inductances couplées d'interphase du modèle SPS 24 pulsations

Les inductances couplées L_1 , L_2 , L_3 et L_4 sont calculées pour obtenir une ondulation maximale du courant de circulation égale à 10% du courant nominal de sortie ($\%I_{ch} = 0.513A$). On suppose que les amplitudes des ondulations de courants ΔI_{L1} , ΔI_{L2} , ΔI_{L3} et ΔI_{L4} sont égales.

Avec $V_{moy} = 513$ V on peut calculer $V_{Lcrête} = 0.02897 \times 513 = 14.86V$.

L'inductance d'interphase peut être calculée avec l'équation suivante:

$$I_{L1crête} = \frac{V_{Lcrête}}{2\pi(12 \times 50)(9L_1)} \quad (4-8)$$

L'ondulation de la tension à 12×50 Hz dans l'inductance d'interphase est $\Delta V_L = 29.72V$.

On réécrit l'équation en fonction de l'ondulation de la tension de l'inductance d'interphase:

$$\Delta I_{L1} = \Delta I_{L2} = \Delta I_{L3} = \Delta I_{L4} = \frac{I_{ch\%}}{2} = \frac{\Delta V_L}{2\pi(12 \times 50)(16L_1)} \quad (4-9)$$

$$\frac{0.513}{2} = \frac{29.72}{2\pi(12 \times 50)(16L_1)} \quad (4-10)$$

Donc, l'inductance d'interphase L_1 du pont 1 est: $L_1 \approx 0.00188$. Dans le montage du modèle SPS ces inductances sont: $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 0.00188H$ et l'inductance mutuelle est presque de même valeur.

Les paramètres du bloc de l'inductance d'interphase sont présentés à la figure 4-27.

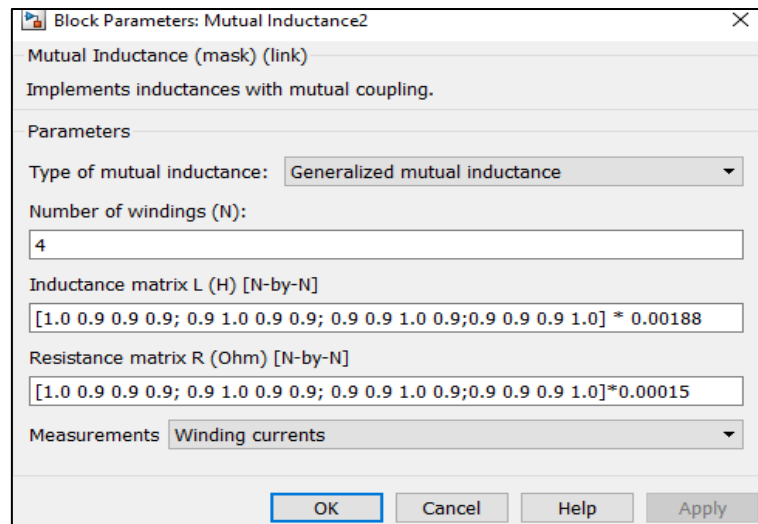


Figure 4- 27 Paramètres du bloc de l'inductance d'interphase couplée

4.4.2 Résultats de simulation

- **Formes d'ondes de tension et de courant à la sortie**

Les formes d'ondes de tension et de courant à la sortie sont montrées aux figures 4-28 et 4-29.

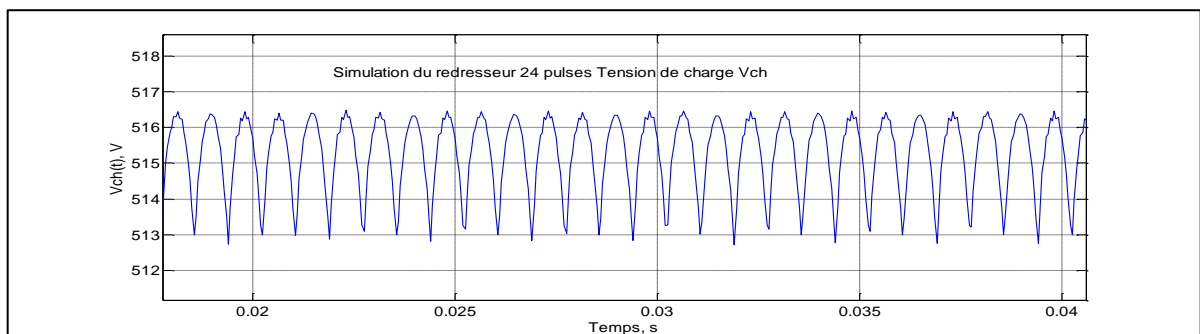


Figure 4- 28 Forme d'onde de la tension de sortie du redresseur 24 pulsations

On remarque que l'ondulation de la tension DC est de l'ordre de 3.3 V sur la courbe de V_{ch}

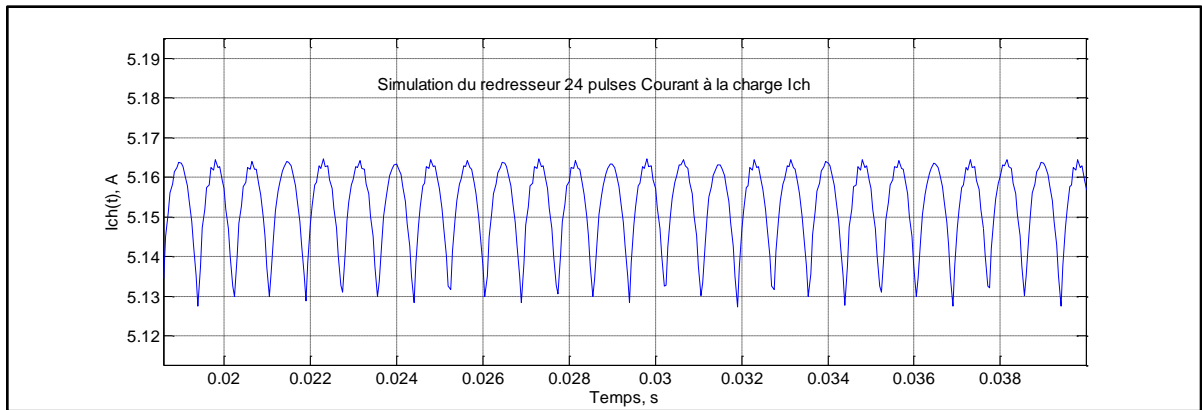


Figure 4- 29 Forme d'onde du courant à la sortie du redresseur 24 pulsations

- **Formes d'ondes de tension et de courant à l'entrée**

Les figures 4-30 et 4-31 montrent respectivement les formes d'ondes des tensions ligne-neutre $v_a(t)$, $v_b(t)$ et $v_c(t)$ et les courants de ligne $i_a(t)$, $i_b(t)$ et $i_c(t)$ à l'entrée AC pour une charge de 100Ω .

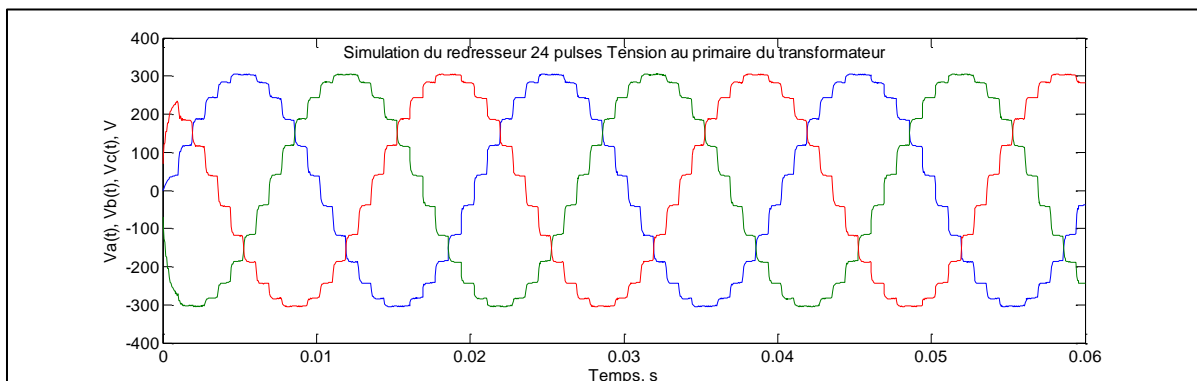


Figure 4- 30 Formes d'ondes des tensions à l'entrée du redresseur 24 pulsations

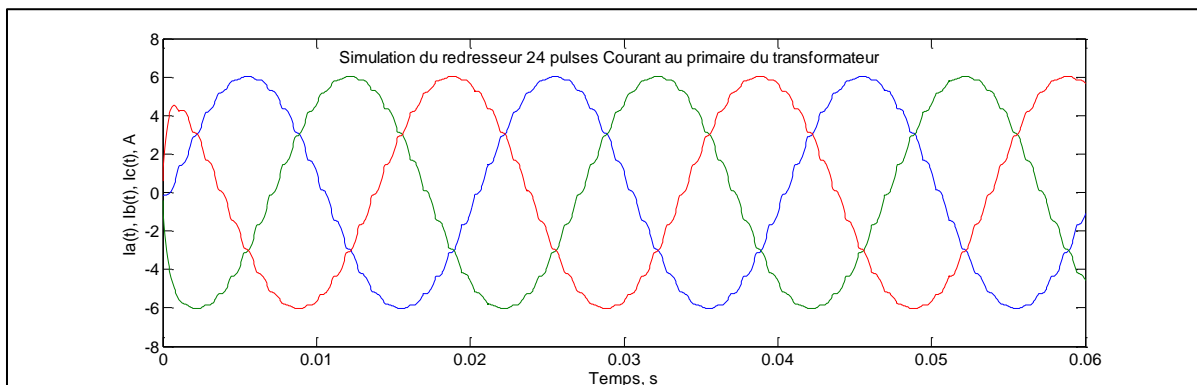


Figure 4- 31 Formes d'ondes des courants à l'entrée du redresseur 24 pulsations.

• **Performance du montage redresseur 24 pulsations en fonction de la charge**

Les différentes variables du montage redresseur (tensions, courants, puissances, facteur de puissance) sont obtenues à l'aide des blocs de mesure connectés à l'entrée et à la sortie comme montrés à la figure 4-32.

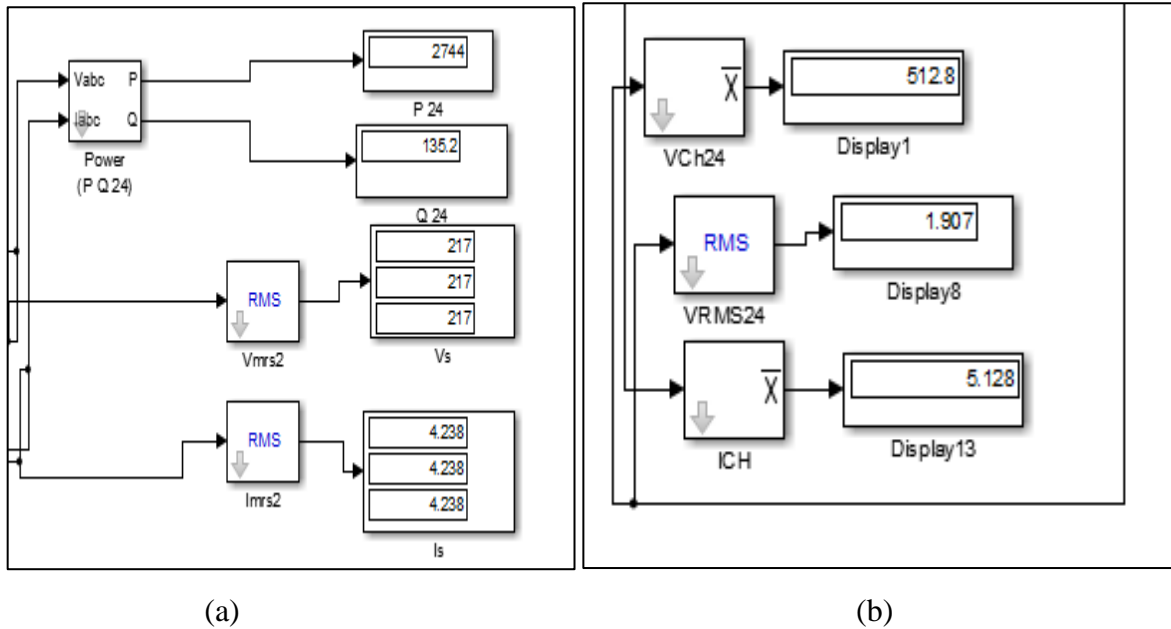


Figure 4 - 32 Les blocs de mesure du montage redresseur (a) Mesures à l'entrée. (b) Mesures à la sortie.

La charge DC a une valeur nominale de 100 Ω. Les variables à l'entrée et à la sortie du redresseur 12 pulsations sont présentées au tableau 4-6.

Tableau 4- 5 Les harmoniques de tension et de courant à l'entrée du redresseur 18 pulsations

Redresseur 12 phases (24 pulsations)		
Charge	100Ω	
Entrée	V _a [V]	217
	I _a [A]	4.238
	S [VA]	2747.3
	P [W]	2744
	Q [VAR]	135.2
	FP	0.9987
Sortie	V _{moy} [V]	512.8
	I _{moy} [A]	5.128
	V _{chac (rms)} [V]	1.907
	FO _v [%]	0.37

- **Harmoniques de tension et de courant à l'entrée**

Les harmoniques des tensions et des courants à l'entrée du redresseur 24 pulsations (au Primaire du transformateur), obtenues avec la fonction FFT de MATLAB, sont présentés au tableau 4-7.

Tableau 4- 6 Les harmoniques de tension et de courant à l'entrée du redresseur 24 pulsations

Ordre	h_1	$h_{23} (\%I_1)$	$h_{25} (\%I_1)$	THD (%)
Harmoniques de tension	305.4 V	4.01	3.45	6.02
Harmoniques de courant	6.022 A	1.99	1.57	2.59

Les figures 4-33 et 4-34 présentent respectivement les spectres de tension et de courant à l'entrée du redresseur 24 pulsations. On reconnaît les harmoniques d'ordre $24k \pm 1$ comme prévu par la théorie.

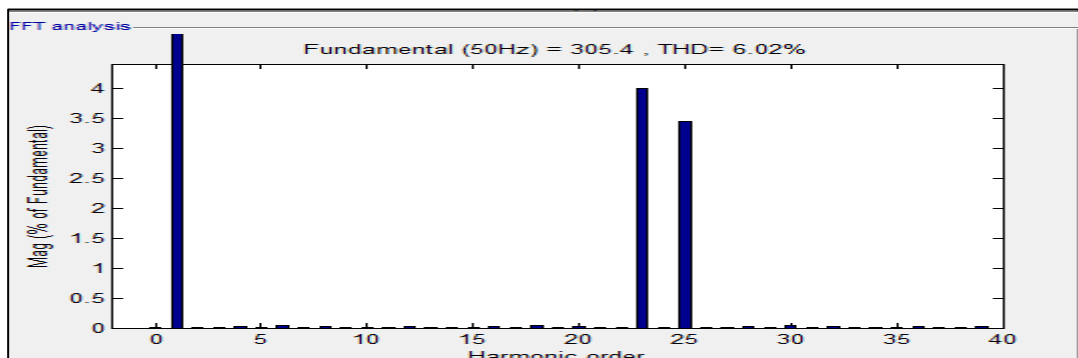


Figure4- 33 Contenus harmoniques au primaire du transformateur du redresseur 24 pulsations. Spectre de tension

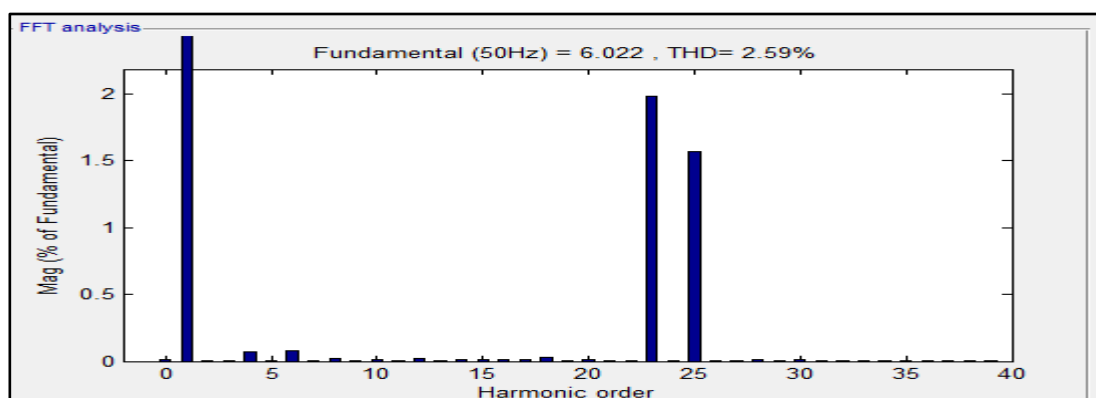


Figure 4- 34 Contenus harmoniques au primaire du transformateur du redresseur 24 pulsations. Spectre de courant

4.5 Comparaison de performances des redresseurs à 12, 18 et 24 pulsations

Les performances des trois montages redresseurs à 12, 18 et 24 pulsations, obtenues sont présentées dans le tableau 4-8.

Tableau 4- 7 Comparaison des performances des redresseurs

Redresseur	12	18	24
Tension V_a [V]	214.9	216.2	217
THD tension [%]	8.59	7.58	6.02
Courant I_a [A]	4.214	4.205	4.238
THD courant [%]	6.45	4.32	2.59
VA à l'entrée S [VA]	2641.2	2693.7	2747.3
Puissance à l'entrée P [W]	2597	2690	2744
Facteur de puissance fp	0.983	0.9986	0.9987
Tension de sortie V_{dc} [V]	512.3	512.7	512.8
Facteur d'ondulation FO [%]	0.6	0.4	0.37

4.5.1 Comparaison des THDs de tension et de courant à l'entrée

Le taux de distorsion harmonique total (THD) des tensions et des courants à l'entrée, est un bon indice de la qualité d'un montage redresseur. De façon générale, ces taux de distorsion harmonique diminuent lorsqu'un plus grand nombre de phases est utilisé.

4.5.2 Comparaison de la tension DC de sortie

Le facteur d'ondulation de la tension DC de sortie est un bon indice de la qualité d'un montage redresseur. Lorsqu'un grand nombre de phases est utilisé, la fréquence des ondulations de la tension de sortie est plus élevée et le facteur d'ondulation est réduit. En conséquence, le filtre de sortie sera plus petit et on pourra même l'éliminer.

4.5.3 Comparaison du facteur de puissance à l'entrée

On peut constater que le facteur de puissance à l'entrée du redresseur est amélioré lorsqu'un grand nombre de phases est utilisé.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation des différents montages redresseurs à diodes polyphasés. Les résultats de simulation montrent une très bonne concordance avec l'étude théorique présentée dans le chapitre trois.

D'après les résultats de simulation et l'analyse spectrale du comportement de chaque redresseur à diodes polyphasé, on constate que l'augmentation des phases permet d'éliminer ou bien de minimiser les harmoniques. La minimisation des harmoniques conduit à une amélioration de la forme d'onde du courant et de la tension côté réseau, ainsi que le THD de tension et du courant. L'augmentation du nombre de phases améliore aussi la qualité de la tension et du courant côté continu. La comparaison entre les différents montages (12, 18 et 24 pulsations) montre que la configuration 24 pulsations présente des meilleures performances en comparant avec les configurations 12 et 18 pulsations. En conclusion on peut dire que les redresseurs polyphasés à diodes jouent aussi le rôle des filtres pour le réseau électrique.

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire a porté essentiellement sur l'étude d'une des solutions modernes de dépollution des courants harmoniques. Ces solutions résident dans l'emploi du redresseur triphasé à MLI ou redresseur à diodes (polyphasé) pour la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive, dans le but d'améliorer surtout le facteur de puissance en ligne. Cette étude nous a permis de :

L'étude et la simulation des redresseurs PD3 commandé et non commandé en présentant la modélisation du redresseur comme une charge non linéaire.

En deuxième partie nous avons entamé l'étude de la structure du redresseur MLI, en appliquant deux types de commande particulières permettant de corriger d'une façon active le facteur de puissance en ligne. Le premier type est la commande par hystérésis qui se base sur le calcul d'un seul correcteur (PI) pour la régulation de la tension de sortie. Le deuxième type est la commande par MLI qui se base sur le calcul de deux correcteurs (PI) nécessaires pour les deux boucles de courant et de tension. La première boucle permet d'assurer un courant à l'entrée du redresseur MLI triphasé, en phase avec la tension du réseau alternatif et la deuxième boucle, externe à la boucle de courant, est pratiquement nécessaire pour fournir la valeur maximale du courant de référence de la première boucle (celle de courant) et pour réguler la tension à la sortie du convertisseur. Les simulations réalisées pour les deux types de commande, ont permis d'avoir des performances très satisfaisantes.

Dans la dernière partie de ce travail nous avons présenté l'étudié et la simulation des redresseurs polyphasé à 6 phases (12 pulsations), à 9 phases (18 pulsations) et à 12 phases (24 pulsations). D'après les résultats de simulation, on peut affirmer que le redressement polyphasé est une solution intéressante pour les réseaux électriques.

Annexe 1:

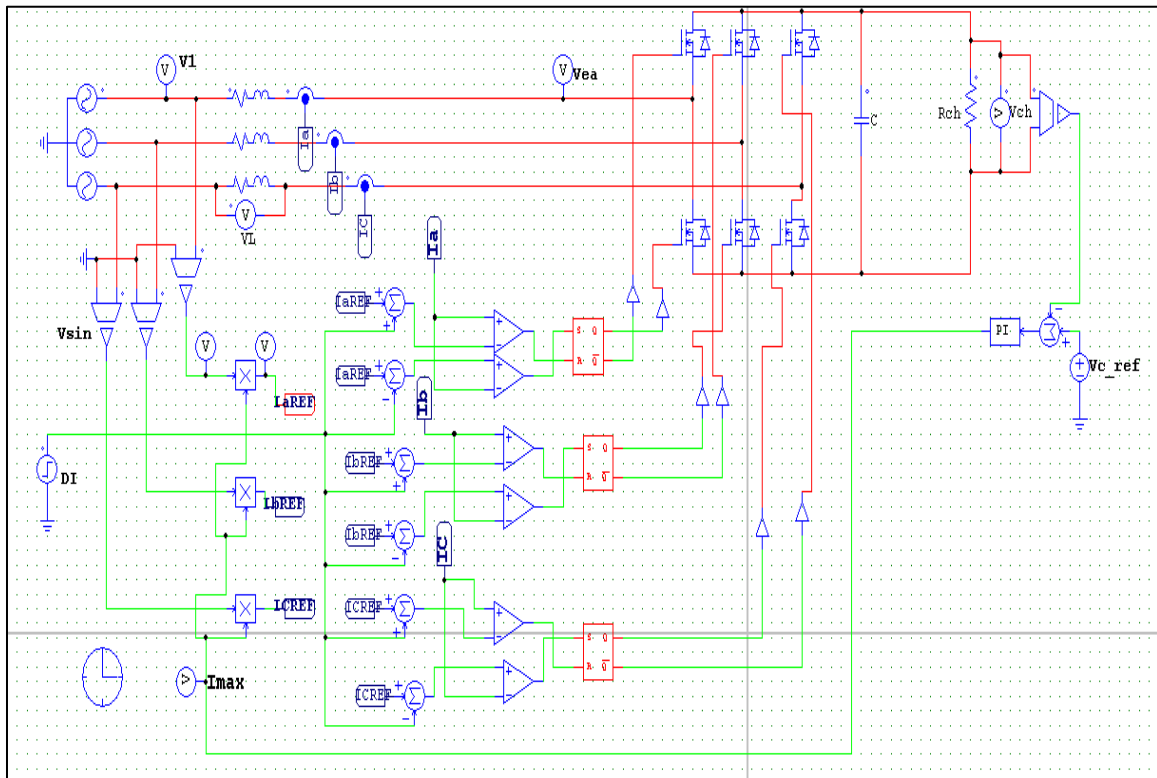


Schéma de simulation de la commande par hystérésis avec boucle de tension

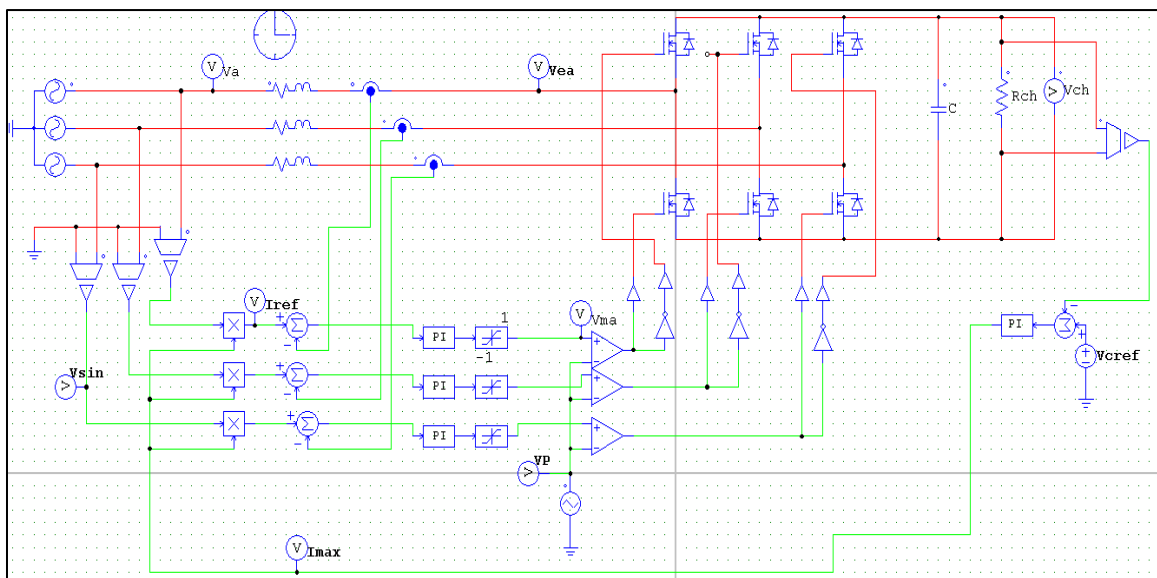


Schéma de simulation de la commande par MLI avec boucle de tension

Annexe 2 :

Paramètres de la simulation:

Pour les trois systèmes globaux nous avons utilisé les paramètres suivants :

Le réseau :

- Amplitude de la tension du réseau: $V_m = 311\text{V}$.
- Fréquence : 50 HZ.
- Résistance de l'inductance de couplage : $R = 0.3\ \Omega$.
- l'inductance de couplage : $L = 0.014\text{ mH}$.

Le redresseur

- Résistance de la charge : $R_{ch} = 100\ \Omega$.
- Capacité du bus continu : $C = 2\text{mF}$

Le régulateur de tension de sortie

- $\tau_v = 0.0541\text{ s}$
- $K_v = 0.3381472$

Le régulateur (correcteur) de courant

- $\tau_i = 1.0181 \cdot 10^{-4}\text{ s}$
- $K_i = 1.311$
- Référence de la tension continue de sortie $V_{dc^*} = 620\text{ volt}$.

Bibliographie :

[1] **Guy Séguier, Francis Labrique, Philippe Delarue**

" Électronique de puissance (Structures, commandes, applications) "livre, 10e édition

[2] **Melle LAOUEDJ Fethia, Melle ZEBBAR Hadjer**

(Etude et simulation d'une commande numérique (discrète) d'un pont redresseur à IGBT/MOSFET) Mémoire master ,Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen 2015

[3] **KORICHI Chabane, LATRECHE Khalil**

«Etude de la structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé. », Mémoire master ,Université A.MIRA-BEJAIA 2019

[4] **Boucha Assia, Benayad Aida**

Méthodologies d'analyse des montages redresseurs Mémoire master ,Université Larbi Ben M'hidi d'Oum El Bouagh i2010

[5] "Redressement ", cours, Université de Savoie

[6] **LEMAINI Mohamed**

Contrôle de puissance d'un redresseur MLI Mémoire master Université Mohamed Khider de Biskra 2018

[7] ABDELMALEK BOULAHIA

Etude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique,

Université de Constantine, 2009.

[8] KEDDARI Ben Salem, KOT Yahia

Modélisation et Simulation D'un Convertisseur AC/DC triphasé Université d'EL-Oued 2014

[9] Alvaro Ortiz Monroy

Etude de montages redresseurs polyphasés pour le réseau d'alimentation électrique des avions

Université LAVAL Québec, Canada 2013

