

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

TARIKET Mohamed

FENNICHE Imad

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machine Electrique

Etude de montages redresseurs polyphasés pour l'alimentation des trains électriques

Soutenu le 17 / 07 / 2019 devant le jury :

Dr. GROUNI	Saïd	Pr	UMBB	Président
Dr. AIBECHE	Abderrezak	MCB	UMBB	Examinateur
Dr. BOUDOUDA	Aimad	MCA	UMBB	Encadreur

Année Universitaire: 2018/2019

Dédicaces

De tout mon cœur, je dédie ce travail :

A mes très chers parents que je remercie beaucoup pour
leur patience sacrifice. *Pour me permettre de réaliser*

Mes objectifs. Qu'ils trouvent ici toute ma

Reconnaissance et ma gratitude.

A mes frères et mes sœurs et toutes les familles

A tous mes amis sans exception

A tout le groupe MGE19.

T. Mohamed

Dédicaces

Je dédie ce travail à mon cher père Mohamed et ma sacrée maman Malika, qui m'ont soutenu dans mon parcours. Je les salut pour leur sacrifices et je les remercie pour leur patience.

Leur morales d'or et leur grand amour pour la science et le savoir été toujours mon guide et mon courage, dès ma première année primaire jusqu'à ce jour-là.

F. Imad

Remerciements

*Nous remercions, en premier lieu, notre **Dieu** le plus puissant
qui a bien voulu nous donner la force et le courage pour
effectuer le présent travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour
leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils
ont enduré.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre promoteur "**Dr.**
Aimad BOUDOUDA" pour son sérieux, sa compétence et
ses orientations.*

*Nous remercions vont aussi les membres jury et tous les
enseignants de Département Ingénierie des Systèmes
Electriques qui ont contribué à notre formation.*

*Aussi nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos
amis et qui par leur amitié et leur bonne humeur, ont créé une
ambiance de travail parfaite.*

ملخص

تقدم هذه المذكرة دراسة عن مجموعات المقومات متعددة الأطوار ذات الأداء المناسب لشبكة الإمداد بالطاقة في القطارات الكهربائية.

الهدف من هذا العمل إنتاج جهد تيار مستمر مُرشح جيداً عند التحميل دون العمل على شكل موجة جيبيية على مستوى تيار المصدر استناداً إلى مصدر ثلاثي الطور، درسنا من أجله مقومات الطور متعدد الأطوار عند 6، 12، 18 و 24 نبض واستخدمناها العملي في محطة السكك الحديدية الفرعية، المخصصة لتزويد القطارات الكهربائية بتيار التيار المباشر.

أجرينا محاكاة على Matlab / Simulink لأربعة مقومات وقمنا بإجراء مقارنة بين نتائج المحاكاة من حيث معدل التشوه التوافقي THD. لقد وجدنا أن استخدام مقومات متعددة الأطوار يحسن نوعية الطاقة الكهربائية للقطارات الكهربائية، وخاصة مقوم 24 نبضة. الكلمات المفتاحية: مقوم متعدد الأطوار، قطار كهربائي، جودة الطاقة، التشوه.

Abstract

This dissertation presents a study on multi-phase rectifier converters having suitable performances for the electric trains supply network.

This work is used to produce a well filtered DC voltage at the load side without affecting the sinusoidal waveform at the source current side based on a three-phase source. For this reason, we studied the multi-phase rectifiers with 6, 12, 18 and 24 pulses and their use at the railway sub-stations, intended for the supply of electric trains by direct current.

We did a simulation on Matlab/Simulink of the four rectifiers and we made a comparison in terms of rate of harmonic distortion THD. We have found that the use of multi-phase rectifiers improves the quality of electrical energy for electric trains, in particular, the 24-pulse rectifier.

Keywords: Multi-phase rectifier, Electric train, Energy quality, Harmonics.

Résumé

Ce mémoire de fin d'étude présente une étude sur des montages redresseurs polyphasés ayant des performances convenables pour le réseau d'alimentation des trains électrique.

Ce travail sert à produire une tension continue bien filtré au niveau de la charge sans agir à la forme d'onde sinusoïdale au niveau de courant de source à base d'une source triphasé. Pour cela, nous avons étudié les redresseurs polyphasés à 6, 12, 18 et 24 pulsations et leur utilisation au niveau des sous-stations ferroviaires, destinées pour l'alimentation des trains électrique par courant continu.

Nous avons fait une simulation sur Matlab/Simulink des quatre montages redresseurs et nous avons fait une comparaison entre les résultats de simulation en termes de taux de distorsion harmonique THD. Nous avons trouvé que l'utilisation des redresseurs polyphasés permet d'améliorer la qualité d'énergie électrique pour les trains électriques, en particulier, le redresseur à 24 pulsations.

Mots clés : Redresseur polyphasé, Train électrique, Qualité d'énergie, Harmonique

Table des matières

Dédicaces.....	I
Dédicaces.....	II
Remerciements	III
ملخص.....	IV
Abstract.....	IV
Résumé	IV
Liste des tableaux	VI
Liste des figures.....	VII
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Alimentation du réseau de traction électrique.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Historique et évolution technique (Exemple : en France).....	3
1.3 Description du système d'alimentation d'un train électrique	6
1.3.1 Les sous-stations.....	6
1.3.2 Les caténaires	8
1.3.3 Le pantographe.....	8
1.4 Systèmes d'électrification des trains électrique.....	9
1.4.1 Electrification en tension continue 1,5 kV.....	9
1.4.2 Electrification en tension monophasée 25 kV à 50 Hz	9
1.4.3 Electrification en tension alternatif à fréquence spécifique (16 2/3 Hz).....	10
1.5 Les principaux équipements de la sous-station	10
1.5.1 Alimentation en tension continue 1,5 kV.....	10
1.5.2 Alimentation en tension monophasée de 25 kV à la fréquence de 50 Hz	13
1.6 Les différents types des convertisseurs statiques	14
1.6.1 Les redresseurs (TRU - Transformer Rectifier Unit)	14

1.6.2	Les hacheurs.....	15
1.6.3	Les onduleurs.....	16
1.7	Conclusion	17
Chapitre 2 Perturbations conduites dans les trains électriques		18
2.1	Introduction.....	18
2.2	Les harmoniques.....	19
2.3	Charges linéaires.....	19
2.4	Charges non linéaires.....	20
2.5	Qualité de l'énergie électrique	20
2.5.1	Qualité de la tension	21
2.5.2	Qualité du courant	22
2.6	Perturbations des réseaux électriques	23
2.6.1	Définition des perturbations	23
2.7	Caractérisation des harmoniques	24
2.7.1	Rang d'harmonique	24
2.7.2	Décomposition d'un signal en Série de Fourier.....	25
2.7.3	Le taux de distorsion harmonique	26
2.7.4	Le facteur de puissance	26
2.8	Effets des harmoniques.....	27
2.9	Problèmes des harmoniques dans les trains électriques.....	27
2.10	Origine des harmoniques.....	28
2.11	Solutions de dépollution des harmoniques.....	29
2.11.1	Solutions classiques (traditionnelles)	29
2.11.2	Solutions récentes (modernes).....	29
2.12	Conclusion	31
Chapitre 3 Redresseurs polyphasés à diodes		32
3.1	Introduction.....	32
3.2	Redresseur à 6 pulsations (3 phases)	32
3.3	Redresseur à 12 pulsations (6 phases)	37
3.4	Redresseur à 18 pulsations (9 phases)	40
3.5	Redresseur à 24 pulsations (12 phases)	44

3.6	Les configurations séries et parallèles des redresseurs polyphasés.....	48
3.7	Résumé des caractéristiques des quatre montages redresseurs	49
3.8	Conclusion	50
Chapitre 4	Simulation des redresseurs polyphasés.....	51
4.1	Introduction.....	51
4.2	Redresseur 3 phases (6 pulsations)	51
4.2.1	Formes d'ondes à l'entrée du redresseur.....	52
4.2.2	Formes d'ondes à la sortie du redresseur	53
4.2.3	Harmoniques de tension et de courant à l'entrée du redresseur	53
4.3	Redresseur 6 phases (12 pulsations)	54
4.3.1	Formes d'ondes à l'entrée du redresseur.....	56
4.3.2	Formes d'ondes à la sortie du redresseur	56
4.3.3	Harmoniques de tension et de courant à l'entrée.....	57
4.4	Redresseur 9 phases (18 pulsations)	58
4.4.1	Formes d'ondes de tension et de courant à l'entrée du redresseur	59
4.4.2	Formes d'ondes de tension à la sortie du redresseur.....	59
4.4.3	Harmoniques de tension et de courant à l'entrée.....	60
4.5	Redresseur 12 phases (24 pulsations)	61
4.5.1	Formes d'ondes de tension et de courant à l'entrée du redresseur	62
4.5.2	Formes d'ondes de tension et de courant à la sortie du redresseur.....	63
4.5.3	Harmoniques de tension et de courant à l'entrée.....	63
4.6	Discussion des résultats de simulation.....	64
4.7	Comparaison des THDs de tension et de courant à l'entrée (6, 12, 18, 24 pulsations)	64
4.8	Conclusion	66
	Conclusion générale	67
	Annexe 01.....	68
	Annexe 02.....	71
	Bibliographie	73

Liste des abréviations

CC	Courant Continu
CA	Courant Alternatif
HT	Haute Tension
DC/AC	Conversion Courant Continu/Courant Alternatif
f	Fréquence
T	Période
THD	Taux de Distorsion Harmonique
P	Puissance Active
Q	Puissance Réactive
D	Puissance Déformante
S	Puissance Apparente
Fp	Facteur de puissance
FAS	Filtre Actif Série
FAP	Filtre Actif Parallèle
Vrms	Tension Efficace de ligne
Vm	Tension Maximale
L	Inductance
M	Mutuelle
Vch	Tension de Charge
Ich	Courant de Charge
SNCF	Société Nationale Des Chemins De Fer Français
EDF	Électricité De France
PLM	L'ancienne Compagnie des chemins de fer de Paris à Lyon
RTE	Réseau de Transport d'Electricité
TGV	Train Grande Vitesse

Liste des tableaux

Tableau 1.1 - Système d'électrification ferroviaire dans le monde	5
Tableau 1.2 - Distance moyenne entre deux sous-stations	8
Tableau 2.1 - les effets des harmoniques en fonction de THD de tension	27
Tableau 3.1 - Principales harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 6 pulsations	36
Tableau 3.2 - Principaux harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 12 pulsations ..	39
Tableau 3.3 - les valeurs relatives de x et y des bobinages en zigzag.....	41
Tableau 3.4 - Principaux harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 18 pulsations ..	43
Tableau 3.5 - les valeurs de x et y des bobinages en zigzag pour 12 phases	45
Tableau 3.6 - Principaux harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 24 pulsations.	47
Tableau 3.7 - Caractéristiques des montages redresseurs à 6, 12, 18 et 24 pulsations	49
Tableau 4.1 - Résultats d'analyse en FFT (3 phases)	53
Tableau 4.2 - Résultats d'analyse en FFT (6 phases)	57
Tableau 4.3 - Résultats d'analyse en FFT (9 phases)	60
Tableau 4.4 - Résultats d'analyse en FFT (12 phases)	63
Tableau 4.5 - Comparaison des THDs de tension et de courant (6, 12, 18, 24 pulsations) ...	65

Liste des figures

Figure 1.1 - Schéma global de la traction électrique	6
Figure 1.2 - Sous-station électrique pour alimenter les caténaires	7
Figure 1.3 - Une caténaire distribue le courant à la locomotive.....	8
Figure 1.4 - Le pantographe	9
Figure 1.5 - Schéma de principe d'une sous-station d'alimentation DC de 1,5 kV	11
Figure 1.6 - Exemple de redresseur utilisé dans une sous-station DC de 1,5 kV.....	12
Figure 1.7 - Schéma de principe de l'alimentation en 2x25 kV à 50 Hz	14
Figure 1.8 - Redresseur 12 pulses à diodes	15
Figure 1.9 - Hacheur pour contrôler la tension de sortie d'un redresseur	16
Figure 1.10 - Alimentation des auxiliaires d'un train par onduleur	16
Figure 2.1 - Un courant déformé par les harmoniques	19
Figure 2.2 - Courant et tension d'une charge linéaire	20
Figure 2.3 - Courant et tension d'une charge non-linéaire	20
Figure 2.4 - Baisse de tension dans un réseau électrique	23
Figure 2.5 - Coupure brève de tension	23
Figure 2.6 - Surtension transitoire de tension	23
Figure 2.7 - Fluctuation de tension dans un réseau électrique	24
Figure 2.8 - Déséquilibre de tension dans un réseau électrique	24
Figure 2.9 - Décomposition harmonique d'une onde polluée	25
Figure 2.10 - Diagramme de Fresnel des puissances	26
Figure 2.11 - Schémas simplifiés des alimentations en continu et des formes d'onde tension et courant dans le cas d'un redresseur à 6 et à 12 pulsations	28
Figure 3.1 - Redresseur triphasé à 6 pulsations	33
Figure 3.2 - Tension triphasée à l'entrée du redresseur	33
Figure 3.3 - Tension ligne-ligne à l'entrée $v(t)$, tension de charge V_{ch} et sa valeur moyenne .	34
Figure 3.4 - Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ à l'entrée du pont redresseur à 6 pulsations.....	35
Figure 3.5 - Montage redresseur à 12 pulsations.....	37
Figure 3.6 - Formes d'ondes de la tension de sortie d'un redresseur à 12 pulsations	38
Figure 3.7 - Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ au primaire du transformateur d'entrée du montage redresseur à 12 pulsations	38
Figure 3.8 - Montage redresseur à 18 pulsations	40
Figure 3.9 - 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	41

Figure 3.10 - Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ au primaire du transformateur d'entrée du montage Redresseur à 18 pulsations	42
Figure 3.11 - Montage redresseur à 24 pulsations	44
Figure 3.12 - 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	45
Figure 3.13 - Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ au primaire du transformateur d'entrée du montage redresseur à 24 pulsations	46
Figure 3.14 - Les configurations séries et parallèles des redresseurs	48
Figure 4.1 - Schéma block du redresseur 6 pulsations	52
Figure 4.2 - Formes d'ondes des tensions et des courants à l'entrée du redresseur 6 pulsations	52
Figure 4.3 - Formes d'ondes de la tension et du courant à la sortie du redresseur 6 pulsations	53
Figure 4.4 - Spectres des tensions et courants au primaire du transformateur	54
Figure 4.5 - Schéma block du redresseur à 12 pulsations	55
Figure 4.6 - Inductance interphase couplée du schéma 12 pulsations.....	55
Figure 4.7 - Formes d'ondes des tensions et courants à l'entrée du redresseur 12 pulsations ...	56
Figure 4.8 - Formes d'ondes de la tension et du courant à la sortie du redresseur 12 pulsations	57
Figure 4.9 - Spectres des tensions et courants au primaire du transformateur	58
Figure 4.10 - Formes d'ondes des tensions et des courants à l'entrée du redresseur 18	59
Figure 4.11 - Formes d'ondes de la tension et courant à la sortie du redresseur 18 pulsations .	60
Figure 4.12 - Spectres des tensions et courants au primaire du transformateur	61
Figure 4.13 - Formes d'ondes des tensions et des courants à l'entrée du redresseur 24	62
Figure 4.14 - Formes d'ondes de la tension à la sortie du redresseur 24 pulsations.	63
Figure 4.15 - Spectres des tensions et courants au primaire du transformateur.	64

Introduction générale

De nos jours, les systèmes de traction à courant continu sont préférés et largement utilisés dans les chemins de fer urbains et les services de banlieue ou de grandes lignes, comme les métros légers et lourds. Les tensions de traction en courant continu les plus courantes sont : le 600 V (utilisée principalement par les tramways et les systèmes souterrains), le 750 V (pour les tramways, trolleys et métros), le 1500 V et le 3000 V (pour les métros et les banlieues). En pratique, le réseau électrique triphasé est le plus utilisé comme source d'électricité. Pour cela, pour alimenter les trains électriques en courant continu, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur statique AC/DC (ex : redresseurs à diodes ou redresseurs de traction). Cependant, l'utilisation de redresseurs dans les sous-stations pour la conversion AC/DC génère des harmoniques qui entraînent à la détérioration de la qualité du courant et de la tension du côté réseau de distribution et du côté alimentation des trains électriques. En effet, la mauvaise qualité de l'énergie électrique entraîne non seulement une perte d'énergie au sein de ces systèmes, mais peut également entraîner un dysfonctionnement de l'équipement électrique connecté au réseau électrique. Actuellement, la qualité de l'énergie électrique est une question brûlante dans les systèmes de traction électrique continue.

Pour améliorer la qualité de l'énergie électrique dans les systèmes de traction continus et garder un taux de distorsion harmonique faible, plusieurs techniques sont utilisées, comme le filtrage (passif et actif), et le compensateur de la puissance réactive (SVC).

Le travail de ce projet de fin d'étude, présente une autre solution pour améliorer la qualité d'énergie. Elle est basée sur l'utilisation de structures redresseurs polyphasées (redresseurs ayant un nombre de pulsations élevé : à 6, 12, 18 et 24 pulsations). Ce type de redresseurs permet d'obtenir à la sortie une tension continue peu ondulée avec un minimum de filtrage et un faible taux d'harmonique au réseau pour satisfaire les normes imposés.

Ce mémoire, comportant quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de quelques généralités sur les différents systèmes d'électrification des trains électriques.

- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons quelques généralités sur les harmoniques générées par les sous-stations, leurs origines, leurs effets et les techniques utilisées pour la réduction de ces harmoniques.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement des redresseurs polyphasés et les outils théoriques utilisés pour analyser les différentes grandeurs de sortie du redresseur.
- Dans le dernier chapitre, nous présenterons la simulation des redresseurs polyphasés (3 phases, 6 phases, 9phases et 12 phases) sous MATLAB/SIMULINK. Ensuite, nous donnerons les résultats de simulation et la discussion de ces résultats.

Enfin, une conclusion générale permet de faire ressortir l'intérêt de notre travail.

Chapitre 1

Alimentation du réseau de traction électrique

1.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents systèmes d'électrification des trains électriques. Une description détaillée des différents équipements d'une sous-station d'alimentation des trains électriques sera présentée. Parmi ces équipements, les redresseurs polyphasés qui seront présentés en détail dans les chapitres prochains.

1.2 Historique et évolution technique (Exemple : en France)

C'est au début de ce siècle qu'apparaît la traction électrique en France avec la mise en service en 1900 des lignes Orsay-Austerlitz et Invalides-Moulineaux alimentées par une tension continue de 600 V depuis un troisième rail.

Le choix des tensions continues de 600 V, 750 V puis 1,5 kV était lié à l'origine au choix du moteur de traction et à son mode de commande : moteur à courant continu à excitation série, commandé par l'intermédiaire d'un rhéostat dont la caractéristique couple-vitesse résultante est bien adaptée aux besoins de la traction ferroviaire [1].

C'est en 1919 que la Compagnie du Midi décide l'électrification de son réseau en tension continue 1,5 kV. À partir de cette date, elle crée son propre réseau d'énergie avec ses usines hydroélectriques, ses lignes de transport à 150 kV à 50 Hz et une distribution à 63 kV à ses sous-stations par des lignes dont les supports sont souvent communs avec ceux des installations des caténaires.

Peu après, la Compagnie Paris-Orléans suit cette même voie et, à l'exception de la ligne de Maurienne électrifiée entre 1925 et 1930, c'est au tour du réseau PLM d'être électrifié en 1 500 V continu après la guerre.

Les sous-stations « continues » alimentées par le réseau triphasé haute tension 63 kV ou 90 kV à 50 Hz (à l'origine SNCF, puis EDF) convertissent l'énergie par abaissement de la tension et redressement de celle-ci. L'espacement entre les sous-stations varie de 8 à 25 km suivant le trafic et l'équipement des réseaux à haute tension [1].

Simultanément, de grands réseaux européens ont développé le système d'électrification en tension alternative 15 kV à 16 $\frac{2}{3}$ Hz, car cette basse fréquence permettait d'alimenter directement les moteurs série des engins de traction en minimisant les problèmes de commutation. Ce système, appliqué essentiellement dans les pays germaniques, oblige l'exploitant ferroviaire à créer et à exploiter son propre réseau d'alimentation à une fréquence différente de la fréquence industrielle.

L'évolution de la technique, spécialement du matériel HT (haute tension) et des convertisseurs embarqués, ainsi que les recherches conduites pour l'essentiel par la SNCF au début des années cinquante, ont permis de mettre au point l'alimentation directe des locomotives depuis une tension à fréquence industrielle. Le principe consiste à transporter l'énergie à tension élevée jusqu'à l'engin de traction et à la convertir ensuite à bord de la locomotive. Ce système appelé « 25 kV - 50 Hz » est appliqué depuis pour la plupart des électrifications en France et dans le monde. L'espacement entre les sous-stations varie de 35 à 90 km suivant le trafic, la puissance du réseau HT et aussi, suivant le choix du schéma 2 x 25 kV à 50 Hz [1].

Après différents essais de schémas électriques de locomotives utilisant aussi des moteurs à courant alternatif, le moteur à courant continu à excitation série alimenté par redressement de la tension et filtrage s'est finalement imposé dans les années soixante, jusqu'à l'apparition des transmissions triphasées dans les années quatre-vingt.

La comparaison entre les systèmes d'électrification 1 500 V (courants continu) et 25 kV à 50 Hz est nettement en faveur de l'alimentation en tension monophasée avec une économie de l'ordre de 30 % en termes de coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance. Néanmoins, le réseau préexistant 1 500 V cc a été conservé et l'existence d'engins de traction appelés « bicourants » permet l'interpénétration sans difficulté entre les deux systèmes d'électrification.

Enfin, la puissance unitaire des engins de traction modernes, conjuguée à la densité du trafic, conduit pratiquement à l'impossibilité technique d'utiliser le système d'alimentation 1 500 V cc pour le réseau de traction des lignes à grande vitesse. Le Tableau 1 résume l'ensemble des principaux systèmes dans le monde [1].

Tension continue				Tension monophasée	
600 V	750 V	1 500 V	3 000 V	15 kV 16 Hz 2/3	25 kV 50 Hz
Métros : — New York — Chicago — Tokyo — Nagoya	Métros Tramways Royaume-Uni (Sud Londres)	Australie Egypte France (1) Inde Indonésie Nouvelle-Zélande Pays-Bas USA	Algérie Afrique du Sud Belgique Brésil Chili Espagne Inde Italie Japon Maroc Pologne Russie	Allemagne Autriche Costa Rica (20 Hz) Norvège Suède Suisse	Australie Afrique du Sud Bulgarie Chine Congo Corée Costa Rica (60 Hz) Danemark Espagne (3) France (2) Grèce Hongrie Japon Inde Iran Malaisie Pakistan Portugal Roumanie Russie Serbie Taiwan Turquie Royaume-Uni Zimbabwe USA (60 Hz) (4)
(1) France 1 500 V continu : Sud-est ; Sud-ouest ; Ouest (Paris Le Mans). (2) France 25 kV à 50 Hz : Nord ; Est Dole – Bâle Dole – Frasne – Pontarlier St Amour – Mouchard Marseille – Nice Bellegarde – Evian Annecy – St Gervais Le Mans – Brest Le Mans – Nantes. Lignes à grande vitesse. (3) Espagne 25 kV à 50 Hz : Lignes à grande vitesse. (4) USA : autres tensions : 11 kV à 25 Hz ; 12,5 kV à 60 Hz.					

Tableau 1.1 Système d'électrification ferroviaire dans le monde [1]

1.3 Description du système d'alimentation d'un train électrique

Le réseau de transport d'électricité à très haute tension est géré par RTE (Réseau de Transport d'électricité). Cette tension est ensuite abaissée par une sous-station électrique pour alimenter les caténaires. La locomotive va alors convertir l'énergie électrique de la caténaire en énergie mécanique permettant le déplacement du train à grande vitesse (figure 1.1).

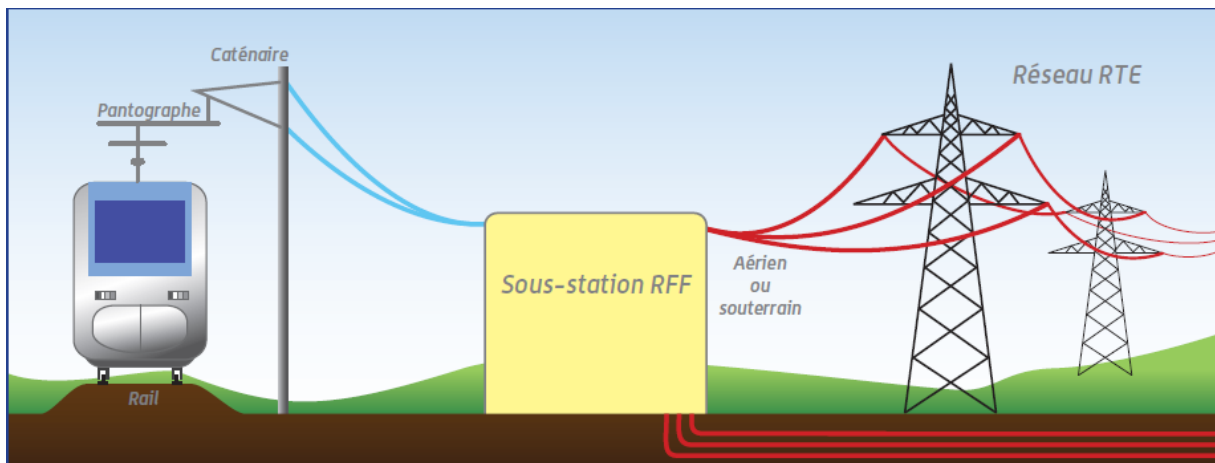


Figure1.1 Schéma global de la traction électrique [2]

Le système d'alimentation électrique d'une ligne ferroviaire est constitué de trois éléments principaux :

- les sous-stations.
- les caténaires.
- le pantographe

1.3.1 Les sous-stations

Point névralgique du système d'alimentation électrique, les sous stations d'alimentation électrique doivent garantir une qualité constante du courant et répondre aux exigences d'énergie des TGV. Elles couvrent en moyenne les besoins d'alimentation électrique sur environ 60 km, c'est pour cette raison que cette alimentation se fait à partir de lignes à Très Haute Tension (THT) [2].

Le rôle de la sous-station est de transformer la tension THT en tension de traction de 1500 Volts continue.

Une sous-station comporte plusieurs éléments :

- une partie assurant l'interface avec le réseau RTE 60 KV.
- un transformateur et un redresseur « produisant » les 1500 Volts continue de la caténaire.
- une partie assurant les protections électriques et le contrôle commande.

La gestion des différentes sous-stations est assurée à distance par une centrale sous-station.

Les lignes nouvelles utilisent une alimentation dite 2 x 25 kV. Elle permet d'augmenter la distance séparant deux sous-stations. L'installation d'une sous-station nécessite environ 1 hectare. Elle dispose d'une puissance de 50 MW en moyenne. Son dimensionnement s'effectue en prenant en compte les prévisions de trafic sur la ligne, les variations de vitesse des trains (accélération...), et surtout le nombre de kilomètres de LGV à alimenter de part et d'autre de la sous-station [3].



Figure 1.2 Sous-station électrique pour alimenter les caténaires [3]

Les sous-stations sont disposées à des intervalles bien précis le long de la voie afin de maintenir un niveau de puissance suffisante et d'éviter trop de pertes en ligne. Le Tableau 2 donne la distance entre les sous-stations selon le système d'alimentation.

Type d'électrification	Distance entre deux sous-stations
Continu 1,5 kV	8-14 km
Monophasé 16 $\frac{2}{3}$ Hz 15 kV	30-60 km
Monophasé 50 Hz 25 kV	30-60 km
Monophasé 50 Hz 2 x 25 kV	40-90 km

Tableau 1.2 Distance moyenne entre deux sous-stations [3]

1.3.2 Les caténaires

Un système caténaire est un ensemble de câbles soutenu par des supports. On distingue le câble porteur du fil de contact. Ce dernier est suspendu au câble porteur par des pendules. Il doit être situé à une hauteur constante. La caténaire distribue le courant à la locomotive. Le point de contact s'effectue à l'aide d'un appareil appelé pantographe. Pour une parfaite transmission de puissance, ce contact doit être le plus continu possible [3].

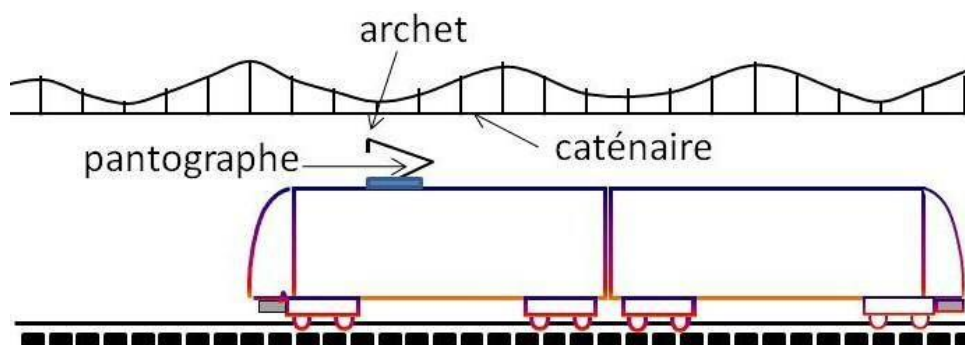


Figure 1.3 Une caténaire distribue le courant à la locomotive [3]

1.3.3 Le pantographe

Le pantographe capte le courant sur la caténaire et le transmet à la locomotive. Il est fabriqué en alliages légers comportant du carbone et du cuivre. Il a une forme

en « Z » et un archet au sommet. Des ressorts permettent de maintenir l'archet sur la caténaire avec une pression la plus constante possible [3].

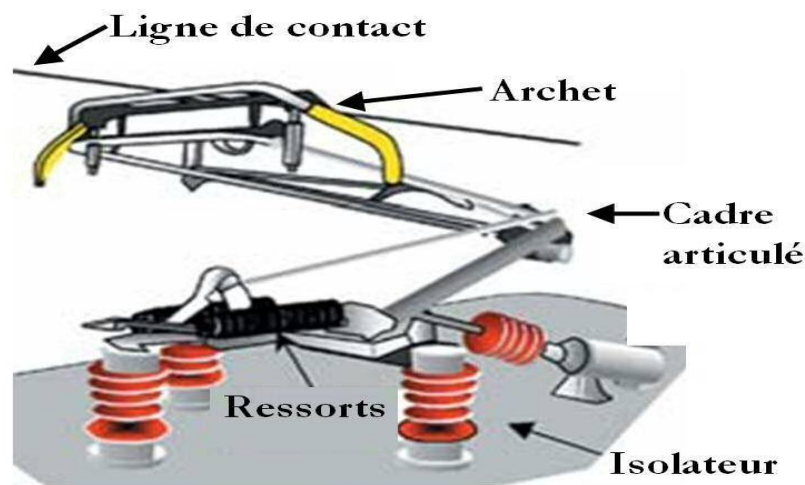


Figure 1.4 Le pantographe [3]

1.4 Systèmes d'électrification des trains électrique

1.4.1 Electrification en tension continue 1,5 kV

L'augmentation des puissances des engins moteurs ainsi que l'évolution croissante du trafic ont nécessité une augmentation concomitante des puissances installées dans les sous-stations. On peut noter que celle-ci fut permise grâce notamment à l'évolution des performances des semi-conducteurs de puissance.

La puissance unitaire des « groupes de traction » (ensemble composé d'un transformateur et d'un redresseur) installés dans les sous-stations de la SNCF a ainsi évolué de la manière suivante [3] :

- 2 500 à 3 000 kW au début des années soixante ;
- 4 000 à 5 000 kW dans les années soixante-dix ;
- 6 600 kW aujourd'hui.

1.4.2 Electrification en tension monophasée 25 kV à 50 Hz

À l'aube du système d'alimentation en tension monophasée du milieu des années cinquante, la puissance unitaire des transformateurs était d'environ 10 MVA.

Au fur et à mesure des années et des besoins, les puissances ont atteint 16 MVA, puis 25 MVA, pour aboutir de nos jours à 50 MVA voire 60 MVA (par exemple : sous-stations de la banlieue parisienne et des lignes nouvelles TGV) [3].

1.4.3 Electrification en tension alternatif à une fréquence spécifique (16 $\frac{2}{3}$ Hz)

Dans cette configuration, il est nécessaire d'utiliser un transformateur et un convertisseur de fréquence.

Les principaux éléments de la sous-station sont interconnectés à l'aide de jeux de barres ou de câbles. Des dispositifs de contrôle équipent également la sous-station comme les appareils de mesure, de protection (disjoncteurs) et de commutation (sectionneur ou interrupteur) [5].

1.5 Les principaux équipements de la sous-station

Chaque système d'alimentation du réseau de traction tension continue ou monophasée sera détaillé selon les trois aspects techniques suivants :

- raccordement au réseau haute tension (poste HT de la sous-station) ;
- conversion et distribution de l'énergie (sous-station) ;
- la commande centralisée des installations fixes sera l'objet d'une analyse commune.

1.5.1 Alimentation en tension continue 1,5 kV

Les sous-stations d'alimentation en tension continue sont généralement raccordées au réseau électrique de moyenne tension (réseau triphasé ERDF 63 kV ou 90 kV à 50 Hz, en France). L'architecture de ce type de sous-station comprend principalement un transformateur triphasé constitué d'un primaire et deux secondaires. Un des deux secondaires est utilisé pour l'alimentation de la traction ferroviaire et l'autre pour les services auxiliaires. La figure 1.5 donne le schéma de principe d'une sous-station d'alimentation ferroviaire de 1,5 kV. Pour des raisons de disponibilité maximale de l'installation, il est généralement nécessaire de doubler les

groupes de conversion bien qu'un seul groupe (transformateur + redresseur) suffise à alimenter les caténaires [4].

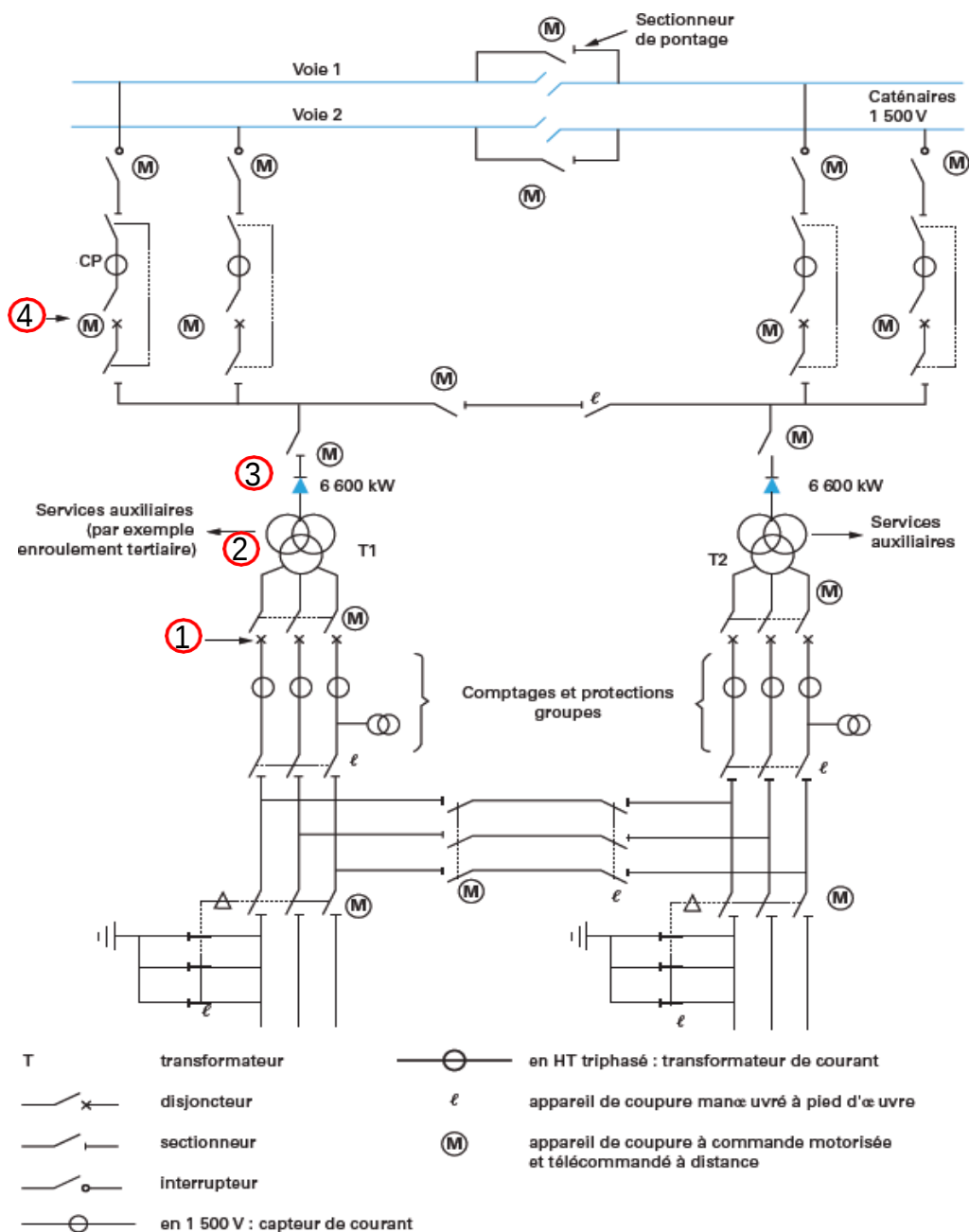


Figure 1.5 Schéma de principe d'une sous-station d'alimentation DC de 1,5 kV [4]

Comme le montre la figure 1.5, cette architecture d'alimentation présente un certain nombre d'équipements principaux :

➤ **Disjoncteurs HT : ①**

Les disjoncteurs HT se caractérisent par une coupure du courant dans le SF6 ;

➤ **Transformateurs : ②**

Les transformateurs (T1 et T2 de la Figure 1.5) sont généralement des transformateurs à enroulements immergés dans un bain d'huile avec un refroidissement naturel. Les phases sont constituées d'un enroulement primaire et de deux enroulements secondaires. Ils présentent communément une puissance nominale de 7,4 MVA en 63 kV à 50 Hz [4].

➤ **Redresseurs 1,5 kV : ③**

Le groupe redresseur est constitué d'un double pont de Graëtz série à diodes et la puissance de ce système est généralement de 6 600 kW [1.6]. Le refroidissement des diodes s'effectue par ventilation naturelle. La figure 1.6 présente un exemple de redresseur utilisé dans une sous-station d'alimentation en tension continue de 1,5 kV.



Figure 1.6 Exemple de redresseur utilisé dans une sous-station DC de 1,5 kV [4]

➤ **Disjoncteurs 1,5 kV : ④**

Ces systèmes sont de type électromécanique ultrarapide à coupure dans l'air. L'intensité nominale du courant est de 4 kA ou 6 kA et le pouvoir de coupure d'un

disjoncteur sur un défaut en court-circuit est de 60 kA avec un temps d'intervention de 20 ms [4].

1.5.2 Alimentation en tension monophasée de 25 kV à la fréquence de 50 Hz

L'alimentation des caténares en tension monophasée s'effectue à partir de la haute tension prélevée entre deux phases du réseau électrique triphasé qui est abaissée à une tension de 25 kV. L'inconvénient du prélèvement de tension entre deux phases est qu'il entraîne un déséquilibre des phases du réseau électrique principal. La solution adoptée consiste à utiliser un schéma de captation dit en « V ». Celui-ci consiste à utiliser dans la sous-station d'alimentation deux transformateurs qui sont branchés sur deux paires de phases différentes du réseau électrique triphasé. Cette solution implique d'installer sur les caténares, au droit de la sous-station, des « sections de séparation » permettant d'isoler les alimentations de 25 kV qui ne sont pas en phases [5].

❖ Variante : l'alimentation symétrique en 2x25 kV à 50 Hz

Une variante du système d'alimentation en tension monophasée 25 kV, consiste à transporter l'énergie sous une tension de 50 kV entre la caténaire et un feeder. Le feeder est une ligne de transport d'énergie utilisée pour le retour de courant d'alimentation. Une tension de 25 kV entre la caténaire et les rails est obtenue à l'aide d'un autotransformateur dont le point milieu est connecté aux rails.

La Figure 1.7 donne le schéma de principe de cette alimentation. La lettre A dans cette figure désigne l'autotransformateur [5]. Ce système d'alimentation permet de réduire les perturbations électromagnétiques émises grâce à la symétrisation du circuit de retour du courant avec l'usage du feeder.

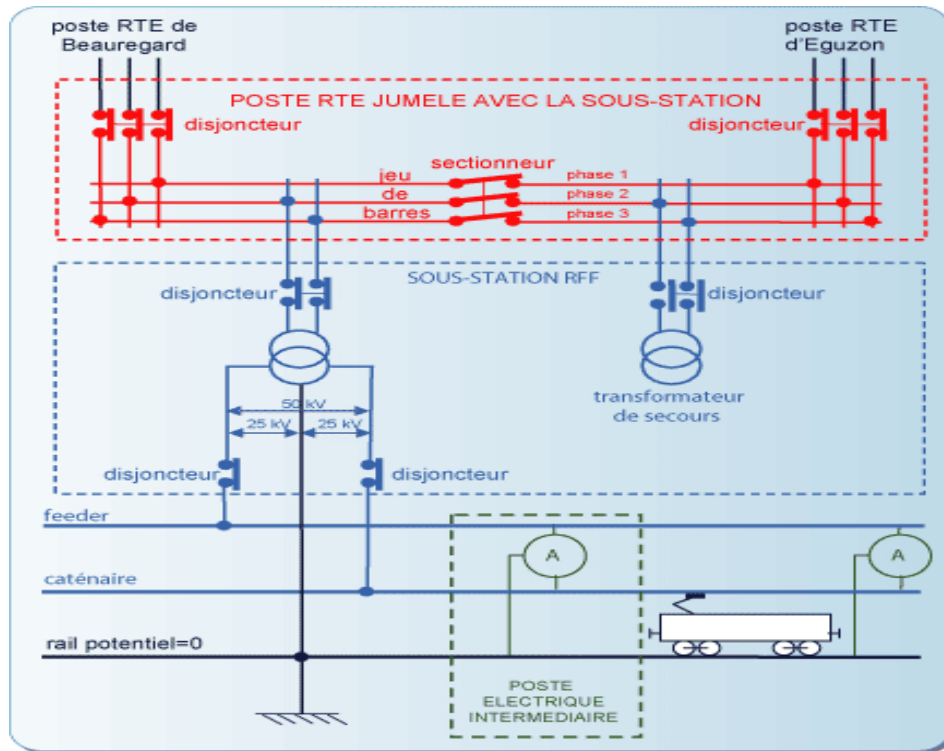


Figure 1.7 Schéma de principe de l'alimentation en 2x25 kV à 50 Hz [5]

1.6 Les différents types des convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un montage utilisant des interrupteurs à semi-conducteurs permettant par une commande convenable de ces derniers de régler un transfert d'énergie entre une source d'entrée et une source de sortie.

1.6.1 Les redresseurs (TRU - Transformer Rectifier Unit)

Le TRU est constitué en général d'un transformateur suivi d'un redresseur polyphasé qui permet d'obtenir une tension continue avec une faible ondulation résiduelle. Des filtres LC sont généralement utilisés pour minimiser les ondulations à la sortie et pour réduire les harmoniques de courant à l'entrée. Le TRU peut avoir un étage de régulation utilisant un hacheur pour contrôler la tension et le courant de sortie [7].

La figure 1.8, montre le diagramme fonctionnel d'un redresseur triphasé à diodes qui est constitué d'un transformateur à deux secondaires avec un couplage

YYD pour produire les six phases nécessaires. Les secondaires sont reliés à deux ponts redresseurs double alternance à diodes. Les sorties des ponts sont connectées en parallèle à la charge pour donner une tension continue avec des ondulations de fréquence égale à 12 fois la fréquence de la source [7].

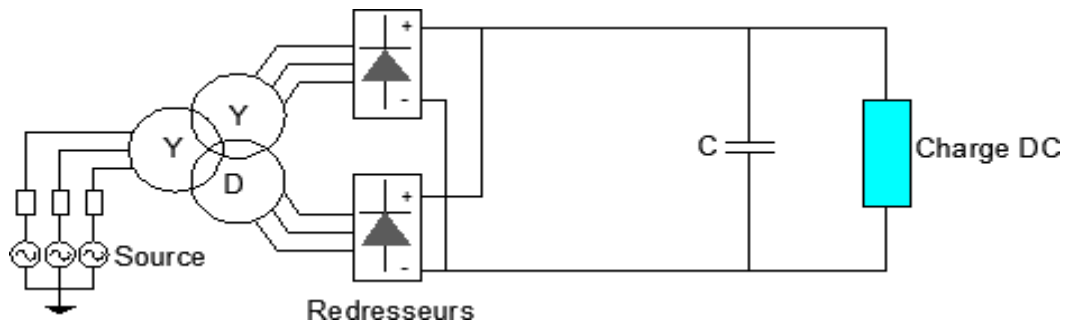


Figure 1.8 Redresseur 12 pulses à diodes [7]

Un autotransformateur avec une connexion Y-D est utilisé à l'entrée pour produire le déphasage de 30° entre les deux secondaires. Les sorties des deux ponts 6 pulses sont connectées en parallèle au condensateur C pour donner une tension continue avec 12 pulsations par période.

1.6.2 Les hacheurs

Le hacheur, ou convertisseur continu - continu, est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés, ce qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé [6].

La figure 1.9 montre la configuration d'un hacheur connecté à la sortie d'un redresseur à diodes. Ce hacheur permet d'augmenter la tension continue du redresseur à une valeur élevée comme à 1500 VDC par exemple. On peut associer à ce hacheur un régulateur de tension pour maintenir la tension de sortie à un niveau [6].

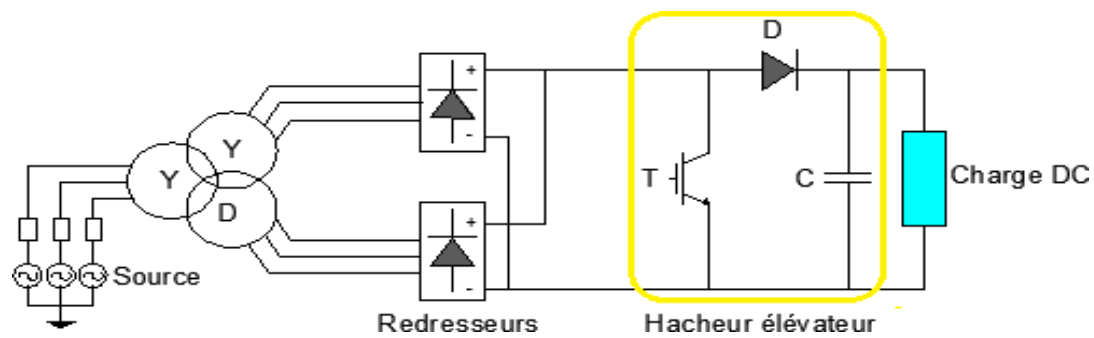


Figure 1.9 Hacheur pour contrôler la tension de sortie d'un redresseur [7]

1.6.3 Les onduleurs

Les onduleurs sont des convertisseurs DC/AC permettant de produire de l'alternatif monophasé ou triphasé pour l'alimentation des charges AC. L'onduleur est un convertisseur électrique très utilisé dans des applications de puissance comme par exemple l'alimentation des auxiliaires d'un train. Le convertisseur auxiliaire de l'exemple : Il est chargé de convertir les 1500V DC (continu) de la caténaire en une tension triphasée (50Hz) de 3x230V avec neutre pour alimenter le train en électricité. Celle-ci est utilisée notamment pour les prises d'ordinateurs portables, l'éclairage, la ventilation, le chauffage ou encore, par le biais d'un redresseur, la charge de batteries, l'éclairage de secours ou l'alimentation de l'électronique [6].

La figure 1.10 présente l'exemple d'un onduleur triphasé utilisé dans les trains électriques. La tension continue fournie par le redresseur 12 pulses (sous station) est convertie en une source alternative triphasée à tension et fréquence variables pour alimenter les auxiliaires d'un train.

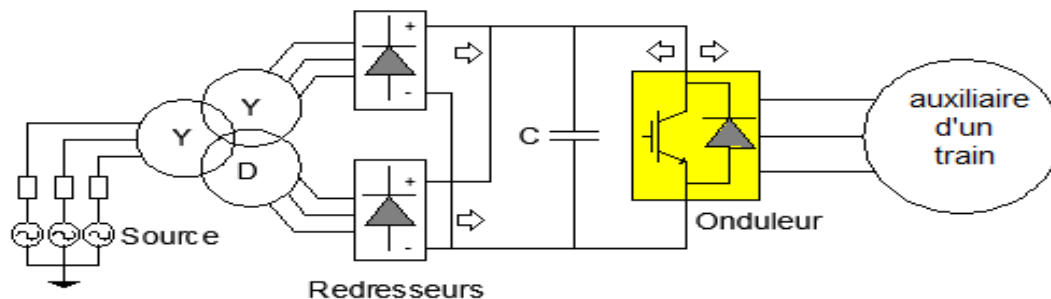


Figure 1.10 Alimentation des auxiliaires d'un train par onduleur [7]

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en première partie l'évolution technique et les systèmes d'électrifications ferroviaires dans le monde.

Ensuite, nous avons exposé les systèmes d'alimentations électriques d'une ligne ferroviaire et les principaux équipements constituant une sous-station électrique.

Enfin, nous avons parlé sur les différents types des convertisseurs statiques utilisés dans l'alimentation des trains électriques.

Chapitre 2

Perturbations conduites dans les trains électriques

2.1 Introduction

La qualité de l'énergie électrique concerne tous les acteurs du domaine énergétique, à savoir les producteurs, les distributeurs et les consommateurs d'électricité. Elle est devenue un sujet important ces dernières années, essentiellement pour les raisons suivantes :

- Des impératifs économiques : les perturbations électriques ont un coût élevé pour les industriels car elles engendrent des arrêts de production, des pertes de matières premières, une baisse de la qualité de la production, un vieillissement prématuré des équipements, etc.
- La généralisation des équipements d'électronique de puissance sensibles aux perturbations et/ou générateurs de perturbations : Malgré leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent rendement, performances élevées), ils ont la particularité de consommer des courants déformés.
- L'ouverture du marché de l'électricité en Algérie : incite à offrir à ses clients une énergie de meilleure qualité.

Dans ce chapitre, nous intéressons aux perturbations conduites (harmoniques) générées par les sous-stations dédiées à l'alimentation des systèmes de traction électriques. Nous allons donner un aperçu sur les harmoniques et des notions élémentaires d'analyse harmonique, les origines et les conséquences de la pollution harmonique.

Enfin, nous donnons quelques techniques utilisées pour la réduction de ces harmoniques.

2.2 Les harmoniques

Une charge non linéaire appelle du réseau électrique un courant déformé, lequel va modifier l'allure de la tension sinusoïdale. Les charges non linéaires génèrent des courants harmoniques qui circulent à partir de la charge vers l'alimentation en empruntant le chemin de la moindre impédance. Les courants harmoniques sont des courants dont la fréquence est un multiple entier de la fondamentale (celle de l'alimentation électrique). La superposition des courants harmoniques sur le courant fondamental provoque les formes d'onde non sinusoïdales associées aux charges non linéaires. La décomposition en série de Fourier d'une onde quelconque permet l'obtention de ses composantes harmoniques comme l'illustre la Figure 2.1 [11].

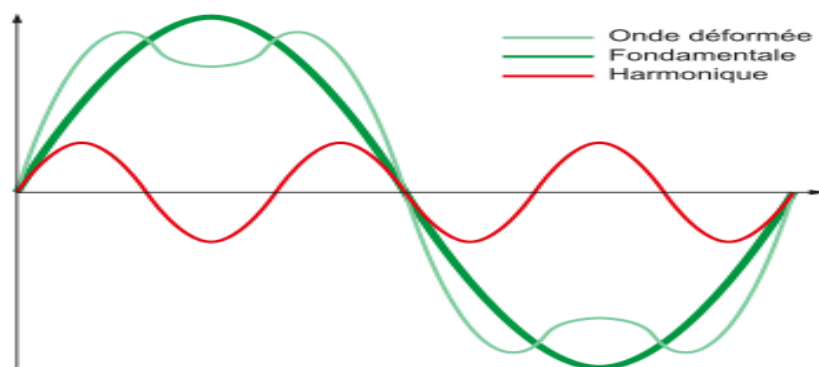


Figure 2.1 Un courant déformé par les harmoniques [11]

Inter-harmoniques : Sont des signaux non multiples de la fréquence industrielle. Les variateurs de vitesses pour machines asynchrones, les fours à arcs sont les principaux générateurs d'inter-harmoniques.

2.3 Charges linéaires

Une charge est dite « linéaire » si le courant qu'elle absorbe est sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale (Figure 2.2). Lorsqu'on applique une tension sinusoïdale à un élément linéaire, le courant résultant est également

sinusoïdal. La relation courant-tension est linéaire quelle que soit la tension ou le courant, comme c'est présenté dans la figure suivante :

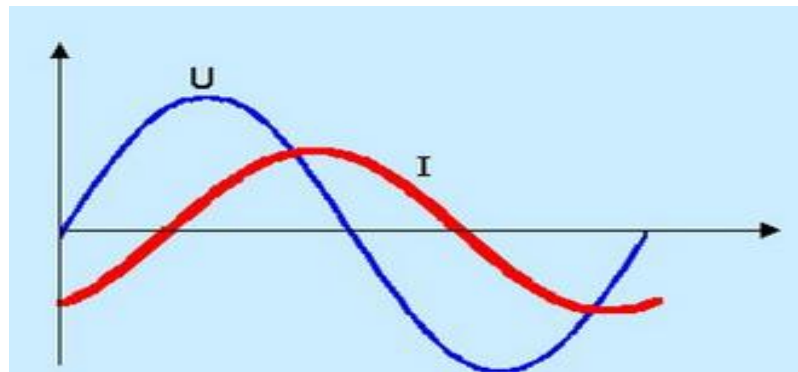


Figure 2.2 Courant et tension d'une charge linéaire [11]

2.4 Charges non linéaires

Ces charges se comportent approximativement comme des sources de courant harmonique, c'est-à-dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non pas par l'impédance ou la tension du réseau sur lesquelles elles sont raccordées [12].

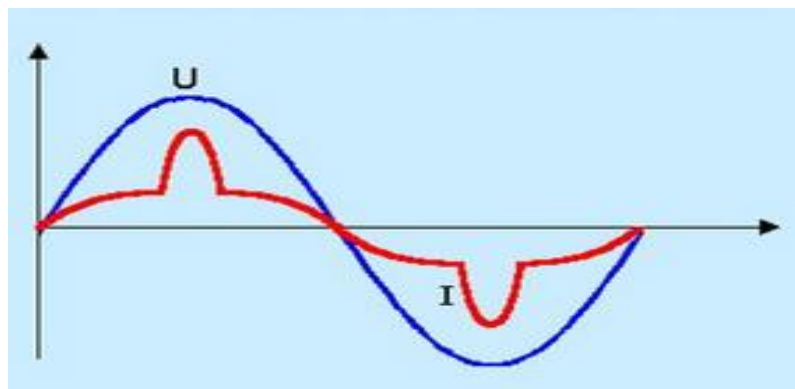


Figure 2.3 Courant et tension d'une charge non-linéaire [11]

2.5 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe.

2.5.1 Qualité de la tension

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie [13].

a) Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale [12].

Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

➤ **Les creux de tension, coupures et sursensions :** Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts circuits et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques [11].

➤ **Les variations de tension :** Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale [2.1]. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou à des modifications de la configuration du réseau.

b) Fréquence

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge. Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 précise que la

fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle 50Hz $\pm 1\%$ pendant 99,5% de l'année. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes [13].

c) Forme d'onde

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

d) Symétrie

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.

2.5.2 Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de $2\pi/3$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale [20].

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension », le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension.

2.6 Perturbations des réseaux électriques

2.6.1 Définition des perturbations

➤ **Creux de tension** : C'est une baisse brutale de l'amplitude de la tension ayant une valeur comprise entre 90% et 1% de la tension contractuelle (La norme EN50160), suivi d'un retour à la tension après une courte période de temps dont la durée peut varier de 10ms à 3 minutes [14].

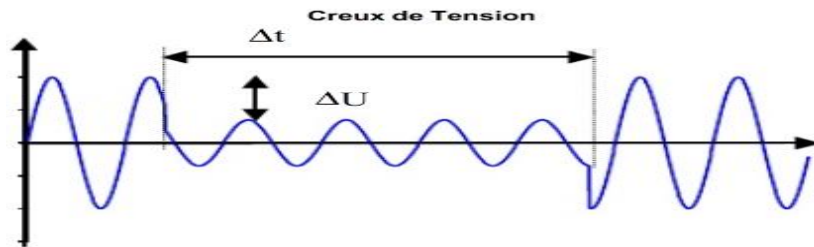


Figure 2.4 Baisse de tension dans un réseau électrique [13]

➤ **Coupures brèves** : Pertes brusques de la tension ($< 1\%$ de la tension contractuelle) pour une durée supérieure ou égale à 1 seconde et n'excédant pas 3 minutes. On peut aussi les appeler les interruptions de tension.

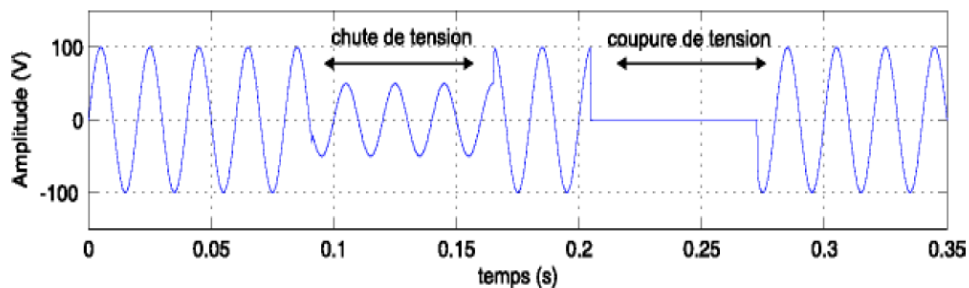


Figure 2.5 Coupure brève de tension [18]

➤ **Surtensions transitoires** : Les surtensions transitoires de la tension pendant un intervalle de temps relativement court.

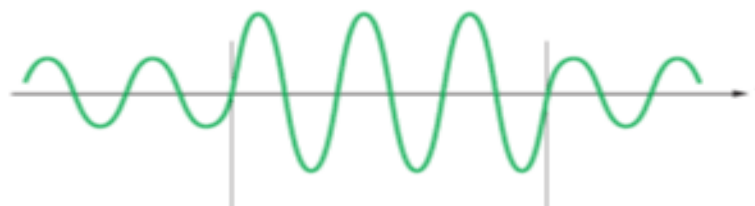


Figure 2.6 Surtension transitoire de tension [18]

➤ **Fluctuation de tension :** La variation de tension est décrite comme une série de variations aléatoires de tension, dont l'ampleur ne dépasse pas la gamme des variations de tension admissible ($\pm 10\%$). Le taux de présence varie de 25 Secondes à 1mn et elle doit être différenciée de variations normales lentes dans la même limite ($\pm 10\%$) en raison de changements progressive de la charge dans le réseau [12].

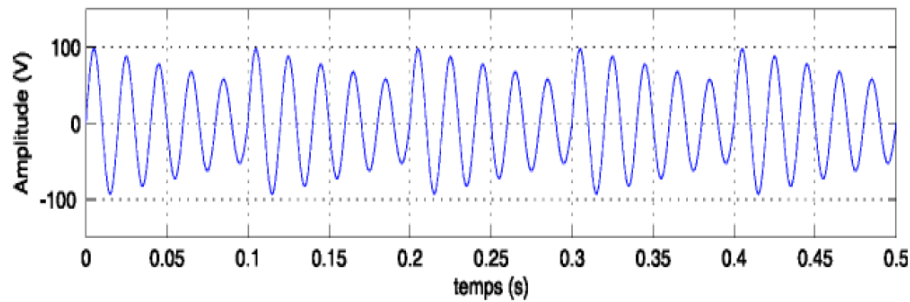


Figure 2.7 Fluctuation de tension dans un réseau électrique [13]

➤ **Déséquilibre du système triphasé de la tension :** Le déséquilibre du système triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou déphasées de 120° les unes par rapport aux autres.

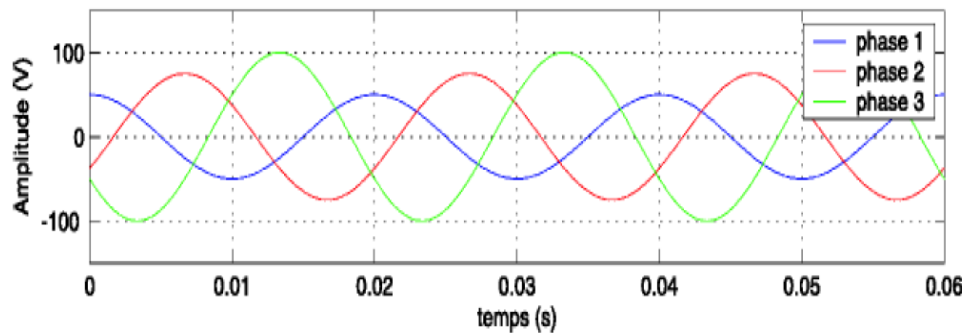


Figure 2.8 Déséquilibre de tension dans un réseau électrique [15]

2.7 Caractérisation des harmoniques

Les différentes grandeurs sont définies pour chiffrer des perturbations harmoniques, parmi celle-ci les plus utilisées sont :

2.7.1 Rang d'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_h sur la fréquence fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz).

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (2.1)$$

f_h : Fréquence de rang h .

f_1 : Fréquence de rang 1 (fondamentale).

2.7.2 Décomposition d'un signal en Série de Fourier

Au début du 19ème siècle, Joseph Fourier a montré qu'un signal périodique de fréquence f peut être décomposé avec des signaux sinusoïdaux de fréquence multiple entière de f .

La base mathématique de l'existence des harmoniques provient de la décomposition des signaux périodiques en série de Fourier. Ceci revient à dire que tout signaux, périodique de période $T = \frac{1}{f}$ peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f [16]. Mathématiquement, cela s'écrit :

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_0^\infty (a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)) \quad (2.2)$$

La valeur a_0 représente la valeur moyenne de $s(t)$. On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (2.3)$$

Il existe quelques prés requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- Si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls.
- Si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls.

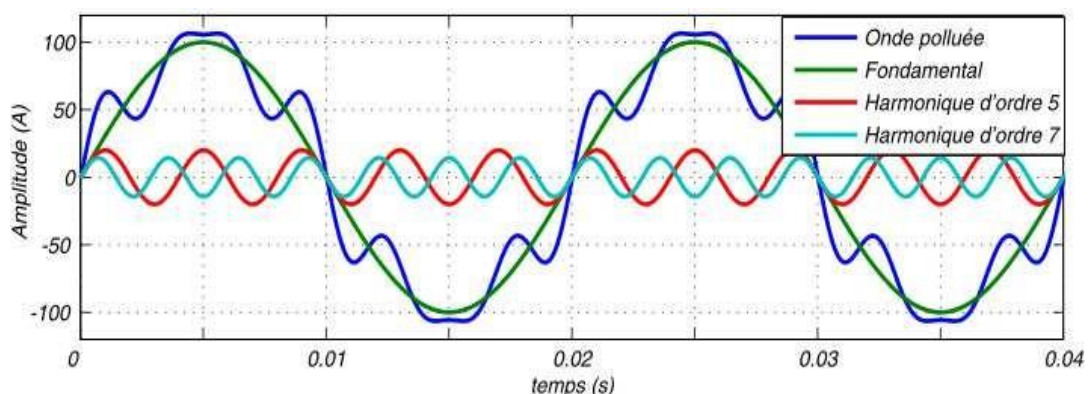


Figure 2.9 Décomposition harmonique d'une onde polluée [15]

2.7.3 Le taux de distorsion harmonique

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

$$\text{THD} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1} \quad (2.4)$$

Y_1 : la valeur efficace de composante fondamentale (du courant ou de la tension).

Y_n : Les valeurs exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).

2.7.4 Le facteur de puissance

La puissance apparente monophasée soit séparée en 3 composantes orthogonales. Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S^2 = \sqrt{Q^2 + P^2 + D^2} \quad (2.5)$$

P est la puissance active, Q la puissance réactive et D la puissance déformante liée aux harmoniques. Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S [16].

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \phi \cos \psi \quad (2.6)$$

Ainsi donc, les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance. Ceci peut se traduire par le diagramme de Fresnel des puissances de la figure 2.10.

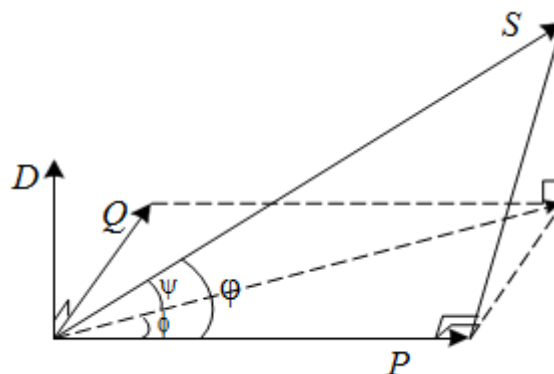


Figure 2.10 Diagramme de Fresnel des puissances [16]

2.8 Effets des harmoniques

a) Effets instantanés

Les effets instantanés créent des perturbations dans le fonctionnement des appareils de protection et de commutation.

b) Effets à moyen et long terme

Les effets à moyen et long terme engendrent l'échauffement des matériels électriques, et causent un vieillissement prématuré de ceux-ci.

Les effets sont directement liés à ce taux de distorsion harmonique (THD), en voici des valeurs typiques :

Taux de distorsion harmonique en tension	Conséquences
THD < 5%	Pas de problèmes
5% < THD < 7%	Dysfonctionnement des appareils sensibles
7% < THD < 9%	Dysfonctionnement des appareils normaux
THD > 9%	Dysfonctionnement de tous les appareils, destruction de certains matériels sur le court, moyen et long terme.

Tableau 2.1 les effets des harmoniques en fonction de THD de tension [13]

2.9 Problèmes des harmoniques dans les trains électriques

La figure 2.11 illustre les structures simplifiées des sous-stations de traction en courant continu (DC) basées sur les redresseurs non contrôlés à (6 et 12 pulsations) en parallèle ou en série et les formes d'onde associées de la tension et du courant de phase.

En raison de l'utilisation des redresseurs dans les sous-stations électriques, la distorsion harmonique du courant du réseau est le problème principal, contrairement aux systèmes de traction à courant alternatif (AC) où le déséquilibre indésirable du système est le problème principal [8].

Le niveau de distorsion harmonique est élevé, d'autant plus que le nombre de pulsations du redresseur est inférieur. En termes de facteur de distorsion harmonique totale (THD), la plage est d'environ 10 à 30% en l'absence de mesures de compensation [8].

Atteindre une distorsion harmonique de courant inférieure à la limite bien connue de 5% fixée par la norme IEEE-519 est l'objectif principal de l'adoption des mesures de compensation.

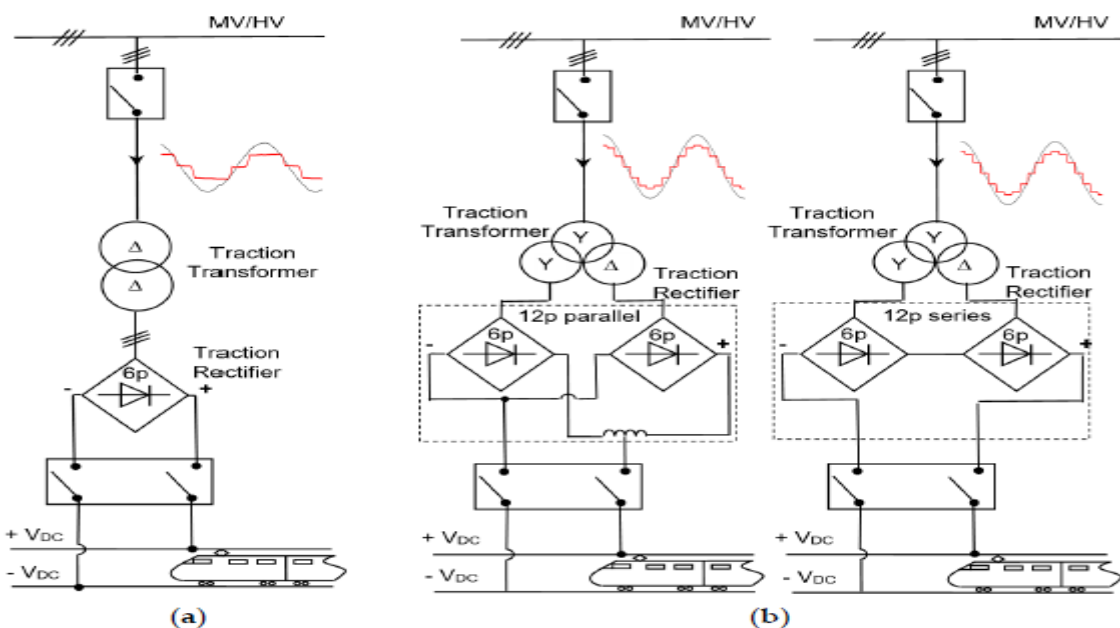


Figure 2.11 Schémas simplifiés des alimentations en continu et des formes d'onde tension et courant dans le cas d'un redresseur à 6 et à 12 pulsations [8]

2.10 Origine des harmoniques

Dans les secteurs industriel et domestique on constate une recrudescence de générateurs d'harmoniques [21]. Il s'agit des dispositifs, tels que les convertisseurs statiques, contenant des éléments de commutation ainsi que d'autres dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire :

a) Convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés. On peut citer de manière non exhaustive :

- **Les redresseurs monophasés et triphasés** génèrent des harmoniques dont la fréquence dépend sensiblement de la commande adoptée.
 - **Les cyclo-convertisseurs** utilisés pour régler la vitesse des moteurs à courant alternatif.
 - **Les gradateurs** utilisés dans les entraînements de faible puissance, les systèmes d'éclairage et de chauffage et les systèmes de conduite des réseaux.
 - **Les variateurs de vitesse électroniques** constitués principalement d'un convertisseur statique et d'une partie électronique, destinés à commander la vitesse d'un moteur électrique.
- b) Dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire, on distingue:**
- les fours à arc et à induction
 - les transformateurs
 - les machines tournantes
 - les inductances saturées, etc.

2.11 Solutions de dépollution des harmoniques

2.11.1 Solutions classiques (traditionnelles)

Les solutions traditionnelles de dépollution sont essentiellement des solutions passives ou des modifications structurelles permettant de traiter directement les harmoniques [14]. On peut citer:

- Le surdimensionnement de l'installation électrique
- L'augmentation de la puissance de court-circuit
- Les transformateurs à couplage passif
- Les filtres passifs

2.11.2 Solutions récentes (modernes)

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance).

Parmi les solutions modernes, on trouve trois solutions utilisées:

a) Les filtres actifs

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

b) La structure

Par la modification de la structure du convertisseur, on peut améliorer la qualité de l'énergie électrique consommée à travers ces convertisseurs. Comme exemple :

➤ onduleur multi-niveaux

Les principales applications de la topologie multi niveau se trouvent généralement dans la traction et la propulsion électriques: locomotives de 3kV, navire électriques, variateurs de vitesse de 4.5kV, ainsi que dans les systèmes de génération et de transport de l'énergie électrique.

L'utilisation des convertisseurs multi-niveaux dans les installations industrielles a été motivée par des avantages énergétiques, largement éprouvés de nos jours : la réduction très significative du taux de distorsion harmonique du courant, l'amélioration du facteur de puissance, la réduction des contraintes électriques aux bornes des interrupteurs statiques, la diminution des pertes de puissance et la réduction du volume des filtres (si nécessaires) [22].

➤ redresseurs polyphasés

L'invention concerne un redresseur polyphasé de forte puissance comportant des bras redresseurs, chacun comprenant un ensemble de composants électroniques monodirectionnels, montés en parallèle, reliés d'un côté à une phase correspondante d'un système de tensions polyphasé, et d'un autre côté à un conducteur composant couplé électriquement à une borne DC d'un circuit apte à

alimenter en courant continu un système extérieur. Les bras redresseurs sont alimentés par un système polyphasé équilibré.

c) La technique MLI aléatoire

La modulation en MLI aléatoire RPWM (Random Pulse Width Modulation) est l'une des solutions pour minimiser le problème des harmoniques. Dans la littérature, cette technique a été utilisée dans la commande des hacheurs ainsi que dans les onduleurs triphasés. La modulation aléatoire permet d'atténuer l'amplitude des harmoniques du signal de sortie du convertisseur. Au lieu d'avoir des composantes spectrales en chaque multiple de la fréquence de commutation, on obtient des composantes étalées sur tout le spectre de fréquence avec des amplitudes aux fréquences centrales atténuées [19].

2.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les Problèmes des harmoniques dans les trains électriques et les différents types des perturbations électriques conduites. En plus nous avons parlés sur les solutions de dépollution des harmoniques pour améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Chapitre 3

Redresseurs polyphasés à diodes

3.1 Introduction

Toutes les installations métropolitaines et un grand nombre d'installations ferroviaires dans le monde sont alimentées par des sous-stations d'alimentation électrique équipées d'unités de conversion AC /DC. Parmi ces convertisseurs les plus utilisés, les redresseurs polyphasés pour assurer une meilleure qualité de l'énergie électrique. Les redresseurs polyphasés à diodes considérés dans ce chapitre sont à 3 phases, 6 phases, 9 phases et 12 phases qui produisent un courant de secteur et une tension continue ayant un faible taux de distorsion harmonique.

Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier lieu les principales caractéristiques du module de base qui est le redresseur triphasé à 6 pulsations. Nous étudions ensuite les montages redresseurs ayant un plus grand nombre de phases.

3.2 Redresseur à 6 pulsations (3 phases)

La figure 3.1 montre le schéma d'un redresseur triphasé à 6 pulsations qui est constitué de 6 diodes connectées en pont (pont de Graetz). La charge continue est connectée entre le point commun des cathodes et le point commun des anodes.

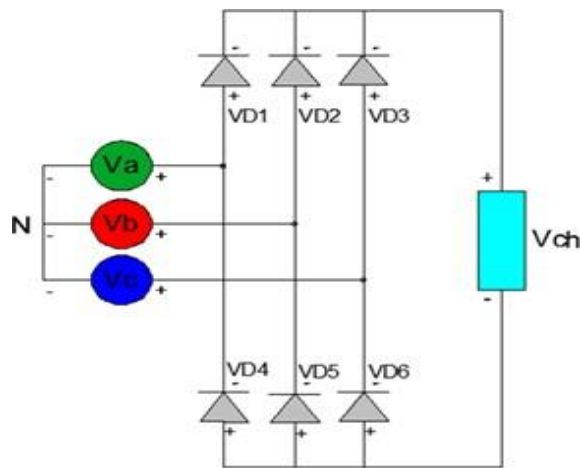


Figure 3.1 Redresseur triphasé à 6 pulsations [7]

Les tensions ligne-neutre de la source triphasée sont montrées à la figure 3.2. La tension ligne-neutre de la phase a est $V_a(t) = V_m \cdot \cos(\omega t)$.

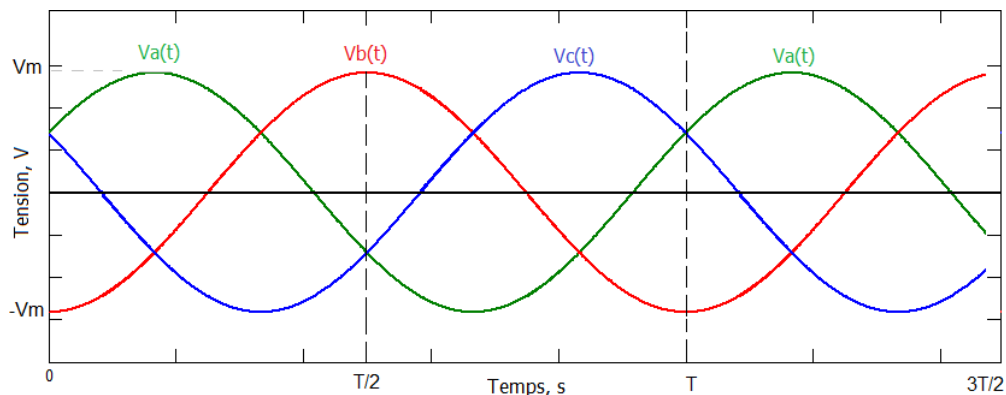


Figure 3.2 Tension triphasée à l'entrée du redresseur [7]

La figure 3.3 montre la tension de sortie du redresseur V_{ch} avec une charge résistive. Cette tension est composée des sections les plus positives des tensions ligne-ligne: V_{ab} , V_{ac} , V_{bc} , V_{ba} , V_{ca} et V_{cb} pour chaque période. La fréquence des ondulations dans la tension V_{ch} est égale à 6 fois la fréquence de la source.

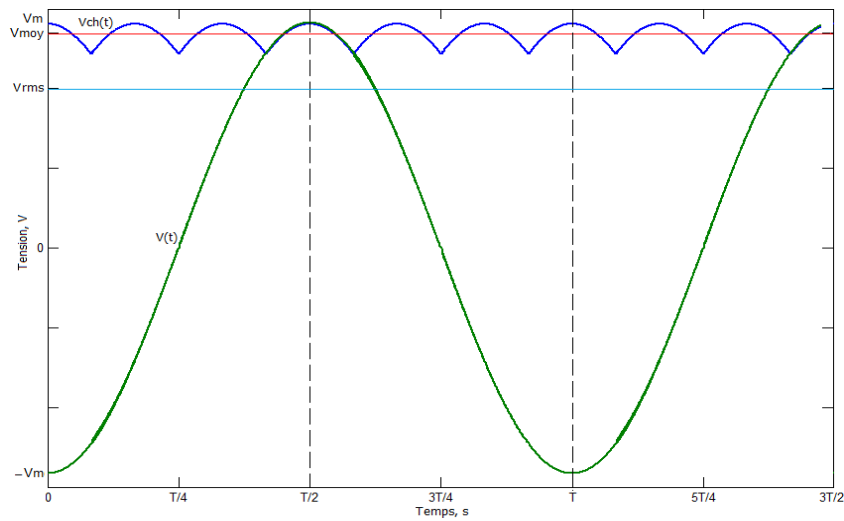


Figure 3.3 Tension ligne-ligne à l'entrée $v(t)$, tension de charge V_{ch} et sa valeur moyenne [7]

La valeur moyenne de la tension à la charge V_{ch} est égale à:

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}(t) dt \quad (3.1)$$

$$V_{moy} = 2 \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} V_m \sin(\alpha) d\alpha \right\} = \frac{1}{\pi} V_m [-\cos(\alpha)]_{\pi/6}^{\pi/2} \quad (3.2)$$

$$= \frac{1}{\pi} V_m \left[\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \right] = \frac{6}{\pi} V_m \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \quad (3.3)$$

$$= \frac{3}{\pi} \sqrt{3} V_m = \frac{3}{\pi} V_{crête} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} V_{rms} \quad (3.4)$$

$$= 1.35 V_{rms} \quad (3.5)$$

Où : V_m est la tension maximale de phase, V_{rms} est la tension efficace de ligne et $V_{crête}$ est la tension crête de ligne.

La valeur moyenne du courant I_{moy} avec une charge résistive est : $I_{moy} = \frac{V_{moy}}{R}$

La figure 3.4 montre les formes d'ondes des courants à l'entrée du pont redresseur. L'angle de conduction des diodes est de $2\pi/3$.

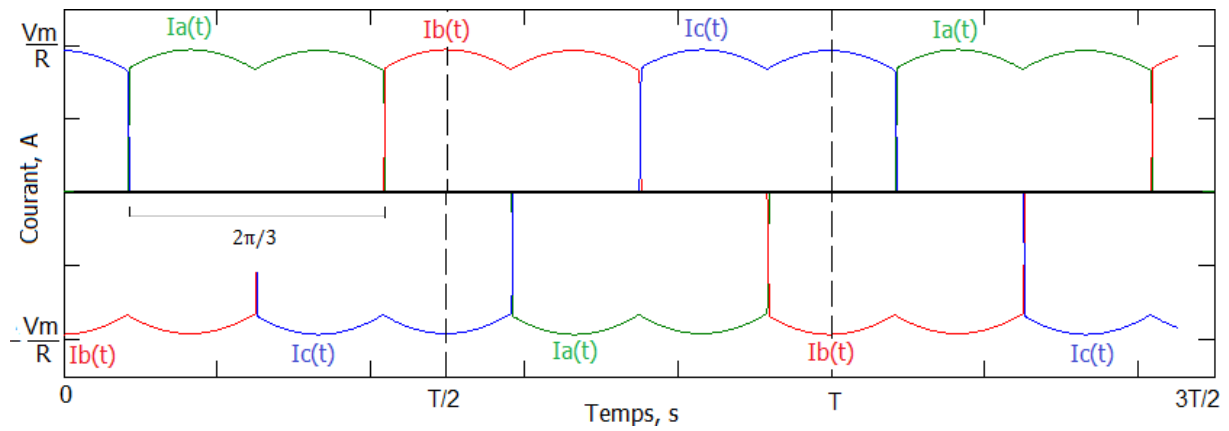


Figure 3.4 Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ à l'entrée du pont redresseur à 6 pulsations [7]

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

$$i(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy} \left[\cos(wt) - \frac{1}{5} \cos(5wt) + \frac{1}{7} \cos(7wt) + \dots \right] \quad (3.6)$$

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

On peut constater que les harmoniques de courant dans un redresseur à 6 pulsations sont d'ordre $6k \pm 1$ (5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, ...).

La valeur efficace de $i_a(t)$ peut être considérée égale à $I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{moy}$ pour l'analyse harmonique théorique (cas d'une charge très inductive).

Les valeurs efficaces des principales harmoniques de courant sont données dans le tableau 3.1

I_1	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}
$\frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy}$	$\frac{2\sqrt{3}}{5\pi} I_{moy}$	$\frac{2\sqrt{3}}{7\pi} I_{moy}$	$\frac{2\sqrt{3}}{11\pi} I_{moy}$	$\frac{2\sqrt{3}}{13\pi} I_{moy}$
$\frac{3}{\pi} \sqrt{2} I_s$	$\frac{3}{5\pi} \sqrt{2} I_s$	$\frac{3}{7\pi} \sqrt{2} I_s$	$\frac{3}{11\pi} \sqrt{2} I_s$	$\frac{3}{13\pi} \sqrt{2} I_s$
I_1	$\frac{1}{5} I_1$	$\frac{1}{7} I_1$	$\frac{1}{11} I_1$	$\frac{1}{13} I_1$

Tableau 3.1 Principales harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 6 pulsations

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

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{I_1^2 \left[1 + \frac{1}{5^2} + \frac{1}{7^2} + \frac{1}{11^2} + \frac{1}{13^2} + \dots \right]} = 1.04712 I_1 \quad (3.7)$$

On déduit le ratio de distorsion harmonique totale THD_i de courant à l'entrée:

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} = 0.3106 \quad (3.8)$$

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

$$PF = \frac{P_{dc}}{S_{in}} = \frac{V_{moy} I_{moy}}{\sqrt{3} V_{rms} I_{rms}} \quad (3.9)$$

Ou : $V_{rms} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} V_{moy}$ et $I_{rms} = 1.04712 I_1 = 1.04712 \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} I_{moy}$ (3.10)

On déduit:

$$PF = \frac{1}{1.04712} = 0.955 \quad (3.11)$$

3.3 Redresseur à 12 pulsations (6 phases)

La figure 3.5 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.

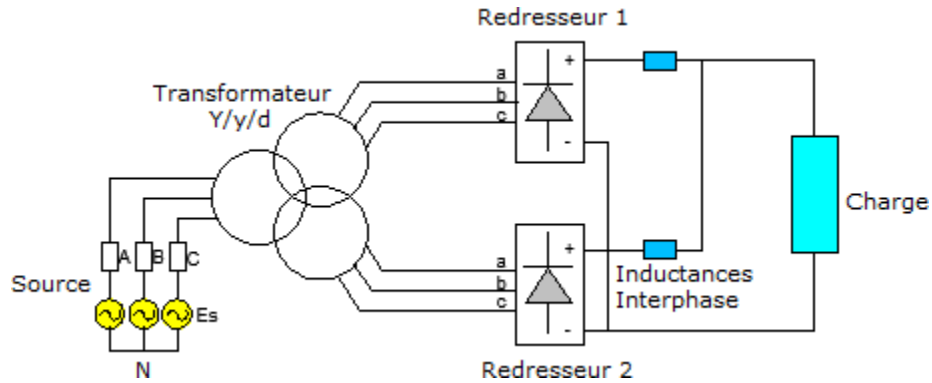


Figure 3.5 Montage redresseur à 12 pulsations [20]

À l'entrée, un transformateur avec deux secondaires, en connexion YYD, est utilisé pour créer un déphasage de 30° entre les deux redresseurs.

La figure 3.6 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. [25]

La figure 3.6 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.

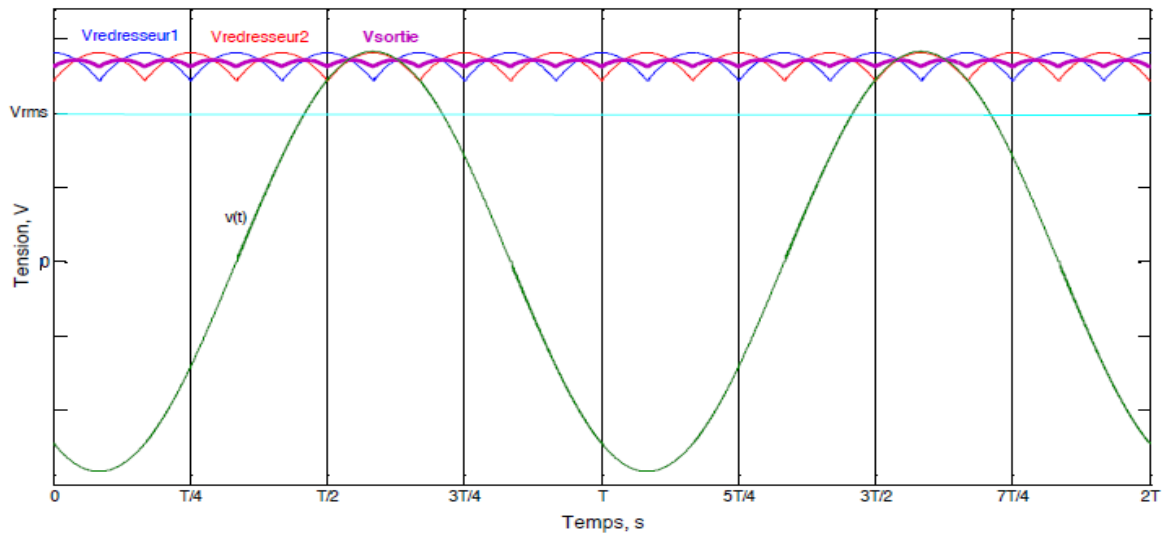


Figure 3.6 Formes d'ondes de la tension de sortie d'un redresseur à 12 pulsations, les tensions de sortie des redresseurs 1 et 2 et la tension ligne-ligne $v(t)$ d'une phase à l'entrée [7]

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: $V_{moy} = 1.35 V_{rms}$, où V_{rms} est la valeur efficace de la tension ligne-ligne aux secondaires.

La figure 3.7 montre les formes d'ondes des courants au primaire du transformateur.

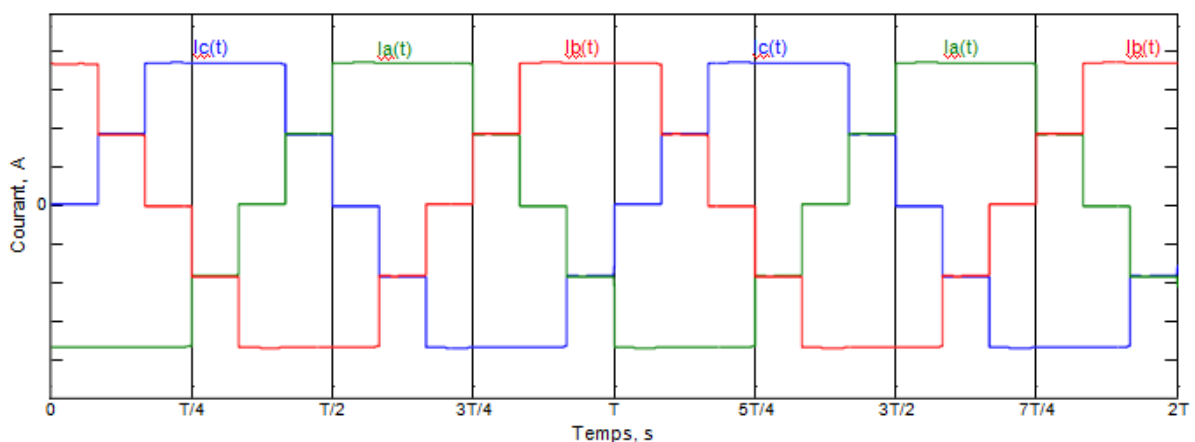


Figure 3.7 Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ au primaire du transformateur d'entrée du montage redresseur à 12 pulsations [7]

Le courant $i_{a(t)}$ à l'entrée peut être décomposé en série de Fourier :

$$i(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy} \left[\cos(wt) - \frac{1}{11} \cos(11wt) + \frac{1}{13} \cos(13wt) + \dots \right] \quad (3.12)$$

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 3.2.

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

Tableau 3.2 Principaux harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 12 pulsations

La valeur efficace du courant $i_{a(t)}$ peut être calculée en fonction des valeurs efficaces des harmoniques:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{I_1^2 \left[1 + \frac{1}{11^2} + \frac{1}{13^2} + \frac{1}{23^2} + \frac{1}{25^2} + \dots \right]} = 1.001011 I_1 \quad (3.13)$$

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

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1} \right)^2 - 1} = 0.152 \quad (3.14)$$

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

$$PF = \frac{P_{dc}}{S_{in}} = \frac{V_{moy} I_{moy}}{\sqrt{3} V_{rms} I_{rms}} \quad (3.15)$$

$$ou V_{rms} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} V_{moy} et I_{rms} = 1.001011 I_1 = 1.001011 \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} I_{moy} \quad (3.16)$$

On déduit:

$$PF = \frac{1}{1.001011} = 0.989 \quad (3.17)$$

3.4 Redresseur à 18 pulsations (9 phases)

La figure 3.8 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.

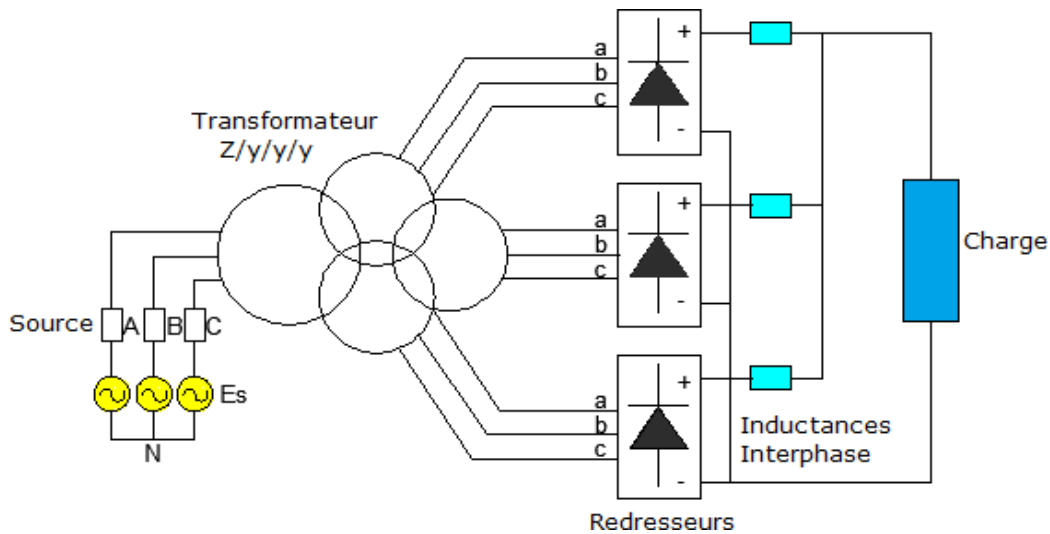


Figure 3.8 Montage redresseur à 18 pulsations [7]

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.

De façon générale, les longueurs des bobinages x et y sont calculées par les relations suivantes [1.7] :

$$x = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(60^\circ - \alpha) \quad (3.18)$$

$$y = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\alpha) \quad (3.19)$$

Pour 20° , 40° et 60° , les valeurs relatives de x et y des bobinages en zigzag au primaire sont données dans le tableau suivant.

α	20°	40°	60°
X	0.742	0.394	1
Y	0.394	0.742	0

Tableau 3.3 les valeurs relatives de x et y des bobinages en zigzag

La figure 3.9 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. À 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.

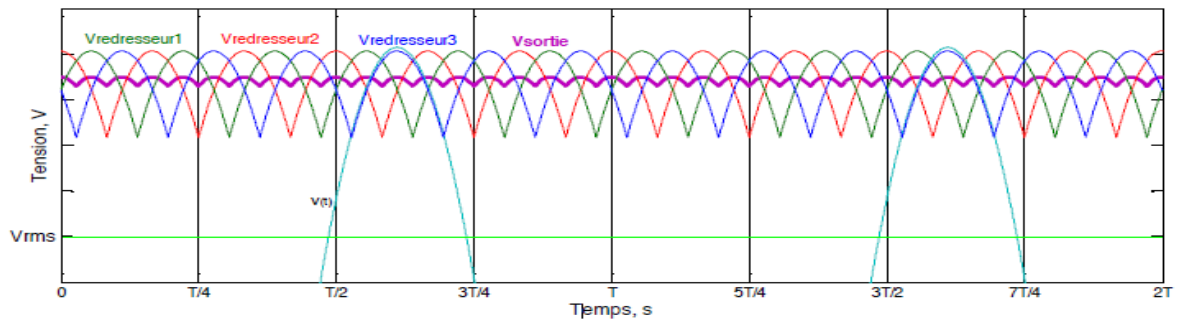


Figure 3.9 Formes d'ondes de la tension de sortie d'un redresseur à 18 pulsations et la tension ligne-ligne $v(t)$ d'une phase à l'entrée [7]

Puisque les trois sorties continues sont connectées en parallèle, la tension moyenne à la charge est égale à la tension moyenne d'un redresseur à 6 pulsations:

$$V_{moy} = 1.35V_{rms} \quad (3.20)$$

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

La figure 3.10 montre les formes d'ondes des courants au primaire du transformateur.

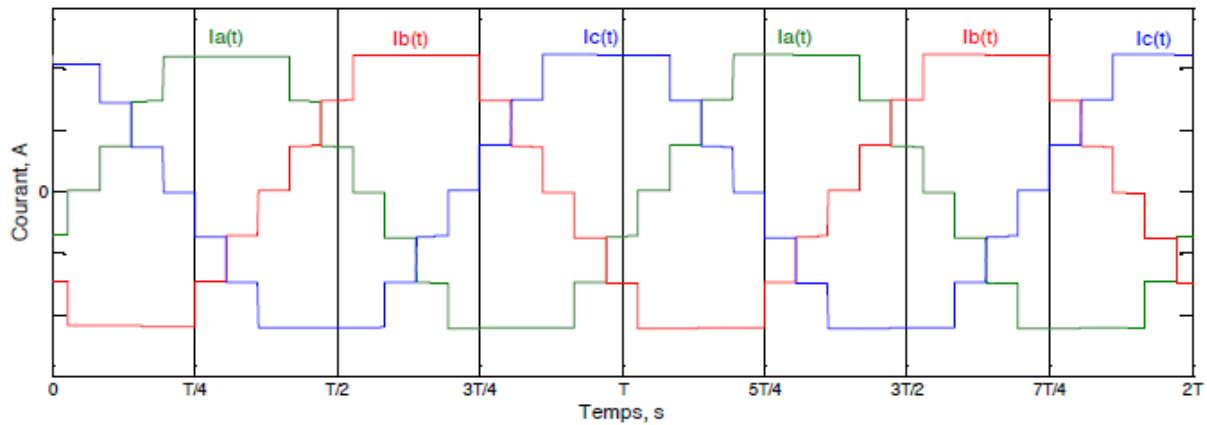


Figure 3.10 Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ au primaire du transformateur d'entrée du montage redresseur à 18 pulsations [7]

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

$$i(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy} \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{17} \cos(17\omega t) + \frac{1}{19} \cos(19\omega t) + \dots \right] \quad (3.21)$$

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 3.4.

I_1	I_{17}	I_{19}	I_{35}	I_{37}
$\frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy}$	$\frac{2\sqrt{3}}{17\pi} I_{moy}$	$\frac{2\sqrt{3}}{19\pi} I_{moy}$	$\frac{2\sqrt{3}}{35\pi} I_{moy}$	$\frac{2\sqrt{3}}{37\pi} I_{moy}$
$\frac{3}{\pi} \sqrt{2} I_s$	$\frac{3}{17\pi} \sqrt{2} I_s$	$\frac{3}{19\pi} \sqrt{2} I_s$	$\frac{3}{35\pi} \sqrt{2} I_s$	$\frac{3}{37\pi} \sqrt{2} I_s$
I_1	$\frac{1}{17} I_1$	$\frac{1}{19} I_1$	$\frac{1}{35} I_1$	$\frac{1}{37} I_1$

Tableau 3.4 Principaux harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 18 pulsations

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

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{I_1^2 \left[1 + \frac{1}{17^2} + \frac{1}{19^2} + \frac{1}{35^2} + \frac{1}{37^2} + \dots \right]} = 1.003881 I_1 \quad (3.22)$$

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

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} = 0.8819 \quad (3.23)$$

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

$$PF = \frac{P_{dc}}{S_{in}} = \frac{V_{moy} I_{moy}}{\sqrt{3} V_{rms} I_{rms}} \quad (3.24)$$

$$\text{Ou } V_{rms} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} V_{moy} \text{ et } I_{rms} = 1.00388 I_1 = 1.00388 \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy} \quad (3.25)$$

On déduit:

$$PF = \frac{1}{1.00388} = 0.99613 \quad (3.26)$$

3.5 Redresseur à 24 pulsations (12 phases)

La figure 3.11 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.

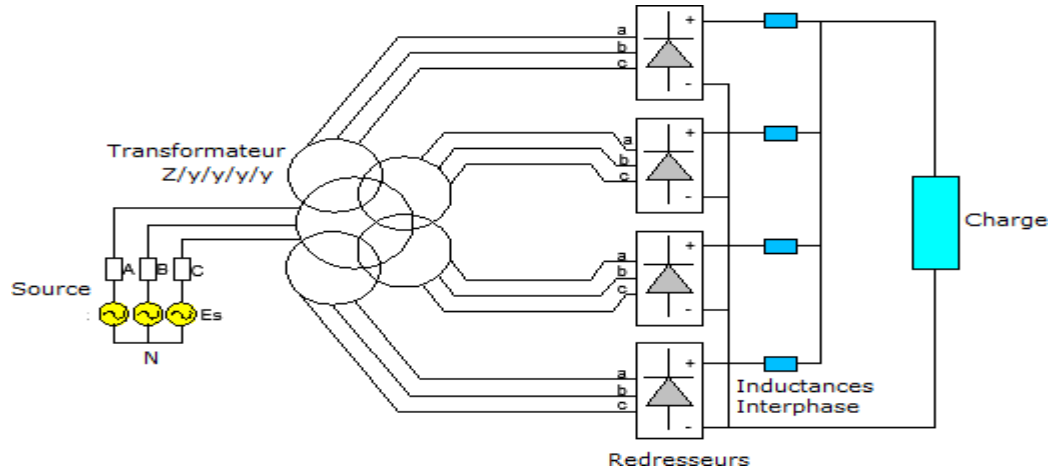


Figure 3.11 Montage redresseur à 24 pulsations [7]

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. [24]

De façon générale, les longueurs des bobinages x et y sont calculées par les relations suivantes [1.7]:

$$x = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(60^\circ - \alpha) \quad (3.27)$$

$$y = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\alpha) \quad (3.28)$$

Pour $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ et 60° , les valeurs relatives de x et y des bobinages en zigzag au primaire sont données dans le tableau suivant.

α	15°	30°	45°	60°
x	0.817	0.577	0.299	1
y	0.299	0.577	0.817	0

Tableau 3.5 les valeurs de x et y des bobinages en zigzag pour 12 phases

La figure 3.12 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. À 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.

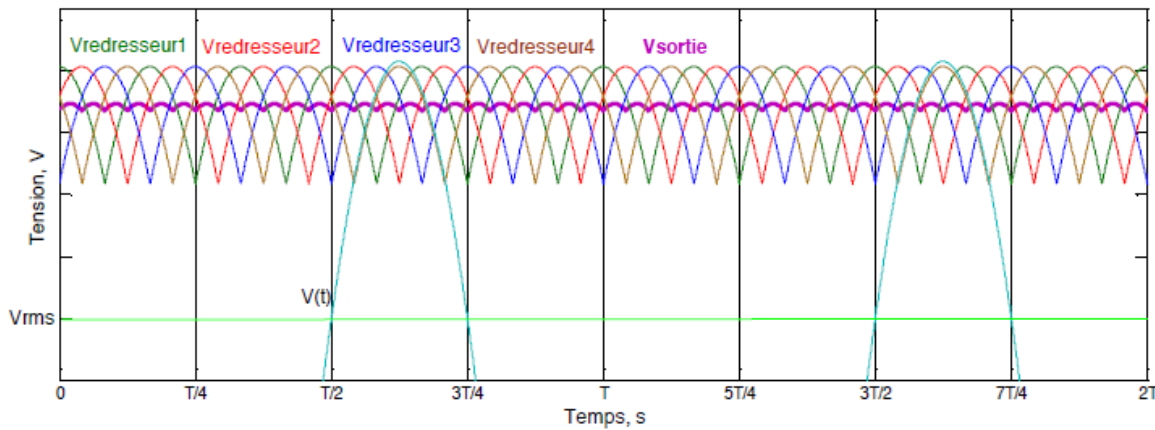


Figure 3.12 Formes d'ondes de la tension de sortie d'un redresseur à 24 pulsations et la tension ligne-ligne $v(t)$ d'une phase à l'entrée [7]

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

$$V_{moy} = 1.35V_{rms} \quad (3.29)$$

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

La figure 3.13 montre les formes d'ondes des courants au primaire du transformateur.

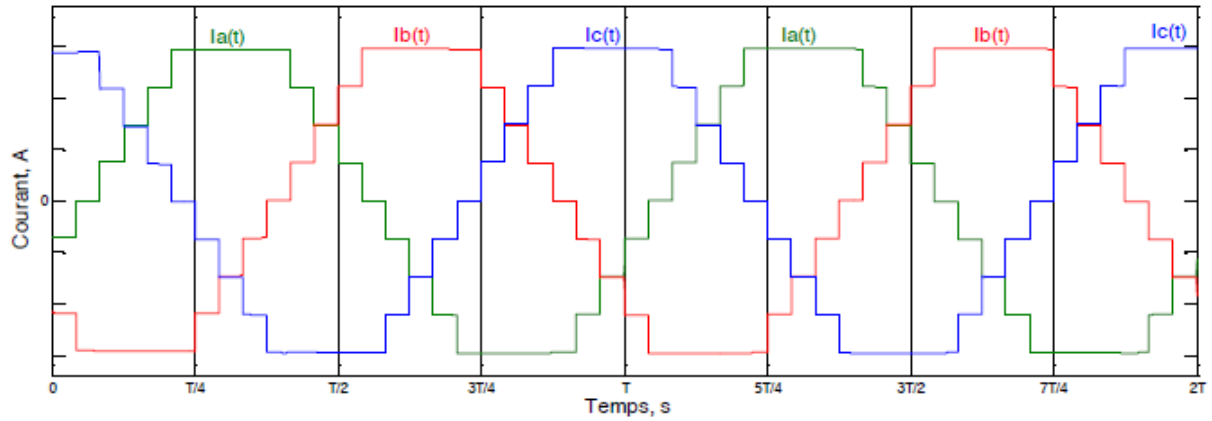


Figure 3.13 Courants $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ au primaire du transformateur d'entrée du montage redresseur à 24 pulsations [7]

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

$$i(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy} \left[\cos(wt) - \frac{1}{23} \cos(23wt) + \frac{1}{25} \cos(25wt) + \dots \right] \quad (3.30)$$

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 3.6.

I_1	I_{23}	I_{25}	I_{47}	I_{49}
$\frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy}$	$\frac{2\sqrt{3}}{23\pi} I_{moy}$	$\frac{2\sqrt{3}}{25\pi} I_{moy}$	$\frac{2\sqrt{3}}{47\pi} I_{moy}$	$\frac{2\sqrt{3}}{49\pi} I_{moy}$
$\frac{3}{\pi} \sqrt{2} I_s$	$\frac{3}{23\pi} \sqrt{2} I_s$	$\frac{3}{25\pi} \sqrt{2} I_s$	$\frac{3}{47\pi} \sqrt{2} I_s$	$\frac{3}{49\pi} \sqrt{2} I_s$
I_1	$\frac{1}{23} I_1$	$\frac{1}{25} I_1$	$\frac{1}{47} I_1$	$\frac{1}{49} I_1$

Tableau 3.6 Principaux harmoniques de courant à l'entrée du redresseur à 24 pulsations.

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

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{I_1^2 \left[1 + \frac{1}{23^2} + \frac{1}{25^2} + \frac{1}{47^2} + \frac{1}{49^2} + \dots \right]} = 1.002177 I_1 \quad (3.31)$$

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

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1} \right)^2 - 1} = 0.0660 \quad (3.32)$$

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

$$PF = \frac{P_{dc}}{S_{in}} = \frac{V_{moy} I_{moy}}{\sqrt{3} V_{rms} I_{rms}} \quad (3.34)$$

$$\text{Ou } V_{rms} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} V_{moy} \text{ et } I_{rms} = 1.002177 I_1 = 1.002177 \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy} \quad (3.35)$$

On déduit:

$$PF = \frac{1}{1.002177} = 0.99783 \quad (3.36)$$

3.6 Les configurations séries et parallèles des redresseurs polyphasés

L'avantage le plus important de la topologie parallèle est la diminution des pertes de charge (presque deux fois plus faible que dans la configuration série). Elle a un impact sur la dimension du redresseur, le nombre de diodes et l'espace nécessaire pour dissiper la chaleur produite par le redresseur [8].

Un convertisseur à 12 pulsations constitué de deux ponts à six pulsations connectés en parallèle est très sensible aux déséquilibres du rapport de rotation entre les enroulements Y et D du convertisseur.

Un convertisseur à 12 impulsions constitué de deux ponts à six impulsions connectés en série est beaucoup moins sensible à ce type de déséquilibre. Les enroulements secondaires du transformateur doivent être découplés pour réduire considérablement cet effet (facteur de couplage $< 0,2$) ou la bobine de transition de sortie, qui relie les sorties des ponts parallèles, doit être appliquée [22].

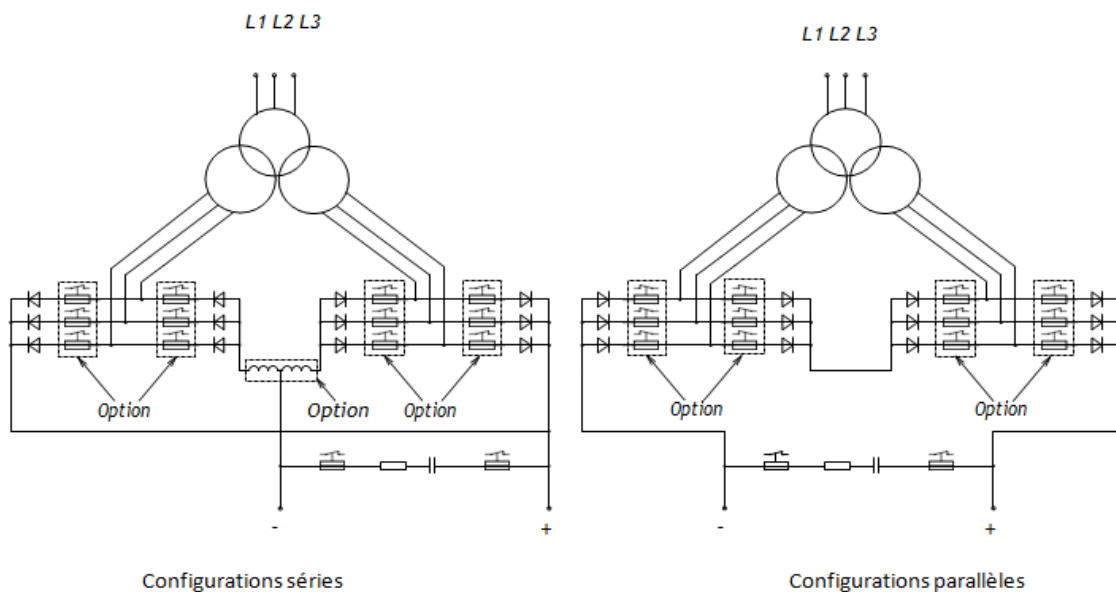


Figure 3.14 Les configurations séries et parallèles des redresseurs [22]

3.7 Résumé des caractéristiques des quatre montages redresseurs

Les principales caractéristiques des redresseurs polyphasés à diodes sont données dans le tableau 3.7.

Redresseur	6 pulsations	12 pulsations	18 pulsations	24 pulsations
Nombre de phases	3	6	9	12
Nombre de ponts	1	2	3	4
Déphasage entre les ponts		30°	20°	15°
Tension au primaire $v(t)$	$V_m \cos(\omega t)$	$V_m \cos(\omega t)$	$V_m \cos(\omega t)$	$V_m \cos(\omega t)$
Courant au primaire $i(t)$	$\frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy} \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \dots \right]$	$\frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy} \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \dots \right]$	$\frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy} \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{17} \cos(17\omega t) + \dots \right]$	$\frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{moy} \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{23} \cos(23\omega t) + \dots \right]$
Tension DC à la charge V_{moy}	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{rms}$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{rms}$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{rms}$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{rms}$
Fréquence des ondulations	6ω	12ω	18ω	24ω
Courant de charge I_{moy}	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi R} V_{rms}$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi R} V_{rms}$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi R} V_{rms}$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi R} V_{rms}$
Fp au primaire	0.955	0.989	0.996	0.998
THDi au primaire	0.311	0.152	0.088	0.066

Tableau 3.7 Caractéristiques des montages redresseurs à 6, 12, 18 et 24 pulsations

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudiés et présentés les principales caractéristiques des convertisseurs redresseurs polyphasés à 6 pulsations (3 phases), 12 pulsations (6 phases), 18 pulsations (9 phases) et à 24 pulsations (12 phases).

Chapitre 4

Simulation des redresseurs polyphasés

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter la simulation des quatre montages redresseurs polyphasés (3 phases, 6 phases, 9 phases et 12 phases) en utilisant le logiciel Matlab/Simulink. La simulation de ces montages permet d'obtenir leurs principales caractéristiques et la valeur des THDs qui seront comparées avec les résultats de l'étude théorique du chapitre 3.

4.2 Redresseur 3 phases (6 pulsations)

Schéma

La figure 4.1 montre le schéma block de simulation du redresseur 3 phases (6 pulsations) qui fournit une tension DC de 1500 V à une charge résistive d'une puissance de 6600 kW. La source AC possède les caractéristiques suivantes, (60 kV, 50 Hz, 60 MVA, $X/R = 10$).

Le transformateur d'entrée est du type étoile-étoile (Y-Y) connectés à pont redresseur 6 pulsations qui sont reliés en parallèle à la charge continue DC.

Le rapport de transformateur Y-Y est ajusté à 0.0197 pour fournir à la sortie la tension continue de 1500 V à pleine charge.

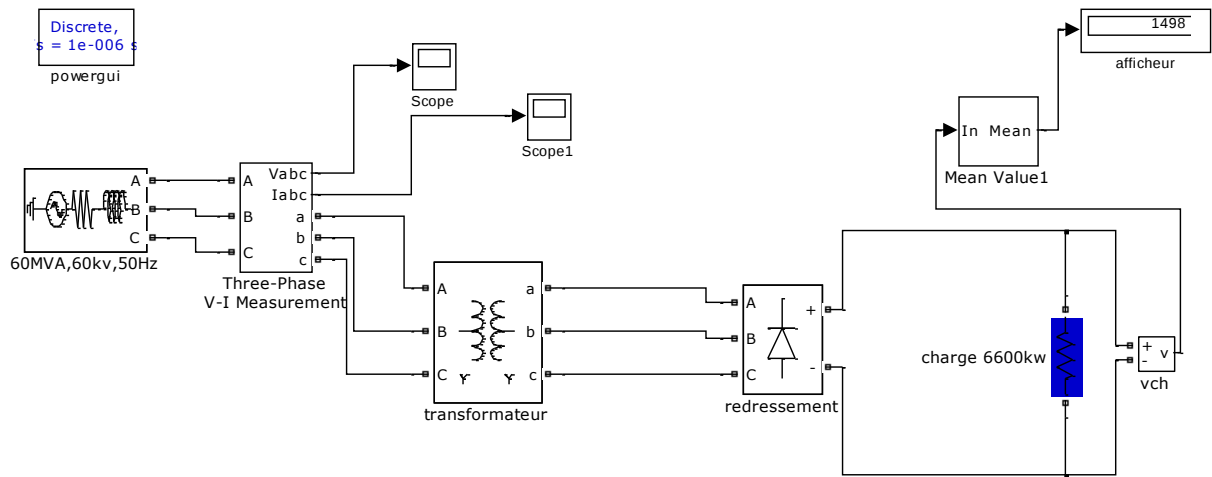
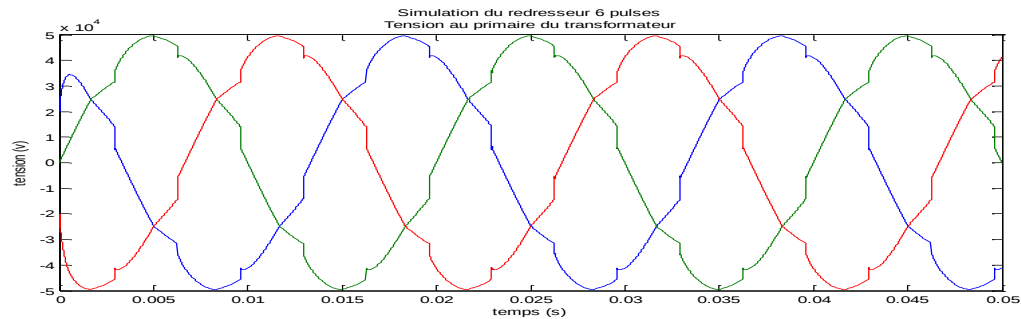


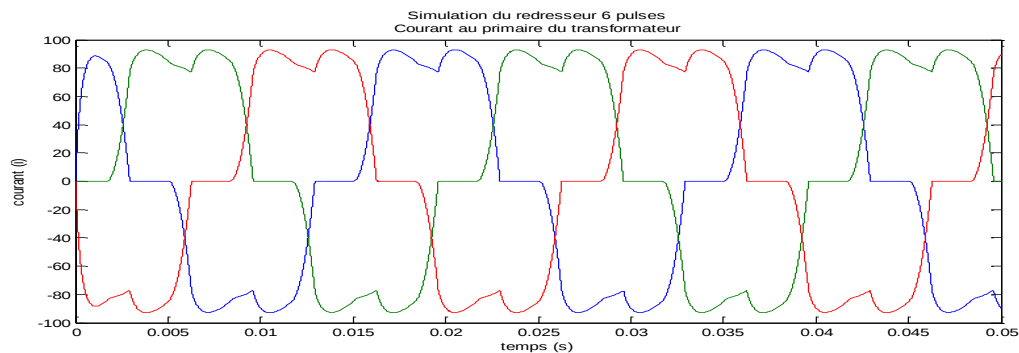
Figure 4.1 Schéma block du redresseur 6 pulsations

4.2.1 Formes d'ondes à l'entrée du redresseur

Les formes d'ondes des tensions de ligne $v_a(t)$, $v_b(t)$ et $v_c(t)$ et des courants de ligne $i_a(t)$, $i_b(t)$ et $i_c(t)$ au primaire du transformateur pour une charge de 6600 kW sont données dans la figure 4.2.



(a)



(b)

Figure 4.2 Formes d'ondes des tensions et des courants à l'entrée du redresseur 6 pulsations. (a) Tension de ligne (b) Courant de ligne

4.2.2 Formes d'ondes à la sortie du redresseur

Les formes d'ondes de la tension v_{ch} et du courant I_{ch} sont montrées à la figure 4.3.

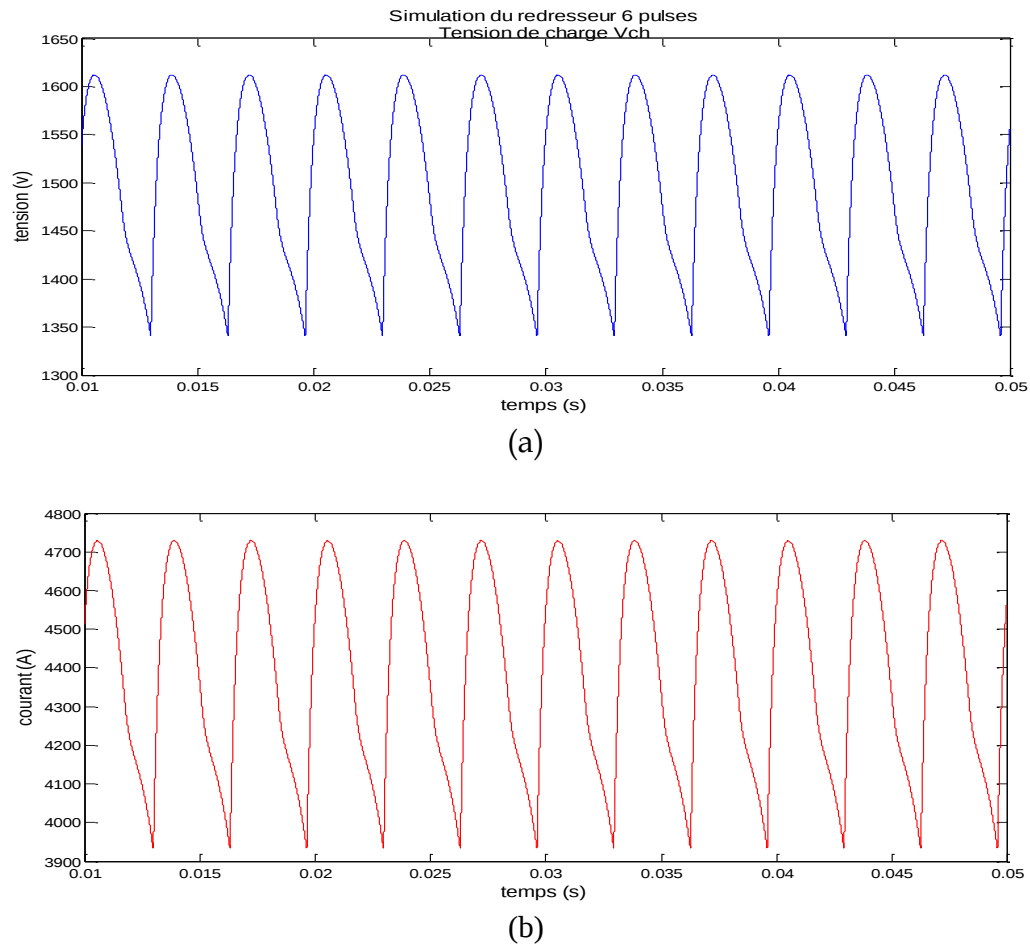


Figure 4.3 Formes d'ondes de la tension et du courant à la sortie du redresseur 6 pulsations. (a) Tension à la charge (b) Courant de charge

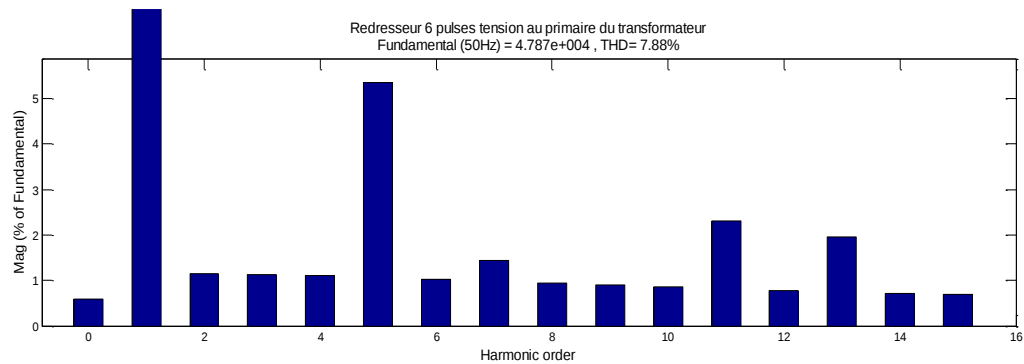
4.2.3 Harmoniques de tension et de courant à l'entrée du redresseur

Les harmoniques des tensions et des courants à l'entrée du redresseur obtenues avec l'analyse en FFT, sont présentées au tableau 4.1.

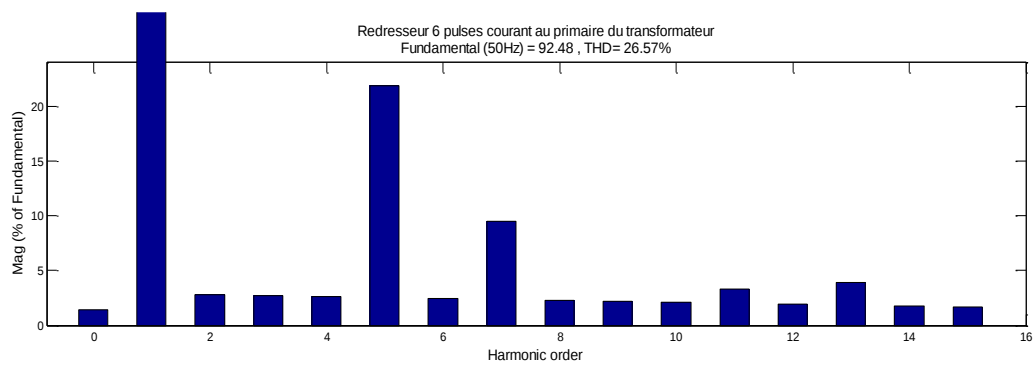
Redresseur 3 phases (6 pulsations)						
Ordre	h_1	H_5 (% I_1)	H_7 (% I_1)	H_{11} (% I_1)	H_{13} (% I_1)	THD (%)
Harmoniques de tension	33850 V	5.35	1.43	2.30	1.97	7.88
Harmoniques de courant	65.39 A	21.94	9.48	3.30	3.91	26.57

Tableau 4.1 Résultats d'analyse en FFT

La figure 4.4 montre les spectres de tension et de courant à l'entrée du redresseur 6 pulsations. On reconnaît les harmoniques d'ordre $6k \pm 1$ comme prévu par la théorie.



(a)



(b)

Figure 4.4 Spectres des tensions et courants au primaire du transformateur.

(a) Spectre de tension (b) Spectre de courant

4.3 Redresseur 6 phases (12 pulsations)

Schéma

Le schéma block de simulation du redresseur 6 phases (12 pulsations) est donné à la figure 4.5.

Le transformateur d'entrée est du type YYD 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.

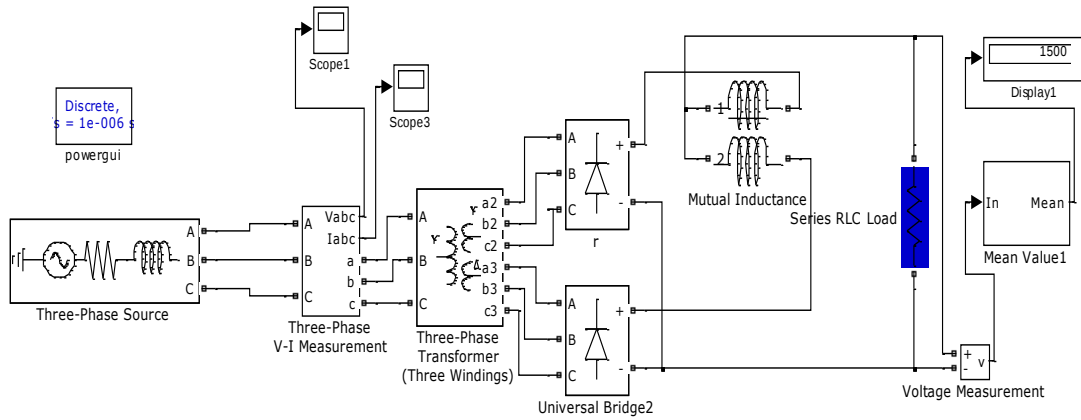


Figure 4.5 Schéma block du redresseur à 12 pulsations

La figure 4.6 montre les inductances d'interphase couplées pour le redresseur 12 pulsations.

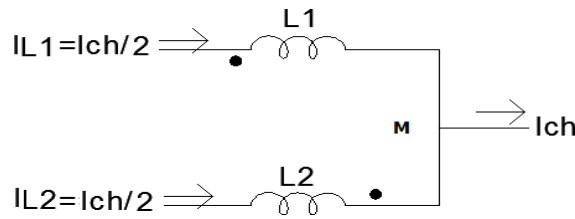


Figure 4.6 Inductance interphase couplée du schéma 12 pulsations

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 (%Ich = 440 A). On suppose que les amplitudes des ondulations de courants ΔI_{L1} et ΔI_{L2} sont égales.

Dans l'équation A1.9 (Annexe 1), avec $V_{\text{moy}} = 270 \text{ V}$ on peut calculer :

$$V_{L\text{crête}} = 0.115 \times 1500 \text{ V} = 172.5 \text{ V}.$$

$$I_{L1 \text{ crete}} = \frac{V_{L\text{crete}}}{2\pi(6 \times 50)(4L_1)} \quad (4.1)$$

L'ondulation de la tension à 6x400 Hz dans l'inductance d'interphase est $\Delta V_L = 345 \text{ V}$. On calcule l'inductance d'interphase L_1 avec l'équation 3.16 (chapitre 3):

$$\Delta I_{L1} = \Delta I_{L2} = \frac{\%I_{ch}}{2} = \frac{\Delta V_L}{2\pi(6 \times 50)(4L_1)} \quad (4.2)$$

$$\frac{440}{2} = \frac{345}{2\pi(6 \times 50)(4L_1)} \quad (4.3)$$

Donc, l'inductance d'interphase $L1$ du pont 1 est : $L1 \approx 0.0002$ H. Dans le schéma du redresseur, ces inductances sont: $L1 = L2 = 0.0002$ H et l'inductance mutuelle M est presque de même valeur.

4.3.1 Formes d'ondes à l'entrée du redresseur

La figure 4.7 présente les formes d'ondes des tensions de ligne $v_a(t)$, $v_b(t)$ et $v_c(t)$ et des courants de ligne $i_a(t)$, $i_b(t)$ et $i_c(t)$ au primaire du transformateur.

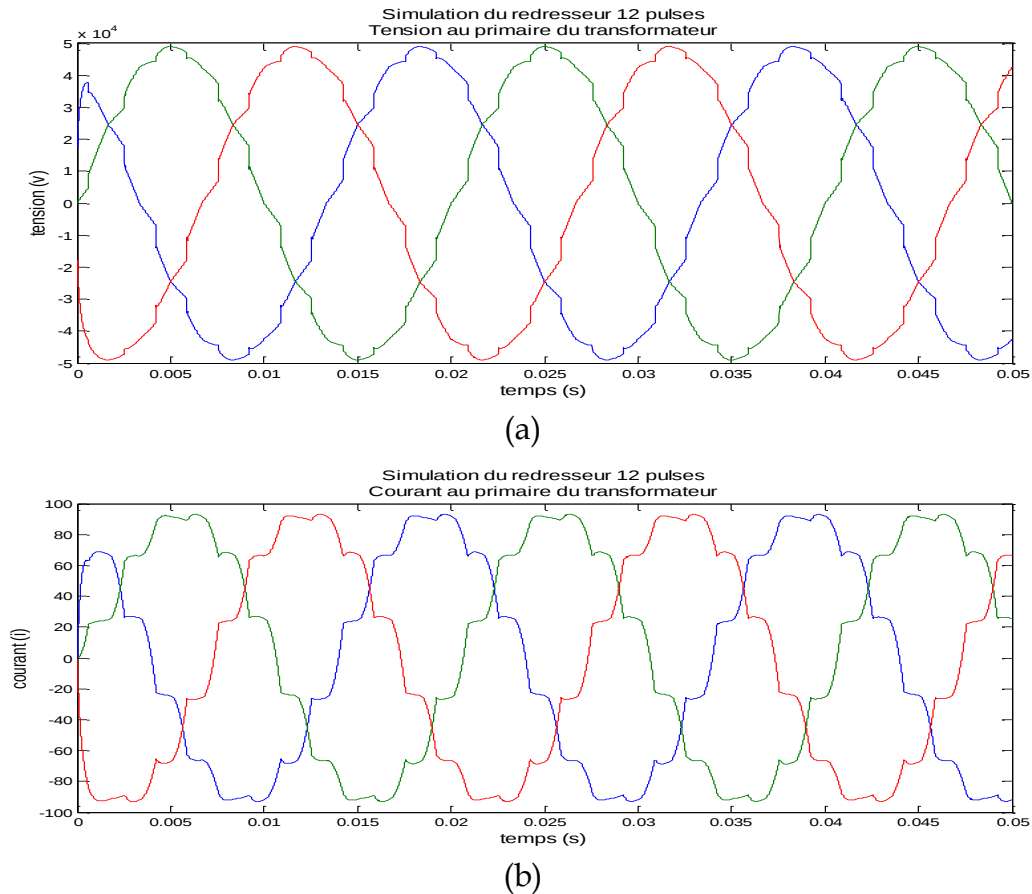
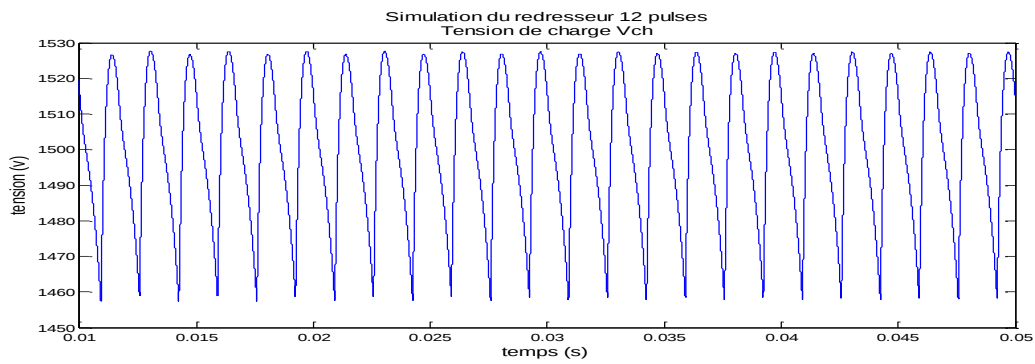


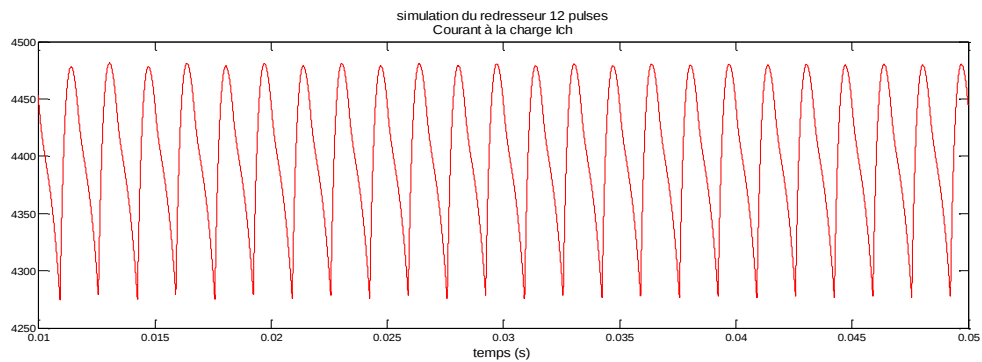
Figure 4.7 Formes d'ondes des tensions et des courants à l'entrée du redresseur 12 pulsations. (a) Tensions de ligne (b) Courants de ligne

4.3.2 Formes d'ondes à la sortie du redresseur

Les formes d'ondes à la sortie du redresseur sont montrées à la figure 4.8.



(a)



(b)

Figure 4.8 Formes d’ondes de la tension et du courant à la sortie du redresseur 12 pulsations. (a) Tension de charge (b) Courant de charge.

D’après la figure, on constate que la fréquence des ondulations de la tension de sortie est égale à 600 Hz (12 fois la fréquence de la source).

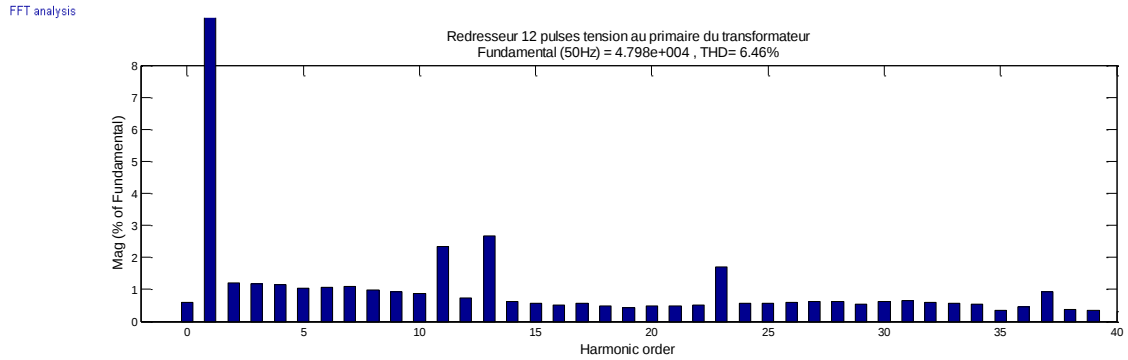
4.3.3 Harmoniques de tension et de courant à l’entrée

Les résultats d’analyse en FFT des tensions et des courants à l’entrée du redresseur sont présentés au tableau 4.2.

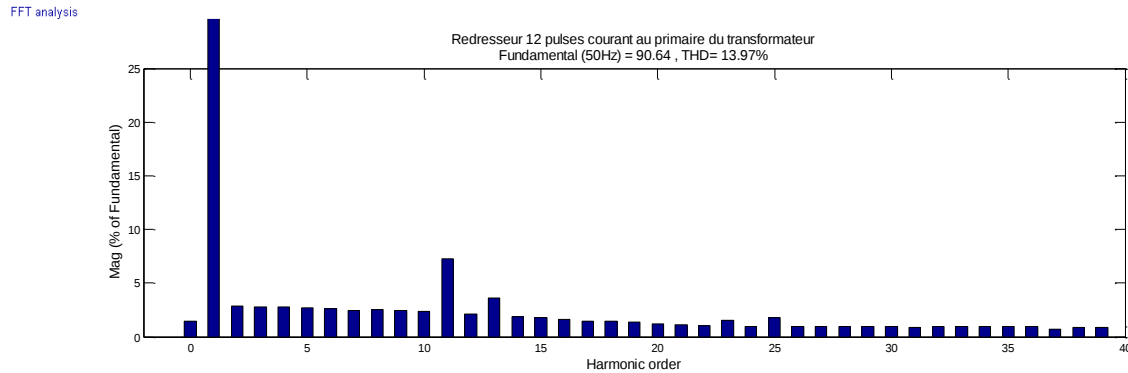
Redresseur 6 phases (12pulsations)								
Ordre	h_1	h_{11} (%I ₁)	h_{13} (%I ₁)	h_{23} (%I ₁)	h_{25} (%I ₁)	h_{35} (%I ₁)	h_{37} (%I ₁)	THD (%)
Harmoniques de tension	33930 V	2.35	2.68	1.69	0.58	0.35	0.93	6.46
Harmoniques de courant	64.09 A	7.27	3.57	1.55	1.78	1.00	0.68	13.97

Tableau 4.2 Résultats d’analyse en FFT

La figure 4.9 présente 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.



(a)



(b)

Figure 4.9 Spectres des tensions et courants au primaire du transformateur.
(a) Spectre de tension (b) Spectre de courant

4.4 Redresseur 9 phases (18 pulsations)

Schéma

Le schéma block de simulation du redresseur 9 phases (18 pulsations) est donné à l'annexe 2 (figure A2.1).

Le transformateur d'entrée est composé de trois transformateurs du type Zigzag-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.

Les rapports des transformateurs Zigzag-Y sont ajustés à 0.0197 pour fournir à la sortie la tension continue de 1500 V à pleine charge.

Dans le schéma les inductances d'interphase sont : $L1 = L2 = L3 = 0.00041\text{H}$ et l'inductance mutuelle est presque de même valeur.

4.4.1 Formes d'ondes de tension et de courant à l'entrée du redresseur

La figure 4.10 montre les formes d'ondes des tensions de ligne $v_a(t)$, $v_b(t)$ et $v_c(t)$ et des courants de ligne $i_a(t)$, $i_b(t)$ et $i_c(t)$ à l'entrée du transformateur.

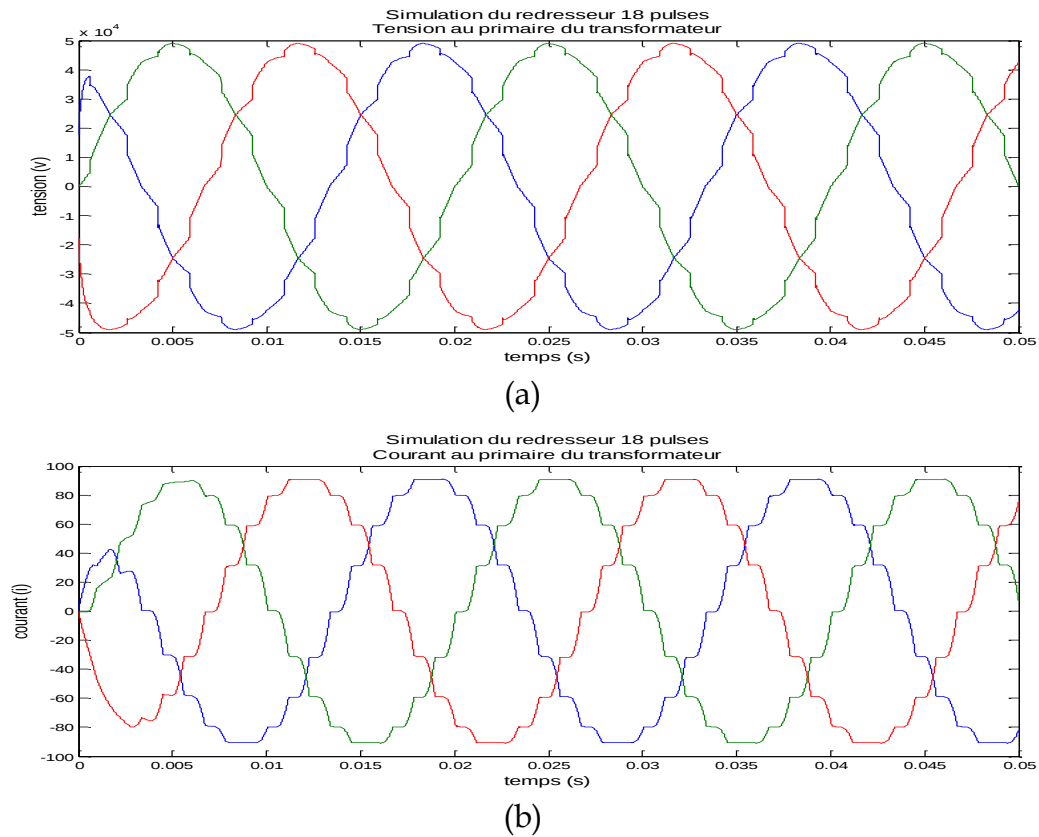
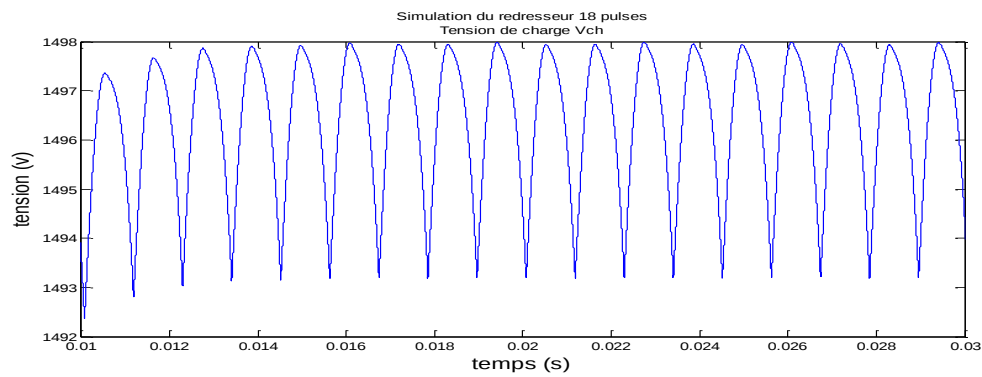


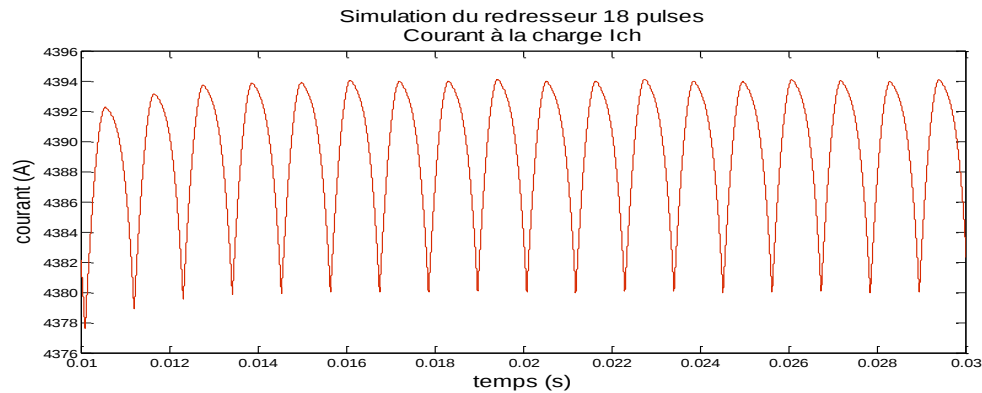
Figure 4.10 Formes d'ondes des tensions et des courants à l'entrée du redresseur 18 pulsations. (a) Tensions de ligne (b) Courants de ligne

4.4.2 Formes d'ondes de tension à la sortie du redresseur

Les formes d'ondes de tension à la sortie sont montrées à la figure 4.11.



(a)



(b)

Figure 4.11 Formes d'ondes de la tension et du courant à la sortie du redresseur 18 pulsations. (a) Tension de charge (b) Courant de charge.

La fréquence des ondulations de la tension continue est égale à 900 Hz (18 fois la fréquence de la source).

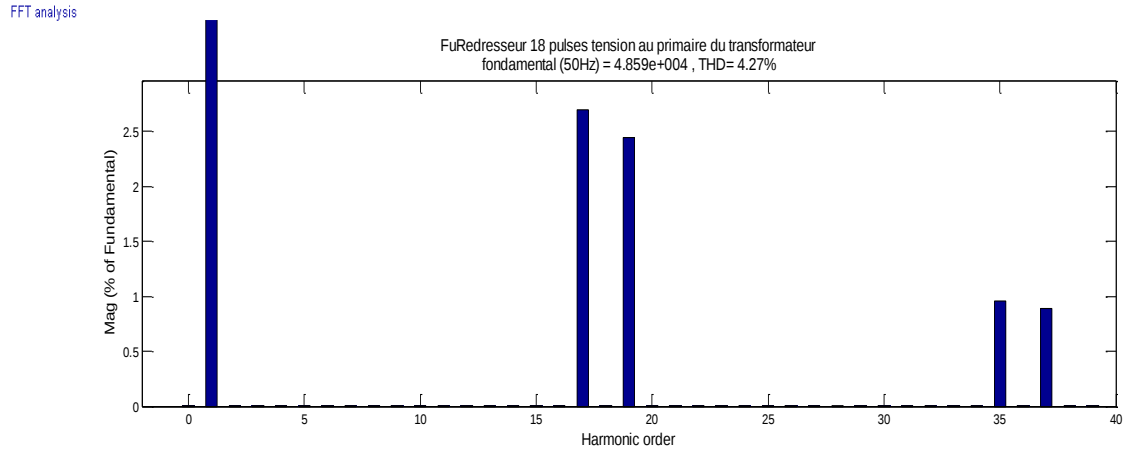
4.4.3 Harmoniques de tension et de courant à l'entrée

Les harmoniques des tensions et des courants à l'entrée du redresseur (au primaire du transformateur) obtenus avec la FFT, sont montrés au tableau 4.3.

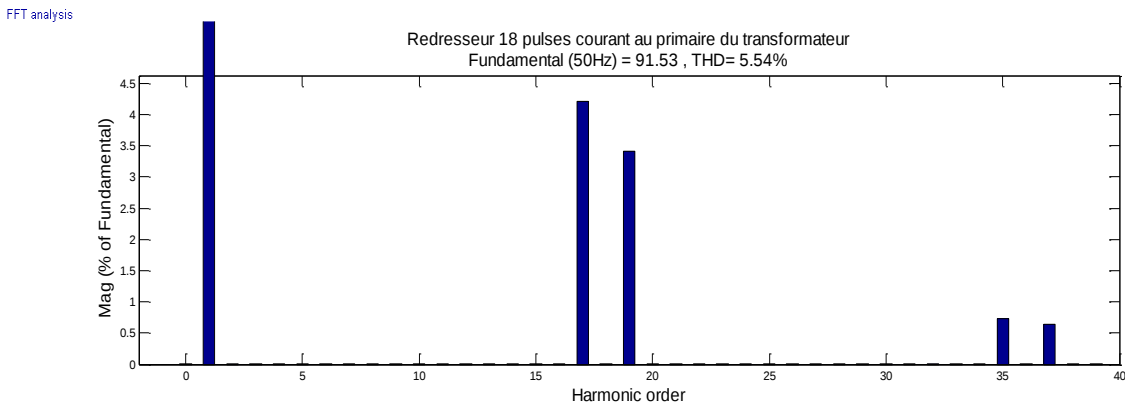
Redresseur 9 phases (18 pulsations)						
Ordre	h_1	h_{17} (%I1)	h_{19} (%I1)	h_{35} (%I1)	h_{37} (%I1)	THD (%)
Harmoniques de tension	34360 V	2.69	2.44	0.96	0.89	4.27
Harmoniques de courant	64.72 A	4.20	3.41	0.73	0.64	5.54

Tableau 4.3 Résultats d'analyse en FFT

La figure 4.12 présente 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.



(a)



(b)

Figure 4.12 Spectres des tensions et courants au primaire du transformateur.

(a) Spectre de tension (b) Spectre de courant

4.5 Redresseur 12 phases (24 pulsations)

Schéma

Le schéma block de simulation du redresseur 12 phases (24 pulsations) est donné à l'annexe 2 (figure 2.2).

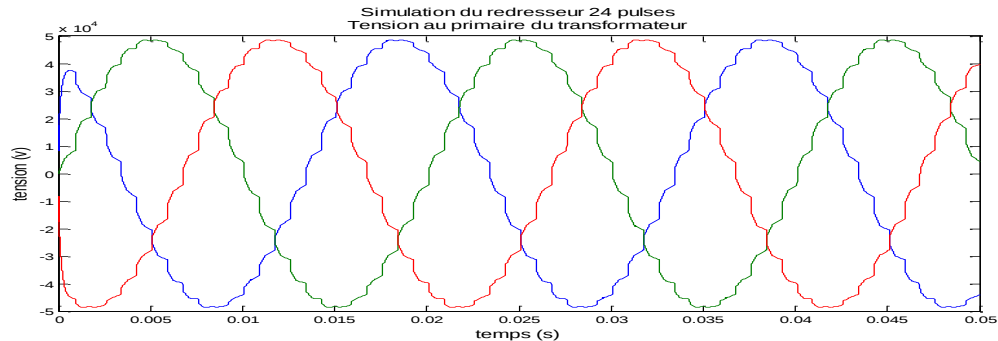
Le transformateur d'entrée est composé de quatre transformateurs du type Zig-Zag-Y avec les primaires connectés en série. Les secondaires avec les déphasages respectifs de 15° , 30° , 45° et 60° sont connectés à quatre ponts redresseurs 6 pulsations qui sont reliés en parallèle à la charge DC. Quatre inductances d'interphase couplées sont utilisées pour limiter le courant de circulation entre les ponts redresseurs.

Les rapports des transformateurs Zig-Zag-Y sont ajustés à 0.0197 pour fournir à la sortie la tension continue de 270 V à pleine charge.

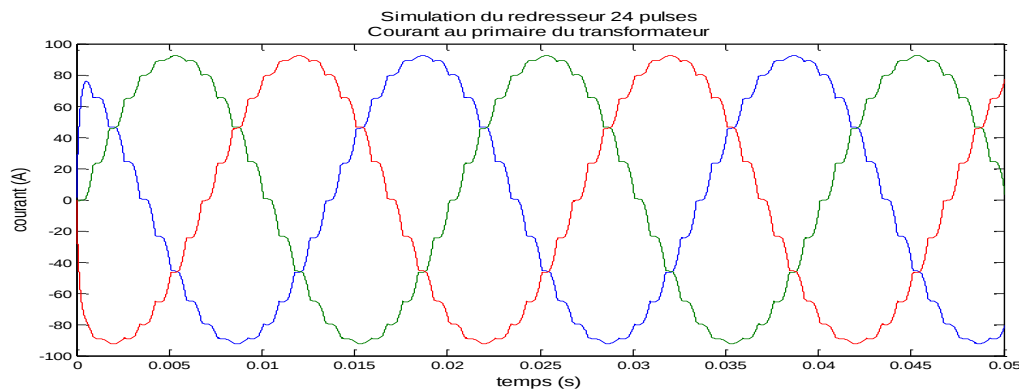
Dans le schéma les inductances d'interphase sont: $L1 = L2 = L3 = L4 = 1.3 \mu\text{H}$ et l'inductance mutuelle est presque de même valeur.

4.5.1 Formes d'ondes de tension et de courant à l'entrée du redresseur

La figure 4.13 montre les formes d'ondes des tensions de ligne $v_a(t)$, $v_b(t)$ et $v_c(t)$ et des courants de ligne $i_a(t)$, $i_b(t)$ et $i_c(t)$ à l'entrée du transformateur.



(a)



(b)

Figure 4.13 Formes d'ondes des tensions et des courants à l'entrée du redresseur 24 pulsations. (a) Tensions de ligne (b) Courants de ligne.

4.5.2 Formes d'ondes de tension et de courant à la sortie du redresseur

Les formes d'ondes de tension et de courant à la sortie sont montrées à la figure 4.14.

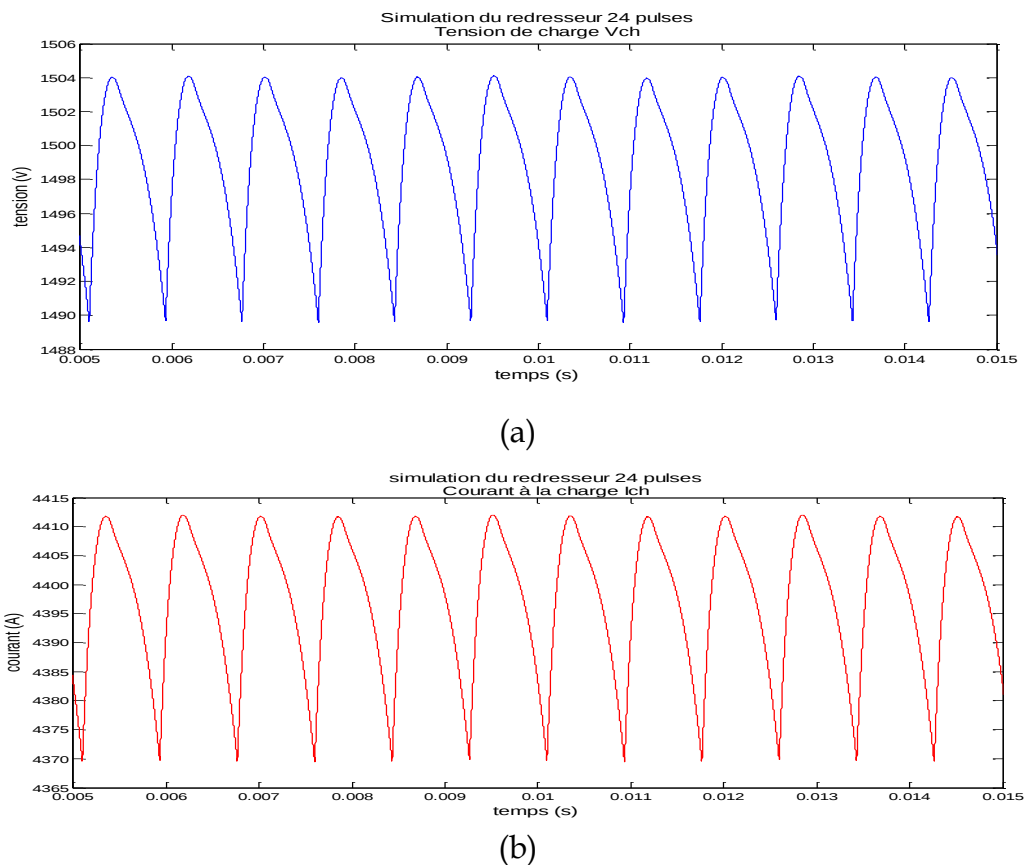


Figure 4.14 Formes d'ondes de la tension et du courant à la sortie du redresseur 24 pulsations. (a) Tension de charge (b) Courant de charge.

La fréquence des ondulations de la tension continue est égale à 1200 Hz (24 fois la fréquence de la source).

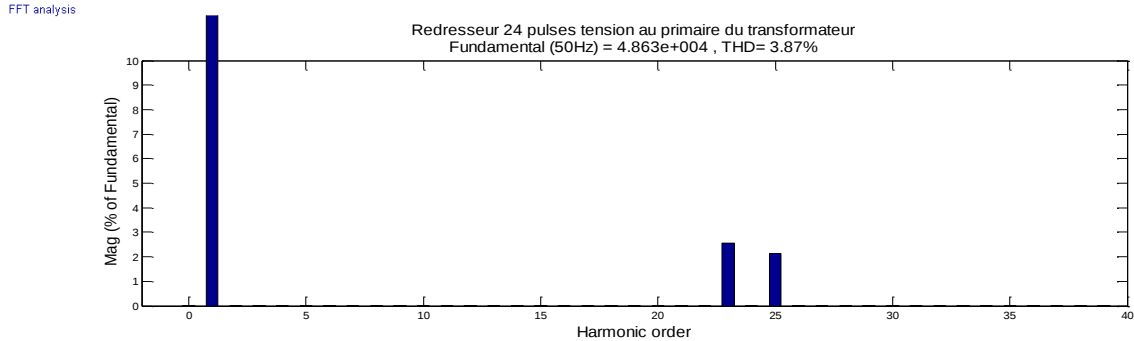
4.5.3 Harmoniques de tension et de courant à l'entrée

Les harmoniques des tensions et des courants à l'entrée du redresseur 24 pulsations obtenues avec la fonction FFT sont présentés au tableau 4.4.

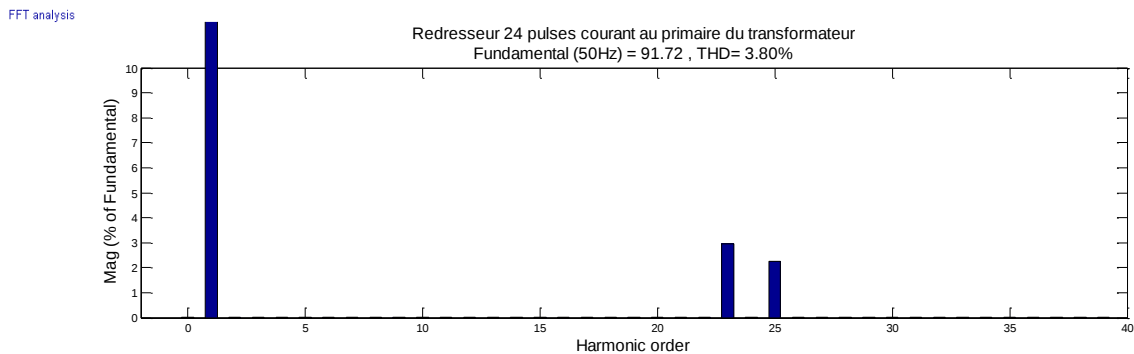
Ordre	h_1	h_{23} (%I ₁)	h_{25} (%I ₁)	THD (%)
Harmoniques de tension	34390 V	2.57	2.14	3.87
Harmoniques de courant	64.85 A	2.96	2.27	3.80

Tableau 4.4 Résultats d'analyse en FFT

La figure 4.15 présente 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.



(a)



(b)

Figure 4.15 Spectres des tensions et courants au primaire du transformateur.

(a) Spectre de tension (b) Spectre de courant

4.6 Discussion des résultats de simulation

- On remarque que le redresseur triphasé génère des courants carrés non sinusoïdaux à l'entrée du redresseur (coté réseau électrique, figure 4.2 (b)) et une tension avec des ondulations importantes à la sortie du redresseur (coté charge, figure 4.3 (a)).
- Les spectres de la figure 4.4 montrent les harmoniques (h_5 , h_7 , h_{11} , h_{13} , ...) comme prévu par la formule $6k \pm 1$.
- Les spectres de la figure 4.9 montrent les harmoniques (h_{11} , h_{13} , h_{23} , h_{25} ,

h35, h37, ...) comme prévu par la formule $12k \pm 1$, On peut remarquer aussi que les harmoniques h5 et h7 sont éliminés par le couplage $Y\Delta$ du transformateur.

- Les spectres de la figure 4.12 montrent les harmoniques (h17, h19, h35, h37, ...) comme prévu par la formule $18k \pm 1$. On peut remarquer aussi que les harmoniques (h11 et h13) sont éliminés.
- Les spectres de la figure 4.15 montrent les harmoniques (h23, h25, ...) comme prévu par la formule $12k \pm 1$.
- Le montage à 24 pulsations présente une meilleure performance par rapport aux montages à 6 pulsations, 12 pulsations et à 18 pulsations.
- On remarque qu'à chaque fois, le nombre de phase augmente, les tensions et les courants de source sont presque sinusoïdaux et la qualité de la tension au côté de la charge est améliorée.

4.7 Comparaison des THDs de tension et de courant à l'entrée (6, 12, 18, 24 pulsations)

Les THDs des montages redresseurs à 6, 12, 18 et 24 pulsations, obtenues par simulation, sont résumées dans le tableau 4.5

Nombres de pulsations	THD% Courants	THD% Tension
6 pulsations	26,57	7,88
12 pulsations	13,97	6,46
18 pulsations	5,54	4,27
24 pulsations	3,80	3,87

Tableau 4.5 Comparaison des THDs de tension et de courant (6, 12, 18, 24 pulsations)

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 ce qui permet d'améliorer la qualité d'énergie électrique au niveau réseau électrique.

4.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des résultats de simulation des différents montages des redresseurs polyphasés à 3 phases (6 pulsations), 6 phases (12 pulsations), à 9 phases (18 pulsations) et à 12 phases (24 pulsations).

Nous avons comparé et analysé l'effet de l'augmentation de nombre de phases de l'alimentation du redresseur sur la forme des ondes de tension et de courant au niveau réseau et niveau charge. Cette comparaison a montré l'efficacité de l'utilisation des redresseurs polyphasés dans la réduction des courants harmoniques de la source et l'amélioration de la qualité de la tension d'alimentation des trains électriques au niveau de la sous station.

Conclusion générale

Le travail de ce mémoire présente l'intérêt de l'utilisation de structures redresseurs polyphasées pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique au niveau des systèmes de traction électrique à courant continu.

Au premier chapitre, nous avons donné une description générale des différents systèmes d'alimentation d'un train électrique. Nous avons donné aussi les principaux équipements constituant une sous-station électrique et ses différents convertisseurs statiques utilisés pour la conversion de l'énergie électrique, notamment les redresseurs de traction.

Au deuxième chapitre, premièrement, nous avons présenté quelques généralités sur les harmoniques. Ensuite, nous avons donné quelques caractérisations des harmoniques, leurs sources et leurs effets. Enfin, nous avons parlé de problèmes des harmoniques dans les trains électriques et leurs solutions.

Au troisième chapitre, nous avons procédé à introduire le principe de fonctionnement des redresseurs polyphasés.

Au quatrième chapitre, premièrement, nous avons simulé les différentes structures des redresseurs polyphasés à 3 phases (6 pulsations), à 6 phases (12 pulsations), à 9 phases (18 pulsations) et à 12 phases (24 pulsations). Ensuite, nous avons discuté les résultats de simulation.

A l'issue de ce travail, nous pouvons conclure ce qui suit :

- L'utilisation des redresseurs polyphasés permet une réduction importante des harmoniques dans le réseau électrique et une tension moine ondulée à la sortie du redresseur et par suite une meilleure qualité de l'énergie électrique au niveau sous-station.
- La structure à 24 pulsations donne une meilleure qualité d'énergie électrique (coté AC et coté DC) par rapport aux autres structures à 6, 12 et 18 pulsations.

Enfin, on peut affirmer que le redressement polyphasé est une solution très efficace pour améliorer la qualité d'énergie dans les systèmes de traction à courant continu. En effet, il permet de réduire le volume et le coût global du filtre passif.

Annexe 01

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.

La figure A1.1 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.

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 : $i_{L1} = -i_{L2}$.

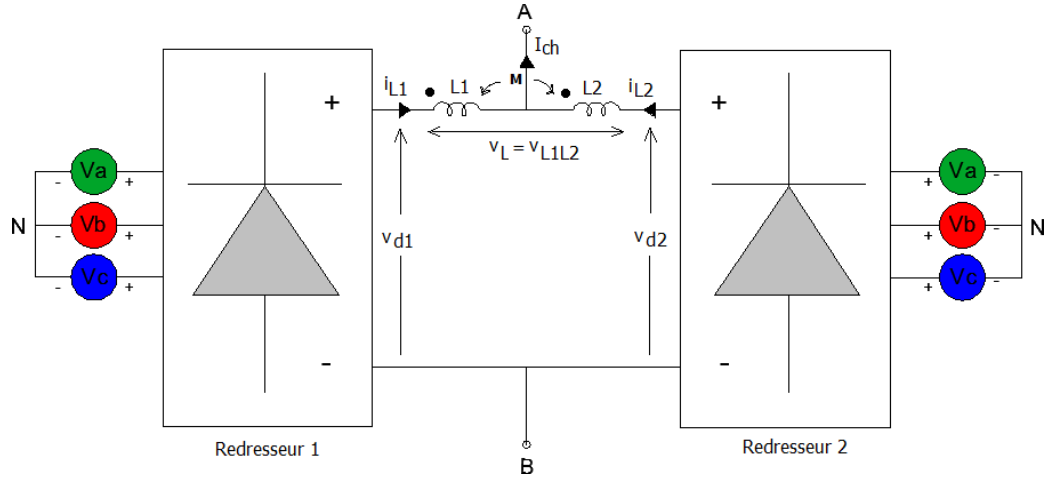


Figure A1.1 Mise en parallèle de deux ponts triphasés double alternance [7]

On peut écrire:

$$V_{d1} - V_{d2} = L_1 \frac{d(i_{L1} - i_{L2})}{dt} + M \frac{d(i_{L1} - i_{L2})}{dt} \quad (\text{A1.1})$$

$L1 = L2$ 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.

$$V_L = 2L_1 \frac{d(i_{L1} - i_{L2})}{dt} = 4L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = L \frac{di_{L1}}{dt} \quad (\text{A1.2})$$

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: $V_{rms} = V_{rms1} = V_{rms2}$.

Les tensions V_{d1} et V_{d2} peuvent être exprimées en séries de Fourier en fonction de leurs tensions ligne-ligne efficaces:

$$V_{d1} = \sqrt{2}V_{rms1} \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \left(1 - \sum_{n=6,12,18...}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{6} \cos n \left(wt - \frac{\pi}{12} \right) \right) \quad (A1.3)$$

$$V_{d2} = \sqrt{2}V_{rms2} \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \left(1 - \sum_{n=6,12,18...}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{6} \cos n \left(wt - \frac{\pi}{12} \right) \right) \quad (A1.4)$$

$$\cos\left(nwt - \frac{n\pi}{12}\right) = \cos(nwt) \cos\left(\frac{n\pi}{12}\right) + \sin(nwt) \sin\left(\frac{n\pi}{12}\right) \quad (A1.5)$$

$$\cos\left(nwt + \frac{n\pi}{12}\right) = \cos(nwt) \cos\left(\frac{n\pi}{12}\right) - \sin(nwt) \sin\left(\frac{n\pi}{12}\right) \quad (A1.6)$$

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

$$V_L = V_{d1} - V_{d2} = \sqrt{2}V_{rms} \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \left(\sum_{n=6,12,18...}^{\infty} \frac{4}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{6} \sin \frac{n\pi}{12} \sin nwt \right) \quad (A1.7)$$

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

$$V_L = V_{d1} - V_{d2} = \frac{12}{35\pi} \sqrt{2}V_{rms} \sin(6wt) \quad (A1.8)$$

L'amplitude de la tension d'interphase est donc: $V_{Lcrête} = \frac{12}{35\pi} \sqrt{2}V_{rms}$. On peut exprimer cette valeur en fonction de la tension moyenne de charge ($V_{moy} = 1.35V_{rms}$):

$$V_{Lcrête} = 0.115V_{moy} \quad (A1.9)$$

La figure A.2 montre les formes d'ondes de la tension de l'inductance d'interphase et la tension de charge [7].

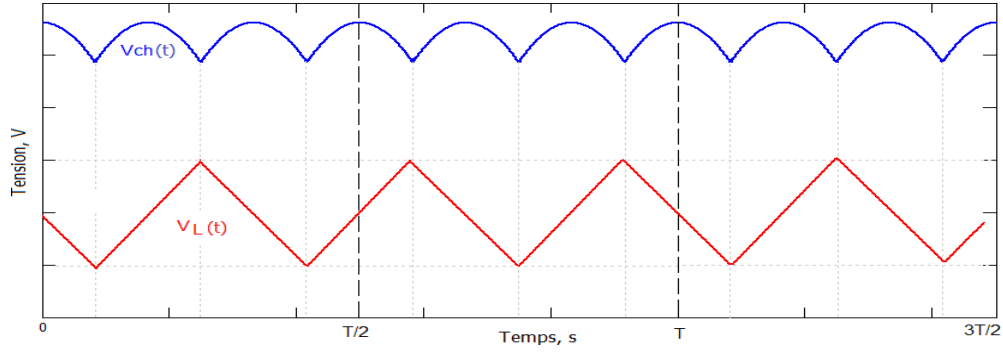


Figure A1.2 Formes d'ondes de la tension de l'inductance d'interphase $V_L(t)$ et la tension de charge $V_{ch}(t)$. [7]

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:

$$I_{L1crête} = \frac{V_{Lcrête}}{2\pi(6f)(4L_1)} \quad (\text{A1.10})$$

$$\Delta I_{L1} = \frac{\Delta V_L}{2\pi(6f)(4L_1)} \quad (\text{A1.11})$$

L_1 est l'inductance d'interphase du pont 1, f est la fréquence de la source, $V_{Lcrête}$ est l'amplitude de la tension aux bornes de l'inductance d'interphase, $I_{L1crête}$ est l'amplitude du courant dans l'inductance d'interphase 1, ΔV_L est l'ondulation de tension aux bornes de l'inductance d'interphase et ΔI_{L1} est l'ondulation du courant dans l'inductance d'interphase 1.

Annexe 02

Les schémas block de simulation de montages redresseurs 18 pulsations et 24 pulsations sont donnés dans les figures suivantes.

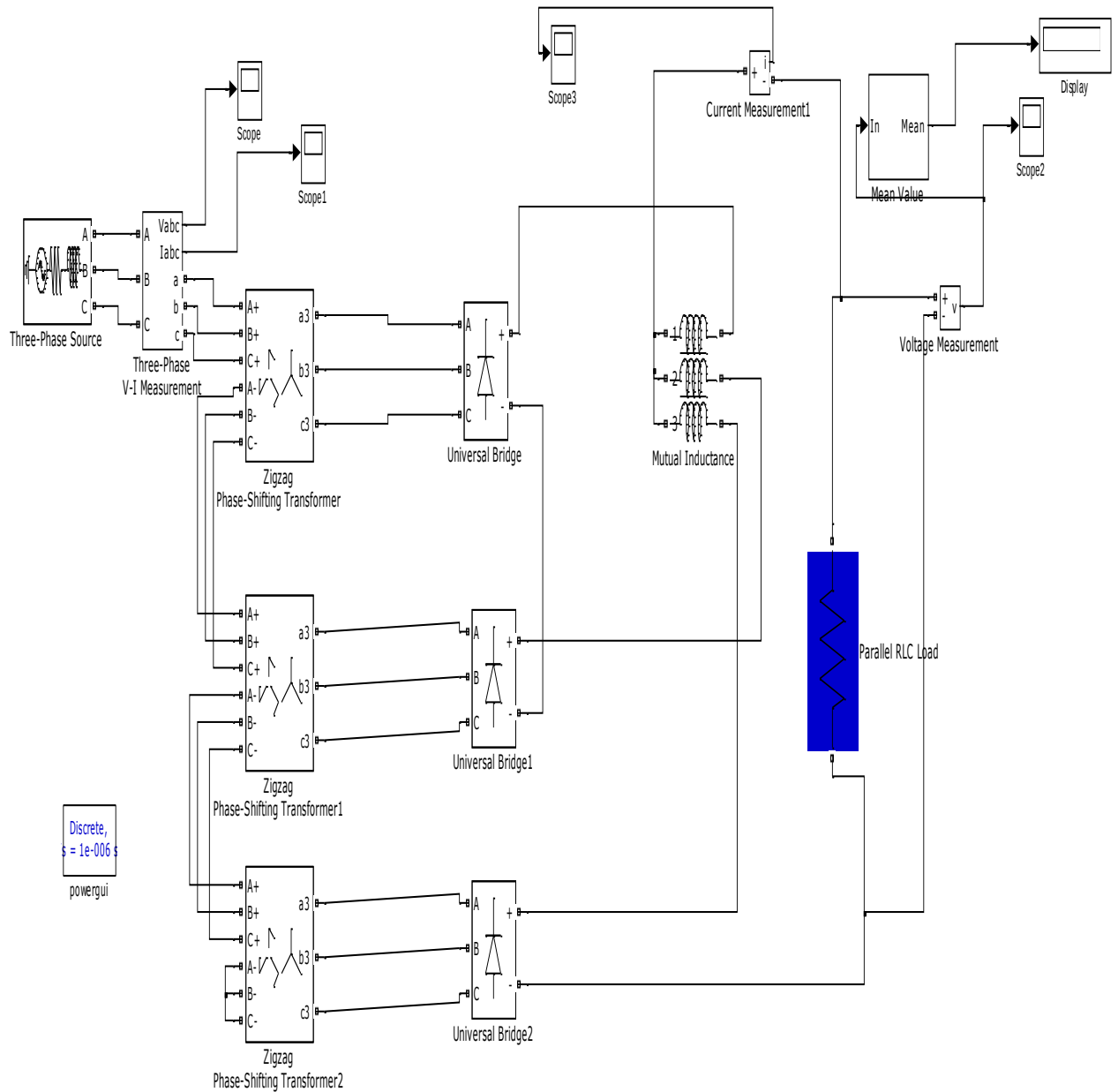


Figure A2.1 Simulation redresseur polyphasé 18 pulsations

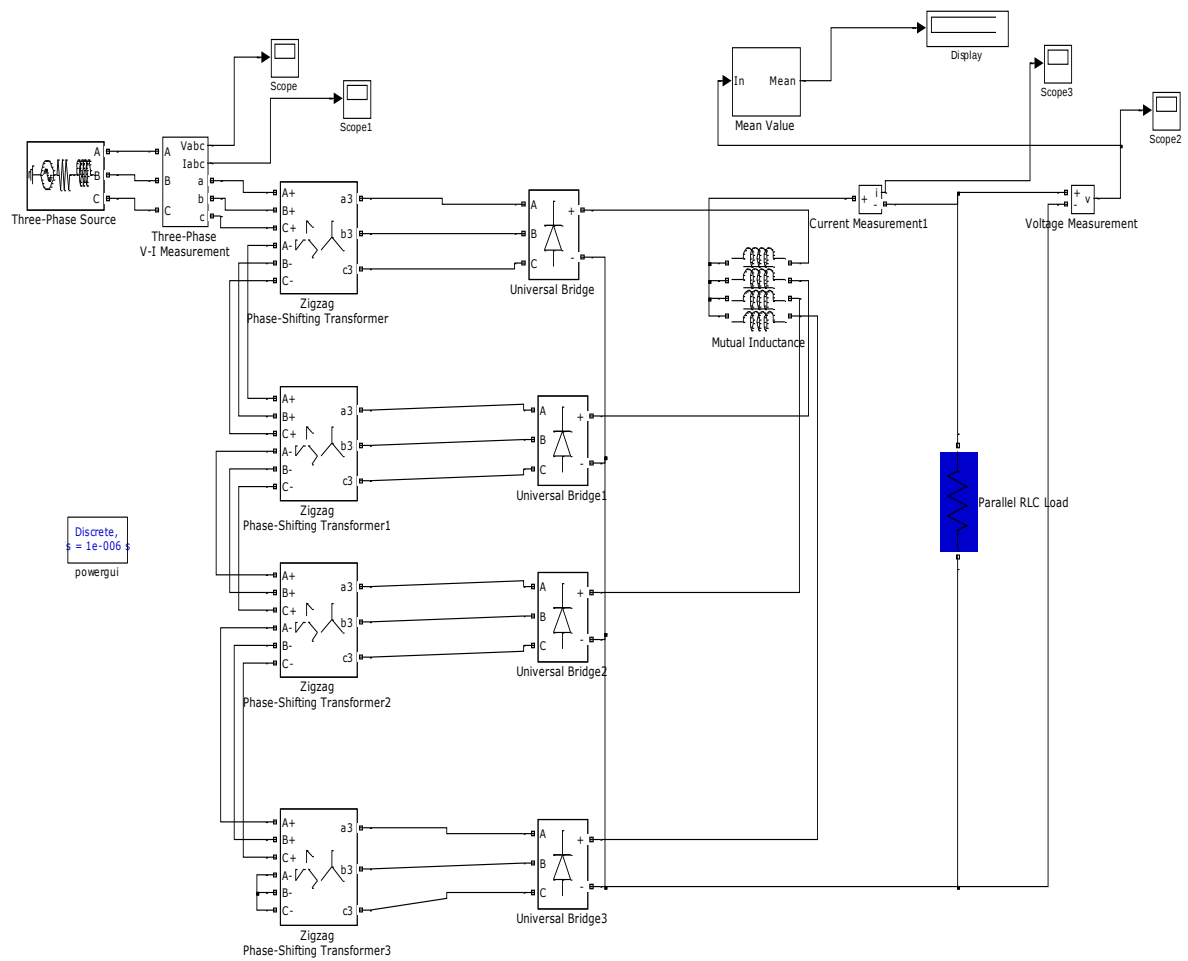


Figure A2.2 Simulation redresseur polyphasé 24 pulsations

Bibliographie

- [1] Jean Marc Allen Bach « Technique Ferroviaire », Fiche technique édition 2013.
- [2] « grand projet ferroviaire », Fiche technique, Novembre 2010.
- [3] Bernard Bransol, «Une sous station 1500V», Fiche technique, 2009.
- [4] « Electric Tractions Systemes and their advantages », [www.electronicshub.org-electric traction-system/](http://www.electronicshub.org-electric-traction-system/), 25-01-2019.
- [5] «Electric Power in Japan », RailWay,1998.
- [6] Technologie Ferroviaire, « Traction Electric », Livre SNCF 3em édition 1971.
- [7] Alvaro Ortiz Monroy, « Etude de montage redresseur polyphasés pour le réseau d'alimentation électrique des avions », Thèse de doctorat, Université Canada, 2013.
- [8] Mihaela Popescu and Alexandru Bitoleanu « A Review of The Energy Efficiency improvement in DC Railway », Mémoire Master University of Craiova, Romania 21 march 2019.
- [9] Réal-Paul Bouchard, Guy Oliver, Électrotechnique, Presses Internationales Polytechnique, 2e Edition, 2010.
- [10] Francoi Bailly, « Harmonique dans les réseaux électriques », Thèse de doctorat, FESUPPA, 13 Avril 2014.
- [11] ABB. ENVILINE TCR Traction Controlled Rectifiers for DC Rail Transportation. Available online:
<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=4116PL839-W2-en.&LanguageCode> (accessed on 9 February 2019).
- [12] Azouz Ahmed Lamine, «Amélioration de la qualité d'énergie électrique d'un système DOC », Thèse de doctorat, Université de Bejaia, 2018.
- [13] Lahmer Amel, « Filtrage et qualité d'énergie », Thèse de doctorat, Université de Annaba, 2017.
- [14] Nissrine Abdallah ,« Etude de développement d'un concept de locomotive Hybride à chaîne de traction électrique autonome propre et durable », Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009.
- [15] « ABB Rectifier », Fiche technique, 2019.

- [16] S. Fukuda, M. Ohta, « An Auxiliary-Supply-Assisted Harmonic Reduction Scheme for 12-Pulse Diode Rectifiers », ICEM'11 IEEE Conference on Electrical Machines, 2010.
- [17] A. Sikora, B. Kulesz, « Effectiveness of different designs of 12- and 24-pulse rectifier transformers », ICEM'08 IEEE Conference on Electrical Machines, 2008.
- [18] J. Sun, Z. Bing, and K. J. Karimi, « Input Impedance Modeling of Multipulse Rectifiers by Harmonic Linearization », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 24, No. 12, December 2009.
- [19] S. Nakhaee, A. Jalilian, « Simulation of 24-Pulse Autotransformer Based AC-DC Converter Employing Pulse Multiplication with Direct Torque Controlled Induction Motor Drive Load », PEDSTC'11 IEEE Conference on Power Electronics, Drives Systems and Technologies, 2011.
- [20] M. H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications, Pearson Prentice Hall, Third Edition, 2003.
- [21] Aircraft Electric Power Characteristics, Department of Defense Interface Standard, MIL-STD-704F, March 2004.
- [22] ABB. ABB Traction Rectifiers Diode Rectifiers for DC Traction Substations. Available online:
<https://library.e.abb.com/public/2c94715f41cc5e11c12577a0004872b6/ABB%2>
- [23] Bałkowiec, T.Koczara, « Three-phase rectifier dedicated to DC traction substation. » Prz. Electrotech. 2017.
- [24] Y.Djeghader, L.Zellouma, « Filtering of harmonics in dc traction substation system. » J. Electr. Eng. 2017.
- [25] Popescu, M.Bitoleanu, A.Preda, « new design method of an LCL filter applied in active DC-traction substations », IEEE Trans. Ind. Appl. 2018.