



ublique Algérienne Démocratique et P

istère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche S



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique



Projet de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

Etude détaillée, simulation par Psim et réalisation pratique des redresseurs non commandés, commandés et hacheur série à base d'un IGBT, application : charge .résistive et moteur à courant continu

Présenté par :

AOUAD Siham

MADOUN Hibat Allah

Devant le jury :

Président : Pr HARTANI Kada

Examineur : Pr MILOUDI Abdallah

Tuteur : Pr MILOUD Yahia

Soutenu le 04 / 06 /2025

Promotion 2024-2025

Remerciement

Au terme de cette étude, nous remercions avant tout, Dieu tout puissant ALLAH qui nous a guidés sur le chemin de la science et nous a permis la réalisation de ce présent travail., il nous a inspiré les bons pas et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.

C'est avec beaucoup de reconnaissance que nous adressons nos sincères remerciements à l'égard de notre promoteur Pr. MILOUD Yahia qui a bien voulu, par son aimable bienveillance, diriger notre étude, qui a fait preuve d'une grande patience. Ses conseils, ses orientations ainsi que, sa confiance et sincérité et surtout ses qualités humaines et ses intérêts portés pour notre sujet de recherche nous ont permis de mener à terme ce projet. Son encadrement était des plus exemplaires.

Nos profonds remerciements vont aussi aux membres de jury le président Pr HARTANI Kada et l'examineur Pr MILOUDI Abdallah d'avoir accepté volontairement et aimablement pour juger ce travail et porter leurs remarques judicieuses et de valoriser notre modeste recherche. Nous sommes particulièrement reconnaissants et honorés par la participation de ce jury de ce mémoire.

Nous remercions également notre chef de département et tous nos enseignants(es) du département d'Electrotechnique et spécialement ceux de notre spécialité Electrotechnique industrielle.

Que toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ce travail, trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude et reconnaissance.

Dédicace

Avant tout, je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné

Le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail ; que je dédie :

Nos parents ; sans eux je n'aurai pas abouti à ce stade d'étude, que Dieu m'aide à les honorer, les servir et les combler.

À mes enseignants

À tous mes amis

À ceux que j'ai passé avec des moments inoubliables

À tous mes amis

Enfin, à tous ceux qui m'aiment.

À vous...

Résumé

Ce travail propose une étude complète de tout ce qui concerne les redresseurs commandés, non commandés et hacheur série. Nous commençons notre travail par une étude théorique des ponts des diodes et des thyristors et hacheur série (commande de vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparée à boucle ouverte). Ensuite, une modélisation théorique, les performances de chaque topologie sont évaluées par simulation sous PSIM, puis validées par des expérimentations pratiques en laboratoire. Les résultats montrent une bonne concordance entre la simulation et la réalité.

Mots clés :

ملخص

يقترح هذا العمل دراسة شاملة لكل ما يتعلق بالمقومات المُتحكم بها وغير المُتحكم بها، والمُفَرمة التسلسلية. نبدأ عملنا بدراسة نظرية لجسور الثنائيات والثايرستورات والمُفَرمة التسلسلية (التحكم في سرعة محرك تيار مستمر بإثارة منفصلة في حلقة مفتوحة). باتباع نمذجة نظرية، يُقَيِّم أداء كل طوبولوجيا عن طريق المحاكاة باستخدام PSIM، ثم يُتَحَقَّق من صحتها من خلال تجارب عملية في المختبر. الهدف هو تحسين تحويل الطاقة من حيث الكفاءة وجودة الإمداد والتكيف مع متطلبات التطبيق. تُظهر النتائج توافقاً جيداً بين المحاكاة والواقع.

Abstract

This work proposes a comprehensive study of everything related to controlled, uncontrolled rectifiers and series chopper. We begin our work with a theoretical study of diode and thyristor bridges and series chopper (speed control of a DC motor with separate excitation in open loop). Following a theoretical modeling, the performances of each topology are evaluated by simulation under PSIM, then validated by practical experiments in the laboratory. The objective is to optimize the energy conversion with regard to efficiency, quality of supply and adjustment to application requirements. The results show a good agreement between simulation and reality.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre Initiation à PSIM.....	2
I.1. Introduction.....	3
I.2.Les étapes de simulation	3
I.2.1. Dessin du schéma de montage	3
a. Contenu des bibliothèques.....	3
b. Sélection et placement.....	4
c. Connexion des composants.....	4
I.2.2. Valeurs numériques et paramètres de simulation.....	5
I.2.3. Simulation: calcul des variables.....	7
I.2.4. Exploitation: SIMVIEW.....	8
Annexes	9
I.3. Conclusion	10
Chapitre II : Redressement non command.....	11
II .1.Introduction:.....	12
II.2. Redresseur non commandé monophasé simple alternance.....	12
II.2.1. Redresseur non commandé monophasé simple alternance à charge résistive:.....	12
Montage:.....	12
b. Analyse de fonctionnement.....	12
c. Formes d'ondes.....	13
d. Valeur moyenne de la tension et le courant:.....	13
e. Valeur efficace de la tension et le courant :.....	13
f. Facteur de forme et Taux d'ondulation :.....	13
h. Le rendement.....	13
II.2.2. Redresseur non commandé monophasé simple alternance à charge inductive :.....	14
a. Montage:.....	14
b. Analyse de fonctionnement.....	14
c. Formes d'ondes	15

Sommaire

d. Valeur moyenne de la tension:	15
II.2.3. Avec diode de roue libre :	15
a. Montage:	16
b. Analyse de fonctionnement	16
c. Formes d'ondes	17
d. Tension et courant moyenne:	17
II.2.4. Avec charge capacitive :	17
a. Montage:	17
b. Analyse de fonctionnement	17
c. Formes d'ondes	18
II.2.5. Analyse de série de Fourier :	19
II.3. Redressement monophasé non commandé double alternance (pont de GRAETZ)	19
II.3.1. Redressement monophasé non commandé double alternance avec charge résistive :	19
a. Montage:	19
b. Analyse de fonctionnement	19
c. Formes d'ondes	20
d. L'étude d'un montage porte sur le calcul de :	20
II.3.2. Avec charge inductive:	21
a. Montage:	21
b. Analyse de fonctionnement	21
II.3.3. Analyse harmonique de la tension redressée	22
II.4.Redressement triphasé non commandé	22
II.4.1. Redressement triphasé non commandé simple alternance P3 (Parallèle 3 phase):	22
a. Montage:	22
b. Analyse de fonctionnement	23
c. Formes d'ondes	24
d. L'étude d'un montage porte sur le calcul de :	24
e. Série de Fourier:	24
II.4.2. Redressement triphasé non commandé double alternance tous diodes PD3:	24

Sommaire

a. Montage:.....	25
b. Analyse de fonctionnement.....	25
c. Formes d'ondes	26
d. L'étude d'un montage porte sur le calcul de :	26
e. Etude des courants dans les diodes (exemple D1) :	27
f. Série de Fourier :.....	27
II.5. Partie de simulation et implémentations pratiques:.....	29
II.5.1.simulation par Psim et réalisation pratique sur monophasé simple alternance :	29
II.5.1.1.charge résistive :	29
a. Equipement requis	29
b. Montage :.....	30
c. Résultats de simulation et la pratique :	31
d. Valeurs moyennes et efficaces :	32
II.5.1.2.charge résistive _ inductive :	33
a. Montage	33
b. Résultats de simulation et la pratique :	33
II.5.1.3.charge résistive _ inductive avec diode de roue libre:	34
a. Montage.....	34
b. Résultats de simulation et la pratique :	35
II.5.1.4.Série de Fourier :	37
II.5.1.5.Interprétation :	38
II.5.2.simulation par Psim et réalisation pratique sur redressement monophasé double alternance (pont de GRATEZ) :	39
II.5.2.1.charge résistive :	39
a. Equipement requis	39
b. Montage :.....	40
c. Résultats de simulation et la pratique :	41
d. Valeurs moyennes et efficaces :	42
II.5.2.2.charge résistive _ inductive :	43

Sommaire

a. Montage.....	43
b. Résultats de simulation et la pratique :.....	43
II.5.2.3. Monophasé double alternance (pont complet PD2) avec charge capacitive(filtrage capacitive):.....	44
a. Montage.....	44
b. Résultats de simulation et la pratique :.....	44
II.5.2.3.Série de Fourier :	45
II.5.2.4.Interprétation :	45
II.5.3.simulation par Psim et réalisation pratique sur triphasé simple alternance :	47
II.5.3.1.charge résistive :	47
a. Equipement requis	47
b. Montage :.....	48
c. Résultats de simulation et la pratique :.....	48
d. Valeurs moyenne :.....	50
II.5. 3.2. charge inductive :	50
a. Montage.....	50
b. Résultats de simulation et la pratique :.....	51
II.5.3.3.Série de Fourier :	52
II.5.4.simulation par Psim et réalisation pratique sur triphasé double alternance :.....	53
II.5.4.1.charge résistive :	53
a. Equipement requis	54
b. Montage :.....	54
c. Résultats de simulation et la pratique :.....	55
d. Valeurs moyenne:.....	55
II.5.4.2.charge inductive :	56
a. Montage.....	56
b. Résultats de simulation et la pratique :.....	56
II.5.4.3. Charge capacitive:	57
a. Montage.....	57

Sommaire

b. Résultats de simulation et la pratique :	57
II.5.4.4.Série de Fourier :	58
II.5.4.5.Interprétation :	59
II.6.Conclusion :	60
Chapitre III : Redressement commandé.....	61
III .1.Introduction:	62
III.2. Redressement commandé	62
III.2.1. Redressement simple alternance commandé par thyristor (charge résistive) :	62
a. Montage:.....	62
b. Analyse de fonctionnement.....	63
c. Forme d'ondes des différentes grandeurs	63
d. Valeur moyenne de la tension V_c et du courant I_c :	63
e. Valeur efficace de la tension :	64
f. Facteur de forme :	64
III.2.2. Redressement simple alternance commandé par thyristor (charge résistive-inductive) :	64
a. Montage:.....	64
b. Analyse de fonctionnement.....	64
c. Valeur moyenne de la tension V_c	65
d. Formes d'ondes des différentes grandeurs :	66
III.2.3. Pont tous thyristors :	66
a. Montage:.....	66
b. Analyse de fonctionnement.....	67
c. Valeur moyenne de la tension V_c	67
d. Valeur efficace de la tension	67
e. Facteur de forme et Taux d'ondulation	67
f. Formes d'ondes des différentes grandeurs pour $\Psi = \frac{\pi}{3}$	68
III.2.3.1. Pont tous thyristors avec diode de roue libre :	69

Sommaire

a. Montage:.....	69
b. Les grandeurs caractéristiques	69
c. Forme d'ondes des différentes grandeurs	70
III.2.4. Pont mixte symétrique :.....	70
a. Montage:.....	70
b. Analyse de fonctionnement.....	71
c. Forme d'ondes des différentes grandeurs	73
d. Valeur moyenne de la tension V_c :	73
e. Valeur efficace de la tension :	74
III.3. Redressement triphasé commandé	74
III.3.1. Redressement commandé P3 :.....	74
a. Montage:.....	74
b. Analyse de fonctionnement.....	74
c. Valeur moyenne de la tension V_c	75
d. Valeur efficace de la tension :	76
e. Forme d'ondes des différentes grandeurs pour $\psi = \frac{\pi}{6}$:	76
f. Différents modes de fonctionnement réversibilité :	77
III.3.2. Redressement commandé PT3 (tous thyristors) :.....	77
a. Montage:.....	77
b. Analyse de fonctionnement.....	78
c. Valeur moyenne de la tension V_c	79
d. Valeur efficace de la tension :	79
e. Forme d'ondes des différentes grandeurs pour $\psi = \frac{\pi}{6}$:	80
f. Etude des courants :	80
III.3.3. Pont mixte symétrique:.....	81
a. Montage:.....	81

Sommaire

b. Analyse de fonctionnement.....	82
c. Valeur moyenne de la tension V_c	82
d. Valeur efficace de la tension :	83
e. Forme d'ondes des différentes grandeurs pour $\psi = \frac{\pi}{2}$:	83
III.4.. Partie de simulation et implémentations pratiques:	84
III.4.1.simulation par Psim et réalisation pratique sur monophasé simple alternance :	85
III.4.1.1.charge résistive :.....	85
a. Equipement requis	85
b. Montage :.....	85
c. Résultats de simulation et la pratique :.....	86
III.4.1.2.avec charge inductive :.....	88
a. Montage.....	88
b. Résultats de simulation et la pratique :.....	89
III.4.1.3. avec diode de roue libre :	90
a. Montage	90
b. Résultats de simulation et la pratique :.....	91
c. Valeur moyenne et efficace :	92
III.4.1.4.Interprétation :.....	92
III.4.2. Simulation par PSIM sur monophasé double alternance commandé:.....	94
III.4.2.1. avec charge résistive-inductive :.....	94
a. Equipement requis	94
b. Montage :.....	94
c. Résultats de simulation et la pratique :.....	95
d. Valeurs moyennes et efficaces :	96
III.4.2.2. Interprétation:.....	97
III.4.3. Pont mixte symétrique (2 diodes / 2 Thyristors)	97
III.4.3.1. avec charge résistive :	97
a. Montage.....	97

Sommaire

b. Résultats de simulation et la pratique :	98
c. Valeur moyenne et efficace:	99
III.4.3.2. avec charge inductive :	100
a. Montage	100
b. Résultats de simulation et la pratique :	101
III.4.3.3. Interprétation	102
III.4.4. Redressement triphasé commandé P3	102
III.4.4.1. avec charge résistive:	102
a. Equipement requis	102
b. Montage :	102
c. Résultats de simulation et la pratique :	103
d. Valeurs moyenne et efficace:	104
III.4.4.2. avec charge résistive-inductive :	105
a. Montage	105
b. Résultats de simulation et la pratique :	106
III.4.4.3. Interprétation	107
III.4.5. Redressement commandé PT3 (tous thyristors) :	108
III.4.5.1. avec charge inductive :	108
a. Equipement requis	108
b. Montage :	108
c. Résultats de simulation et la pratique :	109
III.4.5.2. Interprétation :	111
III.4.6. Redresseurs triphasés PT3 mixte	111
III.4.6.1. Avec charge inductive	111
a. Equipement requis	111
b. Montage	112
c. Résultats des simulations et pratiques	113
III.4.6.2. Interprétation	115

Sommaire

III.5. Conclusion :.....	116
Chapitre IV : Hacheur série.....	117
IV.1. Introduction:.....	118
IV.2. Symbole de l'hacheur.....	118
IV.3. Hacheur série:	118
IV.3.1. Principe du fonctionnement:	118
IV.3.2. Valeur moyenne de la tension	119
IV.4. Rapport cyclique (α)	119
IV.5. Hacheur série (dévolteur) :.....	119
IV.5.1.1. Principe du fonctionnement.....	119
a. Tension aux bornes de la charge	119
IV.5.1.2. Ondulation du courant	120
IV.6.1. Matériel utilisé	121
IV.6.2. Pont complet à diodes avec un hacheur série	121
a. Montage.....	122
b. Analyse	122
c. Résultats des simulations et pratiques	123
IV.6.2.1. Interprétation des résultats	124
IV.6.3. avec une charge purement résistive	124
a. Montage	124
b. Résultats des simulations et pratique	125
IV.6.3.1. Interprétation	127
IV.6.4. Conclusion	127
IV.7. Partie de Commande de vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparée à boucle ouverte	128
IV.7. Moteur à courant continu à excitation séparée	129
IV.7.1. Introduction	129
IV.7.2. Constitution de la machine à courant continu	129
a. Stator	129
b. Rotor	129

Sommaire

c. Collecteur et les Ballais	130
IV.8. Equations de fonctionnement	130
IV.8.1. La force électromotrice (f.é.m.) E	130
IV.8.2. Le couple électromagnétique	131
IV.9. Principe de fonctionnement	131
IV.9.1. En moteur	131
IV.9.2. En génératrice	131
IV.10. Réglage de la vitesse d'un MCC à excitation séparée	132
IV.10.1. Equations mathématiques d'un moteur à C.C à excitation séparée	132
a. Réglage rhéostatique (R_a)	133
b. Réglage par flux ϕ	133
c. Réglage par la tension (U_a)	133
IV.11. Réalisation pratique	134
IV.11.1. Le matériel utilisé	134
IV.11.2. Montage	135
a. à vide	136
b. En charge	138
IV.11.3. Interprétation	140
IV.11.4. Conclusion	141
Conclusion générale.....	145
Bibliographie.....	147
Annex.....	149

Liste des figures

Figure (II.1): Redressement monophasé (P1), charge résistive.....	12
Figure (II.2) : (a) tension d'entrée, (b) tension de sortie, (c) courant de sortie, (d) tension de la diode.....	13
Figure (II.3) : Redressement non commandé mono-alternance sur charge inductive.....	14
Figure (II.4) : formes d'ondes de V_c et i_c pour une charge RL.....	15
Figure (II.5) : charge RL avec D_{RL}	16
Figure(II.6) : forme d'ondes de V_c et i_c pour une charge RL avec D_{RL}	17
Figure (II.7) : Redresseur monophasé non commandé avec charge capacitive:.....	17
Figure (II.8) : courant et tension de charge.....	18
Figure (II.9): Redressement non commandé double-alternance sur charge résistive.....	19
Figure (II.10): Courbes courant et tension d'un redresseur non commandé à pont.....	20
Figure (II.11) : Redressement double-alternance sur charge RL.....	21
Figure (II.12) : Courbes courant et tension d'un redresseur à deux impulsions non commandé à charge inductive.....	22
Figure (II.13) : Redresseur triphasé simple alternance tous diodes P3.....	22
Figure (II.14): Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur P3.....	24
Figure (II.15) : Triphasé double alternance tous diodes PD3.....	25
Figure (II.16): Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur PD3.....	26
Figure (II.17): Circuit de redresseur monophasé-charge résistive: (a) théorique, (b) simulation par PSIM, (c) et réalisation pratique.....	30
Figure (II.18) : Tensions d'entrée et de sortie respectivement de P1 avec charge résistive :(a) par simulation (b), par pratique.....	31
Figure (II.19) : Tensions inverse et courant de charge: (a) simulation par Psim (b) par pratique.....	32
Figure(II.20) : circuit de simulation(a) et pratique (b), P1 avec charge inductive.....	33
Figure (II.21): Tensions d'entré et courant du P1 avec charge inductive :(a) simulation par psim, (b) par pratique	33
Figure (II.22): Tension de sortie du P1 avec RL, (a) simulation par Psim, (b) par pratique.....	34
Figure (II.23): Circuit de simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b), redresseur monophasé-charge RL avec D_{RL}	34

Liste des figures

Figure (II.24) : Tensions d'entrée (a)et de sortie (b) ,par simulation du PD1 avec charge RL et D_{RL}	35
Figure (II.25) : Tensions d'entré (CH1) et courant de charge (CH2) ,du P1 avec charge inductive.....	35
Figure (II.26): Tensions inverse (a)et courant de charge (b) ,par simulation , du P1 avec D_{RL}	36
Figure (II.27): Tensions inverse (CH1) et courant de charge (CH2) ,du P1 avec D_{RL}	36
Figure (II.28): Spectre de l'analyse de Série de Fourier, (a) théorie et (b) par simulation.....	37
Figure (II.29): circuit de PD2 avec charge résistive :(a) théorique,(b) par simulation,(c) pratique	40
Figure (II.30) ; Tensions de sortie (a) et de courant (b) ,par simulation du PD2 avec R.....	41
Figure (II.31) : Tensions de sortie (CH 1) et courant de charge (CH2) ,du PD2 avec R.....	41
Figure (II.32) : Tensions inverse de D1 : (a) simulation, (b) pratique du PD2 avec R.....	41
Figure (II.33) : Tensions inverse de D2 :(a) par simulation, (b) par pratique du PD2 avec Charge R	42
Figure (II. 34): circuit de simulation(a) et pratique (b), PD2 avec charge résistive_inductive	43
Figure (II.35) courant de charge inductive de PD2, (a)de simulation et pratique (b).....	43
Figure (II. 36) : circuit de simulation(a) et pratique (b), PD2 avec charge capacitif.....	44
Figure (II. 37): Tension de charge capacitif (filtrage); simulation(a) et pratique (b).....	44
Figure (II. 38): Spectre de l'analyse de Série de Fourier, (a) théorie et (b) par simulation	45
Figure (II. 39): Circuit de simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b), P3 avec charge résistive.....	48
Figure (II. 40): Tension d'entrée phase 1 et tension de sortie, (a) par simulation et (b) par pratique.....	48
Figure (II. 41): Tension de sortie de P3 avec charge R, (a) par simulation et (b) par pratique.....	49

Liste des figures

Figure (II. 42): courant de sortie de P3 avec charge R, (a) par simulation et (b) par pratique.....	49
Figure (II. 43): Circuit de P3 avec RL, simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b).....	50
Figure (II. 44): Tension de sortie de P3 avec RL, simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b).....	51
Figure (II. 45): courant de sortie de P3 avec RL , simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b).....	51
Figure (II. 46): Tension inverse de P3 avec RL, simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b).....	51
Figure (II. 47): Spectre de l'analyse de Série de Fourier, (a) théorie et (b) par simulation.....	52
Figure (II. 48): Circuit de simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b), PD3 avec charge résistive	54
Figure (II. 49): Tension inverse de charge résistive du PD3, (a) par Psim et (b) réalisation pratique	55
Figure (II. 50): Circuit de PD3 avec RL, simulation par Psim (a) et réalisation pratique (b)	56
Figure (II. 51): Tension et courant de sortie de PD3 avec RL, simulation par Psim (a) et réalisation pratique	56
Figure (II. 52): Circuit de PD3 avec filtrage, (a) simulation par Psim et (b) réalisation pratique	57
Figure (II. 53): Tension de sortie filtré, (a) simulation par Psim et (b) réalisation pratique	57
Figure (II. 54): Spectre de l'analyse de Série de Fourier, (a) théorie et (b) par simulation	58
FIGURES CHAPITRE III	
Figure (III.1): Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.....	62
Figure (III.2): Montage simple alternance commandé avec charge résistive	62
Figure (III.3): Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur commandé.....	63
Figure (III.4): Montage simple alternance charge inductive.....	64

Liste des figures

Figure (III.5) : Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur commandé charge inductive.....	66
Figure(III.6) : Schéma d'un pont monophasé tous thyristor.....	66
Figure(III.7): Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un pont tous thyristors.....	68
Figure(III.8): Pont tout thyristors avec D_{RL}	69
Figure(III.9) : Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un pont tous thyristors avec D_{RL}	70
Figure(III.10) : Schéma d'un pont monophasé mixte.....	70
Figure(III.11): Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un pont mixte.....	73
Figure(III.12): Redresseurs triphasés P3 tous thyristors.....	74
Figure(III.13) : Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur P3 tous thyristors.....	76
Figure(III.14): Différents modes de fonctionnement.....	77
Figure(III.15): Redresseurs triphasés PD3 tous thyristors.....	77
Figure(III.16): Différents modes du fonctionnement.....	79
Figure(III.17) : Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur PD3 tous thyristors.....	80
Figure(III.18): Redresseurs triphasés PD3 mixte.....	81
Figure(III.19): Variation de la tension de sortie.....	83
Figure(III.20): Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur PD3 mixte.....	83
Figure(III.21): Montage simple alternance commandé avec charge résistive, (a) théorique, (b) simulation, (c) pratique.....	85
Figure(III.22): (a) tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = 0$, par simulation.....	86
Figure(III.23): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge résistive pour $\psi = 0$	86
Figure(III. 24): (a) tension et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/4$	86
Figure(III.25): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge résistive pour $\psi = \pi/4$	86
Figure(III.26): (a) tension et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/2$	87

Liste des figures

Figure(III.27) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge résistive pour $\psi = \pi/2$	87
Figure(III.28): Montage simple alternance charge inductive, (a) théorique, (b) simulation, (c) pratique.....	88
Figure(III.29): (a) tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/4$	89
Figure(III.30): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = \pi/4$	89
Figure(III.31): (a) tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/2$	89
Figure (III.32): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = \pi/2$	89
Figure (III.33): Montage simple alternance charge résistive- inductive avec D_{RL} , (a)simulation, (b) pratique.....	90
Figure (III.34): (a) tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/4$	91
Figure (III.35): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive avec D_{RL} pour $\psi = \pi/4$	91
Figure (III.36): (a) tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/2$	91
Figure (III.37): Tension de sortie (CH1) et cour courant de sortie (CH2) charge inductive avec D_{RL} pour $\psi = \pi/2$	91
Figure(III.38): Montage double alternance commandé avec charge inductive, (a) théorique, (b) simulation, (c) pratique.....	94
Figure(III.39): (a) tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = 0$	95
Figure(III.40): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive pour $\psi = 0$	95
Figure(III.41): (a) tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/6$	95
Figure(III.42): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive pour $\psi = \pi/6$	95
Figure(III.43): (a) tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/3$	96
Figure(III.44): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive pour	

Liste des figures

$\psi = \pi/3$	96
Figure(III.45): Schéma d'un pont monophasé mixte avec charge résistive, (a)simulation, (b) pratique.....	97
Figure(III.46) : (a) Tension de sortie (b) et courant de sortie avec charge résistive pour $\psi = 0$	98
Figure(III.47): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge résistive pour $\psi = 0$	98
Figure(III.48): (a) Tension de sortie (b) et courant de sortie avec charge résistive pour $\psi = \pi/6$	98
Figure(III.49): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge résistive pour $\psi = \pi/6$	98
Figure(III.50): Schéma d'un pont monophasé mixte avec charge inductive, (a)simulation, (b) pratique.....	100
Figure(III.51): (a) Tension de sortie (b) et courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = \pi/6$	101
Figure(III.52): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive pour $\psi = \pi/6$	101
Figure(III.53): (a) Tension de sortie (b) et courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = \pi/3$	101
Figure(III.54): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive pour $\psi = \pi/3$	101
Figure(III.55): Schéma d'un redresseur triphasé P3 avec charge résistive (a)simulation, (b) pratique.....	102
Figure(III.56): (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge résistive pour $\psi = 0$	103
Figure(III.57): Tension de sortie et courant de sortie charge résistive pour $\psi = 0$	103
Figure(III.58): (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge résistive pour $\psi = \pi/4$	103
Figure(III.59): Tension de sortie et courant de sortie charge résistive pour $\psi = \pi/4$	103
Figure (III.60): (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge résistive pour $\psi = \pi/2$	104

Liste des figures

Figure(III.61): Tension de sortie et courant de sortie charge résistive pour $\psi = \pi/2$	104
Figure(III.62): Schéma d'un redresseur triphasé P3 avec charge inductive (a) théorique (b) simulation, (c) pratique.....	105
Figure(III.63): (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = 0$	106
Figure(III.64): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = 0$	106
Figure(III.65): (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = \pi/4$	106
Figure(III.66): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = \pi/4$	106
Figure(III.67) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = \pi/2$	107
Figure(III.68): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = \pi/2$	107
Figure (III.69) : Schéma d'un redresseur triphasé PD3 avec charge inductive (a) théorique (b) simulation, (c) pratique.....	108
Figure (III.70) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = 0$	109
Figure (III.71) : Tension et courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = 0$	109
Figure (III.72) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = \pi/6$	109
Figure (III.73) : Tension et courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = \pi/6$	109
Figure (III.74) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = \pi/3$	110
Figure (III.75) : Tension et courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = \pi/3$	110
Figure (III.76) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = 75^\circ$...	110
Figure (III.77) : Tension et courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = 75^\circ$	110
Figure (III.78) : Schéma d'un redresseur triphasé PD3 mixte avec charge inductive (a) théorique (b) simulation, (c) pratique.....	112
Figure (III.79): (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = 0$	113

Liste des figures

Figure (III.80): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = 0$	113
Figure(III.81): (a) tension de sortie et (b) courant de sortie avec charge inductive, pour $\psi = \pi/4$	113
Figure(III.82): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = \pi/4$	113
Figure (III.83) : (a) tension de sortie et (b) courant de sortie avec charge inductive, pour $\psi = \pi/3$	114
Figure(III.84): Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = \pi/3$	114
FIGURES CHAPITRE IV	
Figure(IV.1): Tension aux bornes de la charge avec un hacheur série.....	118
Figure(IV.2): Hacheur série.....	119
Figure(IV.3) : Schéma de la tension et courants d'un hacheur série.....	120
Figure (IV.4) : Montage expérimentale du pont complet à diodes avec un hacheur série, (a) simulation, (b) pratique.....	122
Figure(IV.5): Signal MLI à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.5 par simulation.....	123
Figure(IV.6) : Signal MLI à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.5.....	123
Figure(IV.7) : Signal MLI à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.25 par simulation.....	123
Figure(IV.8): Signal MLI à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.25.....	123
Figure(IV.9) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.5 par simulation.....	123
Figure(IV.10) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.5.....	123
Figure(IV.11) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.25 par simulation.....	123
Figure(IV.12): Signal PWM à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.25.....	123
Figure(IV.13): Montage du hacheur alimente une charge purement résistive (a) simulation, (b) pratique.....	124
Figure(IV.14): Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.25-charge R par simulation.....	125

Liste des figures

Figure (IV.15) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.25-charge R.....	125
Figure(IV.16) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.5 -charge R par simulati.....	125
Figure(IV.17) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.5 -charge R.....	125
Figure(IV.18) : Signal MLI à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.5-charge R par simulation.....	126
Figure(IV.19) : Signal MLI à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.5-charge R.....	126
Figure(IV.20) : Signal MLI à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.25-charge R par simulation.....	126
Figure(IV.21): Signal MLI à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.25-charge R.....	126
Figure (IV.22): Circuit d'excitation d'une machine bipolaire (inducteur).....	129
Figure (IV. 23): La partie tournante (induit).....	129
Figure(IV.24) : Collecteur d'un MCC.....	130
Figure(IV.25) : Balais d'un MCC.....	130
Figure(IV.26) : Ligne de champ magnétique inducteur.....	132
Figure (IV.27) : Circuit équivalent du moteur à excitation séparée.....	132
Figure (IV.28): Action conjuguée sur la tension et le flux.....	134
Figure (IV.29): Schéma complet (boucle ouverte).....	135
Figure(IV.30): Montage pratique pour la commande de vitesse du MCC à vide.....	136
Figure (IV.31) : La courbe de la vitesse du MCC à vide pour $\alpha = 0,6$	137
Figure (IV.32) : La courbe de la vitesse du MCC à vide pour $\alpha = 0,99$	138
Figure (IV.33): MCC à charge (résistive).....	138
Figure (IV.34) : La courbe de la vitesse du MCC en charge pour $\alpha = 0,6$	139
Figure (IV.35): La courbe de la vitesse du MCC en charge pour $\alpha = 0,99$	139
Figure (IV.36): Démarrage à vide puis application d'une charge avec rapport cyclique Quelconque.....	140

Liste des tableaux

Chapitre II : Redressement non commandé

Tableau (II.1):Résumé de Les intervalles de conduction montage P3.....23

Tableau (II.2):Résumé de Les intervalles de conduction montage PD3.....26

Chapitre III : Redressement commandé

Tableau (III.1): Intervalles de conduction P3 tous thyristors.....75

Tableau (III.2): Intervalles de conduction PT3 tous thyristors.....78

Tableau (III.3) : Intervalles de conduction PT3.....82

Liste des symboles et abréviations

1/- Liste des symboles

v_e : Tension d'entrée (V)

v_{max} : Tension maximale (V)

v_{DC} : Tension moyenne (V)

v_{rms} : Tension efficace (V)

R : résistance (Ω)

Ω : vitesse rotorique rad /s

V_a : Tension d'induit (V)

V_{ex} : Tension d'inducteur (V)

P_n : Puissance nominale (w)

Φ : flux magnétique (wb)

E : force électromotrice (V)

T : couple moteur (Nm)

α : Le rapport cyclique

I_{max} : Courant maximum (A)

I_{min} : Courant minimum (A)

F : Fréquence (HZ)

2/- Liste des abréviations

Mcc : moteur à courant continu

MLI : modulation de largeur d'impulsion

AC: source alternative

DC : source continu

D : diode

H : hacheur

f.é.m.: Force électromotrice (V)

D_{RL} : Diode de roue libre

PD1: Redressement non commandé simple alternance

PD2 : Redressement non commandé double alternance

PD3 : Redressement non commandé triphasé de 3 diodes

PD6 : Redressement non commandé triphasé double alternance

Liste des symboles et abréviations

PT3 : Redressement commandé triphasé double alternance

Introduction

générale

Introduction générale

L'électronique de puissance s'est imposée comme une des éléments essentiels dans la conversion de l'énergie électrique.

La commande des machines électriques utilise des convertisseurs statiques. Cette commande nécessite l'association d'une machine dont le fonctionnement est à une vitesse variable.

Les montages redresseurs constituent une composante intéressante parmi les convertisseurs statiques de l'électronique de puissance les plus utilisés dans les différents domaines d'application ou la conversion de l'énergie électrique de la forme alternative au continu s'avère indispensable.

Les montages redresseurs diffèrent les uns des autres selon la nature de la source : monophasé ou triphasé, et selon les composants utilisés (thyristors, diode, IGBT, Mosfet,...).

Notre présent travail cependant s'articule sur quatre chapitres suivants :

Le premier chapitre de ce mémoire est basé sur l'étude du logiciel PSIM avec quelques exemples. Cette simulation est indispensable des différents convertisseurs afin de mener à bien la partie pratique et pour préserver les équipements en bon état.

Le deuxième chapitre concerne : la base théorique d'un redressement non commandé. Différents circuits ont été étudiés, monophasé et triphasé avec des charges variées à savoir résistive, résistive-inductive, par la suite la simulation par Psim est effectuée pour les différents circuits suivi par la validation des résultats par une réalisation pratique des différents montages avec des différentes charges.

Le troisième chapitre est consacré sur les redressements commandés: étude de la théorie détaillée du redresseur commandé des différents circuits monophasé et triphasé. La simulation par Psim et validation des résultats par des réalisations pratiques est ensuite faite.

Enfin, le quatrième chapitre est axé principalement sur la définition du convertisseur DC/DC (hacheur série). Par la suite, des simulations par le logiciel Psim suivies par la réalisation pratique ont été effectuées en tenant compte bien entendu de la génération des signaux à MLI à différentes fréquences pour commander le hacheur série à base d'un IGBT. La dernière partie de ce chapitre, est réservée pour la commande de la vitesse du moteur à courant continu à vide et à charge et à boucle ouverte.

A la fin de ce mémoire, on recommande quelques perspectives pour la continuité de ce travail.

Chapitre I

Initiation au logiciel Psim

I.1. Introduction:

- PSIM est un logiciel de simulation d'électrotechnique et d'électronique de puissance il est distribué par [POWERSYS](#).
- Une version d'évaluation téléchargeable est disponible sur le site du distributeur Lorsque le fichier psim6_demo.zipa été téléchargé, il faut le décompresser avant de lancer l'installation par SETUP.EXE.

I.2. Les étapes de simulation: La simulation d'un circuit peut se décomposer en 4 étapes: [1]

1. Dessin du schéma de montage;
2. Entrée des valeurs des éléments du montage et des paramètres de simulation ;
3. Calcul;
4. Exploitation ;

I.2.1. Dessin du schéma de montage :

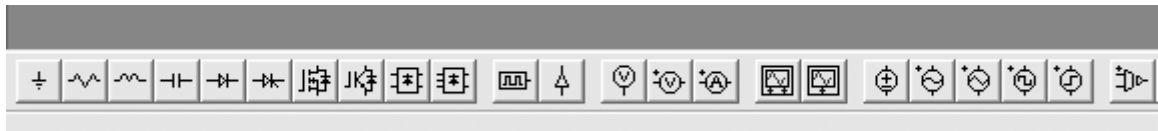
Dès le lancement du logiciel PSIM,  il apparaît une fenêtre comportant une page vierge sur laquelle le schéma du montage à étudier doit être représenté. Le schéma se dessine à l'aide de la souris. Les différents composants disponibles sont rangés dans des bibliothèques accessibles en choisissant « Eléments » dans la barre de menu principale.

**a. Contenu des bibliothèques**

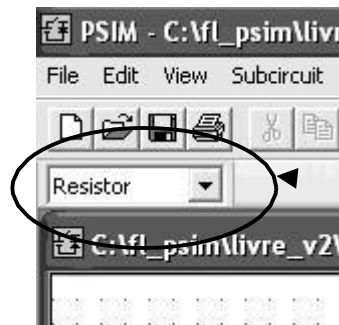
Les éléments disponibles sont répartis en 5 groupes:

1. Power: R, L, C, interrupteurs, transformateurs et moteurs;
2. Control: Filtres, fonctions analogiques et logiques...;
3. Other: Commande des interrupteurs, capteurs, sondes de courant et de tension ;
4. Sources : Sources de courant, de tension;
5. Symbol : Flèche.

Les éléments les plus courants sont directement accessibles à partir des icônes situées en bas de l'écran.



Les derniers éléments utilisés sont également disponibles à partir de la deuxième barre d'outils supérieure.



Derniers éléments utilisés

On peut enfin retrouver les éléments en utilisant l'outil de recherche à l'intérieur de la bibliothèque  (Library Browser) .

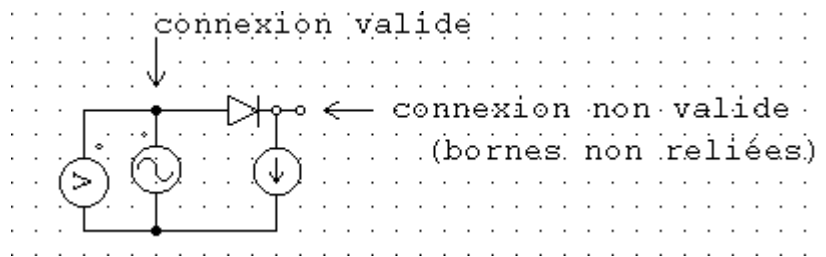
b. Sélection et placement

- Pour sélectionner un composant, il suffit de cliquer sur l'icône en bas de l'écran ou de prendre de composant dans la bibliothèque « Elements ». On dépose ensuite l'élément à l'endroit souhaité grâce à la souris.
- Pour choisir l'orientation du composant, 2 méthodes sont possibles:
 1. Avant de placer le composant, un clic sur le bouton droit de la souris provoque la rotation de l'élément ;
 2. Si le composant est déjà placé, il faut sélectionner le composant (simple clic); il apparaît alors un cadre autour du composant. L'orientation de l'élément peut alors être modifiée à partir du menu «Edit », « Rotate » (rotation à gauche de 90°) ou « Flip »(retournement) .

c. Connexion des composants

Les liaisons électriques entre les composants s'effectuent également à la souris après avoir choisi l'outil de connexion « Wire ». 

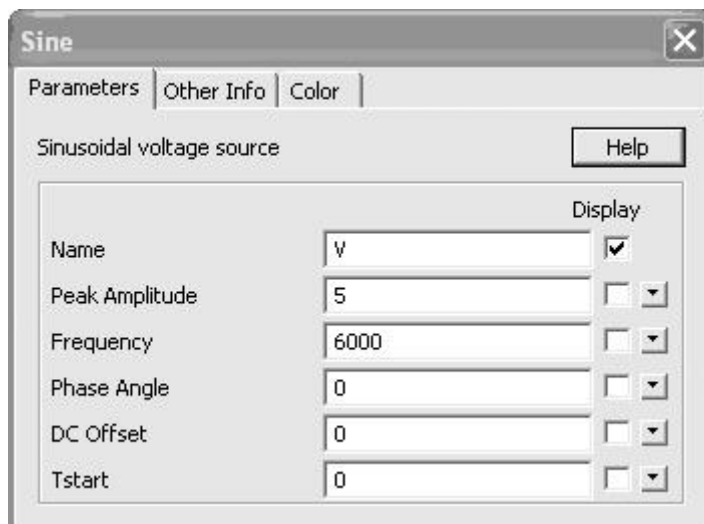
Une connexion valide entre plusieurs composants se matérialise par un point sombre. Un cercle blanc correspond à une borne non reliée.



un Pour effacer composant ou une connexion, on le sélectionne (outil «select ») puis on appuie sur « Suppr ». 

I.2.2. Valeurs numériques et paramètres de simulation

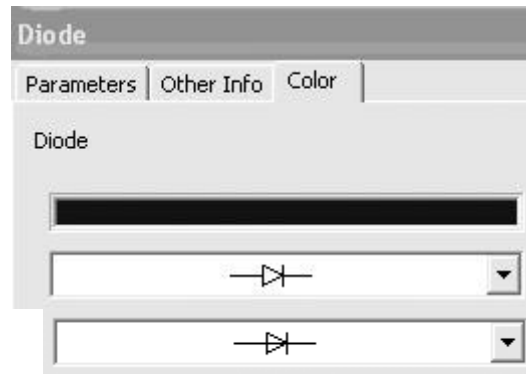
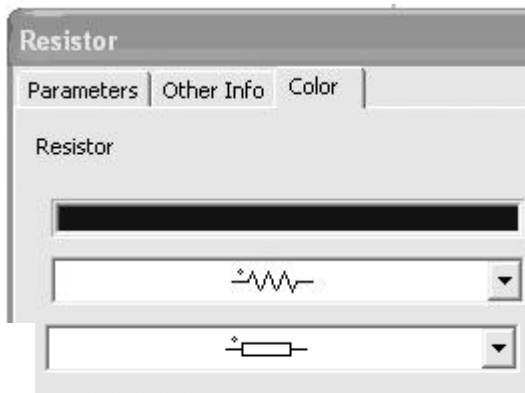
a. Valeurs numériques des éléments.



Pour entrer les valeurs numériques, double-cliquer sur chaque composant et entrer les valeurs souhaitées dans les cases prévues à cet effet.

Il est possible de modifier le nom du composant et d'afficher son nom sur le schéma: case «Display» cochée.

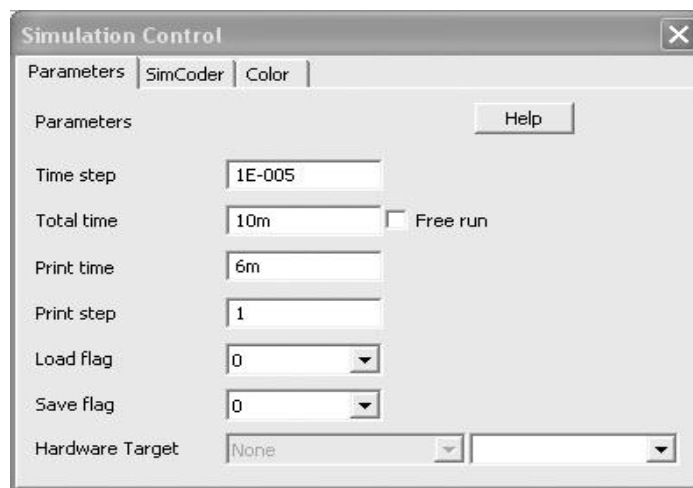
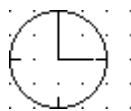
- L'onglet «Other info » donne une description succincte du composant et l'onglet «color » permet de modifier la couleur du symbole sur le schéma et pour quelques composants le symbole du composant. Pour la résistance et la diode, deux symboles sont proposés :



b. Paramètres de simulation

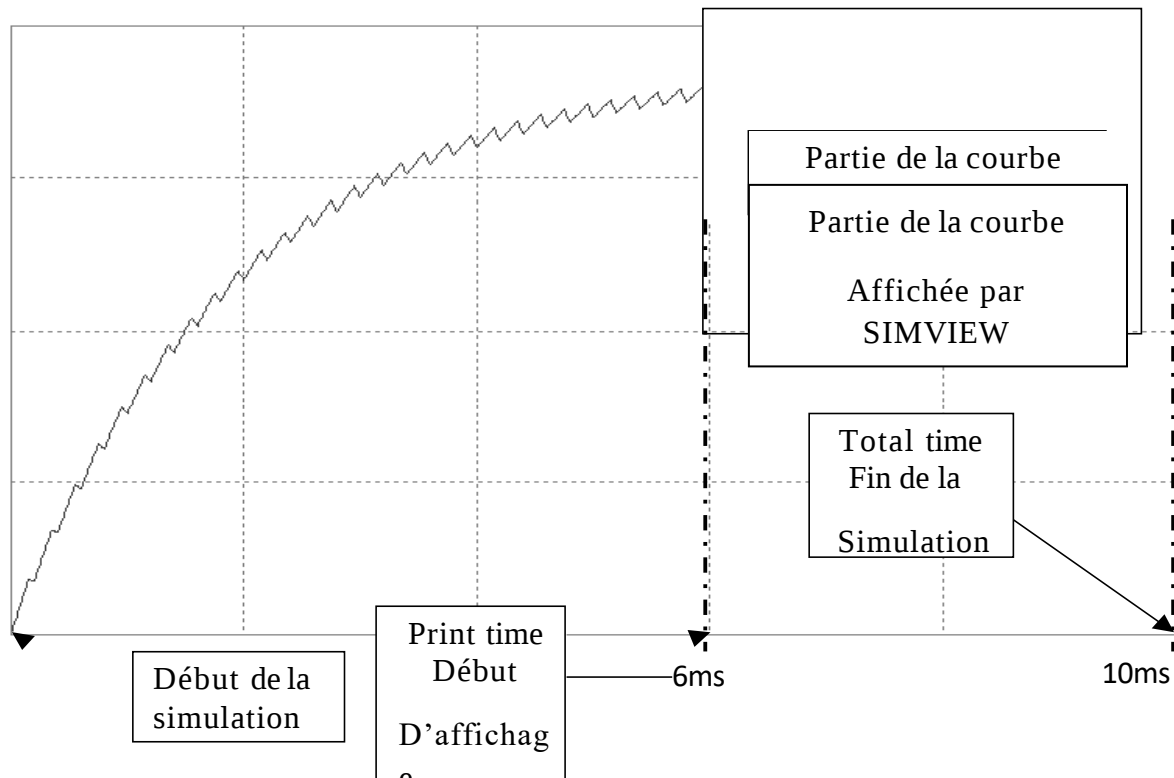
Avant de lancer la simulation, il est nécessaire de préciser la valeur des paramètres de simulation (Simulation Control). Les valeurs proposées par défaut sont généralement acceptables, mais peuvent conduire, dans certains cas, à des résultats imprécis ou des temps de calculs prohibitifs.

Dans le menu principal, choisir «Simulate», puis «Simulation Control».



Les grandeurs à préciser sont:

- Le pas de calcul (Time Step);
- Le temps total simulé (Total time);
- Le début d'affichage des courbes (PrintTime) ;
- le pas d'affichage (Print Step).



Le début de la simulation n'est pas paramétrable: cela correspond à $t=0$ si les conditions initiales sont nulles (« Load flag »=0). PSIM effectue les calculs en incrémentant le temps de la valeur du pas de calcul jusqu'à atteindre la valeur finale (total time).

Le logiciel de visualisation SIMVIEW affiche les courbes correspondantes à une partie des points calculés, de « print time » (début d'affichage) à « total time » (temps total).

Dans l'intervalle [« print time »- «total time »], il est possible d'afficher partiellement les points calculés grâce au paramètre « Print Step » (pas d'affichage). La valeur entière «n » affectée au pas d'affichage permet d'afficher un point pour «n points» calculés. Cela permet d'obtenir un nombre de points affichés à l'écran inférieur à la limite imposée par la version de démonstration à 6000 points.

- Afin de bien assimiler le paramétrage du «simulation control », deux exemples viennent illustrer la détermination des paramètres.

I.2.3. Simulation: calcul des variables



La simulation (calcul des valeurs des variables à chaque instant) est obtenue en lançant PSIM d'une des manières suivantes :

- A partir du menu principal:« Simulate » puis « Run PSIM »;
- en appuyant sur «F8»;
- En cliquant sur l'icône PSIM



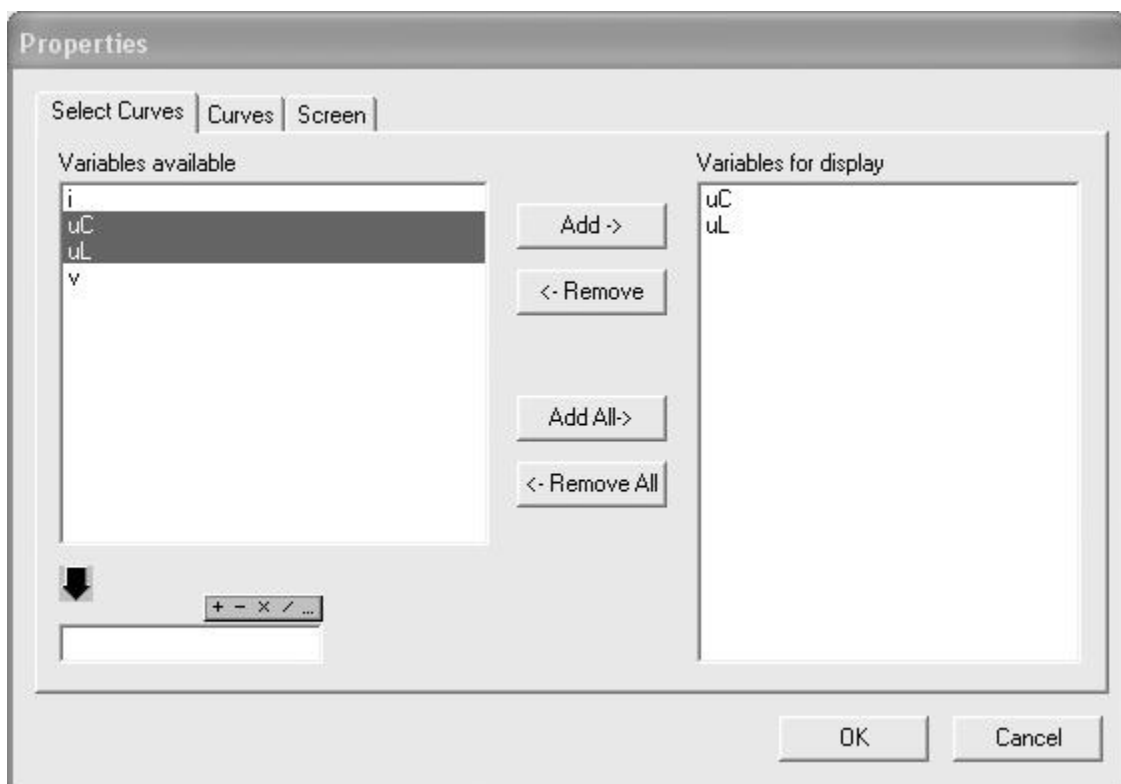
Le logiciel signale alors d'éventuelles erreurs dans le schéma (bornes non reliées, valeurs numériques nulles (car non renseignées) ou incorrectes, dépassement des capacités de simulation (nombre de composants trop élevé).

- A la fin de la simulation, le tracé des courbes se fait grâce à SIMVIEW. le lancement de ce logiciel est automatique si l'option «Auto-Run SIM VIEW» du menu

« Options » est cochée.

I.2.4. Exploitation: SIMVIEW

Le logiciel SIMVIEW permet de tracer la représentation temporelle des résultats de la simulation.



Les courbes que l'on peut tracer sont celles qui ont été définies lors du tracé du schéma en plaçant des appareils de mesure (voltmètre, ampèremètre, tachymètre ...). Les variables correspondantes sont affichées dans la fenêtre « Variables available ».

- Pour que les courbes soient tracées, il faut les faire apparaître dans la fenêtre

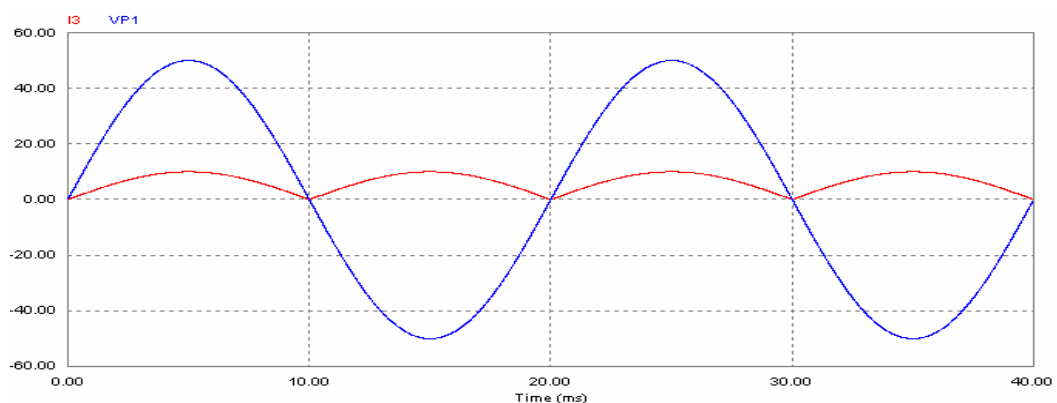
«Variables for Display».

- L'onglet «Curves » permet de modifier le nom de la variable, la couleur et l'épaisseur de la courbe.

- On accède par l'onglet « Screen » aux couleurs de la fenêtre d'affichage: axes, fond et grille.

- Pour tracer des courbes dans plusieurs fenêtres, il faut créer une nouvelle fenêtre à partir du menu principal « Screen », « Add Screen »ou 

- On peut ensuite modifier les échelles si nécessaire («Axis »), modifier la zone d'affichage (zoom , décalage...), effectuer des mesures de temps, de valeur moyenne, effacer..(« Measure »), calculer les harmoniques («Options » «FFT ») ou modifier la variable en abscisse.



Annexes :

1. Inverser un composant : **Edit > Flip** L/R (horizontal) ou T/B (vertical)

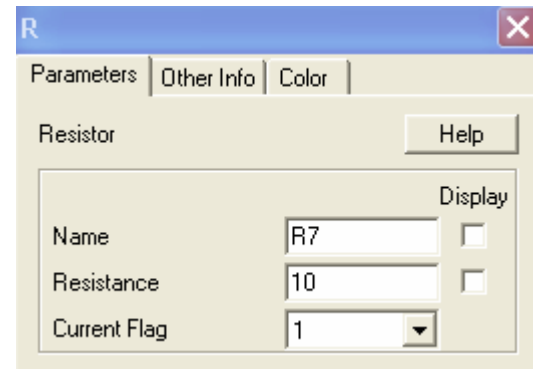
- Faire pivoter un composant: **Edit> Rotate**
- Passage du domaine et temporel au domaine fréquentiel: **Option>FFT**
- Recadrage des courbes: **Axis >X axis** ou **Y Axis** en décochant **Auto-Scale** «Bouton Mesure »



- Aperçu avant impression : **File> Print Preview**

- ✓ Il est possible d'obtenir directement la mesure de courant dans un composant en mettant à 1 **Current Flag**

I(R7) peut alors être sélectionnée dans les variables à afficher (SIMVIEW)



- ✓ La fenêtre **SIMVIEW** est actualisée lors de tout en nouvelle simulation (**RUN**). Elle peut donc être gardée ouverte pour éviter un nouveau choix des courbes et des échelles

Les courbes obtenues sur PSIM peuvent être copiées collées dans une autre logiciel, en utilisant la fonction **Edit>Copy to Clip board**.

I.3. Conclusion :

Ce chapitre d'initiation à PSIM, nous a permis de découvrir les bases de la simulation de circuits électriques et électroniques de puissance. Nous avons appris à créer et à éditer des schémas, à configurer les simulations et à analyser les résultats. Psim, s'est révélé être un outil puissant et flexible pour la conception et la vérification des circuits.

Grace à ces connaissances de base, nous sommes maintenant en mesure d'utiliser le logiciel PSIM pour simuler des circuits d'électroniques de puissances et plus particulièrement tous les convertisseurs de ce mémoire. Les possibilités offertes par PSIM sont vastes et nous sommes impatients d'explorer d'avantage ses fonctionnalités dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Redressement non commandé

Chapitre II: Redressement non commandé

II.1. Introduction :

Les convertisseurs (AC-DC) souvent appelés redresseurs, sont des convertisseurs d'électronique de puissance qui permettent d'obtenir une tension continue (de valeur moyenne non nulle) fixe à partir d'une tension alternative monophasée ou triphasée.

II.2. Redresseur non commandé monophasé simple alternance : [2]

II.2.1. Redresseur non commandé monophasé simple alternance à charge résistive:

Les redresseurs mono-alternance représentent la forme la plus simple de convertisseur Statique. Nous utiliserons une seule diode, figure (II.1)

a. Montage :

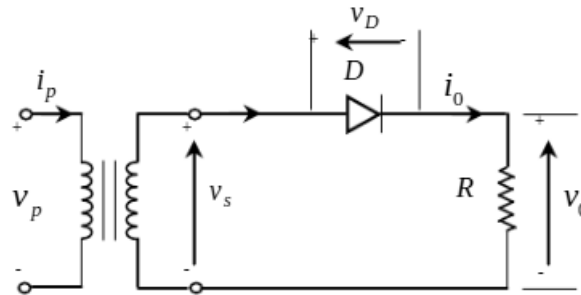


Figure (II.1). Redressement monophasé (PD1), charge résistive

On désigne par V_s la tension d'alimentation secondaire ($V_s = V_m \sin(\omega t)$)

$$\text{Ou } V_m = \sqrt{2}V_{rms} \quad (\text{II.1})$$

b. Analyse fonctionnement :

La diode D conduit quand la tension d'alimentation V_s est positive et supérieure à la tension de seuil aux bornes de la diode :

➤ Pour $0 < \omega t < \pi \rightarrow D$ est passante

$$V_c = V_m \sin(\omega t) \quad (\text{II.2})$$

➤ Pour $\pi < \omega t < 2\pi \rightarrow D$ est bloquée

$$V_c = 0 \quad (\text{II.3})$$

c. Formes d'ondes :

Les formes d'ondes théoriques du courant et de la tension sont représentées dans la Figure (II.2). La courbe de $i_c(t)$ a la même allure que la courbe ($V_c = R i_c$)

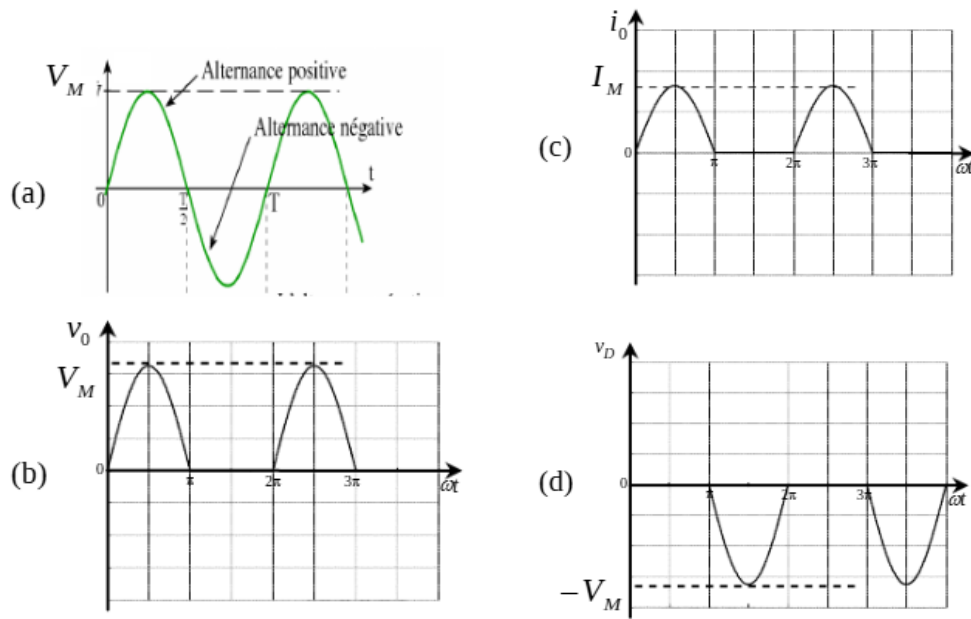


Figure (II.2) : (a) tension d'entrée, (b) tension de sortie, (c) courant de sortie, (d) tension de la diode

d. Valeur moyenne de la tension et le courant:

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^{2\pi} V_0 d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi} \quad (II.4)$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{V_m}{\pi R} \quad (II.5)$$

e. Valeur efficace de la tension et le courant :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V^2(\omega t) d(\omega t)} = \frac{V_m}{2} \quad (II.6)$$

f. Facteur de forme et Taux d'ondulation :

$$F = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{V_m}{2} \frac{\pi}{V_m} = \frac{\pi}{2} \quad (II.7)$$

$$\tau = \sqrt{F^2 - 1} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - 1} = 1.21 \quad (II.8)$$

h. Le rendement :

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} \quad (II.9)$$

$$\text{Ou } P_{Dc} = V_{Dc} \cdot I_{Dc} \quad (\text{II.10})$$

$$P_{rms} = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (\text{II.11})$$

II.2.2.Redresseur non commandé monophasé simple alternance à charge inductive :

a. Montage :

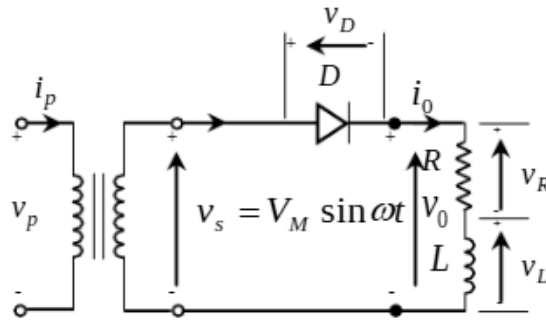


Figure (II.3) : Redressement non commandé mono-alternance sur charge inductive

b. Analyse fonctionnement :

➤ Pour D conductrice et en négligeant la chute de tension à travers D, on a :

$$V_c(\theta) = V_m \sin(\theta) \quad \text{Ou } \theta = \omega t, \text{ donc}$$

$$L \frac{di_c(\theta)}{d\theta} + R i_c(\theta) = V_m \sin(\theta) \quad (\text{II.12})$$

➤ La solution de cette équation est faite de deux termes :

1. Un terme transitoire représente la solution générale sans second membre :

$$L \frac{di_c(\theta)}{d\theta} + R i_c(\theta) = 0 \Rightarrow i_1(\theta) = K e^{\left(-\frac{\theta}{\tau}\right)} \quad (\text{II.13})$$

2. Un terme permanent c'est solution particulière avec second membre :

$$i_2(\theta) = \frac{V_m}{Z} \sin(\theta - \varphi) \quad (\text{II.14})$$

Cette solution est le régime définitif qu'on obtient théoriquement ou bout d'un temps infini, le régime transitoire ayant alors totalement disparu

$$\text{Avec } Z = \sqrt{(R)^2 + (L\omega)^2}, \tau = \frac{L\omega}{R}, \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{L\omega}{R}\right) \text{ et } \theta = \omega t$$

$$\text{On a donc la solution générale : } i_c(\theta) = \frac{V_m}{Z} \sin(\theta - \varphi) + K e^{\left(-\frac{\theta}{\tau}\right)} \quad (\text{II.15})$$

Fixons la constante arbitraire $i = 0$ Pour $\theta = 0$

$$0 = K - \frac{V_m}{Z} \sin(\varphi) \Rightarrow K = \frac{V_m}{Z} \sin(\varphi) \quad (\text{II.16})$$

$$i_{ch}(\theta) = \frac{V_m}{Z} \left[\sin(\theta - \varphi) + \sin(\varphi) e^{\left(-\frac{\theta}{\tau}\right)} \right] \quad (\text{II.17})$$

Ou φ est le déphasage entre tension et courant

c. Formes d'ondes :

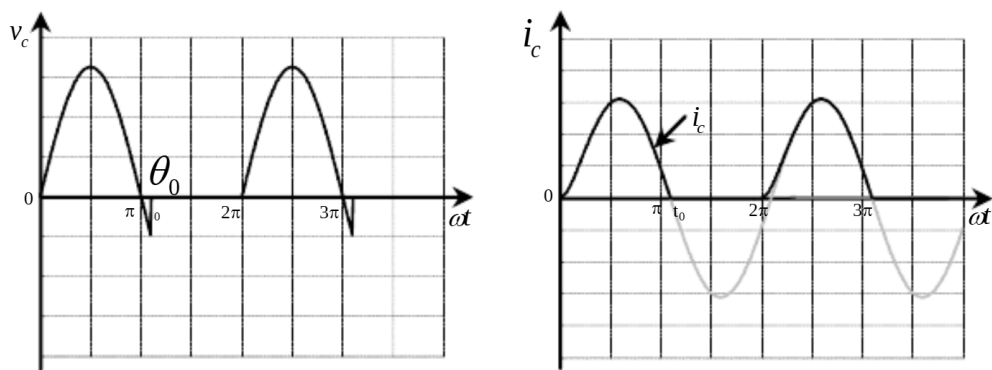


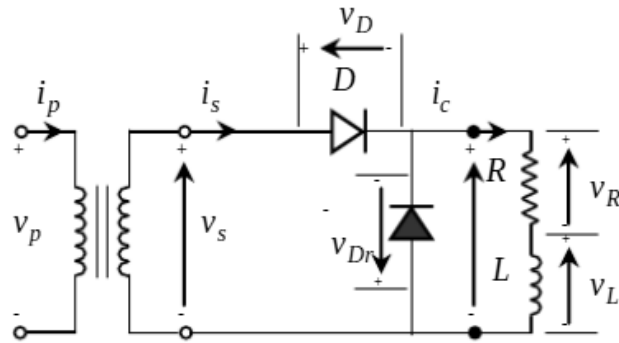
Figure (II.4) : formes d'ondes de V_c et i_c pour une charge RL

d. Valeur moyenne de la tension :

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\theta_0} V_m \sin \omega t. d\omega t = \frac{V_m}{2\pi} [1 - \cos(\theta_0)] \quad (\text{II.18})$$

II.2.3. Avec diode de roue libre:

Une diode de roue libre fournit un chemin pour la continuité du courant de la charge inductive. Ainsi, il lisse la charge et améliore le facteur de puissance d'entrée et aussi de protéger la diode de redressement.

a. Montage :Figure (II.5) : charge RL avec D_{RL} **b. Analyse fonctionnement :**

- Pour $0 < \theta < \pi$:

La diode D étant conductrice alors que la diode D_{RL} est bloquée, on a

$$V_c(\theta) = L \frac{di_c(\theta)}{dt} + R i_c(\theta) = V_M \sin(\theta)$$

$$\text{On a donc : } i_c(\theta) = \frac{V_M}{Z} \sin(\theta - \varphi) + K e^{\left(\frac{\theta}{\tau}\right)}$$

$$\text{Avec } Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}; \tau = \frac{L\omega}{R}, \varphi = \text{Arctg}\left(\frac{L\omega}{R}\right) \text{ et } \theta = \omega t \quad (\text{II.19})$$

$$\text{Pour } \theta = 0 \text{ On a } i_c(0) = I_0 = \frac{V_M}{Z} \sin(-\varphi) + K e^{\left(\frac{0}{\tau}\right)} \rightarrow K = I_0 + \frac{V_M}{Z} \sin(\theta) \quad (\text{II.20})$$

$$\text{Donc } i_c(\theta) = \frac{V_M}{Z} \sin(\theta - \varphi) + \left(I_0 + \frac{V_M}{Z} \sin(\varphi)\right) e^{-\left(\frac{\theta}{\tau}\right)} \quad (\text{II.21})$$

- Pour $\pi < \theta < 2\pi$

La diode D_{RL} étant conductrice alors que la diode D est bloquée, on a :

$$V_c(\theta) = L \frac{di_c(\theta)}{dt} + R i_c(\theta) = 0$$

$$\text{On a donc : } i_c(\theta) = K e^{\left(\frac{\theta}{\tau}\right)} \text{ avec } \tau = \frac{L\omega}{R} \text{ et } \theta = \omega t \quad (\text{II.22})$$

$$\text{Pour } \theta = \pi \text{ on a } i_c(\pi) = I_\pi = K e^{\left(\frac{\pi}{\tau}\right)} \rightarrow K = I_\pi e^{\left(\frac{\pi}{\tau}\right)} \quad (\text{II.23})$$

$$\text{Donc } i_c(\theta) = I_\pi e^{-\left(\frac{\theta-\pi}{\tau}\right)} \quad (\text{II.24})$$

le phénomène est périodique, $i_c(\theta)$ l'intensité doit retrouver la valeur I_0 à la fin de période.

c. Formes d'ondes des différentes grandeurs :

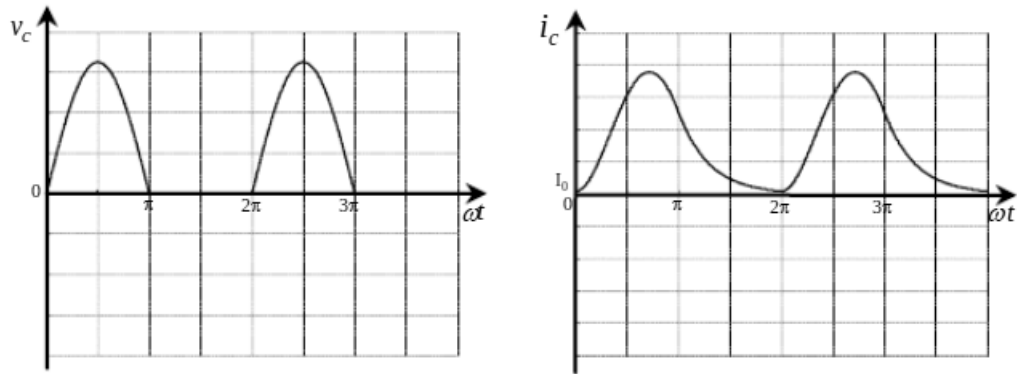


Figure (II.6) : Forme d'ondes de V_c et i_c pour une charge RL avec DRL

d. Tension et courant moyenne :

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} \quad (\text{II.25})$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{II.26})$$

II.2.4. Avec charge capacitive :

a. Montage :

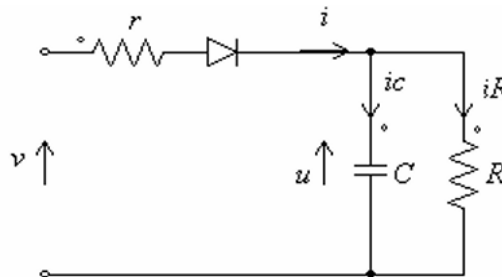


Figure (II.7): Redresseur monophasé non commandé avec charge capacitive

b. Analyse de fonctionnement :

Le condensateur C fournit le filtrage de base de tension redressé où les résistances R sont désormais disponibles, On étudie le régime établi :

- Tant que la tension d'alimentation V est inférieure à la tension u aux bornes du condensateur, la diode est bloquée. Elle devient passante à l'instant $t = t_0$ ou V devient

supérieur à u .

$$V_m \sin \omega t_0 = (u)_{t_0} \quad (\text{II.27})$$

Pour $t > t_0$,

$$u = V_m \sin \omega t \quad (\text{II.28})$$

$$i_R = \frac{V}{R} = \frac{V_m}{R} \sin \omega t \quad (\text{II.29})$$

$$i_c = C \frac{du}{dt} = c\omega V_m \cos \omega t \quad (\text{II.30})$$

$$i = V_m \left(\frac{\sin(\omega t)}{R} + C\omega \cos(\omega t) \right) \quad (\text{II.31})$$

$$Z = \sqrt{\frac{R^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2}} \quad (\text{II.32})$$

$$I_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t = \frac{V_m}{Z} \frac{1 - \cos(\theta_c)}{2\pi} \quad (\text{II.33})$$

La conduction cesse quand i s'annule et tend vers une valeur négative, donc

pour $t = t_1$ tel que : $\sin(\omega t_1) = -RC \cos(\omega t_1)$

Durant l'intervalle $[t_1, T + t_0]$, le condensateur se décharge dans la résistance et u atteint la

valeur u_{t_0} pour $t = T + t_0$.

c. Formes d'ondes :

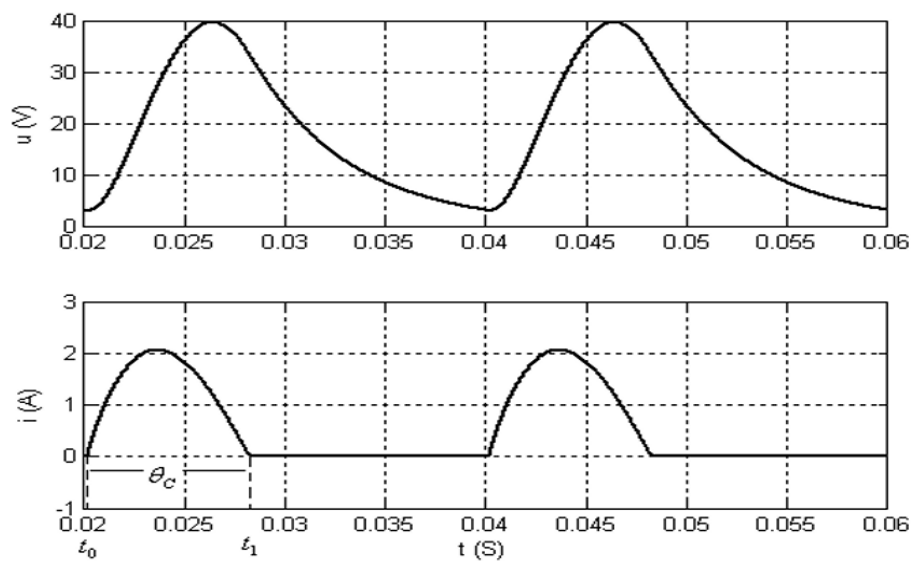


Figure (II.8): courant et tension de charge.

II.2.5. L'équation de série de Fourier de la tension de sortie:

$$V_c(\omega t) = \frac{V_m}{\pi} + \frac{V_m}{2} \sin(\omega t) - \frac{2V_m}{3\pi} \cos(2\omega t) - \frac{2V_m}{15\pi} \cos(4\omega t) - \frac{2V_m}{35\pi} \cos(6\omega t) \dots \dots \dots \quad (\text{II.34})$$

II.3. Redressement monophasé non commandé double alternance (pont de GRAETZ) : [2]

Un redresseur monophasé à onde complète est un dispositif qui redresse une tension alternative négative d'entrée monophasée et maintient une tension alternative positive, La fréquence en sortie du redresseur est alors le double de la fréquence d'entrée.

Lorsque un groupe de diodes sont à cathodes communes, l'élément susceptible de conduire est celui qui a le potentiel d'anode le plus élevé.

Lorsque un groupe de diodes sont à anodes communes, l'élément susceptible de conduire est celui qui a le potentiel de cathode le plus faible.

II.3.1. Redressement monophasé non commandé double alternance avec charge résistive :

a. Montage

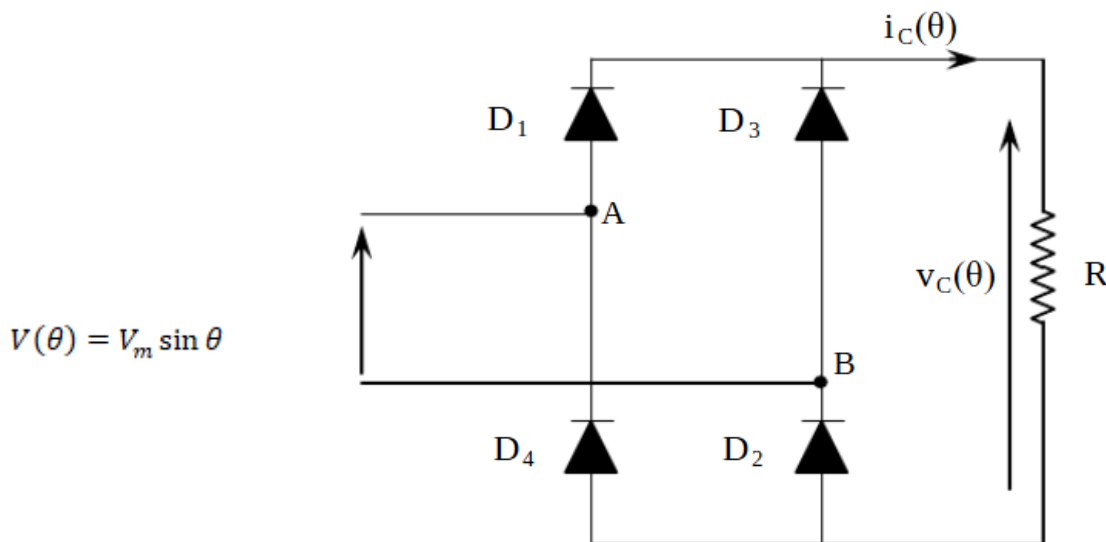


Figure (II.9): Redressement non commandé double-alternance sur charge résistive

b. Analyse du fonctionnement :

On effectue généralement un changement de variable temps, angle: tel que $\theta = \omega t$.

- Pour $0 < \omega t < \pi$: D_1 et D_2 sont conductrices car la polarité de la borne A est celle de B est négative, d'où :

$$V_c(\theta) = V(\theta) = V_m \sin \theta \quad (\text{II.35})$$

Et

$$i_c(\theta) = \frac{V_c(\theta)}{R} = \frac{V_m}{R} \sin \theta \quad (\text{II.36})$$

Remarque: $i_c(\theta)$ et $V_c(\theta)$ ont la même forme.

➤ Pour $\pi < \omega t < 2\pi$: La polarité de la borne A devienne négative et la polarité de la borne B devienne positive, donc D_3 et D_4 conduisent et D_1 et D_2 se bloquent, d'où :

$$V_c(\theta) = -V(\theta) = -V_m \sin \theta \quad (\text{II.37})$$

Et

$$i_c(\theta) = -\frac{V_c(\theta)}{R} = -\frac{V_m}{R} \sin \theta \quad (\text{II.38})$$

c. Formes d'ondes des différentes grandeurs

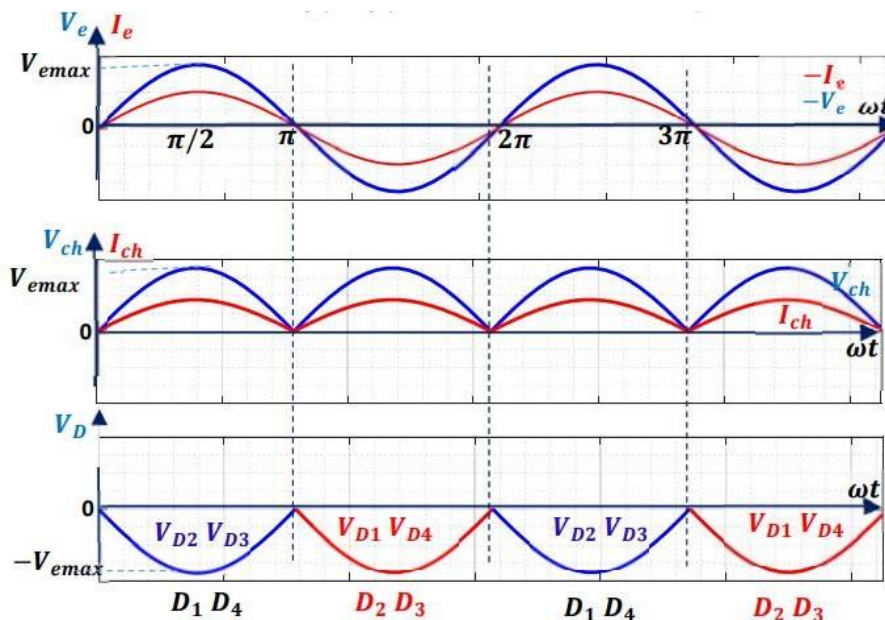


Figure (II.10): Courbes courant et tension d'un redresseur non commandé à pont complet

d. L'étude d'un montage porte sur le calcul de :

➤ Valeur moyenne de la tension redressée :

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} v_m \sin(\omega t) dt = \frac{2V_m}{\pi} \quad (\text{II.39})$$

➤ Valeur efficace de la tension :

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (II.40)$$

➤ Valeur moyenne du courant :

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{2V_m}{\pi R} \quad (II.41)$$

➤ Valeur efficace du courant :

$$I_{rms} = \frac{v_{rms}}{R} = \frac{V_m}{\sqrt{2} R} \quad (II.42)$$

➤ Facteur de forme :

$$F = \frac{v_{rms}}{V_{dc}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{2 V_m} = \frac{\pi}{2 \sqrt{2}} \quad (II.43)$$

➤ Taux d'ondulation :

$$\tau = \frac{\pi}{2} \quad (II.44)$$

II.3.2. Avec charge inductive:

Pour lisser le courant on place une bobine d'inductance L en série avec la charge.

La charge est par exemple un moteur à courant continu de f.é.m. et de résistance interne

a. Montage :

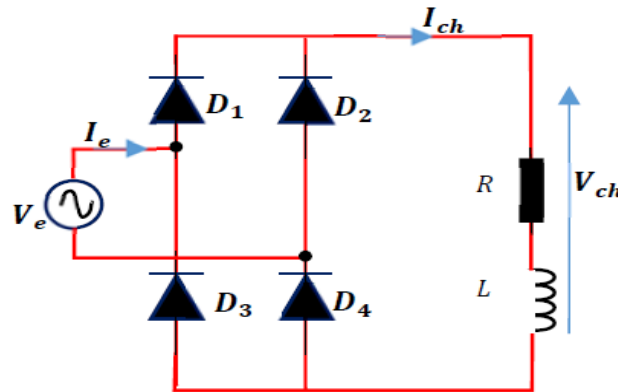


Figure (II.11) : Redressement double-alternance sur charge RL

b. Formes d'ondes : les formes d'ondes des paramètres décrivant le fonctionnement du montage avec une charge inductive sont représentées à la figure (II.12)

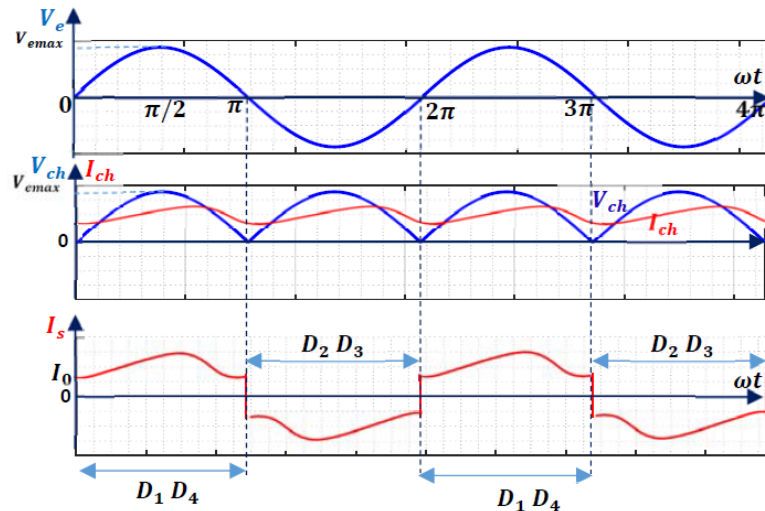


Figure (II.12) : Courbes courant et tension d'un redresseur à deux impulsions non commandé à charge inductive

II.3.3. Analyse harmonique de la tension redressée :

La tension est périodique de période $\frac{T}{2}$ pulsation (2ω). De plus nous sommes dans l'hypothèse où l'intensité $i(t)$ ne s'annule jamais. on peut calculer les éléments de la décomposition en série de Fourier:

$$V_c = \frac{2v_m}{\pi} + \frac{2v_m}{\pi} \left(\frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \frac{2}{35} \cos 6\omega t \dots \right) \quad (\text{II.45})$$

II.4.Redressement triphasé non commandé [3]

II.4.1. Redressement triphasé non commandé simple alternance P3 (Parallèle 3 phase):

a. Montage :

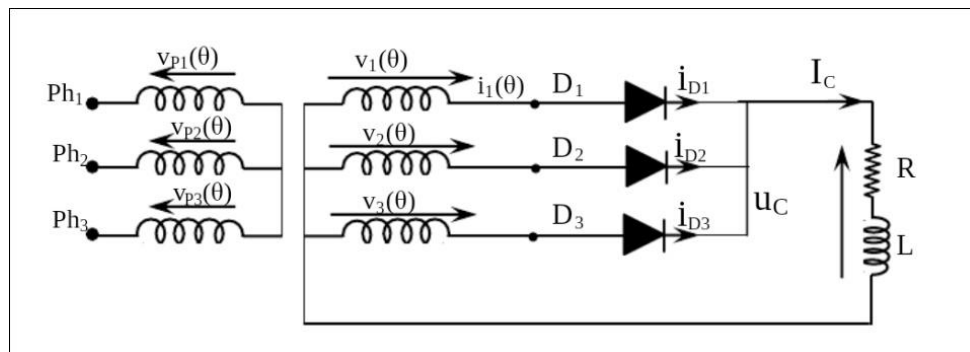


Figure (II.13) : Redresseur triphasé simple alternance tous diodes P3

La charge est constituée d'une résistance R et d'une inductance L de forte valeur que l'on assimile à Un générateur de courant I_C , Le réseau de tensions secondaires du transformateur sera noté de la façon suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 = V_m \sin(\theta) \\ V_2 = V_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_3 = V_m \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{array} \right. \quad (\text{II.46})$$

b. Analyse du fonctionnement :

Dans ce montage la diode en conduction est celle dont l'anode est reliée à la plus positive des tensions du générateur, les autres sont bloquées. Les intervalles de conduction sont suivants:

Tableau (II.1):Résumé de Les intervalles de conduction montage P3

Intervalle	Diode en conduction	Diodes bloquées	Tension de sortie uC	Tension aux bornes de D1	Courant i_1
$\left[\frac{\pi}{6} ; \frac{5\pi}{6} \right]$	D_1	D_2 et D_3	V_1	0	I_C
$\left[\frac{5\pi}{6} ; \frac{3\pi}{2} \right]$	D_2	D_1 et D_3	V_2	$V_1 - V_2$	0
$\left[\frac{3\pi}{2} ; \frac{13\pi}{6} \right]$	D_3	D_1 et D_2	V_3	$V_1 - V_3$	0
$\left[\frac{13\pi}{6} ; \frac{17\pi}{6} \right]$	D_1	D_2 et D_3	V_1	0	I_C

c. Formes d'ondes des différentes grandeurs :

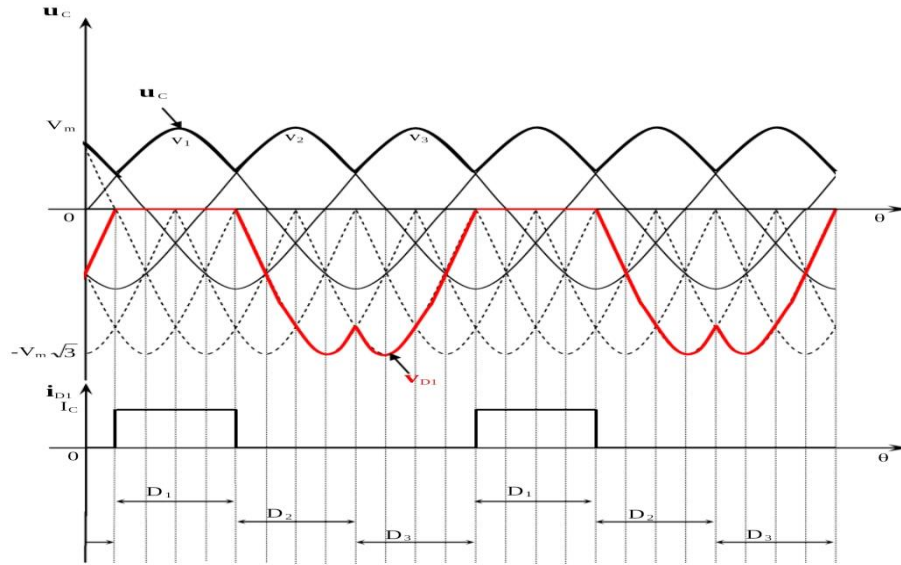


Figure (II.14): Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur P3

d. Valeur moyenne de la tension :

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

- Valeur moyenne de la tension de sortie V_c . [2]

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} V_1(\theta) d(\theta) \quad \text{avec} \quad V(\theta) = V_m \sin(\theta) \quad (\text{II.47})$$

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} V_m \sin(\theta) d(\theta) \quad (\text{II.48})$$

$$V_{dc} = \frac{3V_m}{2\pi} (-\cos(\theta)) \Big|_{\pi/6}^{\pi/2} \quad (\text{II.49})$$

$$V_{dc} = \frac{3V_m}{2\pi} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \quad (\text{II.50})$$

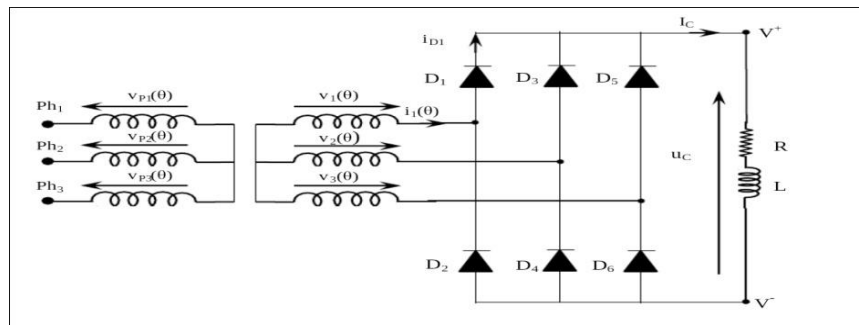
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} = 0,827V_m \quad (\text{II.51})$$

e. Série de Fourier

$$V_c = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} + \frac{3\sqrt{3}V_m}{8\pi} \cos 3\omega t - \frac{3\sqrt{3}V_m}{35\pi} \cos 6\omega t - \frac{3\sqrt{3}V_m}{80\pi} \cos 9\omega t - \dots \quad (\text{II.52})$$

II.4.2. Redressement triphasé non commandé double alternance tous diodes PD3 :

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

a. Montage :**Figure (II.15) :** Triphasé double alternance tous diodes PD3

La charge est constituée d'une résistance R et d'une inductance L de forte valeur que l'on assimile à Un générateur de courant I_C , Le réseau de tensions secondaires du transformateur sera noté de la façon suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 = V_m \sin(\theta) \\ V_2 = V_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) V_3 = V_m \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{array} \right. \quad (II.53)$$

b. Analyse du fonctionnement :

La tension de sortie V_c est alors donnée par : $V_c = V^+(\theta) - V^-(\theta)$

Cette relation permet de prédéterminer ce que doit être la forme de la tension de sortie $V_c(\theta)$ Ainsi,

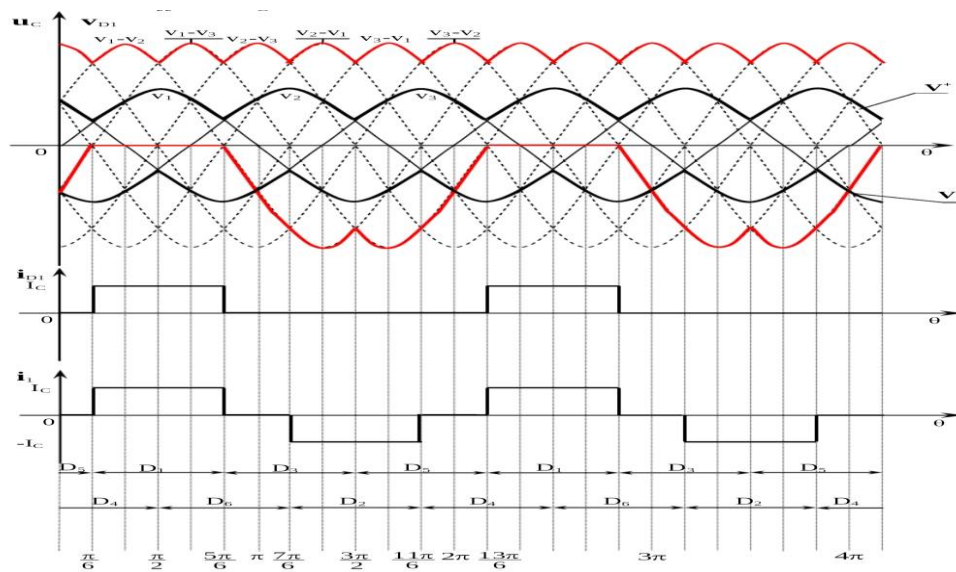
Dans l'intervalle $[\frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{2}]$, la tension $V^+(\theta) = V_1(\theta)$ et $V^-(\theta) = V_2(\theta)$ donc :

$V_c(\theta) = U_{12}(\theta)$ sur cette intervalle

En opérant par intervalles successifs, il est alors possible d'établir le tableau suivant:

Tableau (II.2):Résumé des intervalles de conduction montage (PD3)

Intervalle	Diodes en Conductions	Tension de sortie U_C	Tension aux bornes de D1	Courant i_{D1}	Courant i_l
$[\frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{2}]$	D1 et D4	$V_1 - V_2 = U_{12}$	0	I_C	I_C
$[\frac{\pi}{2}; \frac{5\pi}{6}]$	D1 et D6	$V_1 - V_3 = U_{13}$	0	I_C	I_C
$[\frac{5\pi}{6}; \frac{7\pi}{6}]$	D3 et D6	$V_2 - V_3 = U_{23}$	$V_1 - V_2$	0	0
$[\frac{7\pi}{6}; \frac{3\pi}{2}]$	D3 et D2	$V_2 - V_1 = U_{21}$	$V_1 - V_2$	0	$-I_C$
$[\frac{3\pi}{2}; \frac{11\pi}{6}]$	D5 et D2	$V_3 - V_1 = U_{31}$	$V_1 - V_3$	0	$-I_C$
$[\frac{11\pi}{6}; \frac{13\pi}{6}]$	D5 et D4	$V_3 - V_2 = U_{32}$	$V_1 - V_3$	0	0

c. Formes d'ondes des différentes grandeurs :**Figure (II.16):** Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur PD3 toutes diodes.**d. Valeur moyenne de la tension de sortie V_c :**

La relation $V_c(\theta) = V^+(\theta) - V^-(\theta)$ permet aussi de calculer la valeur moyenne de la tension V_c

$$\text{On a } V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T V_c(\theta) d\theta = \frac{1}{T} \int_0^T V^+(\theta) d\theta - \frac{1}{T} \int_0^T V^-(\theta) d\theta \quad (\text{II.54})$$

$$\text{Avec } \frac{1}{T} \int_0^T V^+(\theta) d\theta = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \text{ et } \frac{1}{T} \int_0^T V^-(\theta) d\theta = -\frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \quad (\text{II.55})$$

Donc $V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} - \left(-\frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi}\right)$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad (\text{II.56})$$

e. Etude des courants dans les diodes (exemple D1) :

$$I_{D1\max} = I_c$$

$$I_{D1\text{moy}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_c d\theta = \frac{I_c}{2\pi} \left[\theta\right]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} = \rightarrow I_{D1\text{moy}} = \frac{I_c}{3} \quad (\text{II.57})$$

$$I_{D1\text{eff}} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad (\text{II.58})$$

f. Sériér de Fourier :

$$V_c = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=0,1,\dots}^{\infty} \frac{6\sqrt{3}V_m}{\pi} (-1)^{n+1} \frac{1}{36n^2-1} \cos n\omega t \quad (\text{II.59})$$

$$a_n = \frac{6\sqrt{3}}{\pi} V_m (-1)^{n+1} \frac{1}{36n^2-1} \quad (\text{II.60})$$

$$V_c = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=0,1}^{\infty} a_n \cos n\omega t \quad (\text{II.61})$$

II.5.Partie de simulation et implémentations pratiques

II.5. Partie de simulation et implémentations pratiques :

Cette partie est concernée par la simulation avec le logiciel Psim des différents circuits des convertisseurs à base des diodes monophasé et triphasé avec des charges résistives , résistives-inductives et par la suite comparée pratiquement.

II.5.1. Simulation par PSIM et réalisation pratique sur monophasé simple alternance

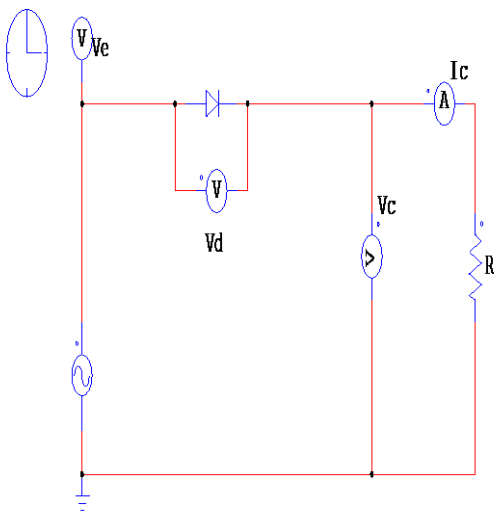
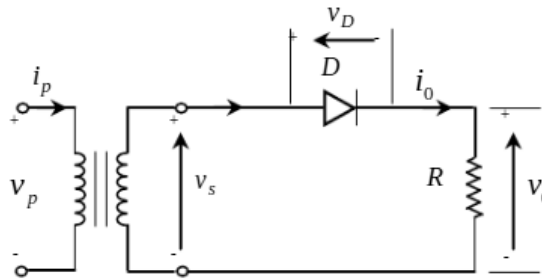
II.5.1.1.charge résistive :

a. EQUIPEMENT REQUIS :

1.	EM-3310-1E	MODULE D'ALIMENTATION D'ÉNERGIE TRIPHASÉ	× 1
2.	PE-5310-2B	AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL	× 1
3.	PE-5310-2C	TRANSDUCTEUR DE COURANT	× 1
4.	PE-5310-3A	RMS MÈTRE	× 1
5.	PE-5310-3B	WATTMÈTRE (0.3 W-30 KW)	× 1
6.	PE-5310-3C	UNITÉ DE RÉSISTANCE DE CHARGE	× 1
7.	PE-5310-3E	UNITÉ DE CHARGE INDUCTIVE	× 1
8.	PE-5310-5A	DIODES DE PUISSANCE	× 1
9.	PE-5310-5B	FUSIBLES	× 1
10.	PE-5340-3A	TRANSFORMATEUR DE SÉPARATION	× 1
11.	EM-3380-1A	TABLE D'EXPÉRIENCE	× 1
12.	EM-3380-2B	ARMATEUR EXPÉRIMENTALE	× 1
13.	EM-3390-1A	SUPPORT DE FILS DE CONNEXION	× 1
14.	EM-3390-3A	ACCESSOIRE DE FILS DE CONNEXION	× 1
15.	EM-3390-4A	DISPOSITIF DE SÉCURITÉ SUR LA PRISE ÉLECTRIQUE	× 1
16.	OSCILLOSCOPE À	MÉMOIRE NUMÉRIQUE(DSO)	× 1

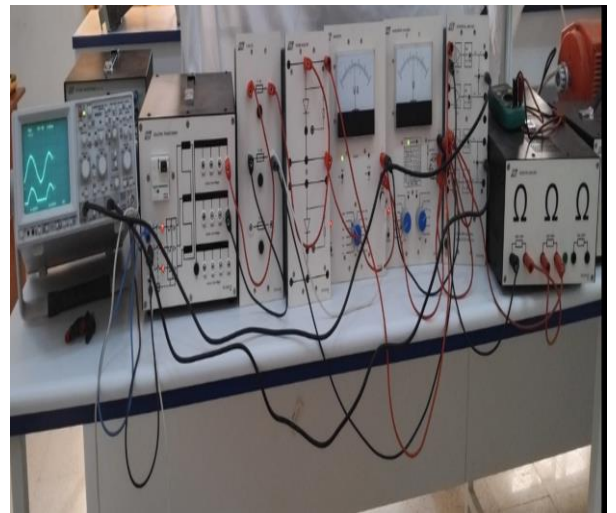
b. Montage :

Cette réalisation est effectuée en utilisant une seule diode avec charge résistive de $200\ \Omega$. La tension d'alimentation est 350V.



(b)

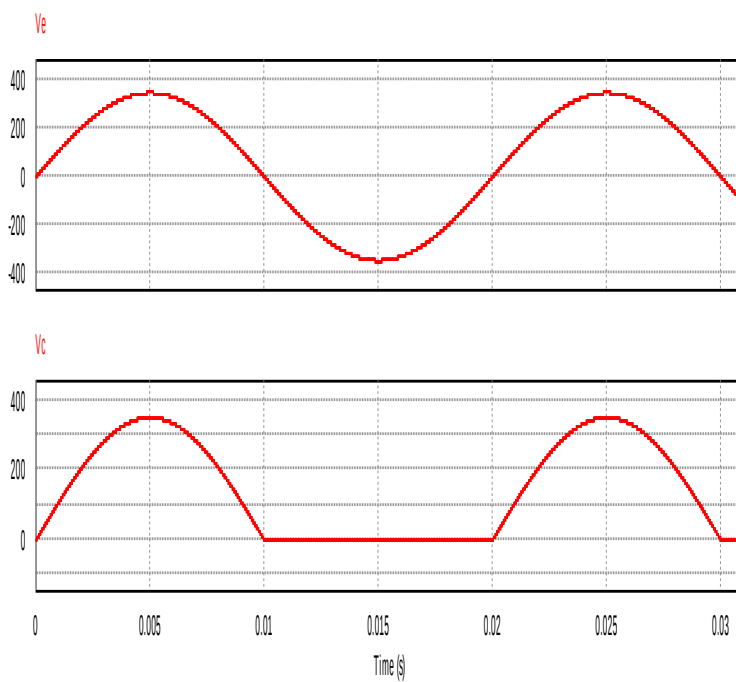
(a).



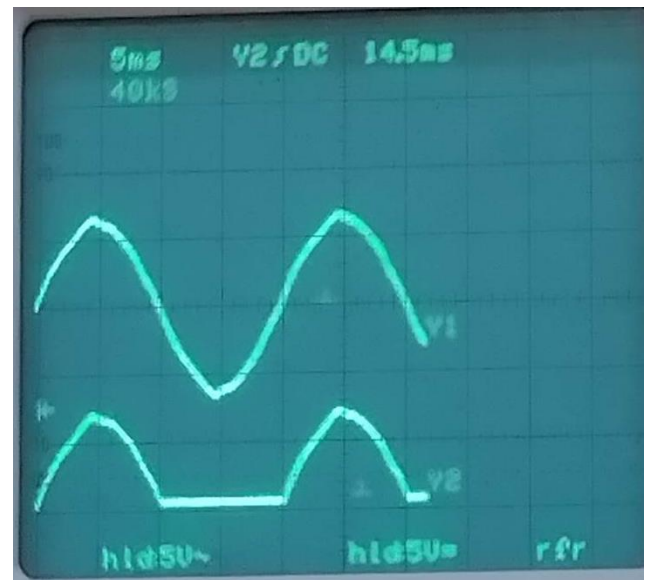
(c)

Figure (II.17) : Circuit de redresseur monophasé-charge résistive: (a) théorique, (b) simulation par PSIM, (c) et réalisation pratique

c. Résultats de simulation et la pratique:

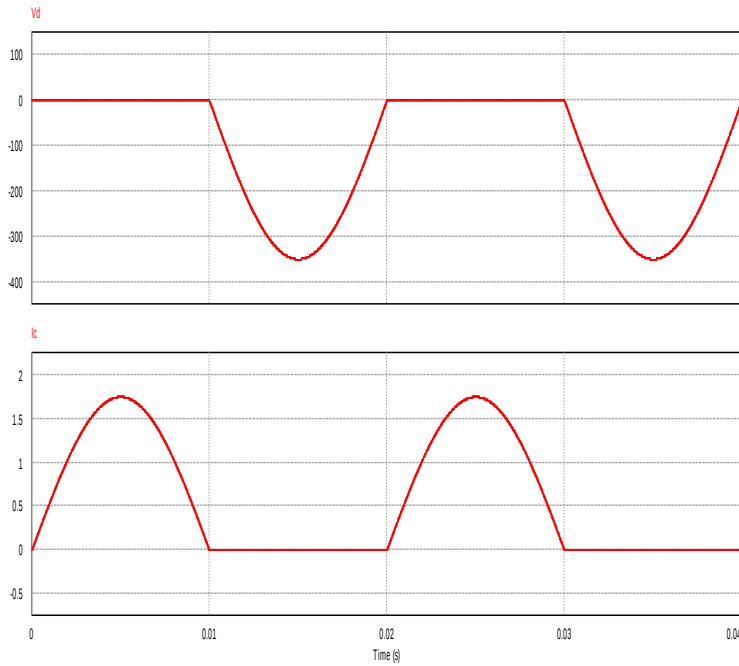


(a)

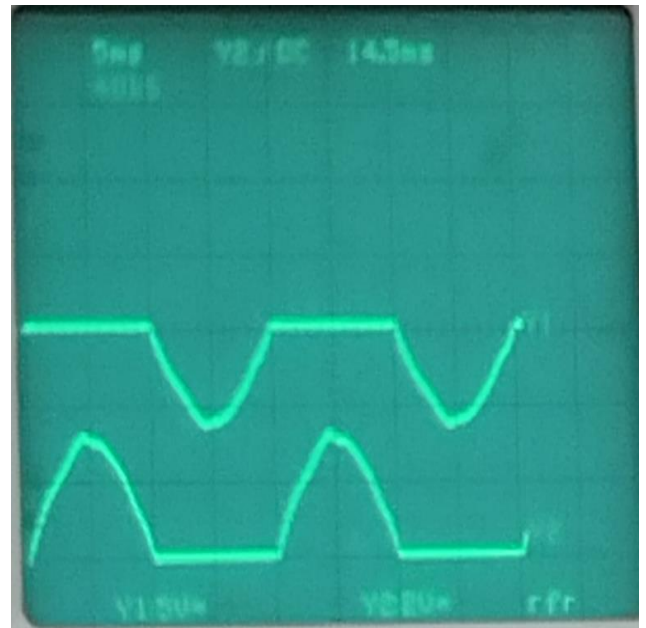


(b)

Figure (II.18) : Tensions d'entrée et de sortie respectivement de P1 avec charge résistive :(a) par simulation (b), par pratique



(a)



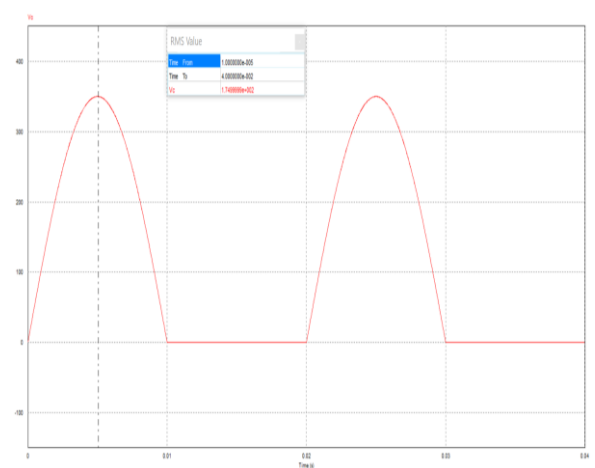
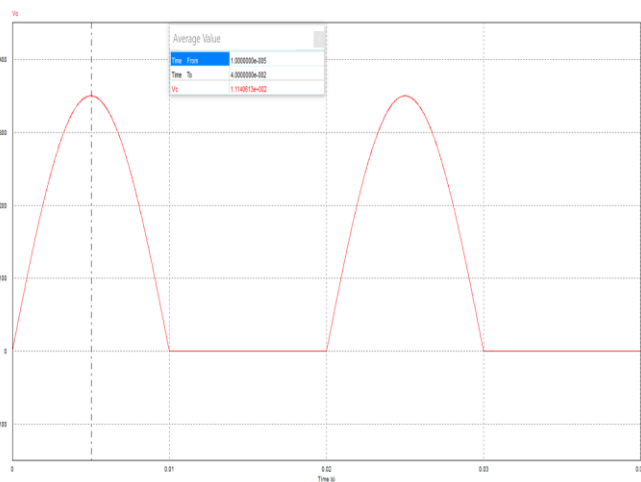
CH1 5V 5 ms

CH2 2V 5 ms

(b)

Figure (II.19) : Tensions inverse et courant de charge: (a) simulation par Psim (b) par pratique

d. Valeurs moyennes et efficaces :



On a $V_{max} = 350\text{ V}$

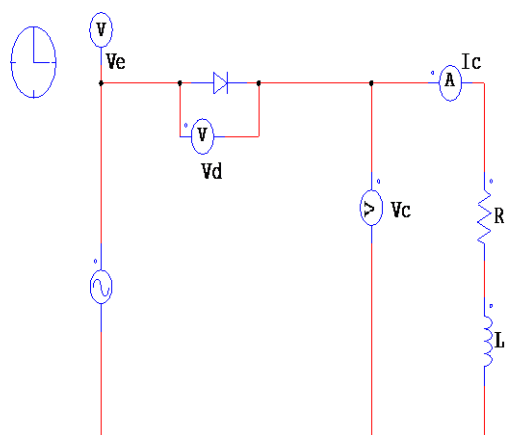
$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = \frac{350}{3.14} = 111.46\text{V}$$

et

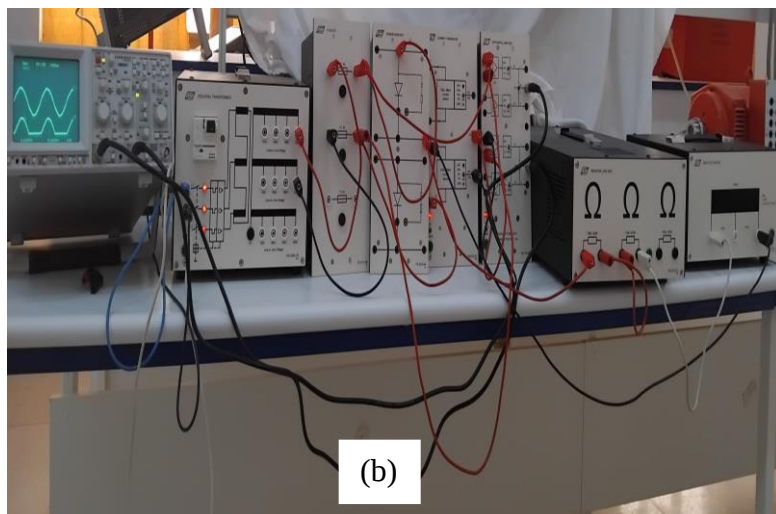
$$V_{rms} = \frac{V_m}{2} = \frac{350}{2} = 175\text{V}$$

II.5.1.2. charge résistive_inductive:

a. Montage :



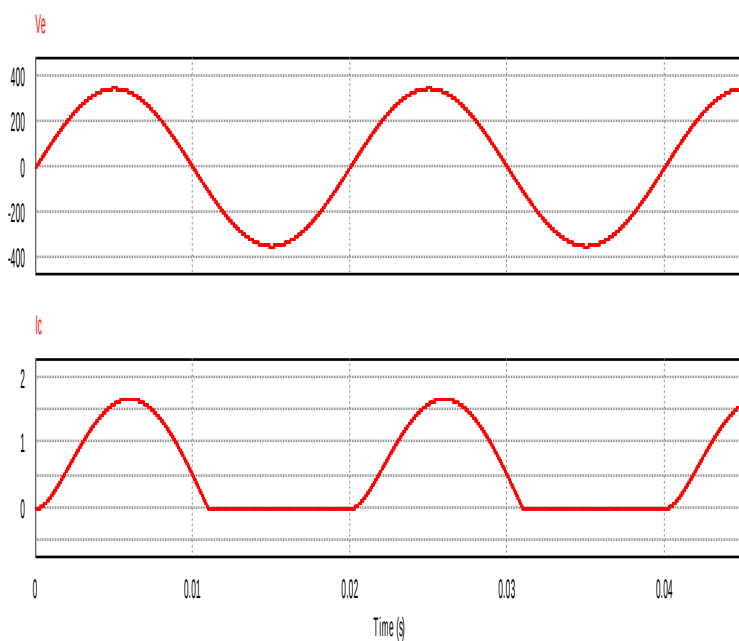
(a)



(b)

Figure (II.20) : Circuit de simulation(a) et pratique (b), P1 avec charge inductive

b. Résultats de simulation et la pratique:



(a)

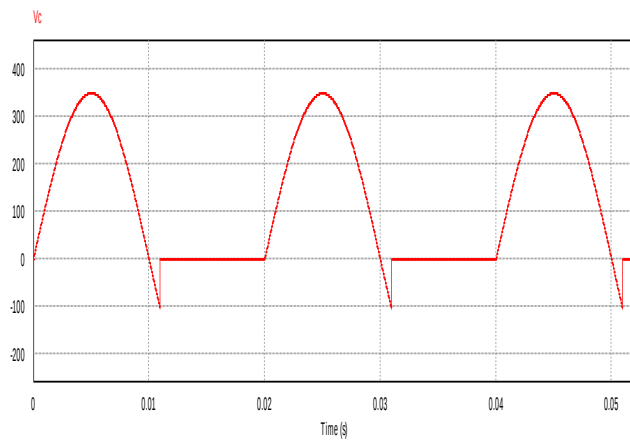


CH1 5V 5 ms

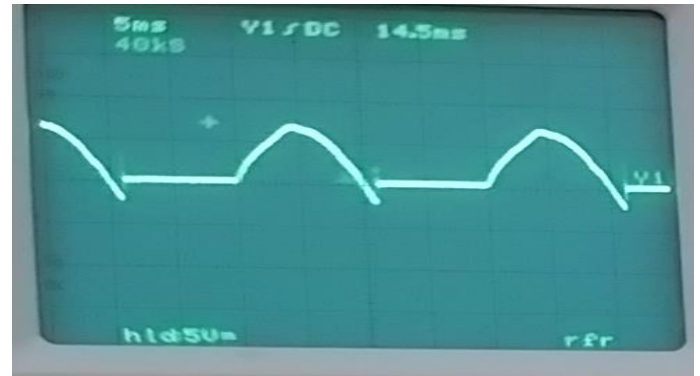
CH2 2V 5 ms

(b)

Figure (II.21) : Tensions d'entrée et courant du P1 avec charge inductive :(a) simulation par psim, (b) par pratique



(a)

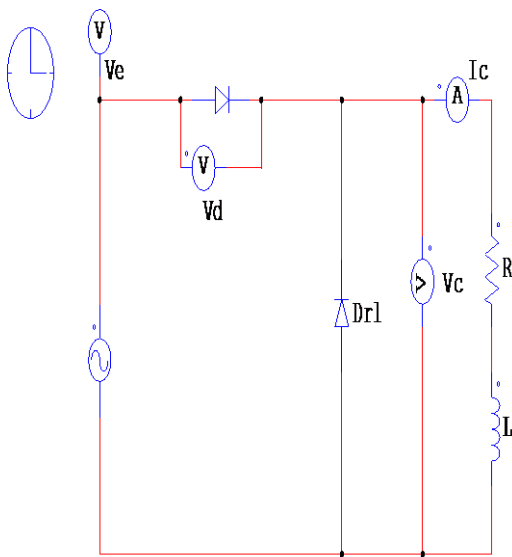


(b)

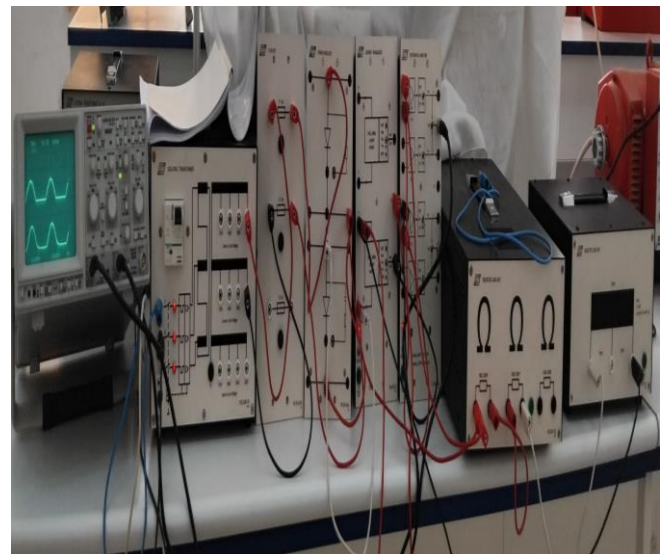
Figure (II.22): Tension de sortie du P1 avec RL, (a) simulation par Psim, (b) par pratique

II.5.1.3. Charge résistive_ inductive avec diode de roue libre:

a. Montage :



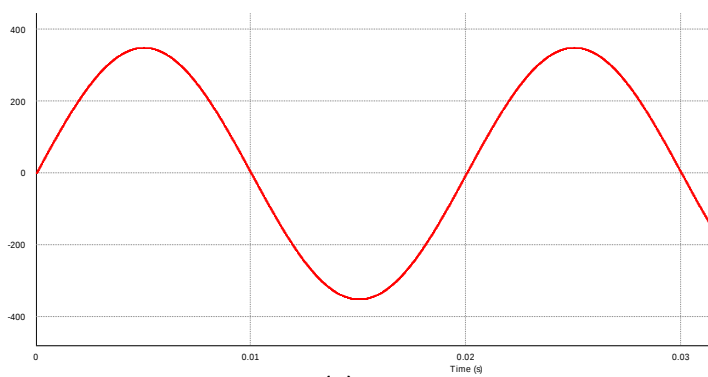
(a)



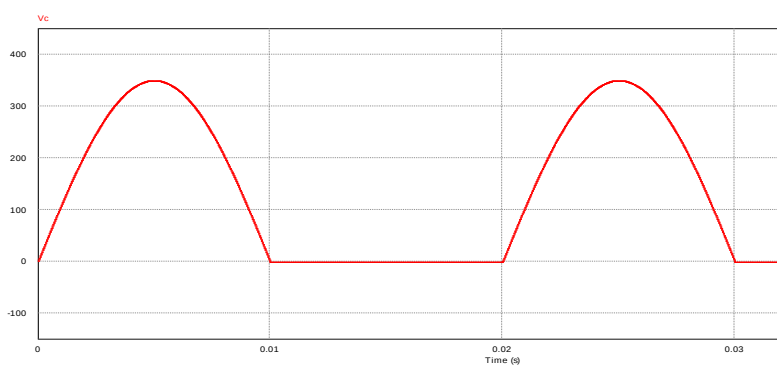
(b)

Figure (II.23) : Circuit de simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b), redresseur monophasé-charge RL avec D_{RL}

b. Résultats de simulation et la pratique :

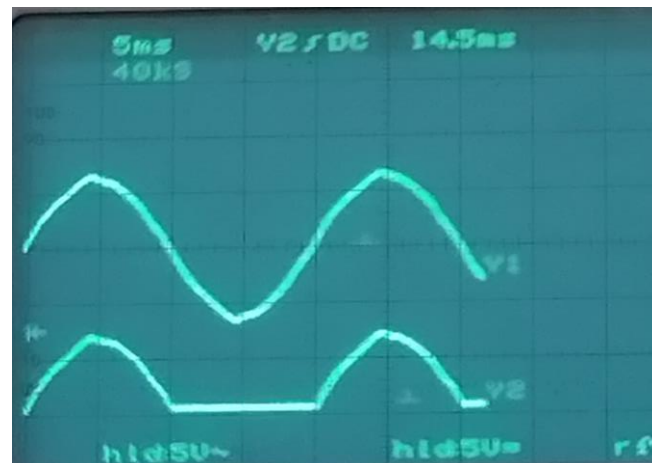


(a)



(b)

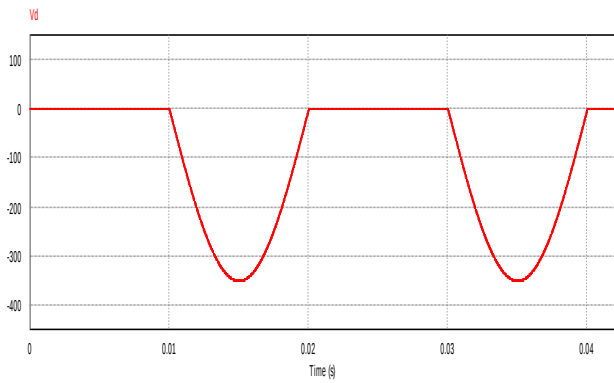
Figure (II.24) : Tensions d'entrée (a) et de sortie (b) ,par simulation du P1 avec charge RL et D_{RL}



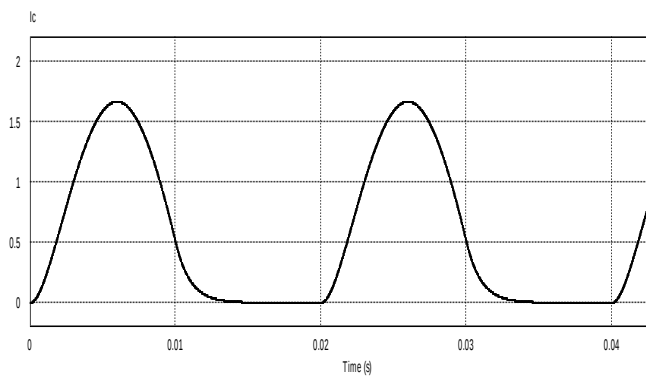
CH1 5V 5 ms

CH2 5V 5 ms

Figure (II.25) : Tensions d'entrée (CH 1) et de sortie (CH2) ,du P1 avec D_{RL}

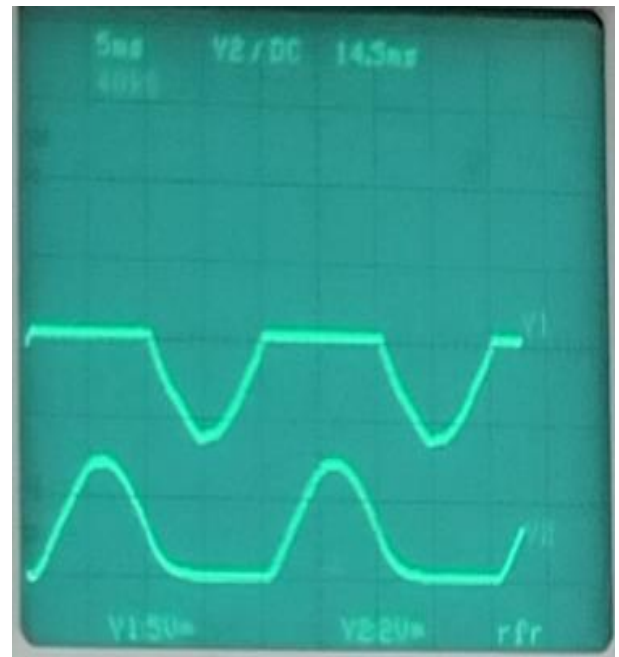


(a)



(b)

Figure (II.26): Tensions inverse (a) et courant de charge (b), par simulation, du P1 avec D_{RL}



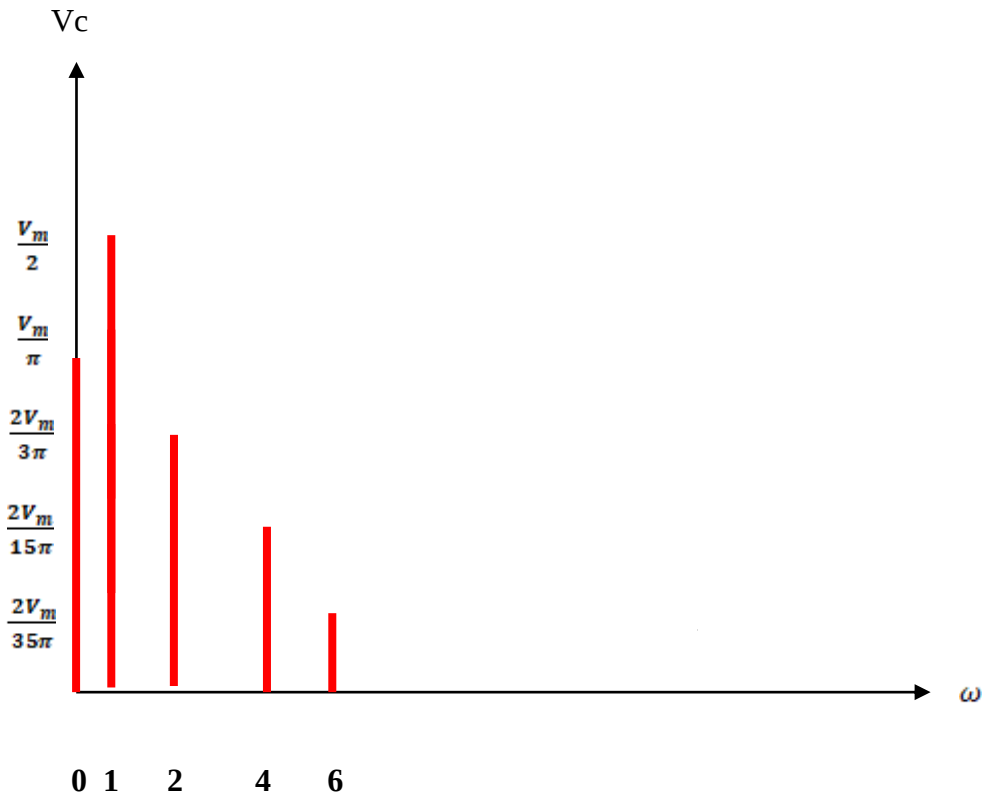
CH1 5V 5 ms

CH2 2V 5 ms

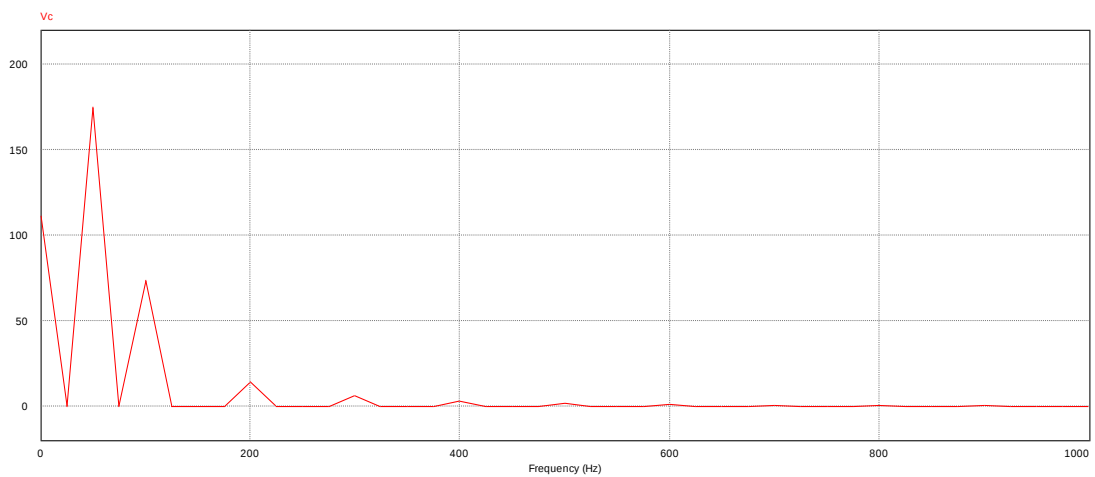
Figure (II.27) : Tensions inverse (CH 1) et courant de charge (CH2), du P1 avec D_{RL}

II.5.1.4. Série de Fourier :

$$V_c(\omega t) = \frac{V_m}{\pi} + \frac{V_m}{2} \sin(\omega t) - \frac{2V_m}{3\pi} \cos(2\omega t) - \frac{2V_m}{15\pi} \cos(4\omega t) - \frac{2V_m}{35\pi} \cos(6\omega t) \dots\dots\dots$$



(a)



(b)

Figure (II.28) : Spectre de l'analyse de Série de Fourier, (a) théorie et (b) par simulation

II.5.1.5. Interprétation :

Dans cette expérience, un redressement simple alternance à diode est alimenté par une tension alternative du réseau 350V :

Dans le premier essai, la tension obtenue à la sortie alimente une charge purement résistive de valeur $200\ \Omega$, alors concernant la simulation de la tension, la valeur maximale est 350V fixe et cette dernière sera comparée pratiquement. On a 1 carreau qui représente 5V à l'oscilloscope donne comme signal 7V et cette tension est multipliée par le gain de notre amplificateur qui est 50 ainsi la tension obtenue maximale est égale $50 \times 7 = 350V$ approximativement. Pour la lecture de la valeur du courant, on a visualisé par Psim la valeur maximale de 1.74A. Cette valeur est comparée pratiquement avec 1 carreau qui donne 2 A à l'oscilloscope c'est-à-dire on a comme valeur maximale approximative 3.6A et puisque l'amplificateur du courant est ajusté à gain de 2A donc le courant maximal réel est $3.6 \div 2 = 1.8A$. Donc on voit clairement que la pratique valide parfaitement la simulation par Psim.

Dans le deuxième essai, on a inséré une inductance de valeur 200 mH en série avec la résistance, ensuite une simulation a été effectuée par le logiciel Psim .On constate qu'il y a une partie négative qui est due à l'inductance, quand au courant il se prolonge au delà de π .

Pour éliminer la discontinuité du courant, une diode de roue libre est insérée en parallèle avec la charge RL figure (II.23). L'insertion de la diode de roue libre a empêché l'apparition de la partie négative à la sortie de la tension. Quand au courant pour avoir une continuité sans interruption il faut augmenter davantage la valeur de L.

II.5.2. Simulation par PSIM et implémentation pratique du redressement monophasé non commandé à double alternance (pont de GRAETZ), PD2

II.5.2.1. Charge résistive :

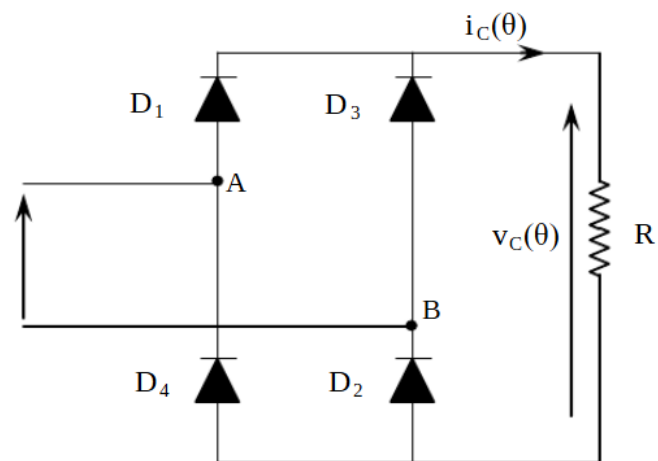
Le convertisseur à pont complet généralement est utilisé pour des puissances moyennes. On principe on devrait trouver une tension moyenne double à celle obtenue utilisant simple alternance à une seule diode, c'est-à-dire la puissance sera quatre fois grandes.

Les mêmes essais par simulation et réalisation pratique vont être effectuées pour ce pont cmplet (PD2). Cette partie sera débutée par une charge purement résistive.

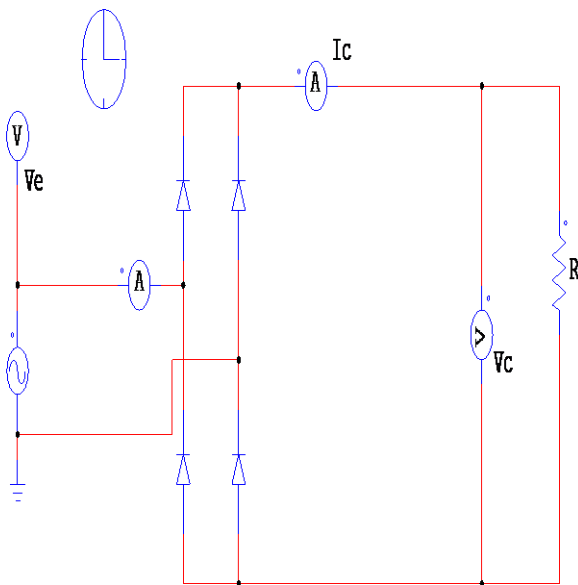
a. EQUIPEMENT REQUIS :

1.	EM-3310-1E	MODULE D'ALIMENTATION D'ÉNERGIE TRIPHASÉ	× 1
2.	PE-5310-2B	AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL	× 1
3.	PE-5310-2C	TRANSDUCTEUR DE COURANT	× 1
4.	PE-5310-3A	RMS MÈTRE	× 1
5.	PE-5310-3B	WATTMÈTRE (0.3 W-30 KW)	× 1
6.	PE-5310-3C	UNITÉ DE RÉSISTANCE DE CHARGE	× 1
7.	PE-5310-3E	UNITÉ DE CHARGE INDUCTIVE	× 1
8.	PE-5310-5A	DIODES DE PUISSANCE	× 2
9.	PE-5310-5B	FUSIBLES	× 1
10.	PE-5340-3A	TRANSFORMATEUR DE SÉPARATION	× 1
11.	EM-3380-1A	TABLE D'EXPÉRIENCE	× 1
12.	EM-3380-2B	ARMATEUR EXPÉRIMENTALE	× 1
13.	EM-3390-1A	SUPPORT DE FILS DE CONNEXION	× 1
14.	EM-3390-3A	ACCESSOIRE DE FILS DE CONNEXION	× 1
15.	EM-3390-4A	DISPOSITIF DE SÉCURITÉ SUR LA PRISE ELECTRIQUE	× 1
16.	OSCILLOSCOPE A	MÉMOIRE NUMÉRIQUE(DSO)	× 1

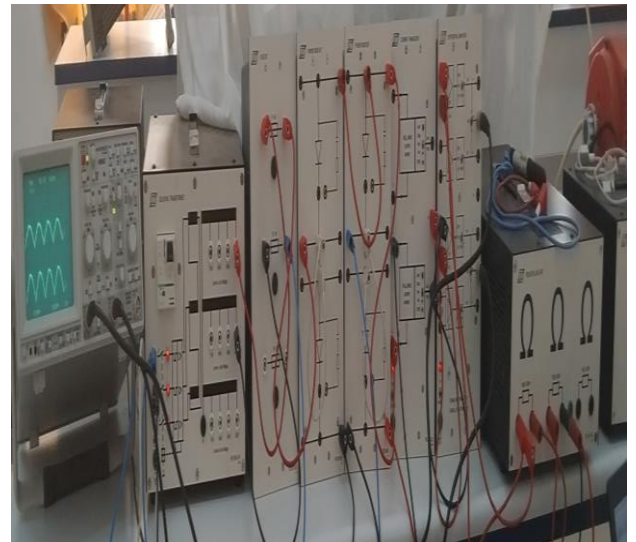
b. Montage :



(a)



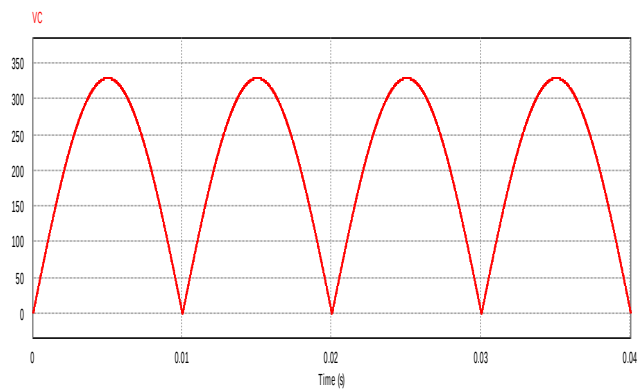
(b)



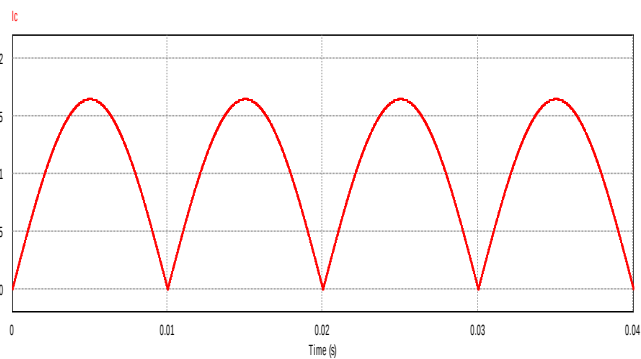
(c)

Figure (II. 29) : Circuit PD2 avec charge résistive :(a) théorique,(b) par simulation,(c) pratique

c. Résultats de simulation et pratique :

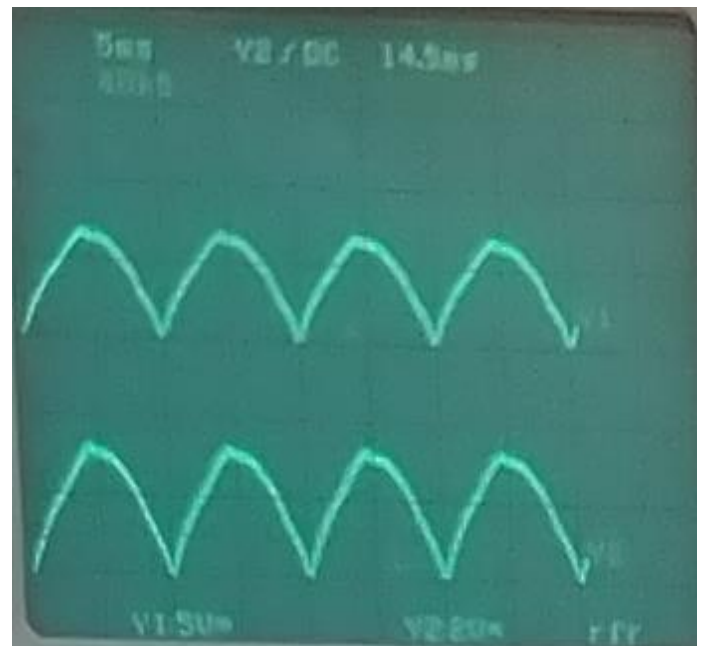


(a)



(b)

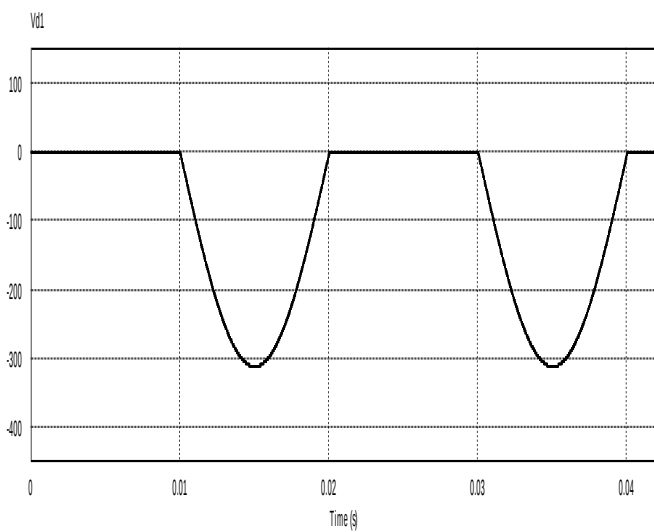
Figure (II. 30) : Tensions de sortie (a) et du courant (b) ,par simulation du PD2 avec R



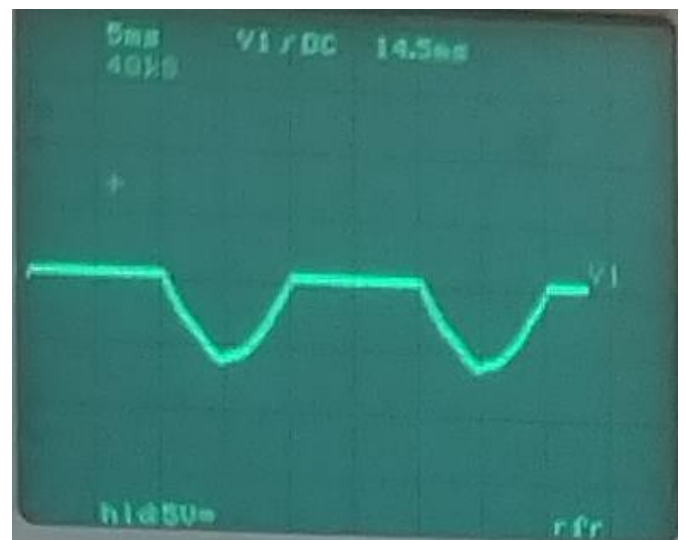
CH1 5V 5 ms

CH2 2V 5 ms

Figure (II.31) : Tensions de sortie (CH 1) et courant de charge (CH2) ,du PD2 avec R

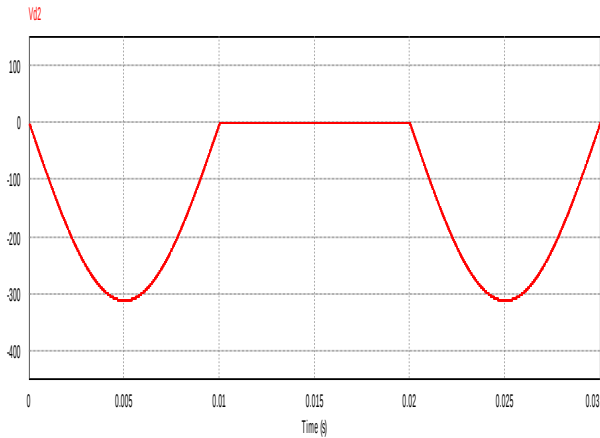


(a)

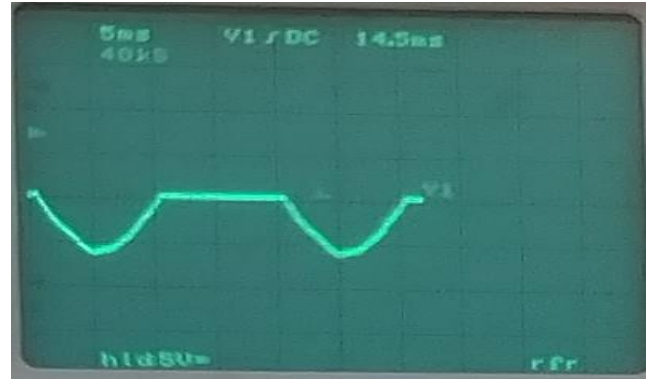


(b)

Figure (II. 32):Tensions inverse de D1 : (a) simulation, (b) pratique du PD2 avec R



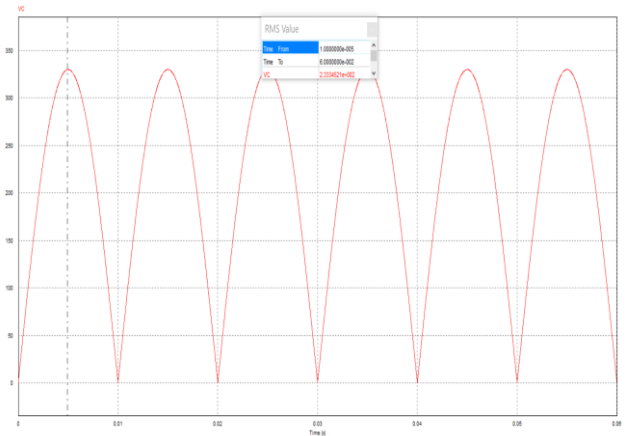
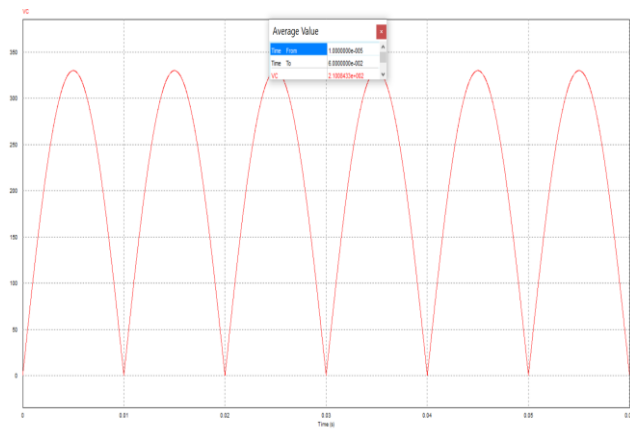
(a)



(b)

Figure (II. 33) : Tensions inverse de D2 :(a) par simulation, (b) par pratique du PD2 avec R

d. Valeurs moyennes et efficaces



On a $V_m = 330V$

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = \frac{2 \times 330}{\pi} = 210.2 V$$

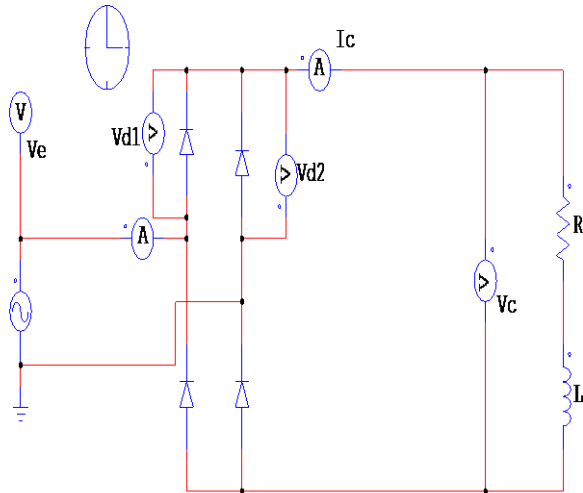
et

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{330}{\sqrt{2}} = 233.34V$$

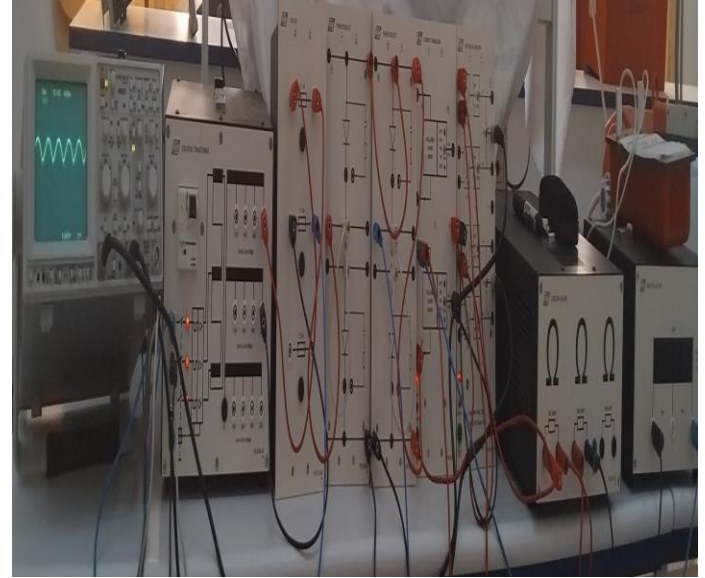
D'après ces deux valeurs, on constate que la tension efficace (V_{rms}) est supérieure que la tension moyenne (V_{DC}), ce qui est tout à fait correcte.

II.5.2.2. Avec charge résistive_inductive :

a. Montage :



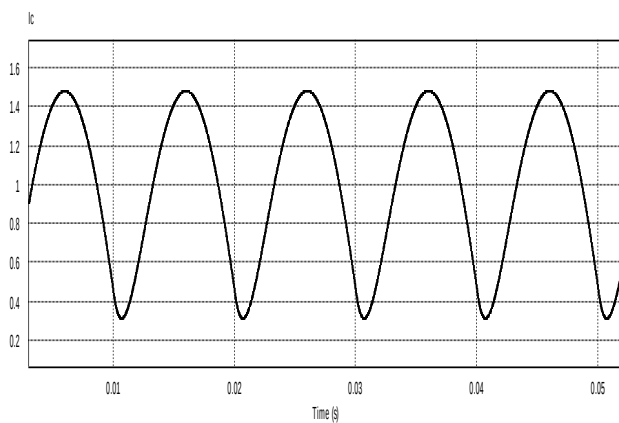
(a)



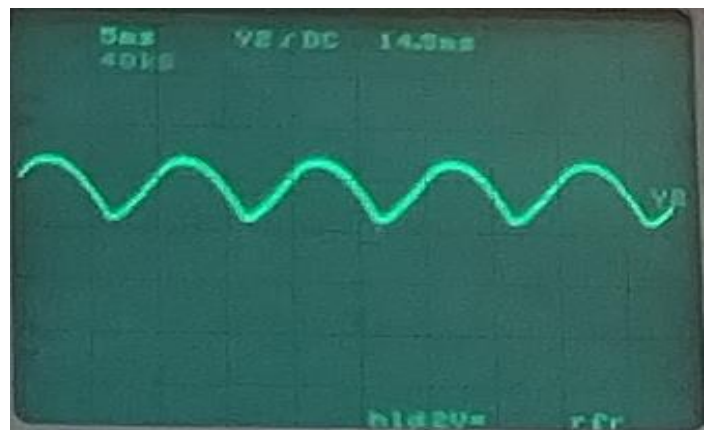
(b)

Figure (II. 34) : circuit de simulation(a) et pratique (b), PD2 avec charge résistive_inductive

b. Résultats de simulation et pratique :



(a)

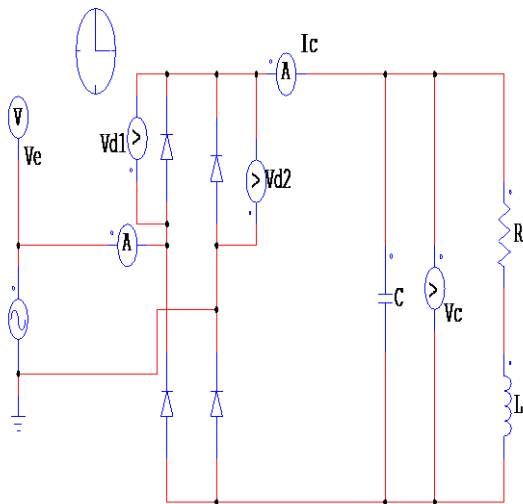


(b)

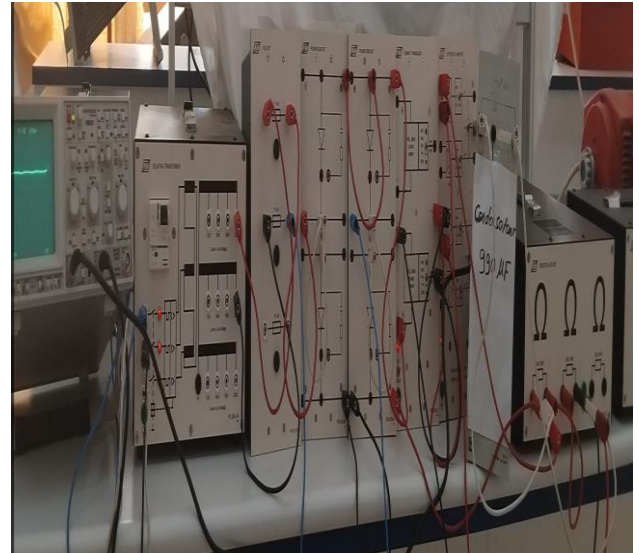
Figure (II.35): courant de charge inductive de PD2, (a)de simulation et pratique (b)

II.5.2.3. Montage monophasé double alternance (pont complet PD2) avec une charge capacitif (Filtrage capacitif):

a. Montage :



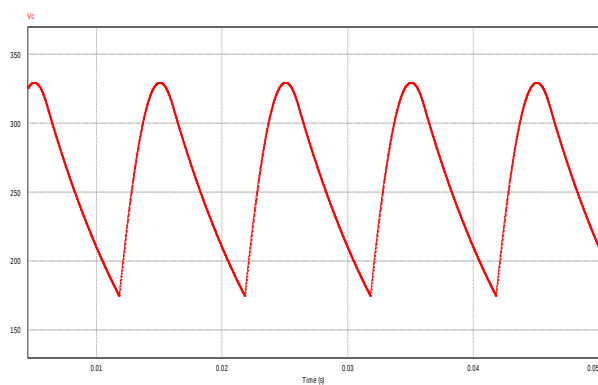
(a)



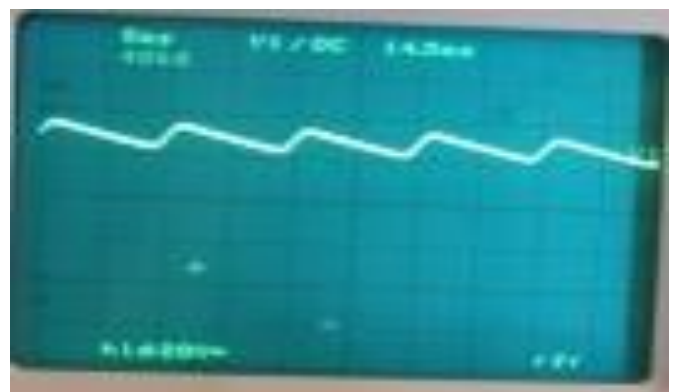
(b)

Figure (II. 36) : circuit de simulation(a) et pratique (b), PD2 avec charge capacitif

b. Résultats des simulations et pratiques :



(a)



(b)

Figure (II. 37) : Tension de charge capacitif (filtrage); simulation(a) et pratique (b)

II.5.2.4. Série de Fourier :

$$V_c = \frac{2v_m}{\pi} + \frac{2v_m}{\pi} \left(\frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \frac{2}{35} \cos 6\omega t \dots \right)$$

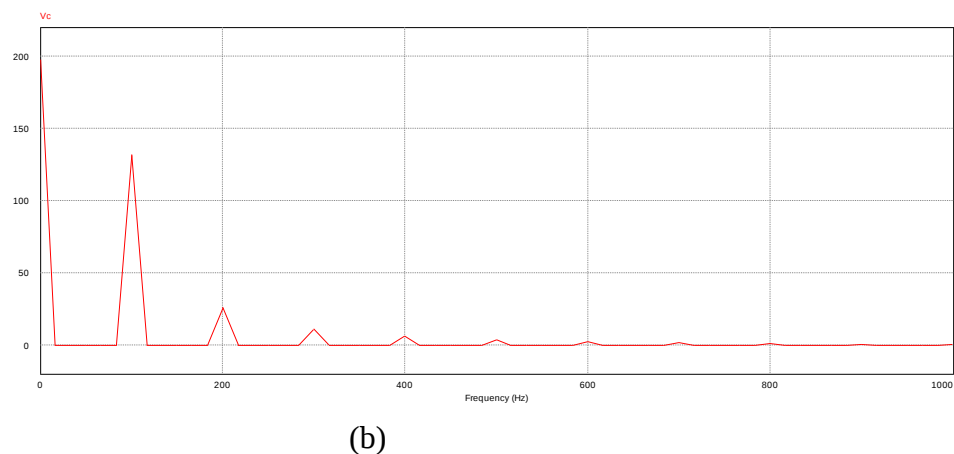
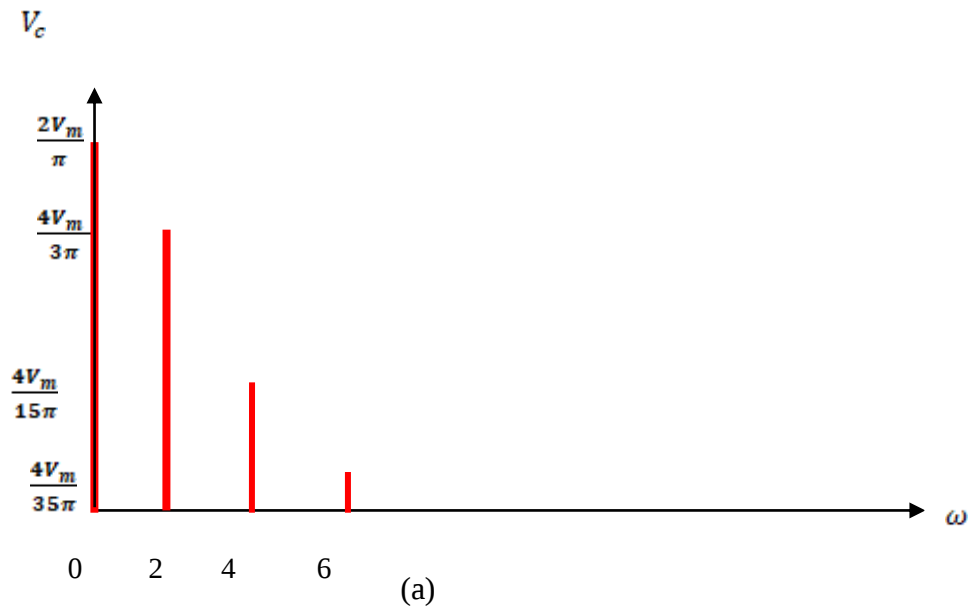


Figure (II. 38) : Spectre de l'analyse de Série de Fourier, (a) théorie et (b) par simulation

II.5.2.5. Interprétation :

Dans cette expérience, un pont à diodes est alimenté par une tension alternative du réseau et la tension obtenue à la sortie du pont alimente une charge purement résistive sans filtrage, figure (II. 29). Il est tout à fait clair d'après les courbes la forme de la tension est ondulée. Afin de minimiser cette ondulation, un condensateur de valeur ($990 \mu F$) est placé en parallèle avec la résistance et le résultat obtenu est montré dans la figure (II. 36). On voit clairement que le

résultat est meilleur et la tension tend vers une tension continue. Pour lisser cette tension davantage, il faut bien entendu augmenter la valeur du condensateur.

En ce qui concerne le courant, pour une charge purement résistive la tension et le courant ont la même forme figure(II.30). Après, qu'on insère une inductance en série avec la résistance, le courant devient de plus en plus continu et cela bien entendu dépendra de la valeur de l'inductance, figure(II.35). Pour obtenir un courant parfaitement lisse, il suffit d'augmenter davantage la valeur de l'inductance.

II.5.3. Simulation par PSIM et réalisation pratique d'un convertisseur triphasé simple alternance (P3)

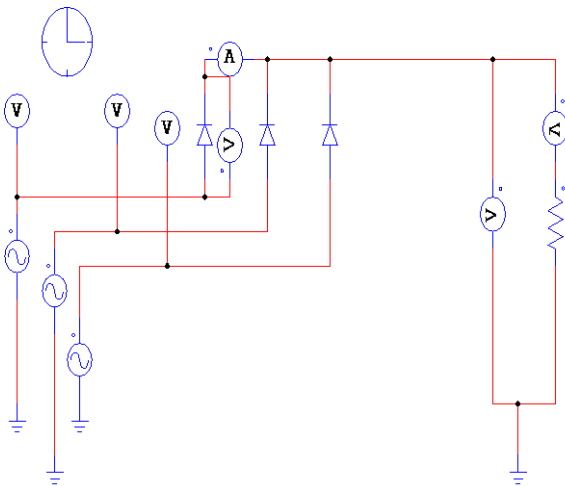
En général, ce convertisseur est peu utilisé à l'industrie, mais néanmoins il sert point de vue théorique .

II.5.3. 1. Charge résistive :

a. EQUIPEMENT REQUIS :

1.	EM-3310-1E	MODULE D'ALIMENTATION D'ÉNERGIE TRIPHASÉ	× 1
2.	PE-5310-2B	AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL	× 1
3.	PE-5310-2C	TRANSDUCTEUR DE COURANT	× 1
4.	PE-5310-3A	RMS MÈTRE	× 1
5.	PE-5310-3B	WATTMÈTRE (0.3 W-30 KW)	× 1
6.	PE-5310-3C	UNITÉ DE RÉSISTANCE DE CHARGE	× 1
7.	PE-5310-3E	UNITÉ DE CHARGE INDUCTIVE	× 1
8.	PE-5310-5A	DIODES DE PUISSANCE	× 3
9.	PE-5310-5B	FUSIBLES	× 1
10.	PE-5340-3A	TRANSFORMATEUR DE SÉPARATION	× 1
11.	EM-3380-1A	TABLE D'EXPÉRIENCE	× 1
12.	EM-3380-2B	ARMATEUR EXPÉRIMENTALE	× 1
13.	EM-3390-1A	SUPPORT DE FILS DE CONNEXION	× 1
14.	EM-3390-3A	ACCESSOIRE DE FILS DE CONNEXION	× 1
15.	EM-3390-4A	DISPOSITIF DE SÉCURITÉ SUR LA PRISE ÉLECTRIQUE	× 1
16.	OSCILLOSCOPE À MÉMOIRE NUMÉRIQUE(DSO)		× 1

b. Montage :



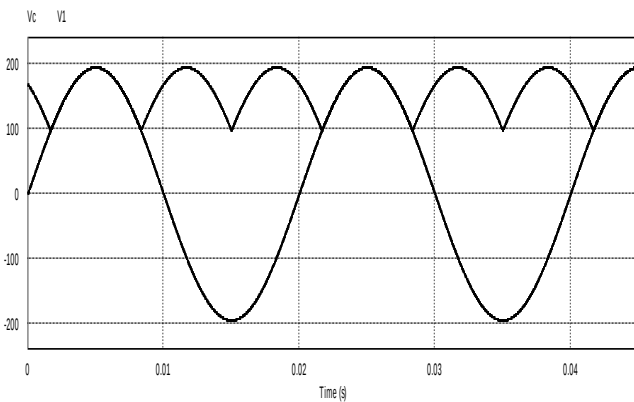
(a)



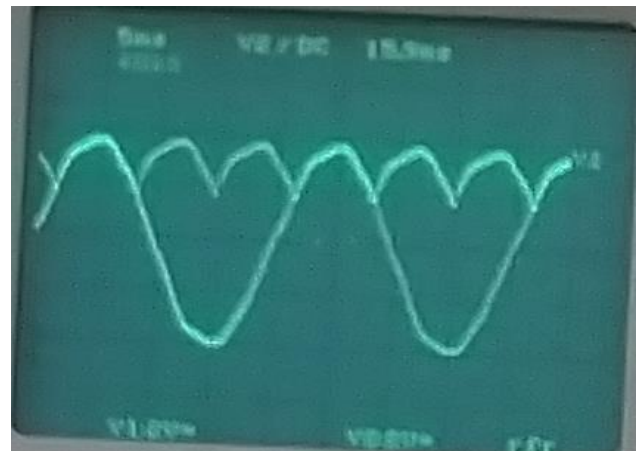
(b)

Figure (II. 39) : Circuit de simulation par Psim (a) , réalisation pratique (b) avec charge résistive

c. Résultats des simulations et pratiques



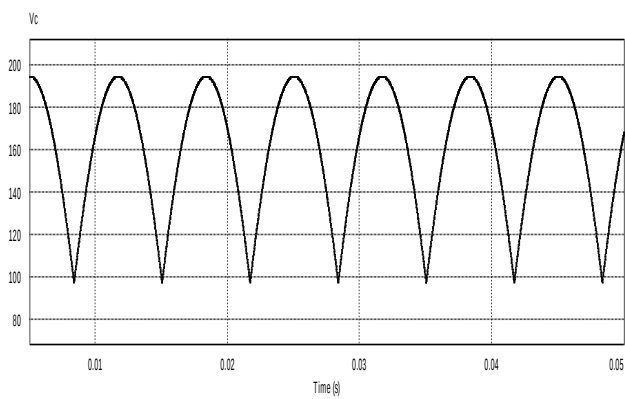
(a)



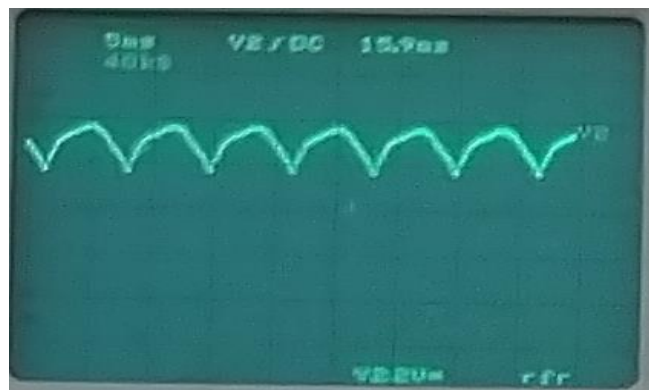
(b)

Figure (II. 40): Tension d'entrée phase 1 et de tension de sortie, (a) par simulation et (b) par pratique

Remarque : Les autres phases sont décalées par $\frac{2\pi}{3}$ respectivement

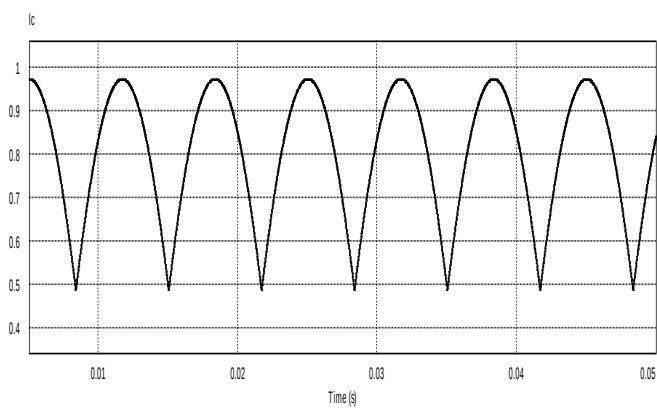


(a)

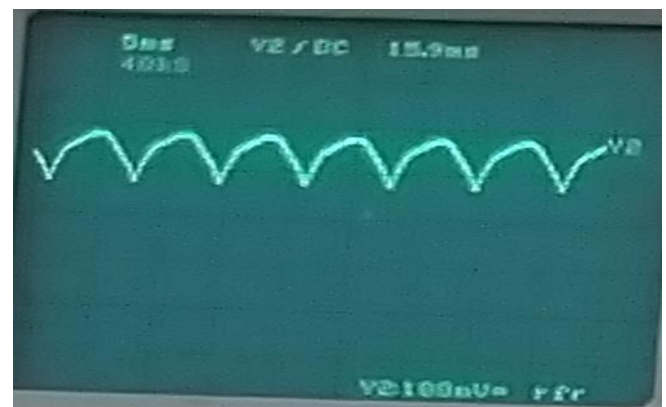


(b)

Figure (II. 41) : Tension de sortie de P3 avec charge R, (a) par simulation et (b) par pratique



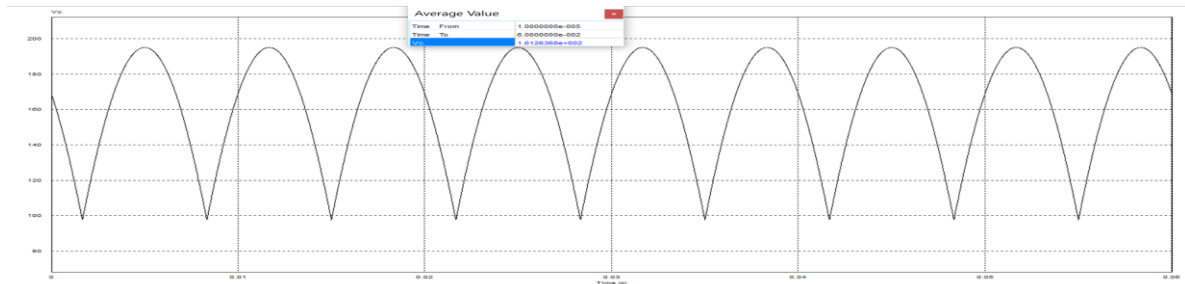
(a)



(b)

Figure (II. 42) : Courant de sortie de P3 avec charge R, (a) par simulation et (b) par pratique

d. Valeur moyenne :



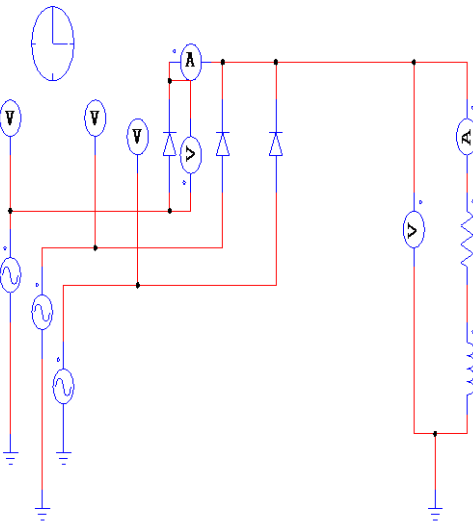
On a $V_m = 195V$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} = 0,827V_m = 0.827 \times 195$$

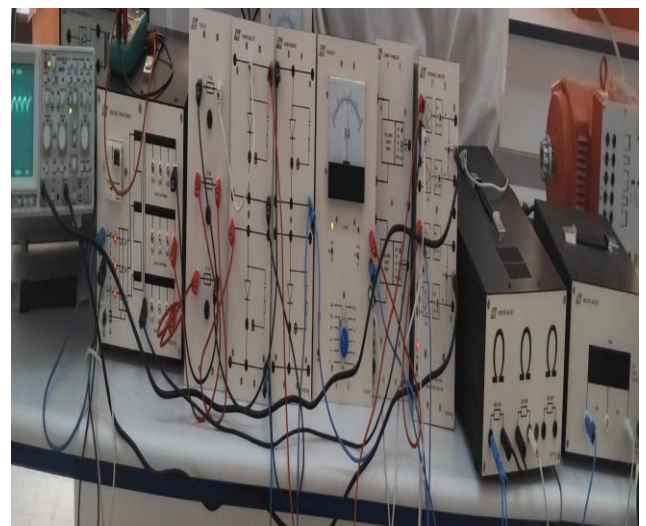
$$V_{dc} = 161.26V$$

II.5.3.2. Charge inductive :

a. Montage :



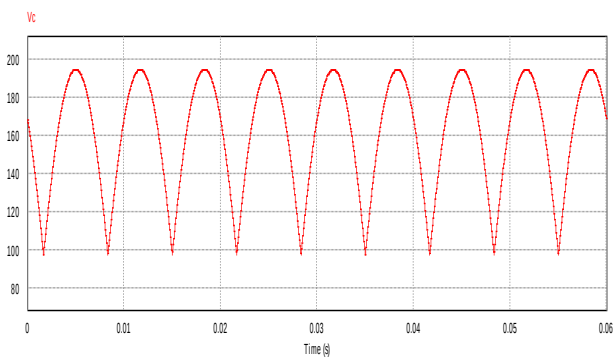
(a)



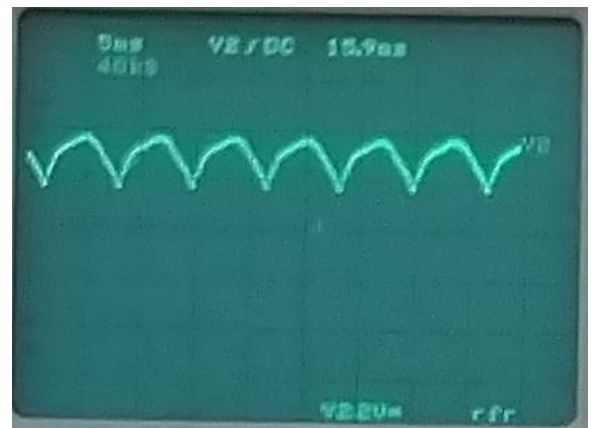
(b)

Figure (II. 43) : Circuit de P3 avec RL, simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b)

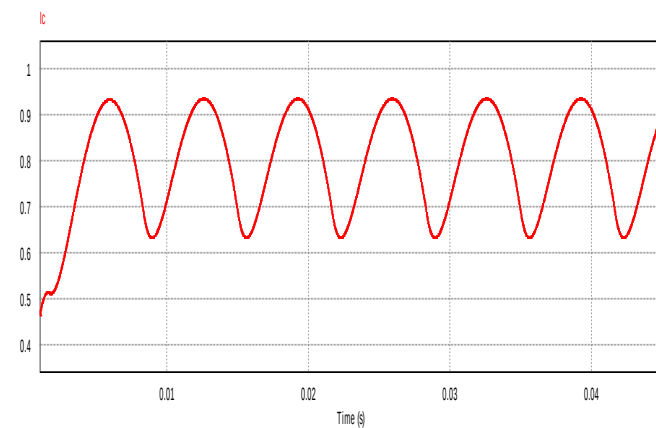
b. Résultats par simulation et pratique :



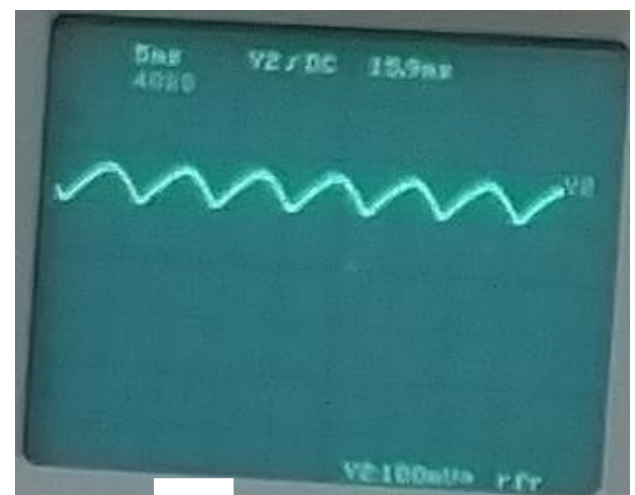
(a)



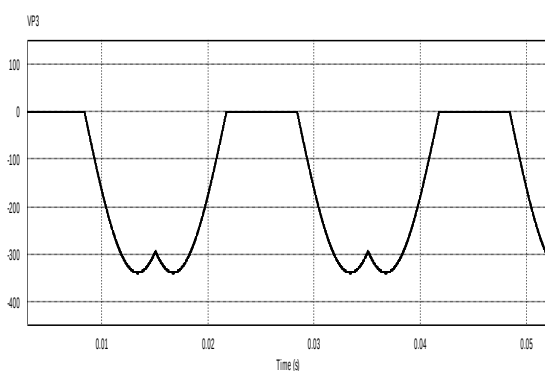
(b)

Figure (II. 44):Tension de sortie de P3 avec RL, simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b)

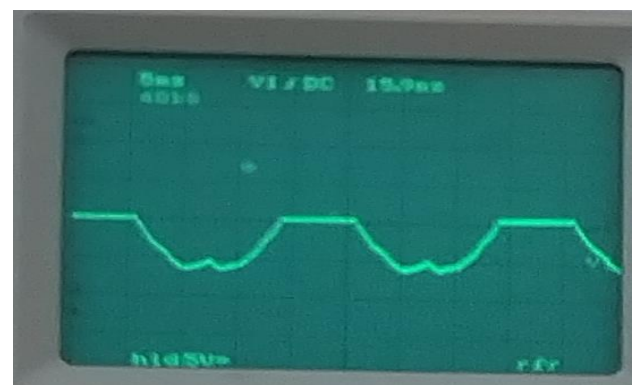
(a)



(b)

Figure (II. 45) : courant de sortie de P3 avec RL, simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b)

(a)

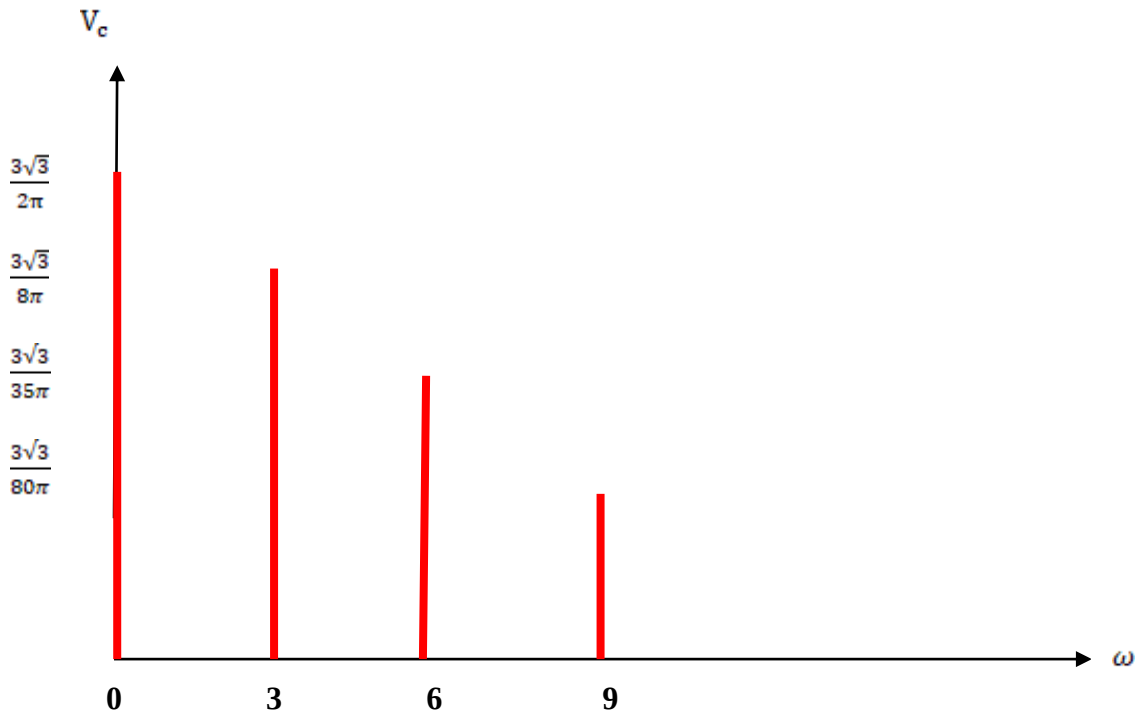


(b)

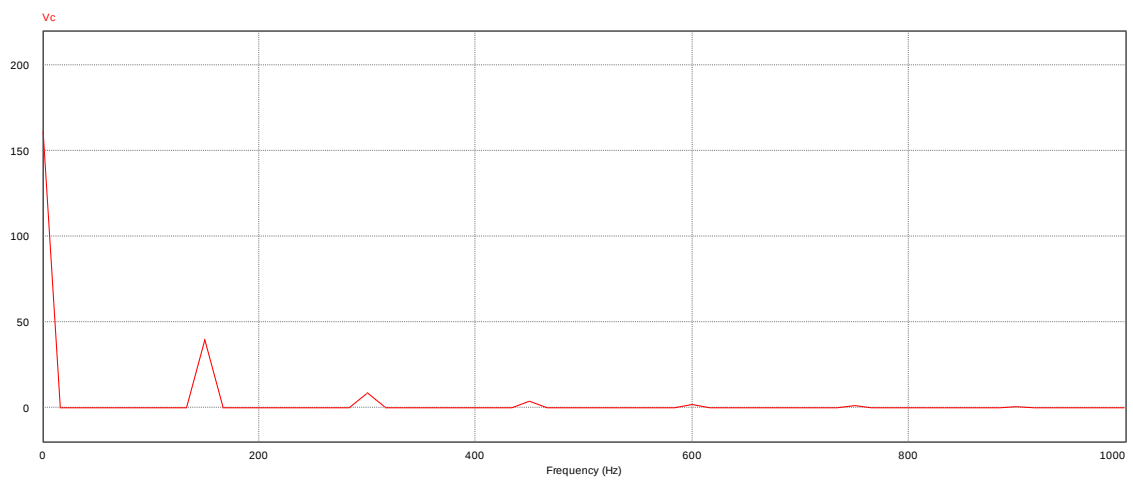
Figure (II. 46) :Tension inverse de P3 avec RL, simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b)

II.5.3.3. Série de Fourier :

$$V_c = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} + \frac{3\sqrt{3}V_m}{8\pi} \cos 3\omega t - \frac{3\sqrt{3}V_m}{35\pi} \cos 6\omega t - \frac{3\sqrt{3}V_m}{80\pi} \cos 9\omega t - \dots$$



(a)



(b)

Figure (II.47) : Spectre de l'analyse de Série de Fourier, (a) théorie et (b) par simulation

II.5.3.4. Interprétation

Ce convertisseur P3, quand la charge est purement résistive, il y a une ressemblance entre tension et courant de sortie c'est-à-dire sont en phase. Pour avoir un courant lisse, dans ce cas on insère une inductance de lissage de grande valeur. Dans ce mémoire on a utilisé une inductance de valeur 200mH. Cependant, on constate qu'il y a une nette amélioration comparativement avec une charge purement résistive. En conclusion de cette partie, les résultats obtenus pratiquement valident parfaitement ceux obtenus par simulation.

II.5.4. Simulation par PSIM et réalisation pratique sur triphasé double alternance (PD3)

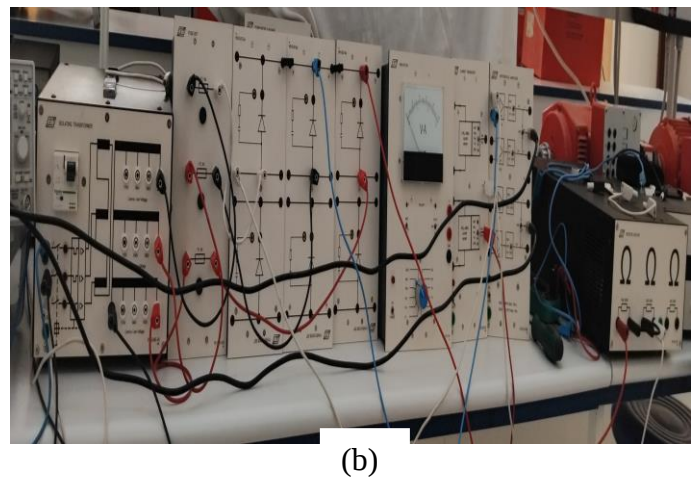
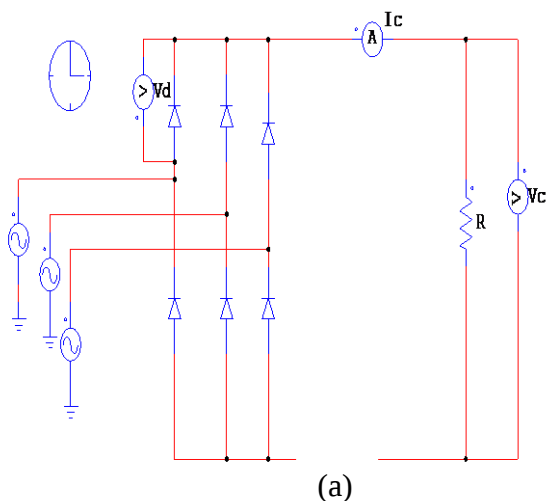
II.5.4. 1. Charge résistive :

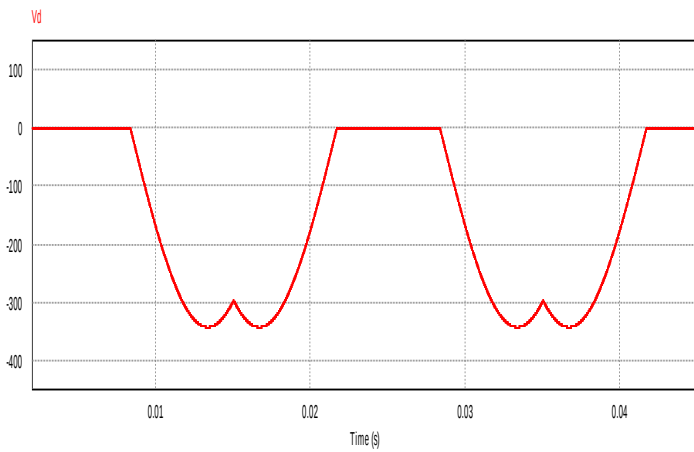
Ce convertisseur est largement utilisé dans l'industrie et dans le domaine de recherche pour des puissances élevées. La tension de sortie qui sera obtenus soit par simulation ou pratique contient peut d'ondulation (harmonique). Pour la lisser davantage il faut insérer un condensateur de valeur acceptable en parallèle avec la résistance

La réalisation pratique est faite exactement comme au convertisseur P3, mais les résultats seront évidemment meilleurs que le convertisseur P3.

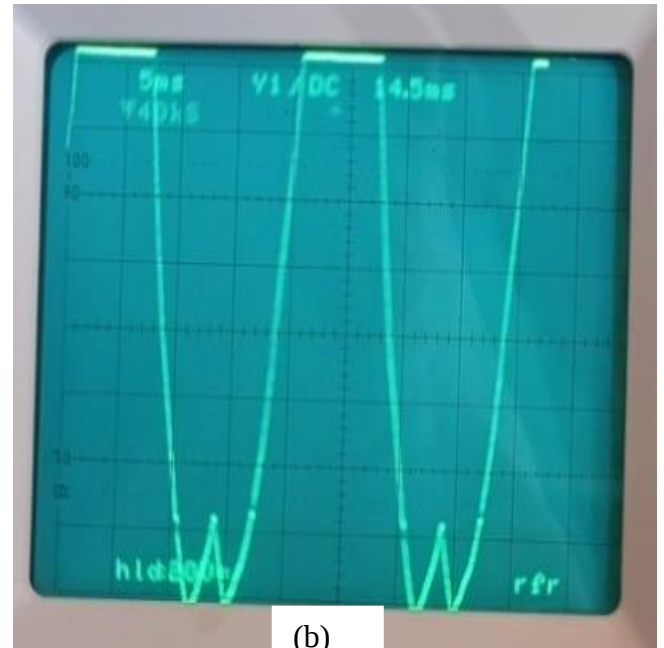
a. EQUIPEMENT REQUIS :

1.	EM-3310-1E	MODULE D'ALIMENTATION D'ÉNERGIE TRIPHASÉ	× 1
2.	PE-5310-2B	AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL	× 1
3.	PE-5310-2C	TRANSDUCTEUR DE COURANT	× 1
4.	PE-5310-3A	RMS MÈTRE	× 1
5.	PE-5310-3B	WATTMÈTRE (0.3 W-30 KW)	× 1
6.	PE-5310-3C	UNITÉ DE RÉSISTANCE DE CHARGE	× 1
7.	PE-5310-3E	UNITÉ DE CHARGE INDUCTIVE	× 1
8.	PE-5310-5A	DIODES DE PUISSANCE	× 6
9.	PE-5310-5B	FUSIBLES	× 1
10.	PE-5340-3A	TRANSFORMATEUR DE SÉPARATION	× 1
11.	EM-3380-1A	TABLE D'EXPÉRIENCE	× 1
12.	EM-3380-2B	ARMATEUR EXPÉRIMENTALE	× 1
13.	EM-3390-1A	SUPPORT DE FILS DE CONNEXION	× 1
14.	EM-3390-3A	ACCESSOIRE DE FILS DE CONNEXION	× 1
15.	EM-3390-4A	DISPOSITIF DE SÉCURITÉ SUR LA PRISE ÉLECTRIQUE	× 1
16.	OSCILLOSCOPE À MÉMOIRE NUMÉRIQUE(DSO)		× 1

b. Montage : u_C **Figure (II. 48) :** Circuit de simulation par Psim (a) et réalisation pratique(b), PD3 avec charge résistive



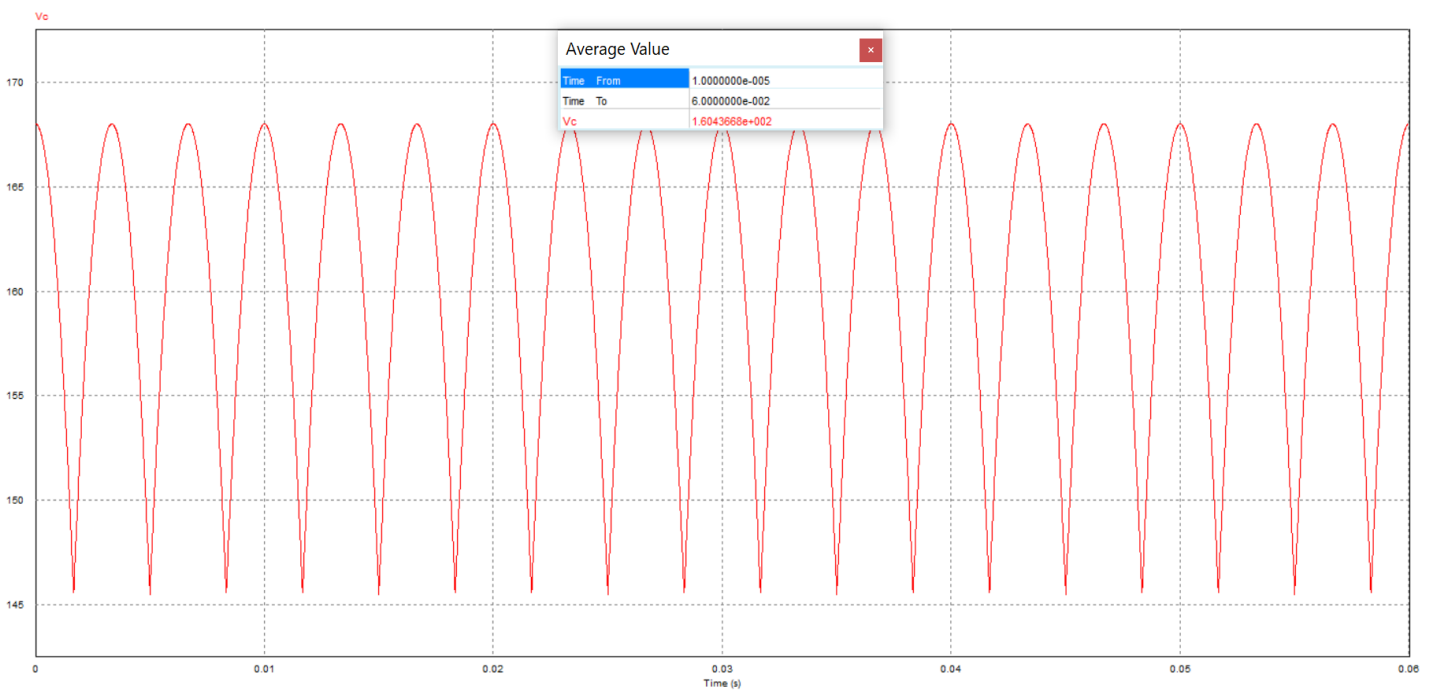
(a)



(b)

Figure (II. 49): Tension inverse de charge résistive du PD3, (a) par Psim et (b) réalisation pratique

c. Valeur moyenne :



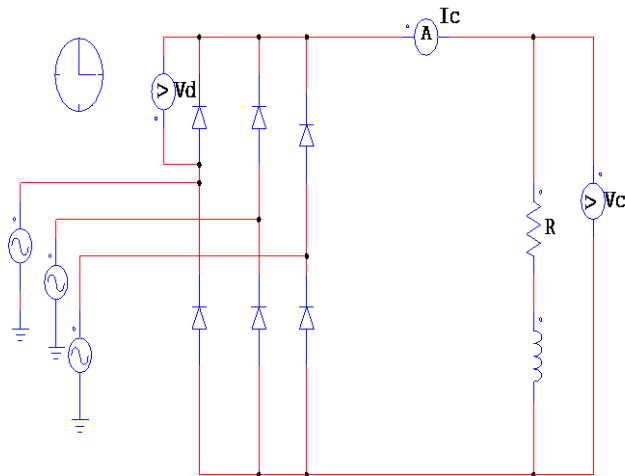
On a $V_m = 97V$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} = 1.65 \times 97$$

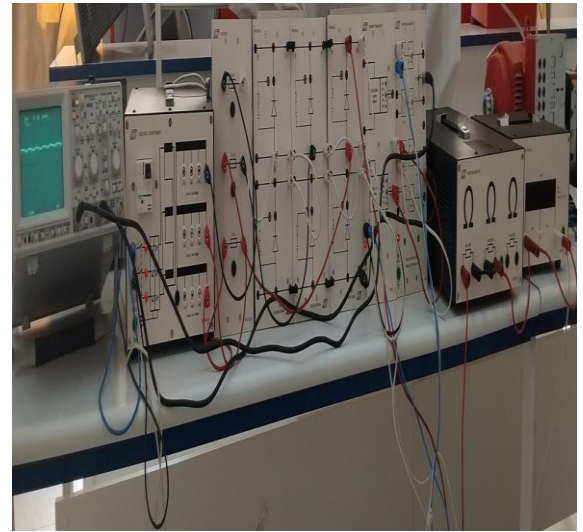
$$V_{dc} = 160.05V$$

II.5.4.2. Charge inductive :

a. Montage :



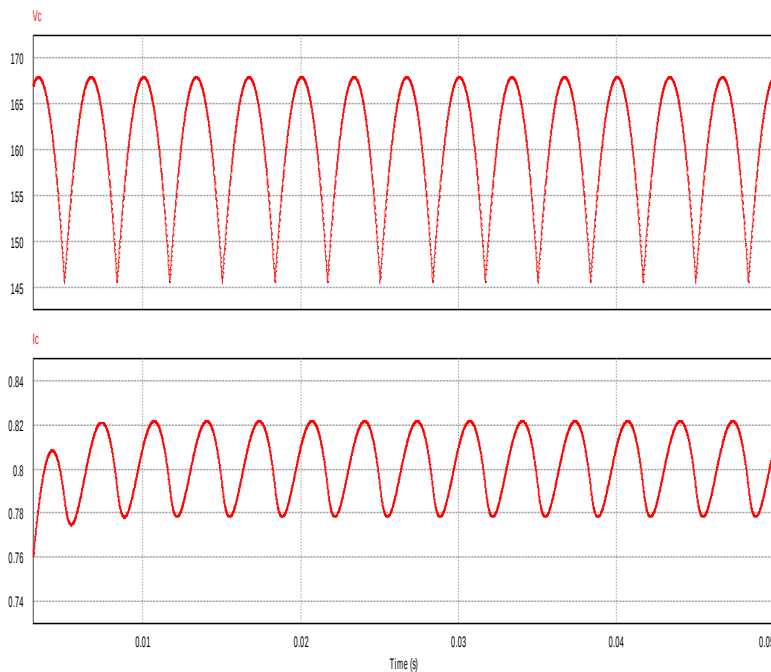
(a)



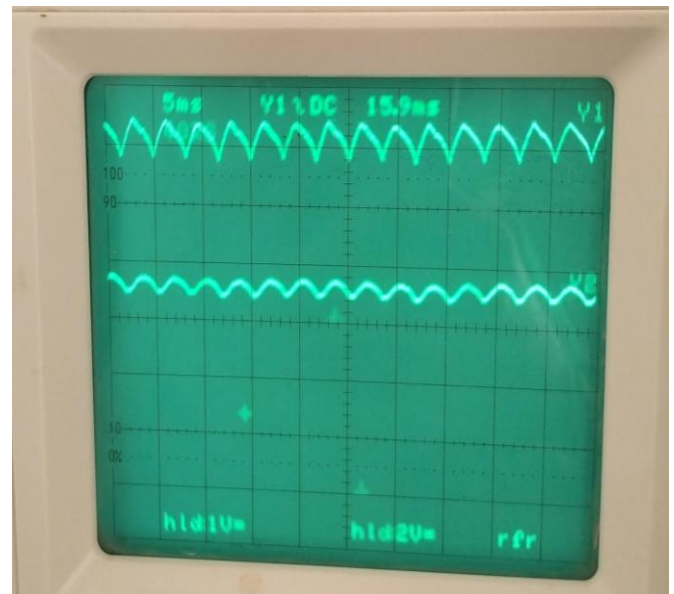
(b)

Figure (II. 50) : Circuit de PD3 avec RL, simulation par Psim (a) et réalisation pratique (b)

b. Résultats obtenus par simulation et pratique :



(a)

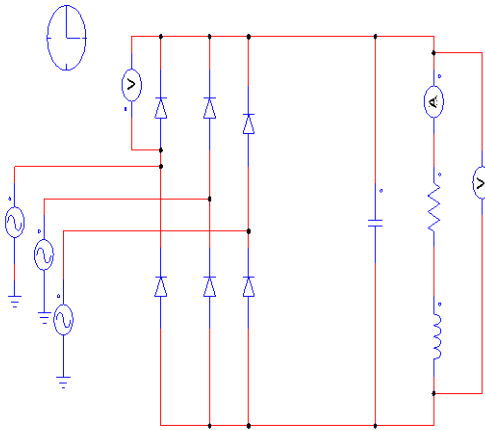


(b)

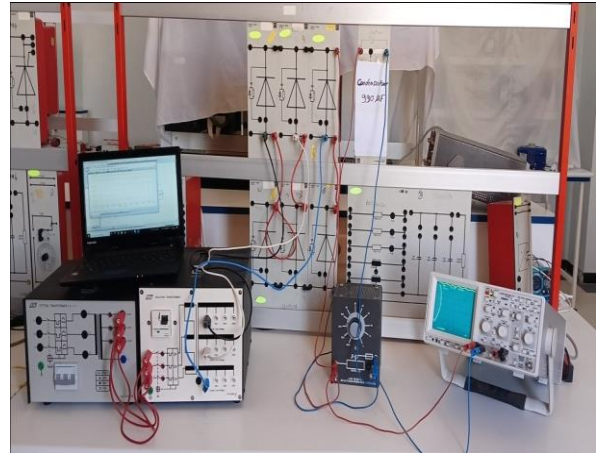
Figure (II. 51): Tension et courant de sortie de PD3 avec RL, simulation par Psim (a) et réalisation pratique (b)

II.5.4.3. Charge capacitif :

a. Montage :



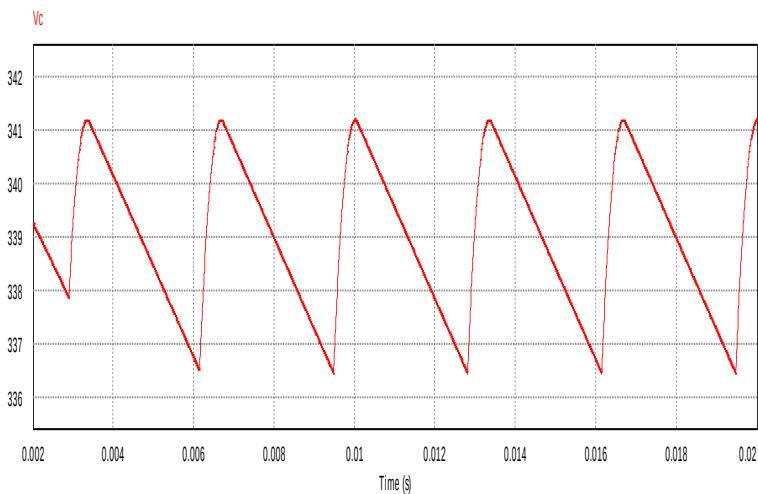
(a)



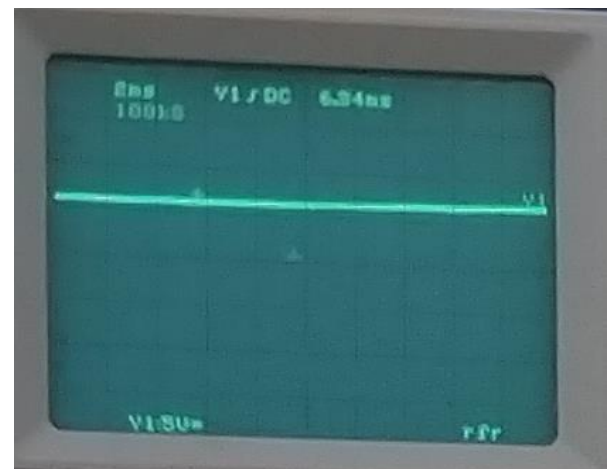
(b)

Figure (II. 52) : Circuit de PD3 avec filtrage, (a) simulation par Psim et (b) réalisation pratique

b. Résultats de simulation et pratique



(a)



(b)

Figure (II. 53) : Tension de sortie filtré, (a) simulation par Psim et (b) réalisation pratique

II.5.4.4. Série de Fourier :

$$V_c = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=0,1}^{\infty} a_n \cos n\omega t$$

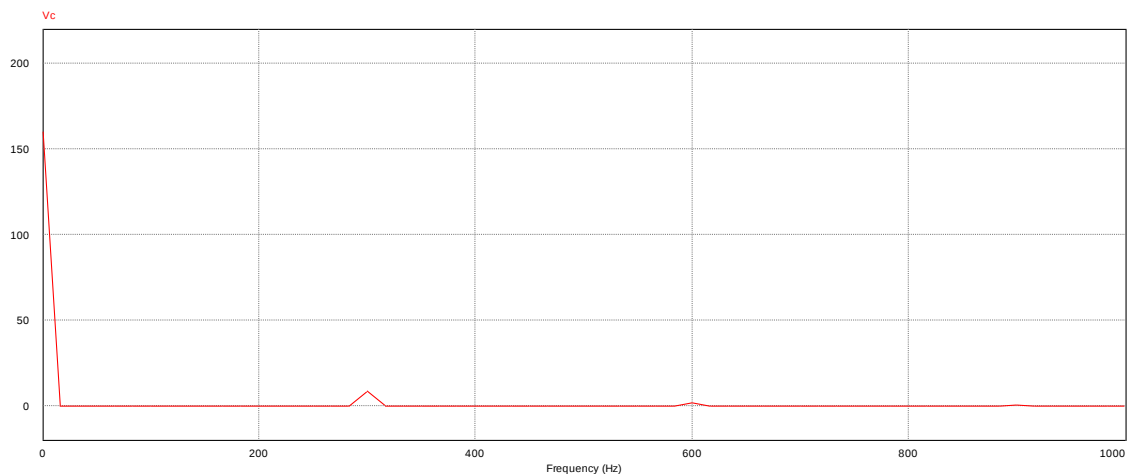
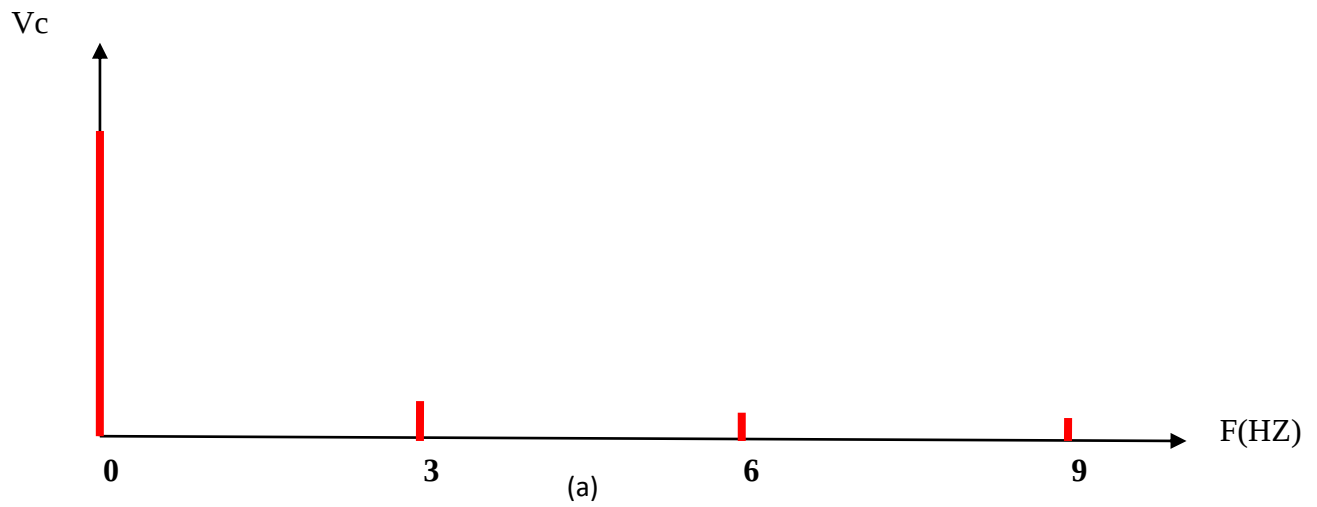


Figure (II.54) : Spectre de l'analyse de Série de Fourier, (a) théorie et (b) par simulation

II.5.4.5. Interprétation :

Dans cette réalisation pratique, le redresseur triphasé à pont complet (PD3) est alimenté par une tension de phase : $V_{ph} = 119V$, donc, $V_{max} = 119 \times \sqrt{2} = 168V$

La tension de simulation dans ce cas est : $168 \div \sqrt{3} = 97V$

Dans le premier essai, la tension obtenue à la sortie alimente une charge purement résistive de valeur 200Ω , alors concernant la simulation la tension visualisée par le logiciel Psim de valeur maximale est $168V$ en va comparer cette valeur pratiquement. 1 carreau représente $1V$ dans l'oscilloscope c'est à dire on a $3.4V$ comme valeur maximale du signal et cette tension est multipliée par le gain de notre amplificateur qui est 50, donc la tension maximale est égale $50 \times 3.4 = 170V$ approximativement. Concernant la lecture de la valeur du courant, on a visualisé par Psim la valeur maximale de $0.84A$.

Validation pratique : 1 carreau représente $2A$ à l'oscilloscope ce qui donne comme valeur maximale approximative, $7.8A$ et puisque l'amplificateur du courant est ajusté à gain de $10A$ donc le courant maximal est $7.8 \div 10 = 0.78A$ approximative qui presque identique à la simulation.

Dans le deuxième essai, on a inséré une inductance de valeur $200mH$ en série avec la résistance. On remarque que la tension est la même que la tension à charge résistive seulement la valeur du courant a légèrement diminué : $I = 0.82A$

On constate également que le courant figure(II.54) est meilleur que celui de la résistance pure figure(II.51). Pour lisser davantage le courant à charge inductive, il faut bien entendu augmenter la valeur de l'inductance.

A propos de la tension de sortie, les ondulations sont presque disparues à cause de l'insertion du condensateur ($990\mu F$) en parallèle avec la résistance.

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié un redressement non commandé à diodes qui sert à convertir la tension de source alternative en tension continue. Nous avons étudié les différents types des redresseurs non commandé, notamment le redressement simple alternance monophasé et triphasé et à pont complet à base des diodes avec des différentes charges.

Nous avons également analysé les caractéristiques de ce convertisseurs PD3, telles que la tension et courant de sortie, tension inverse et aussi identification de la valeur moyenne et efficace.

Enfin, les résultats obtenus pratiquement valident parfaitement la simulation effectuée par le logiciel Psim. Cela montre évidemment l'importance de la simulation avant de passer à la pratique pour préserver le matériel en bon état au sein de notre laboratoire.

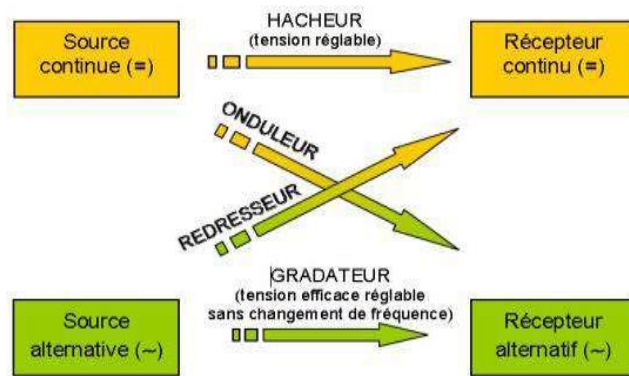
Chapitre III

Redressement Commandé

Chapitre III: Redressement Commandé

III.1. Introduction :

Le domaine de l'électronique de puissance s'est considérablement développé et offre un énorme potentiel pour la conversion d'énergie électrique. Les nouveaux convertisseurs statiques AC/DC sont devenus un domaine de recherche attractif et de grand intérêt [4].

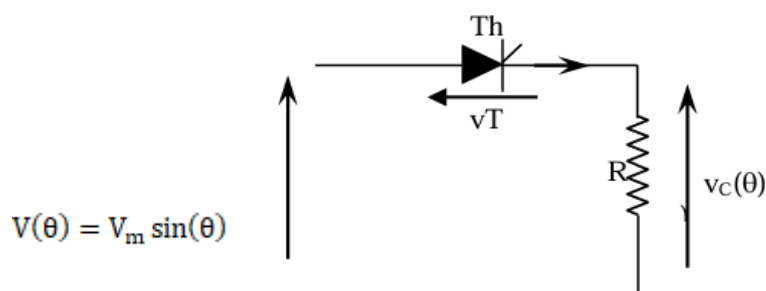


(Figure III.1) : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.

III.2. Redressement commandé :

III.2.1. Redressement simple alternance commandé par thyristor (charge résistive) :

a. Montage :



(Figure III.2): Montage simple alternance commandé avec charge résistive.

b. Analyse de fonctionnement :[5]

On amorce le thyristor à $\omega t_1 = \psi$: donc conduction du thyristor jusqu'à π ou le courant s'annule (charge résistive).

L'amorçage suivant s'effectue à $2\pi + \psi$.

- Pour $\psi < \theta < \pi$: Th conduit $V_c(\theta) = V(\theta) = V_m \sin(\theta)$

$$I_c = \frac{V_c(\theta)}{R} = \frac{V_m}{R} \sin(\theta) \quad (\text{III.1})$$

$I_c(\theta)$ et $V_c(\theta)$ Ont la même forme.

- Pour $\pi < \theta < 2\pi + \psi$: Th bloqué car à $\theta = \pi$ le courant s'annule

$$I_c(\theta) = 0 \text{ et } V_c(\theta) = 0.$$

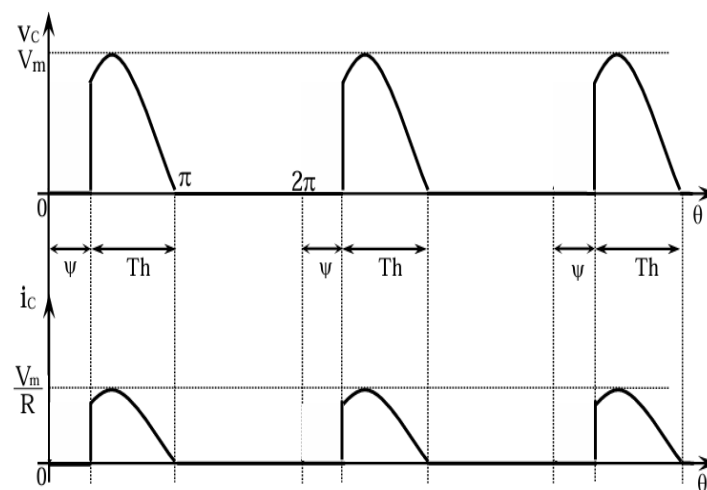
c. Forme d'ondes des différentes grandeurs :

Figure (III.3) : Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur commandé.

d. Valeur moyenne de la tension V_c et du courant I_c :

La valeur moyenne de la tension V_c est :

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\psi}^{\pi} V(\theta) d\theta \quad \text{Avec } V(\theta) = V_m \sin(\theta) \quad (\text{III.2})$$

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\psi}^{\pi} V_m \sin(\theta) d\theta \Rightarrow V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \psi) \quad (\text{III.3})$$

$$I_c = \frac{V_M}{R2\pi} (1 + \cos \psi) \quad (\text{III.4})$$

Donc, en variant ψ de 0 à π , on peut varier la tension de sortie moyenne V_{dc} de $\frac{V_m}{\pi}$ à 0.

e. Valeur efficace de la tension :

$$V_{rms} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \psi + \frac{\sin 2\psi}{2} \right)} \quad (\text{III.5})$$

f. Facteur de forme:

$$F = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \psi + \frac{\sin 2\psi}{2} \right)} \cdot \frac{2\pi}{V_m} (1 + \cos \psi)$$

$$F = \pi(1 + \cos \psi) \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \psi + \frac{\sin 2\psi}{2} \right)} \quad (\text{III.6})$$

III.2.2. Redressement simple alternance commandé par thyristor (charge résistive-inductive) :

a. Montage :

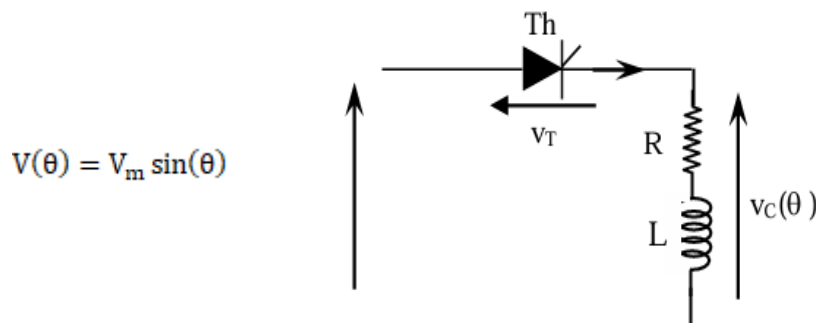


Figure (III.4): Montage simple alternance charge inductive.

b. Analyse de fonctionnement :

On déclenche le thyristor à $\omega t_1 = \psi$, sa conduction se produit jusqu'à θ_1 (moment de blocage) ou le courant se coupe. Ainsi, sur un intervalle de 2π , la conduction passe de ψ à θ_1 .

- Pour $\psi < \theta < \theta_1$:

Le thyristor Th est déblocé $\theta = \psi$, à partir de cet instant on a :

Equation différentielle de 1^{er} ordre avec second membre sinusoïdale.

$$L \frac{di_c(\theta)}{dt} + Ri_c(\theta) = V_m \sin(\theta) \quad (\text{III.7})$$

Le courant i_c est la somme de deux courants I_f courant permanent ou forcé et i_l courant libre ou transitoire donc $I_c = I_f + I_l$.

Donc, on a comme solution de l'équation (III.5) :

$$I_c(\theta) = \frac{V_m}{Z} \sin(\theta - \varphi) + K e^{-\left(\frac{\theta}{\tau}\right)} \quad (\text{III.8})$$

Avec

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2},$$

$$\tau = \frac{L\omega}{R},$$

$$\varphi = \text{Arctg} \left(\frac{L\omega}{R} \right) \text{ et } \theta = \omega t.$$

Pour $\theta = \psi$ on a

$$I_c(\psi) = 0 = \frac{V_m}{Z} \sin(\psi - \varphi) + K e^{-\left(\frac{\psi}{\tau}\right)} \Rightarrow K = -\frac{V_m}{Z} \sin(\psi - \varphi) e^{\left(\frac{\psi}{\tau}\right)} \quad (\text{III.9})$$

$$I_c(\theta) = \frac{V_m}{Z} \left[\sin(\theta - \varphi) - \left(\sin(\psi - \varphi) e^{-\left(\frac{\theta - \psi}{\tau}\right)} \right) \right] \quad (\text{III.10})$$

Le thyristor arrêtera sa conduction lorsque l'intensité tombera à zéro. Si θ_1 représente l'angle d'extinction, on a :

$$\sin(\theta_1 - \varphi) - \left(\sin(\psi - \varphi) e^{-\left(\frac{\theta_1 - \psi}{\tau}\right)} \right) = 0 \quad (\text{III.11})$$

Il est possible de résoudre cette équation graphiquement.

- Pour $\theta_1 < \theta < 2\pi + \psi$: Th bloqué car à $\theta = \pi$ le courant s'annule

$$I_c(\theta) = 0 \text{ et } V_c(\theta) = 0.$$

c. Valeur moyenne de la tension V_c :

La valeur moyenne de la tension V_c est :

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\psi}^{\theta_1} V(\theta) d\theta \quad (\text{III.12})$$

$$V(\theta) = V_m \sin(\theta)$$

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\psi}^{\theta_1} V_m \sin(\theta) d\theta \Rightarrow V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi} (\cos(\psi) - \cos(\theta_1)) \quad (\text{III.13})$$

d. Formes d'ondes des différentes grandeurs :

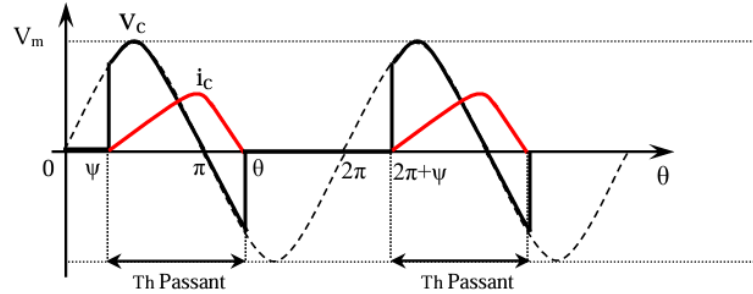
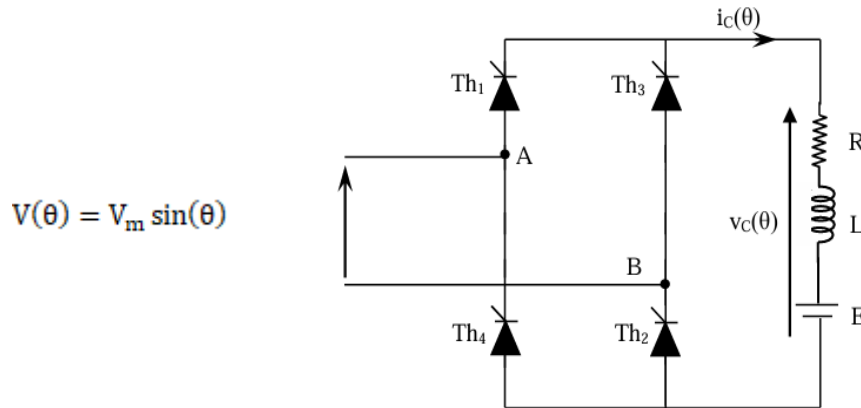


Figure (III.5) : Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur commandé charge inductive.

III.2.3. Pont tous thyristors :

a. Montage :



(Figure III.6) : Schéma d'un pont monophasé tous thyristor.

Th_1 et Th_2 sont déclenchés à $\psi \in [0, \pi]$

Th_3 et Th_4 sont déclenchés à $\psi + \pi$ avec $\psi \in [\pi, 2\pi]$

Ce montage est employé pour fournir de l'énergie aux machines à courant continu (DC). Cela autorise la récupération de l'énergie électrique lorsque la machine fonctionne en tant que génératrice. En d'autres termes, l'énergie est transférée de la machine vers le réseau.

b. Analyse du fonctionnement :

Avec une inductance de lissage, le courant traversant la charge est strictement stable. Par la suite, on conserve toujours $I_c(\theta) = I_c = \text{cte}$

Pour

$\psi < \theta < \pi + \psi$: Th_1 et Th_2 conducteurs, d'où :

$$V_c(\theta) = V(\theta) = V_M \sin(\theta), V_{Th1}(\theta) = 0 \text{ et } I(\theta) = I_c.$$

Pour

$\pi + \psi < \theta < 2\pi + \psi$: Th_3 et Th_4 conducteurs, d'où :

$$V_c(\theta) = -V(\theta) = -V_m \sin(\theta), V_{Th1}(\theta) = V_m \sin(\theta) \text{ et } I(\theta) = -I_c.$$

c. Valeur moyenne de la tension V_c :

La valeur moyenne de la tension V_c est :

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} V(\theta) d\theta \quad (\text{III.14})$$

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} V_m \sin(\theta) d\theta \Rightarrow V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \cos(\psi) \quad (\text{III.15})$$

Nous remarquons que :

- ✓ Pour $0 < \psi < \pi/2$: V_{dc} est positive.
- ✓ Pour $\pi/2 < \psi < \pi$: V_{dc} est négative.

Le courant moyen à la sortie du redresseur i_c est constamment positif, donc si $V_{dc} < 0$, on reçoit une puissance $V_{dc} i_c < 0$, signifiant que la puissance est transférée de la machine vers la source: opération inversée.

d. Valeur efficace de la tension :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} (V_m \sin \omega t)^2 d\omega t} \quad (\text{III.16})$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (\text{III.17})$$

e. Facteur de forme et taux d'ondulation :

$$F = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{2V_m} \cos(\psi) = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cos \psi \quad (\text{III.18})$$

$$\tau = \sqrt{F^2 - 1} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cos \psi\right)^2 - 1} \quad (\text{III.19})$$

Ce mode est employé pour la récupération. Dans ce cas, pour que la machine fonctionne comme une génératrice, il est nécessaire de renverser la f.c.e.m. E en inversant le courant d'excitation.

Ainsi, pour $\psi > \pi/2$, la tension de sortie V_{dc} se transforme en valeur négative. Dans ce contexte, on désigne le convertisseur par « Onduleur non autonome », car la fréquence de sortie est déterminée par le réseau.

Et pour $\psi < \pi/2$, la tension de sortie v_{DC} prend une valeur positive. Dans ce contexte, on désigne le convertisseur par le terme « Redresseur ».

f. Formes d'ondes des différentes grandeurs pour $\psi = \frac{\pi}{3}$:

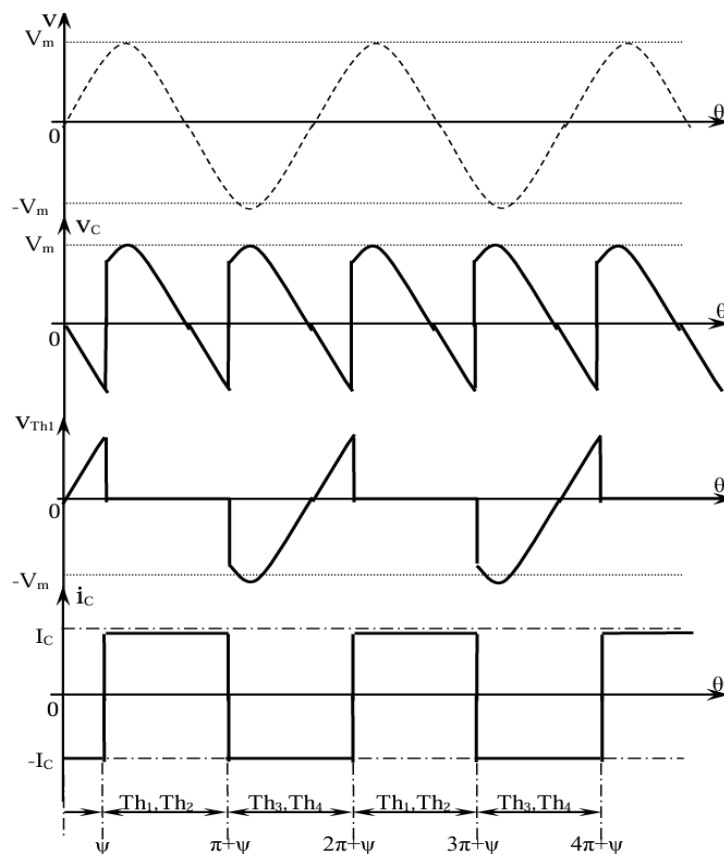
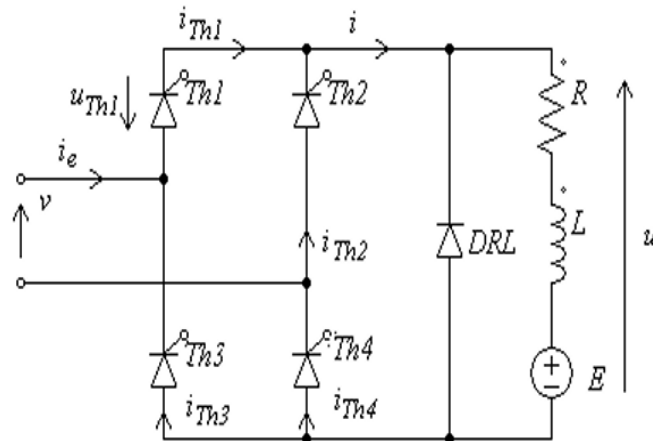


Figure (III.7): Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un pont tous thyristors.

III.2.3.1. Pont tous thyristors avec diode de roue libre :

a. Montage :



(Figure III.8) : Pont tout thyristors avec D_{RL} .

En pratique, on utilise fréquemment une diode de roue libre D_{RL} pour diverses raisons :

- La diode de roue libre D_{RL} gère les phases de roue libre, ce qui permet une réduction de taille des thyristors (facteur économique).
- Elle autorise l'accroissement de l'angle de retard à l'amorçage jusqu'à environ 170° .
- Elle sert de dispositif de sauvegarde pour le pont en cas d'interruption du réseau ou de non démarrage d'un thyristor. Elle diminue également l'usage d'énergie réactive.

b. Les grandeurs caractéristiques :

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \psi) \quad (III.20)$$

$$I_{dc} = I_{Thc} = \frac{\pi - \psi}{\pi} I_c; I_e = I_c \sqrt{\frac{\pi - \psi}{\pi}} \quad (III.21)$$

c. Forme d'ondes des différentes grandeurs :

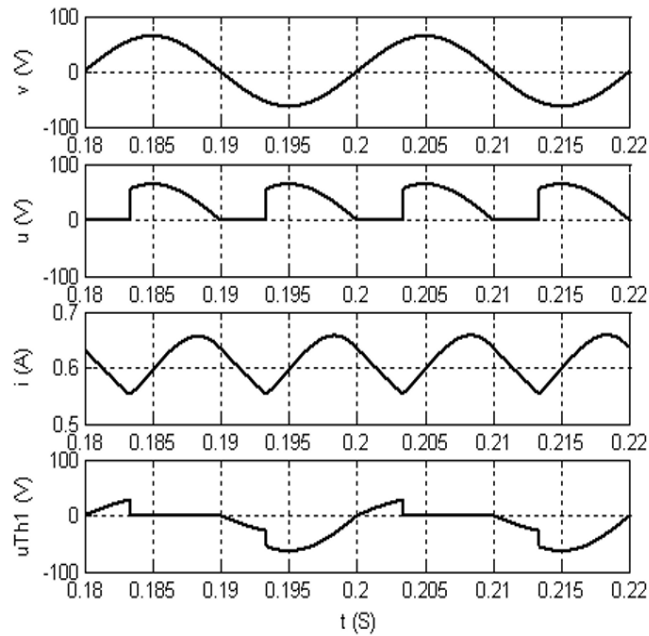


Figure (III.9) : Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un pont tous thyristors avec D_{RL} .

III.2.4. Pont mixte symétrique :[6]

a. Montage :

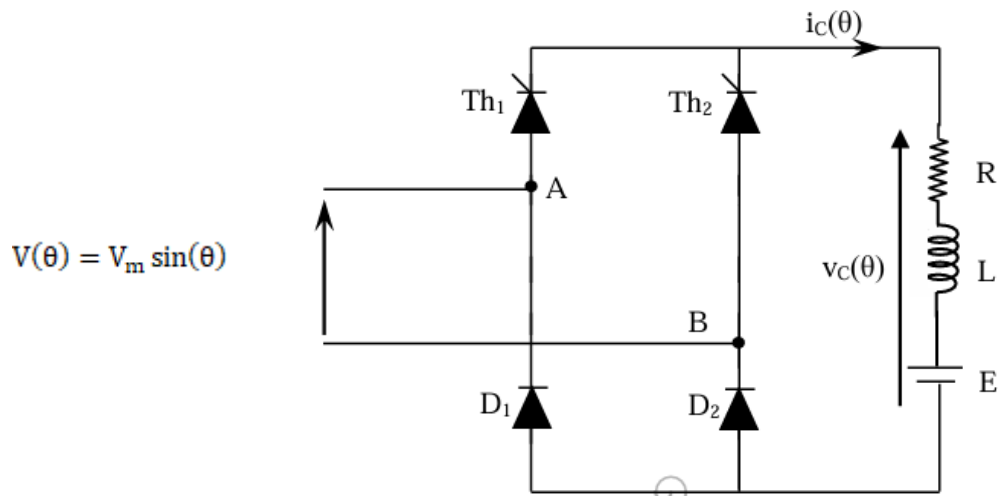


Figure (III.10) : Schéma d'un pont monophasé mixte

- ✓ Th_1 est déclenché à ψ avec $\psi \in [0, \pi]$ et Th_2 est déclenché à $\psi + \pi$ avec $\psi \in [0, \pi]$
- ✓ D_1 conduit à π et à 2π car la polarité de la borne A est négative.
- ✓ D_2 conduit à 0 et à 2π car la polarité de la borne B est négative.

Ce pont est employé pour vérifier la vitesse des machines à courant continu.

b. Analyse du fonctionnement :

- Pour $0 < \theta < \psi$: Th_2 et D_2 conducteurs (fonctionnement en roue libre)

$$L \frac{dI_c(\theta)}{dt} + RI_c(\theta) + E = 0 \quad (III.22)$$

$$I_c(\theta) = -\frac{E}{R} + Ke^{(-\frac{\theta}{\tau})} \quad (III.23)$$

- Pour $\theta = 0$ on a :

$$I_c(0) = I_0 = -\frac{E}{R} + Ke^{(-\frac{0}{\tau})} \Rightarrow K = I_0 + \frac{E}{R} \quad (III.24)$$

$$I_c(\theta) = -\frac{E}{R} + (I_0 + \frac{E}{R})e^{(-\frac{\theta}{\tau})}$$

$$I_c(\theta) = i_{Th2}(\theta) = i_{D2}(\theta)$$

- Pour $\psi < \theta < \pi$: Th_1 et D_2 conducteurs, d'où :

$$V(\theta) = L \frac{dI_c(\theta)}{dt} + RI_c(\theta) = V_m \sin(\theta) \quad (III.25)$$

Dans ce contexte, on détermine la solution globale de l'équation différentielle en tenant compte du fait que le système est affecté par les deux tensions $V_m \sin(\theta)$ et $-E$.

En vertu du principe de superposition, il en résulte :

$$L \frac{dI_{1c}(\theta)}{dt} + RI_{1c}(\theta) = V_m \sin(\theta)$$

$$L \frac{dI_{2c}(\theta)}{dt} + RI_{2c}(\theta) = -E \quad (III.26)$$

$$I_{1c}(\theta) = \frac{V_m}{Z} \sin(\theta - \varphi) + K_1 e^{(-\frac{\theta}{\tau})} \quad (III.27)$$

$$\text{Avec : } Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}, \tau = \frac{L\omega}{R}, \varphi = \text{Arctg} \left(\frac{L\omega}{R} \right) \text{ et } \theta = \omega t$$

$$I_{2c}(\theta) = -\frac{E}{R} + K_2 e^{(-\frac{\theta}{\tau})} \quad (III.28)$$

$$\text{Avec : } \tau = \frac{L\omega}{R} \text{ et } \theta = \omega t$$

$$\text{On en déduit : } I_c(\theta) = I_{1c}(\theta) + I_{2c}(\theta)$$

$$I_c(\theta) = -\frac{E}{R} + \frac{V_m}{Z} \sin(\theta - \varphi) + \left(Ke^{(-\frac{\theta}{\tau})} \right) \text{ avec } K = K_1 + K_2 \quad (III.29)$$

- Pour $\theta = \psi$ on a :

$$I_c(\psi) = I_\psi = -\frac{E}{R} + \frac{V_m}{Z} \sin(\psi - \varphi) + Ke^{\left(-\frac{\psi}{\tau}\right)} \Rightarrow K = \left(I_\psi + \frac{E}{R} - \frac{V_m}{Z} \sin(\psi - \varphi)\right) e^{\left(\frac{\psi}{\tau}\right)} \quad (\text{III.30})$$

$$I_c(\theta) = -\frac{E}{R} + \frac{V_m}{Z} \sin(\theta - \varphi) + \left(\left(I_\psi + \frac{E}{R} - \frac{V_m}{Z} \sin(\psi - \varphi)\right) e^{-\left(\frac{\theta - \psi}{\tau}\right)}\right) \quad (\text{III.31})$$

$$V_c(\theta) = v(\theta), I(\theta) = I_c(\theta)$$

- Pour $\pi < \theta < \pi + \psi$: Th_1 et D_1 conducteurs (fonctionnement en roue libre), d'où :

$$V_c(\theta) = L \frac{dI_c(\theta)}{dt} + RI_c(\theta) + E = 0 \quad (\text{III.32})$$

$$\text{On a donc : } I_c(\theta) = -\frac{E}{R} + Ke^{\left(-\frac{\theta}{\tau}\right)} \quad (\text{III.33})$$

$$\text{Avec : } \tau = \frac{L\omega}{R} \text{ et } \theta = \omega t$$

- Pour $\theta = \pi$ on a

$$I_c(\pi) = I_0 = I_\pi = -\frac{E}{R} + Ke^{\left(-\frac{\pi}{\tau}\right)} \Rightarrow K = \left(I_0 + \frac{E}{R}\right) e^{\left(\frac{\pi}{\tau}\right)} \quad (\text{III.34})$$

$$I_c(\theta) = -\frac{E}{R} + \left(I_0 + \frac{E}{R}\right) e^{-\left(\frac{\theta - \pi}{\tau}\right)} \quad (\text{III.35})$$

$$V_c(\theta) = 0, I(\theta) = 0 \text{ et } I_c(\theta) = I_{Th1}(\theta) = I_{D1}(\theta)$$

- Pour $\psi + \pi < \theta < 2\pi$: Th_2 et D_1 conducteurs, d'où :

$$V_c(\theta) = V(\theta) = L \frac{dI_c(\theta)}{dt} + RI_c(\theta) + E = V_m \sin(\theta) \quad (\text{III.36})$$

Dans ce contexte, on détermine la solution globale de l'équation différentielle en tenant compte du fait que le système est affecté par les deux tensions $V_m \sin(\theta)$ et $-E$

En vertu du principe de superposition, il en résulte :

$$L \frac{dI_{1c}(\theta)}{dt} + RI_{1c}(\theta) = V_m \sin(\theta) \quad (\text{III.37})$$

$$L \frac{dI_{2c}(\theta)}{dt} + RI_{2c}(\theta) = -E \quad (\text{III.38})$$

$$I_{1c}(\theta) = \frac{V_m}{Z} \sin(\theta - \varphi) + K_1 e^{\left(-\frac{\theta}{\tau}\right)} \text{ avec } Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}, \tau = \frac{L\omega}{R}, \varphi = \text{Arctg}\left(\frac{L\omega}{R}\right)$$

$$\theta = \omega t$$

$$I_{2c}(\theta) = -\frac{E}{R} + K_2 e^{\left(-\frac{\theta}{\tau}\right)} \text{ avec : } \tau = \frac{L\omega}{R} \text{ et } \theta = \omega t \quad (\text{III.39})$$

On en déduit : $I_c(\theta) = I_{1c}(\theta) + I_{2c}(\theta)$

$$I_c(\theta) = -\frac{E}{R} + \frac{V_m}{Z} \sin(\theta - \varphi) + \left(K e^{-\left(\frac{\theta}{\tau}\right)} \right) \text{ avec } K = K_1 + K_2 \quad (\text{III.40})$$

- Pour $\theta = \psi + \pi$ on a :

$$I_c(\psi + \pi) = I_\psi = I_{\psi+\pi} = -\frac{E}{R} + \frac{V_m}{Z} \sin(\psi + \pi - \varphi) + K e^{-\left(\frac{\psi+\pi}{\tau}\right)}$$

$$\Rightarrow K = \left(I_\psi + \frac{E}{R} - \frac{V_m}{Z} \sin(\psi + \pi - \varphi) \right) e^{\left(\frac{\psi+\pi}{\tau}\right)} \quad (\text{III.41})$$

$$I_c(\theta) = -\frac{E}{R} + \frac{V_m}{Z} \sin(\theta - \varphi) + \left(\left(I_\psi + \frac{E}{R} - \frac{V_m}{Z} \sin(\psi + \pi - \varphi) \right) e^{-\left(\frac{\theta-\psi-\pi}{\tau}\right)} \right) \quad (\text{III.42})$$

$$V_c(\theta) = V(\theta), \quad I(\theta) = I_c(\theta)$$

c. Formes d'ondes des différentes grandeurs :

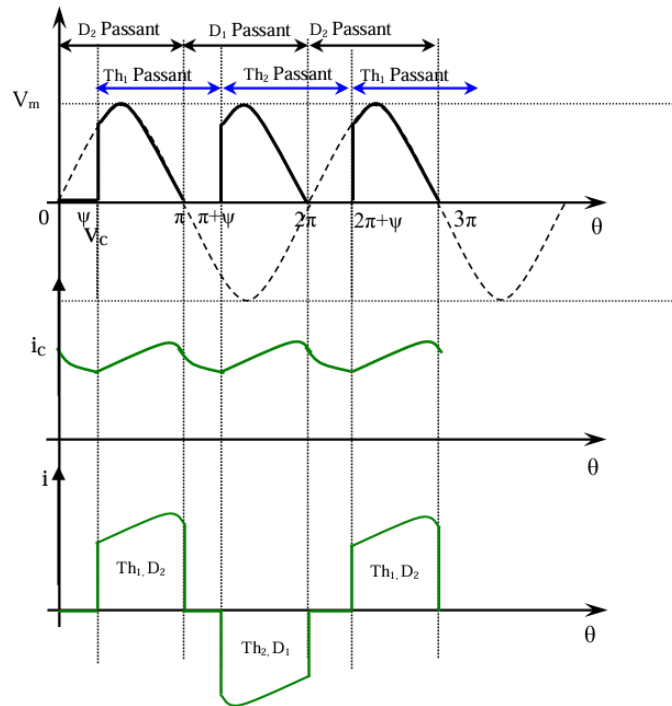


Figure (III.11) : Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un pont mixte.

d. Valeur moyenne de la tension V_c :

La valeur moyenne de la tension V_c est :

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\psi}^{\pi} V(\theta) d\theta \quad \text{avec } V(\theta) = V_m \sin(\theta) \quad (\text{III.43})$$

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\pi} V_m \sin(\theta) \quad (\text{III.44})$$

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \psi) \quad (\text{III.45})$$

Ainsi, en faisant varier ψ de 0 à π , la tension de sortie moyenne peut fluctuer V_{dc} de $\frac{2V_m}{\pi}$ à 0.

e. La valeur efficace de la tension:

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \psi + \frac{\sin 2\psi}{2})} \quad (\text{III.46})$$

III.3.Redressement triphasé commandé :

III.3.1. Redressement commandé P3 :

a. Montage :

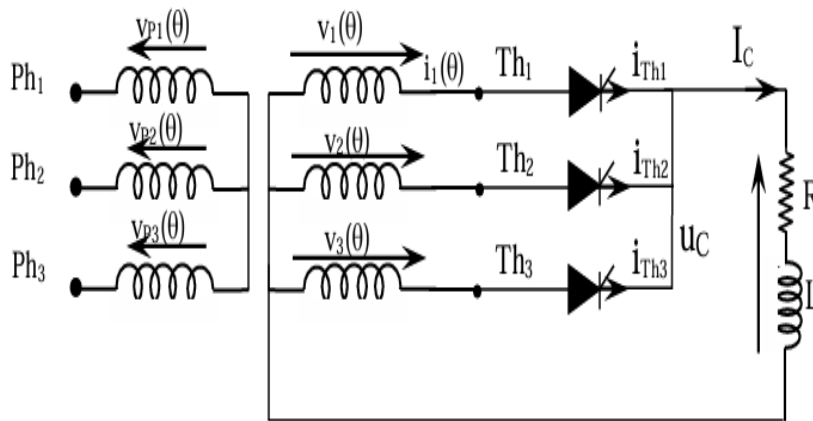


Figure (III.12) : Redresseurs triphasés P3 tous thyristors.

b. Analyse du fonctionnement :

Pour faciliter l'analyse, nous assumons les mêmes conditions que celles observées pour les redresseurs non contrôlés. On suppose que l'impulsion envoyée sur T_1 avec un retard ψ par rapport à l'amorçage qu'on aurait eu s'il y avait des diodes $\left(\frac{\pi}{6}\right)$ pour analyser le fonctionnement induit la conduction de ce thyristor. L'impulsion transmise à T_2 avec un retard de $\frac{3}{2\pi}$ par rapport à T_1 doit permettre l'activation de T_2 et la neutralisation de T_1 .

De la même manière L'impulsion transmise à T_3 , avec un décalage de $\frac{3}{2\pi}$ par rapport à T_2 , doit garantir l'activation de T_3 et la neutralisation de T_2 .

❖ Les intervalles de conduction sont montrés au tableau suivant :

Tableau (III.1): Intervalles de conduction P3 tous thyristors.

Intervalle	Thyristors en conduction	Thyristors bloqués	Tension de sortie U_c	Tension aux bornes de T_1	Courant i_1
$\left[\frac{\pi}{6} + \psi ; \frac{5\pi}{6} + \psi \right]$	T_1	T_2 et T_3	V_1	0	I_c
$\left[\frac{5\pi}{6} + \psi ; \frac{3\pi}{2} + \psi \right]$	T_2	T_1 et T_3	V_2	$V_1 - V_2$	0
$\left[\frac{3\pi}{2} + \psi ; \frac{13\pi}{6} + \psi \right]$	T_3	T_1 et T_2	V_3	$V_1 - V_3$	0
$\left[\frac{13\pi}{6} + \psi ; \frac{17\pi}{6} + \psi \right]$	T_1	T_2 et T_3	V_1	0	I_c

c. Valeur moyenne de la tension V_c :

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

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \psi}^{\frac{5\pi}{6} + \psi} v_1(\theta) d\theta \quad (III.47)$$

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \psi}^{\frac{5\pi}{6} + \psi} V_m \sin(\theta) d\theta \quad (III.48)$$

$$V_{dc} = \frac{3V_m}{2\pi} \left[-\cos(\theta) \right]_{\frac{\pi}{6} + \psi}^{\frac{5\pi}{6} + \psi} \quad (III.49)$$

$$V_{dc} = \frac{3V_m}{2\pi} \left[-\cos\left(\psi + \frac{5\pi}{6}\right) + \cos\left(\psi + \frac{\pi}{6}\right) \right] \quad (III.50)$$

$$\left[-\cos\left(\psi + \frac{5\pi}{6}\right) + \cos\left(\psi + \frac{\pi}{6}\right) \right] = -\cos(\psi) \cos\left(\frac{5\pi}{6}\right) + \sin(\psi) \sin\left(\frac{5\pi}{6}\right) + \cos(\psi) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) - \sin(\psi) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)$$

$$\text{On a : } \cos\left(\frac{5\pi}{6}\right) = -\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \text{ et } \sin\left(\frac{5\pi}{6}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)$$

$$\text{Donc : } \left[-\cos\left(\psi + \frac{5\pi}{6}\right) + \cos\left(\psi + \frac{\pi}{6}\right) \right] = 2 \cos(\psi) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \sqrt{3} \cos(\psi)$$

Finalement :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos(\psi) \quad (III.51)$$

On note usuellement $V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m$ qui correspond à la valeur moyenne maximale obtenue quand le convertisseur n'est pas commandé ($\psi = 0$).

Dans ce cas, on retient : $V_{dc} = V_c \cos(\psi)$

Remarque :

✓ Les restrictions concernant les composants sont identiques à celles du convertisseur non commandé.

✓ Courant moyen : $I_T = \frac{I_c}{3}$

✓ Courant efficace : $I_{Teff} = \frac{I_c}{\sqrt{3}}$

✓ Tension maximale inverse (qui est fonction de l'angle d'amorçage ψ) $V_m \sqrt{3}$ (valeur crête).

d. Valeur efficace de la tension :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\psi}^{\frac{5\pi}{6}+\psi} (V_m \sin \omega t)^2 d\omega t} = \sqrt{3} V_m \sqrt{\left(\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\psi\right)} \quad (\text{III.52})$$

e. Forme d'ondes des différentes grandeurs pour $\psi = \frac{\pi}{6}$:

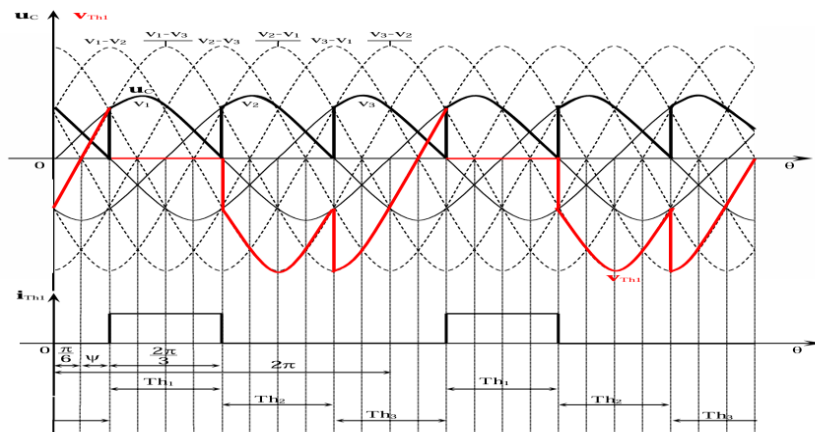


Figure (III.13) : Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur P3 tous thyristors.

f. Différents modes de fonctionnement réversibilité :

Selon ce qui a été exposé précédemment et en se limitant à des valeurs de ψ comprises entre 0 et $\frac{\pi}{2}$, la valeur moyenne de la tension rectifiée V_c du convertisseur est soit positive, soit nulle.

Si l'on considère une valeur de ψ dépassant $\frac{\pi}{2}$, le système fonctionne en mode onduleur soutenu par le réseau.

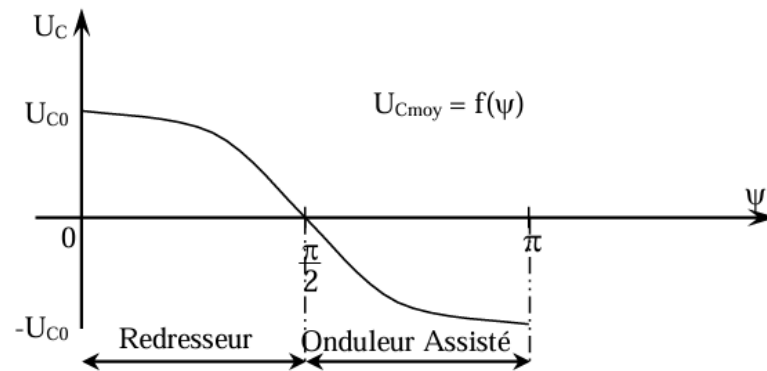


Figure (III.14) : Différents modes de fonctionnement.

III.3.2. Redressement commandé PT3 (tous thyristors) :

a. Montage :

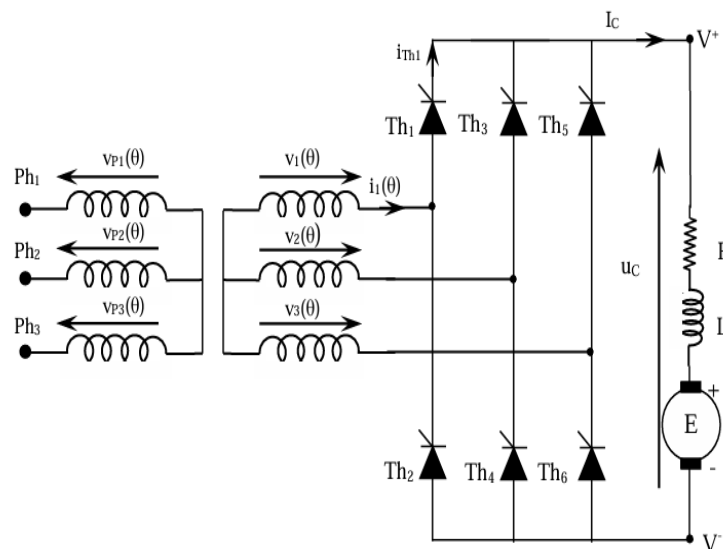


Figure (III.15) : Redresseurs triphasés PT3 tous thyristors.

Ce pont est constitué de six thyristors. Les thyristors Th1, Th 3, Th5, sont amorcés durant la phase positive des tensions V_1 , V_2 , et V_3 . On amorce les thyristors Th2, Th4, et Th6 durant la phase négative du cycle ; [7].

L'angle d'amorçage de référence est toujours l'angle d'amorçage naturel.

On considérera que le transformateur en couplage étoile-étoile est exempt de fuites magnétiques et de résistances. Le pont sera également considéré impeccable et la charge est composée d'un moteur à courant continu présentant un courant continu absorbé constant I_C .

Le réseau de tensions secondaires du transformateur sera noté de la façon suivante :

$$\begin{cases} V_1 = V_m \sin(\theta) \\ V_2 = V_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_3 = V_m \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.53})$$

b. Analyse du fonctionnement :

Le décalage de phase est ψ : nous calculons d'abord la tension $V^+(\theta)$ pour ce point d'amorçage, puis nous déterminons la tension $V^-(\theta)$ pour le même angle de commande. On peut alors identifier les caractéristiques spécifiques de ce pont. En procédant par étapes.

En se basant sur les données successives, on peut alors dresser le tableau suivant :

Tableau (III.2): Intervalles de conduction PT3 tous thyristors.

Intervalle	Thyristors en conduction	Tensions de sortie u_c	Tensions aux bornes de T_1	Courant i_{T1}	Courant i_1
$\left[\psi + \frac{\pi}{6}; \psi + \frac{\pi}{2} \right]$	T_1 et T_4	$v_1 - v_2 = u_{12}$	0	I_c	I_c
$\left[\psi + \frac{\pi}{2}; \psi + \frac{5\pi}{6} \right]$	T_1 et T_6	$v_1 - v_3 = u_{13}$	0	I_c	I_c
$\left[\psi + \frac{5\pi}{6}; \psi + \frac{7\pi}{6} \right]$	T_3 et T_6	$v_2 - v_3 = u_{23}$	$v_1 - v_2$	0	0
$\left[\psi + \frac{7\pi}{6}; \psi + \frac{3\pi}{2} \right]$	T_3 et T_2	$v_2 - v_1 = u_{21}$	$v_1 - v_2$	0	$-I_c$
$\left[\psi + \frac{3\pi}{2}; \psi + \frac{11\pi}{6} \right]$	T_5 et T_2	$v_3 - v_1 = u_{31}$	$v_1 - v_3$	0	$-I_c$
$\left[\psi + \frac{11\pi}{6}; \psi + \frac{13\pi}{6} \right]$	T_5 et T_4	$v_3 - v_2 = u_{32}$	$v_1 - v_3$	0	0

c. Valeur moyenne de la tension de sortie V_c :

La relation entre $V_c(\theta) = V^+(\theta) - V^-(\theta)$ permet aussi de calculer la valeur moyenne de la tension u_c :

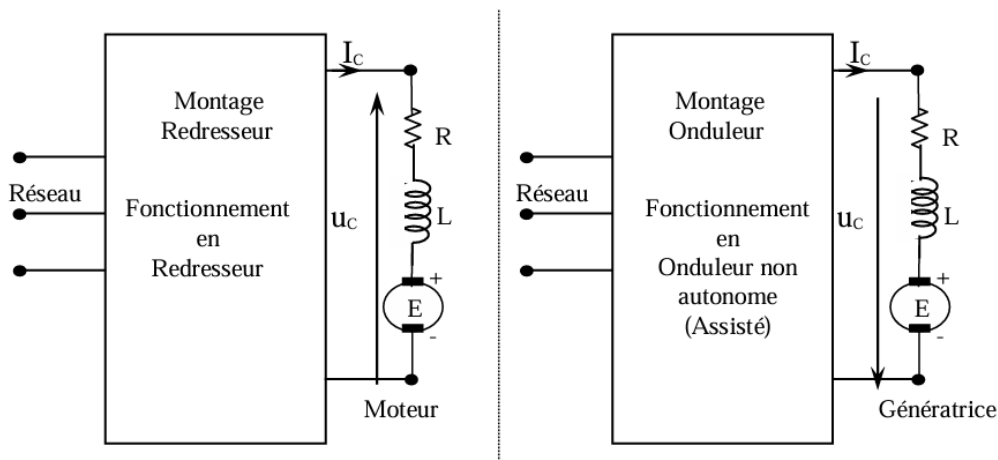
$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T V_c(\theta) d\theta = \frac{1}{T} \int_0^T V^+(\theta) d\theta - \frac{1}{T} \int_0^T V^-(\theta) d\theta \quad (\text{III.54})$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T V^+(\theta) d\theta = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\psi) \quad \text{et} \quad \frac{1}{T} \int_0^T V^-(\theta) d\theta = -\frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\psi)$$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\psi) - \left(-\frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\psi) \right) \quad (\text{III.55})$$

A noter que :

- ✓ Pour $\psi < \frac{\pi}{2}$: $V_{dc} > 0$
- ✓ Pour $\psi = \frac{\pi}{2}$: $V_{dc} = 0$
- ✓ Pour $\psi > \frac{\pi}{2}$: $V_{dc} < 0$, dans cette circonstance, la puissance P_c est calculée comme $V_{dc}I_c$ et se trouve inférieure à zéro. Ainsi, l'énergie est transférée du moteur au réseau. C'est le processus de régénération et le convertisseur agit en tant qu'onduleur non autonome.



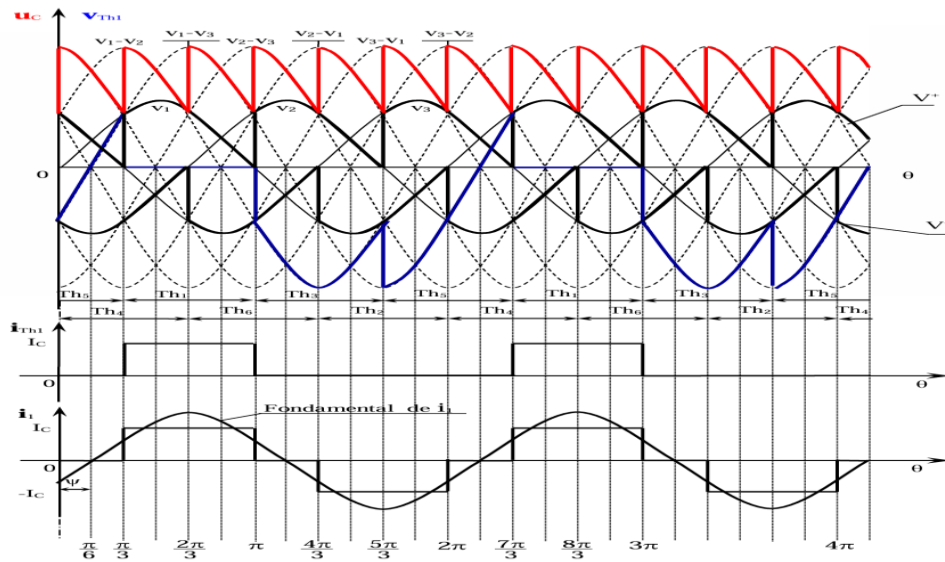
Figure(III.16) : Différents modes du fonctionnement.

d. La valeur efficace de la tension :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\psi}^{\frac{5\pi}{6}+\psi} 3V_m^2 \sin^2 \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) d\omega t} \quad (\text{III.57})$$

$$V_{rms} = \sqrt{6} V_m \sqrt{\left(\frac{1}{4} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\psi \right)} \quad (\text{III.5})$$

e. Forme d'ondes des différentes grandeurs pour $\psi = \frac{\pi}{6}$:



(Figure III.17) : Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur PT3 tous thyristors.

Indépendamment de la valeur de ψ , la durée de cette tension de sortie est fixée à $\frac{\pi}{3}$.

Théoriquement, l'angle de commande ψ peut varier de 0 à π . En réalité, l'éventualité de variation est uniquement de 0 à $\pi - \gamma$, ou γ fait référence à ce qu'on appelle l'angle de garde.

f. Etude des courants :

- Courants dans les thyristors :

$$I_{T \text{ moy}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \psi}^{\frac{5\pi}{6} + \psi} I_c d\theta = \frac{I_c}{2\pi} [\theta]_{\frac{\pi}{6} + \psi}^{\frac{5\pi}{6} + \psi} \Rightarrow I_{T \text{ moy}} = \frac{I_c}{3} \quad (\text{III.59})$$

$$I_{T \text{ eff}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \psi}^{\frac{5\pi}{6} + \psi} (I_c)^2 d\theta} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \Rightarrow I_{T \text{ eff}} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad (\text{III.60})$$

- Facteur de puissance :

✓ Courant secondaire efficace $I_{1 \text{ eff}}$:

$$I_{1 \text{ eff}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} (I_1)^2 d\theta} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_c^2 d\theta} = I_c \sqrt{\frac{2}{3}} \Rightarrow I_{1 \text{ eff}} = I_c \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (\text{III.61})$$

✓ Puissance de la charge :

$$P_C = V_c \cdot I_c = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\psi) I_c \quad (\text{III.62})$$

✓ Puissance apparente secondaire :

$$S = 3VI_1 = 3 \frac{V_m}{\sqrt{2}} I_c \sqrt{\frac{2}{3}} = \frac{3}{\sqrt{3}} V_m I_c = \sqrt{3} V_m I_c \quad (\text{III.63})$$

✓ Facteur de puissance :

$$f_s = \frac{P_c}{S} = \frac{\frac{3\sqrt{3}V_m \cos(\psi)I_c}{\pi}}{\sqrt{3}V_m I_c} = \frac{3}{\pi} \cos(\psi) \quad (\text{III.64})$$

Ainsi, le déphasage est $\varphi = \psi$ entre V_1 et la composante fondamentale de I_1 .

III.3.3. Pont mixte symétrique :

a. Montage :

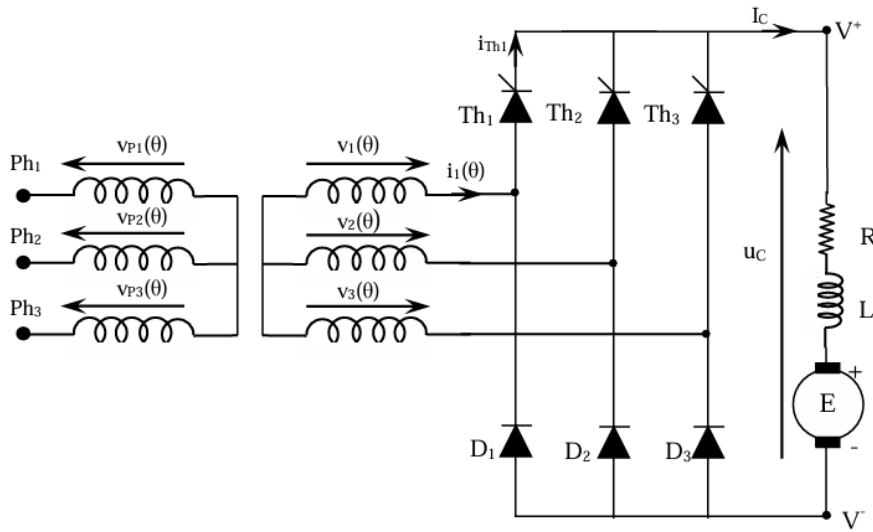


Figure (III.18) : Redresseurs triphasés PT3 mixte.

Ce pont est constitué de trois thyristors et de trois diodes. Les thyristors Th1, Th2 et Th3 sont déclenchés lors de la phase positive des tensions V_1, V_2 , et V_3 . Durant l'alternance négative, les diodes D_1, D_2 , et D_3 sont en mode conducteur ; [8].

L'angle d'amorçage de référence est toujours l'angle d'amorçage naturel. Le transformateur en configuration étoile-étoile sera jugé exempt de fuites magnétiques et de résistances. Le pont sera également jugé impeccable et la charge est composée d'un moteur à courant continu avec un courant continu constant I_c absorbé.

Le réseau de tensions secondaires du transformateur sera noté de la façon suivante :

$$\begin{cases} V_1 = V_m \sin(\theta) \\ V_2 = V_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_3 = V_m \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.65})$$

b. Analyse du fonctionnement :

Le décalage à l'amorçage est ψ ; nous calculons d'abord la tension $V^+(\theta)$ pour cette valeur d'angle d'amorçage, puis nous déterminons la tension $V^-(\theta)$ pour cet angle de commande identique. On peut donc identifier les caractéristiques spécifiques de ce pont. En procédant par étapes successives, on peut alors construire le tableau suivant avec $\psi = \frac{\pi}{2}$:

Tableau (III.3) : Intervalles de conduction PT3

<i>Intervalle</i>	<i>Interrupteurs en conduction</i>	<i>Tension de sortie u_c</i>	<i>Courant i_l</i>
$\left[\frac{2\pi}{3}, \frac{7\pi}{6} \right]$	T_1 et D_3	$V_1 - V_3 = u_{12}$	I_c
$\left[\frac{7\pi}{6}, \frac{4\pi}{3} \right]$	T_1 et D_1	0	0
$\left[\frac{4\pi}{3}, \frac{11\pi}{6} \right]$	T_2 et D_1	$V_2 - V_1 = u_{23}$	$-I_c$
$\left[\frac{11\pi}{6}, 2\pi \right]$	T_2 et D_2	0	0
$\left[2\pi, \frac{5\pi}{2} \right]$	T_3 et D_2	$V_3 - V_2 = u_{31}$	0
$\left[\frac{5\pi}{2}, \frac{8\pi}{3} \right]$	T_3 et D_3	0	0

c. Valeur moyenne de la tension de sortie V_c :

Il est observé qu'au cours d'une période donnée, nous avons trois arches identiques, ce qui donne :

L'équation $V_c(\theta) = V^+(\theta) - V^-(\theta)$ permet également de déterminer la valeur moyenne de la tension V_c :

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T V_c(\theta) d\theta = \frac{1}{T} \int_0^T V^+(\theta) d\theta - \frac{1}{T} \int_0^T V^-(\theta) d\theta \quad (III.66)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T V^+(\theta) d\theta = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\psi) \text{ et } \frac{1}{T} \int_0^T V^-(\theta) d\theta = -\frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \quad (III.67)$$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\psi) - \left(-\frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \right) \quad (III.68)$$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m (1 + \cos(\psi)) \quad (III.69)$$

d. Valeur efficace de la tension :

$$V_{rms} = \sqrt{\left[\frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\psi}^{\frac{5\pi}{6}+\psi} 3V_m^2 \sin^2 \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) d\omega t \right]} \quad (III.70)$$

$$V_{rms} = \sqrt{3} V_m \sqrt{\left[\frac{3}{4\pi} \left(\pi - \psi + \frac{\sin 2\psi}{2} \right) \right]} \quad (\text{III.71})$$

Le graphique ci-dessous illustre la fluctuation de la tension de sortie à travers la charge v_{DC} pour le pont mixte et le pont tous thyristors.

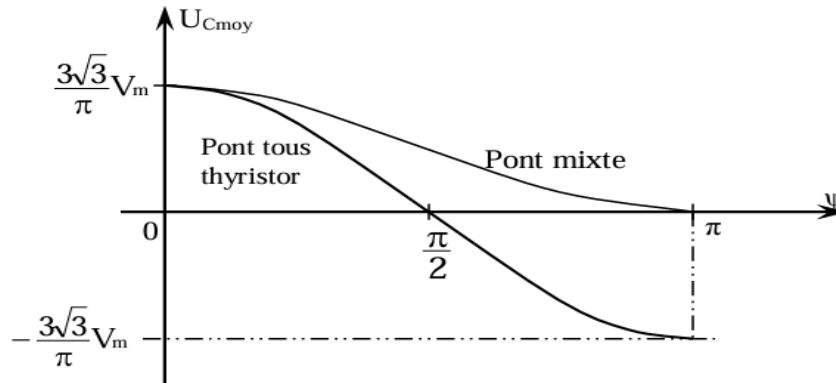
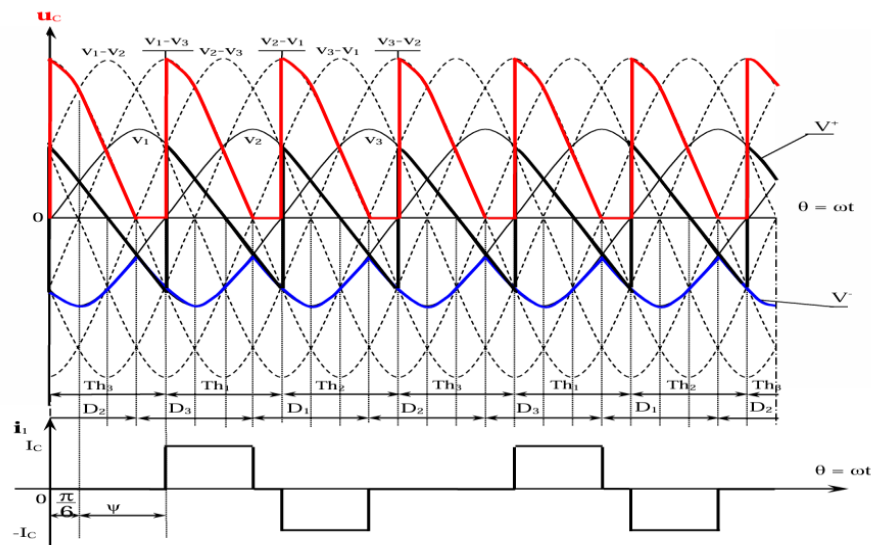


Figure (III.19) : Variation de la tension de sortie.

e. Formes d'ondes des différentes grandeurs pour $\psi = \frac{\pi}{2}$:



Figure(III.20) : Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur PT3 mixte.

III.4.Partie de simulation et implémentations pratiques

III.4. Partie de simulation et implémentations pratiques :

Dans ce chapitre, un redressement commandé est utilisé à base des thyristors. La tension moyenne obtenue sera variable par l'intermédiaire de l'angle d'amorçage. Les convertisseurs monophasés et triphasés à charge résistive et inductive seront simulés et réalisés pratiquement.

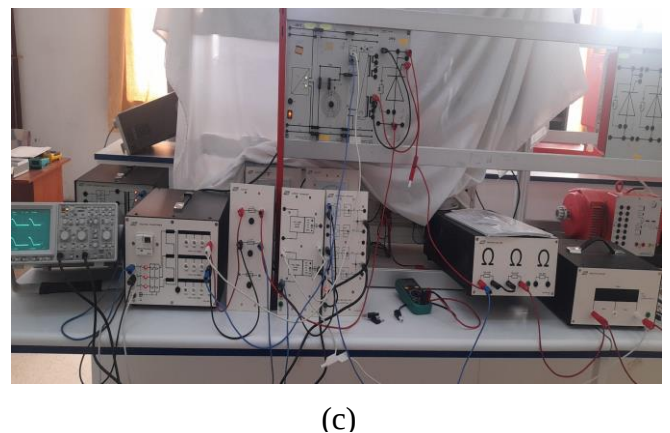
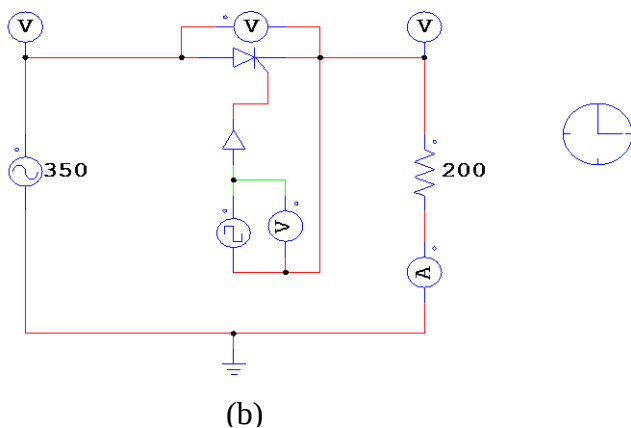
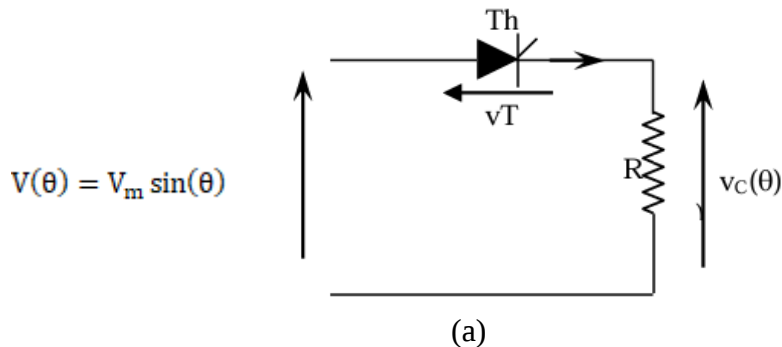
II.4.1. Simulation par PSIM sur monophasé commandé à simple alternance :

II.4.1.1. Avec charge résistive :

a. Equipement requis :

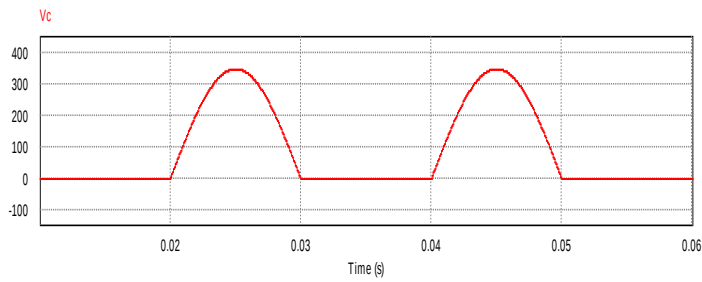
1. 1 Cadre profilé à deux étages, de largeur 120 cm.
2. 1 Transformateur triphasé 45/90, 30N.
3. Branche de convertisseur à thyristors.
4. 1 Rhéostat à curseur 350 Ω /1,5A.
5. 1 Alimentation stabilisé $\pm 15V$ /3A.
6. 2 Appareils de mesure A.
7. 1 Oscilloscope bi canal, par ex. HAMEG HM 412-5.
8. 1 Alimentation continue 220V.

b. Montage :

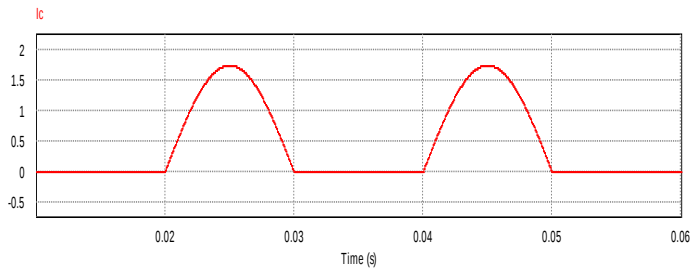


(Figure III.21) : Montage simple alternance commandé avec charge résistive, (a) théorique, (b) simulation, (c) pratique

c. Résultats des simulations et pratiques :

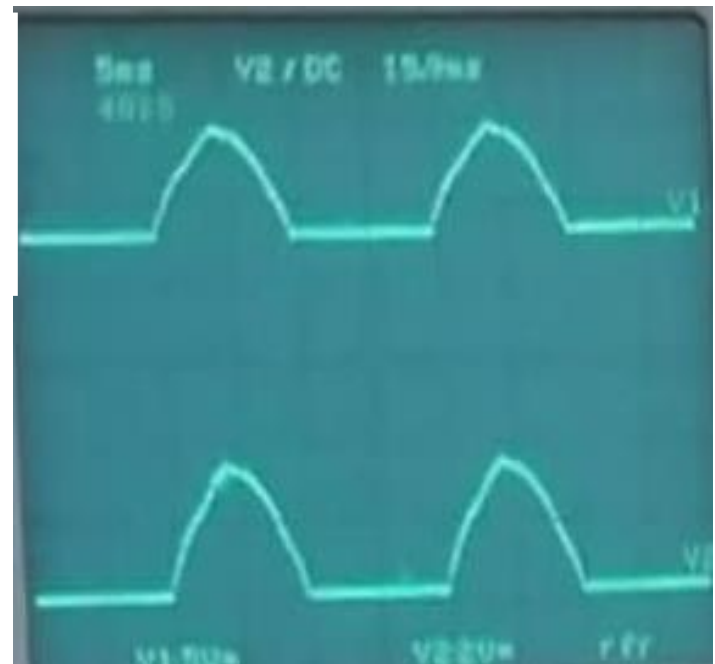


(a)



(b)

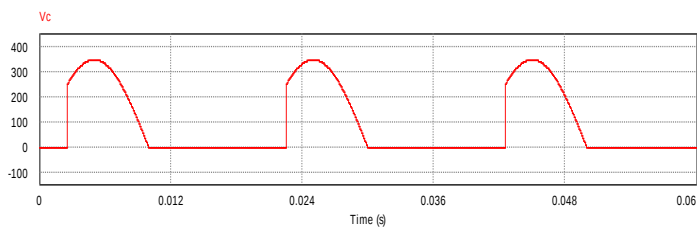
Figure (III.22) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = 0$, par simulation.



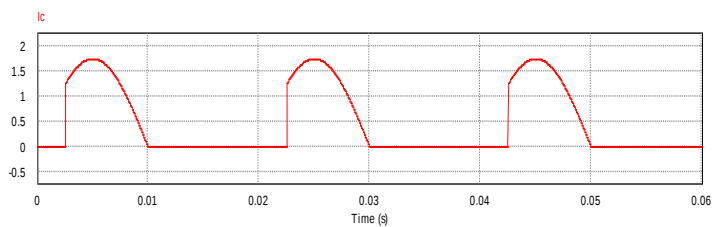
CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.23) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge résistive pour $\psi = 0$

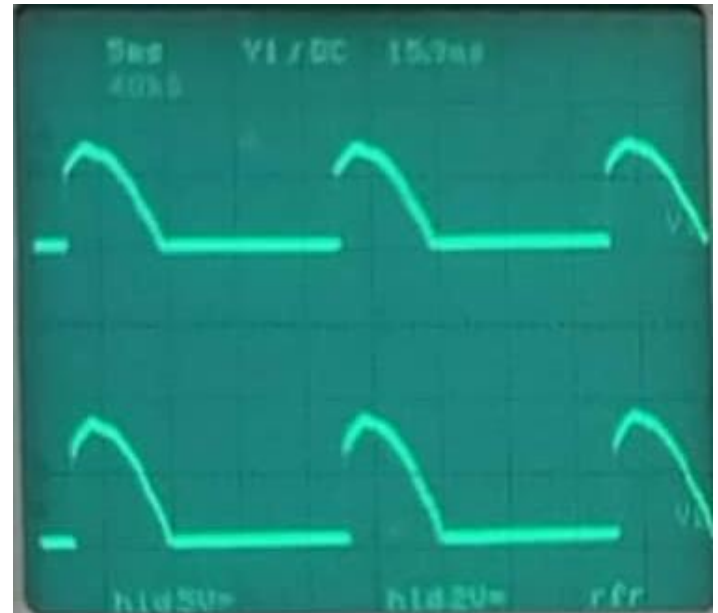


(a)



(b)

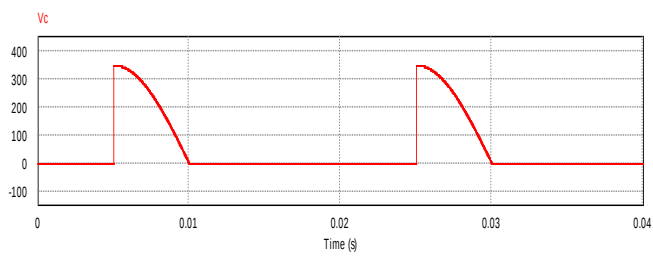
Figure (III. 24) : (a) Tension et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/4$.



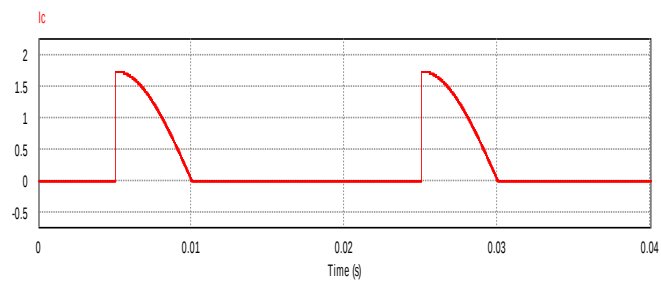
CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.25) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge résistive pour $\psi = \pi/4$



(a)



(b)



CH1	5V	5ms
CH2	2V	5ms

Figure (III.26) : (a) Tension et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/2$.

Figure (III.27) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge résistive pour $\psi = \pi/2$.

II.4.1.2. Avec charge inductive:

a. Montage :

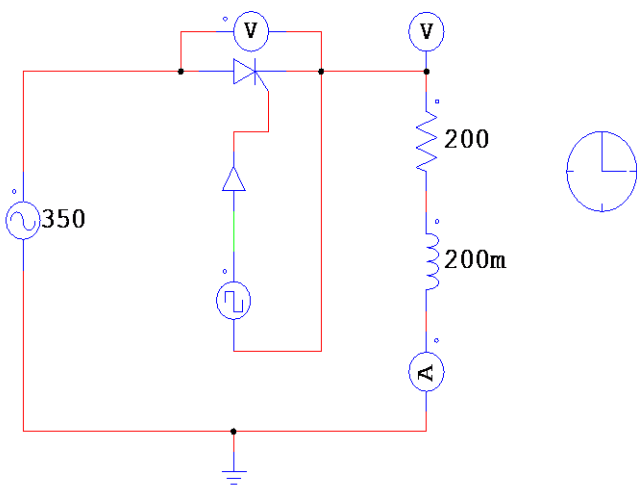
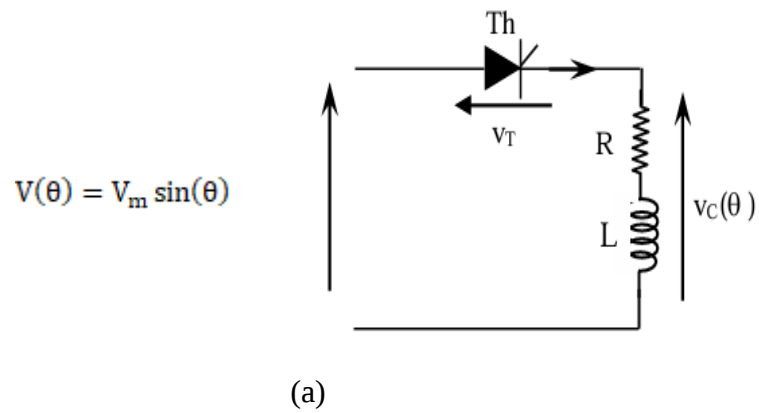
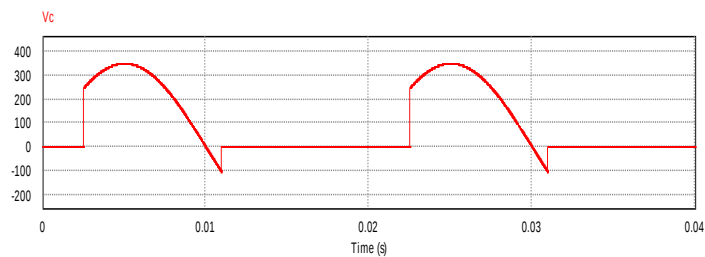
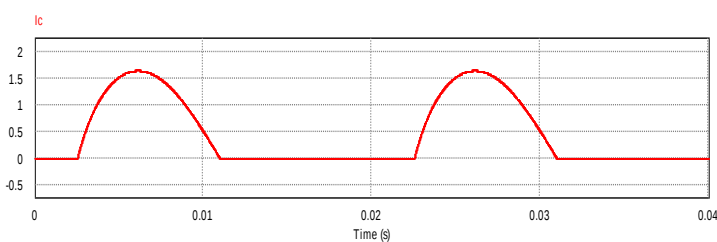


Figure (III.28) : Montage simple alternance charge inductive, (a) théorique, (b) simulation, (c) pratique.

b. Résultats des simulations et pratiques :



(a)



(b)

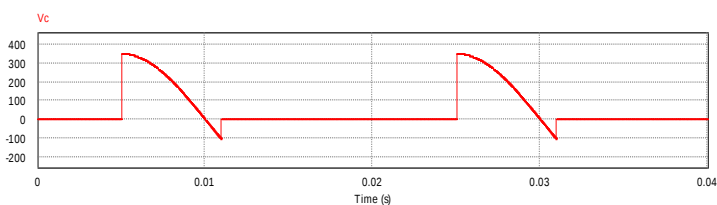
Figure (III.29) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/4$.



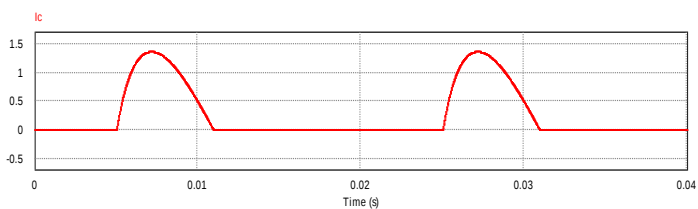
CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.30) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = \pi/4$



(a)



(b)

Figure (III.31) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/2$.



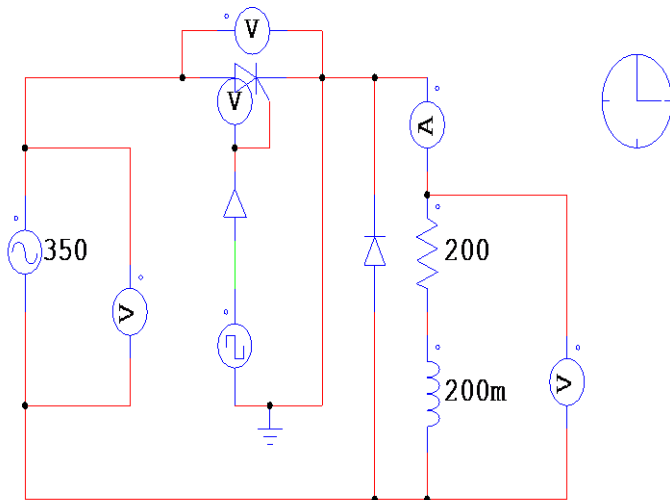
CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.32) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = \pi/2$

II.4.1.3. Avec diode de roue libre :

a. Montage :



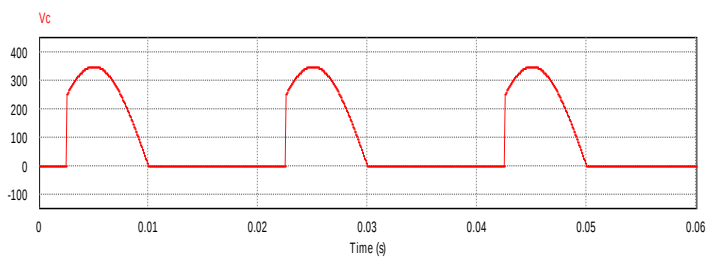
(a)



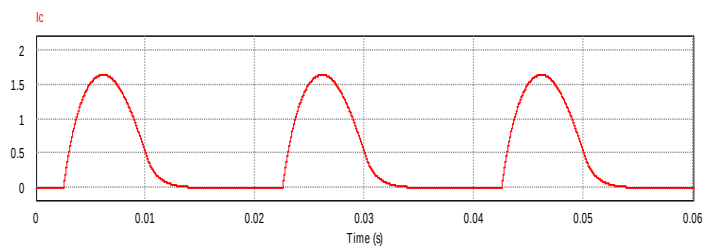
(b)

Figure (III.33) : Montage simple alternance charge résistive- inductive avec D_{RL} , (a) simulation, (b) pratique.

b. Résultats des simulations et pratique :



(a)



(b)

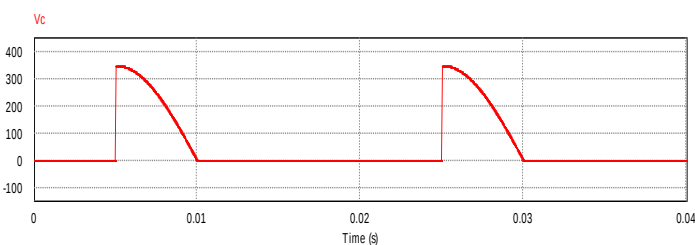
Figure (III.34) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/4$.



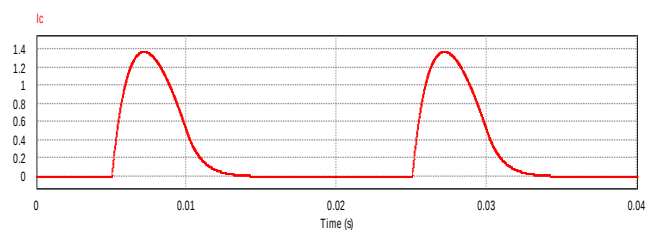
CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.35) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive avec D_{RL} pour $\psi = \pi/4$

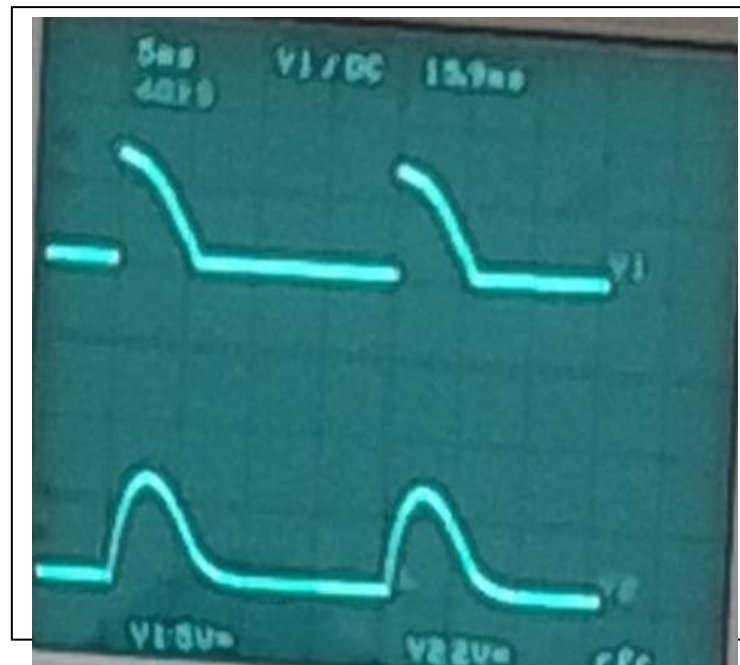


(a)



(b)

Figure (III.36) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/2$.



CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.37) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive avec D_{RL} pour $\psi = \pi/2$

c. Valeurs moyennes et efficaces :

Average Value

Time From	1.0000000e-005
Time To	6.0000000e-002
Vc	1.1140577e+002

RMS Value

Time From	1.0000000e-005
Time To	6.0000000e-002
Vc	1.7499999e+002

On a :

$$V_{\max} = 350 \text{ V}$$

$$V_{\text{dc}} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \psi) \quad V_{\text{rms}} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \psi + \frac{\sin 2\psi}{2} \right)}$$

Pour $\psi = 0$:

$$V_{\text{dc}} = \frac{350}{2\pi} (1 + \cos 0) = 111.4 \text{ V} \quad \text{et} \quad V_{\text{rms}} = \frac{350}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - 0 + \frac{\sin 2 \times 0}{2} \right)} = 175 \text{ V}$$

II.4.1.4. Interprétation :

Dans cette expérience, le redressement monophasé simple alternance a été simulé et réalisé pratiquement.

Dans le premier essai, la tension obtenue à la sortie alimente une charge purement résistive de valeur 200Ω , alors concernant la simulation la tension visualisée par PSIM de valeur maximale approximative est 349.9 V on compare cette valeur pratiquement. 1 carreau représente 5 V à l'oscilloscope et la valeur trouvée est multipliée par le gain de notre amplificateur qui est 50 donc la tension maximale est égale $7 \times 50 = 350 \text{ V}$ approximative, et pour la lecture de la valeur de courant on a visualisé par PSIM une valeur maximale de 1.74 A

Validation pratique : 1 carreau représente 2 A ce qui donne comme valeur maximale approximative 3A, donc on doit diviser cette valeur par un gain de 2 donné par l'amplificateur de courant ainsi le courant maximum est $3/2=1.5$ A approximativement qui valide celle obtenue par simulation de 1.74A.

On remarque également d'après les graphes en comparant entre la charge résistive pure et la charge résistive-inductive : dans la charge résistive les courbes de la tension et le courant sont les mêmes (concernant la forme), tandis que pour la charge inductive les courbes de tension présentent une partie négative et le courant s'annule au-delà de π et enfin pour la charge inductive avec la diode de roue libre (D_{RL}), la partie négative a disparu grâce à l'inductance et pour que le courant devienne continu sans interruption, il faut augmenter la valeur de l'inductance au lieu de 200mH chose qu'on ne peut pas obtenir avec la charge résistive-inductive sans diode de roue libre.

Donc, pratiquement la diode de roue libre est indispensable afin non seulement avoir la continuité du courant mais également pour éviter l'endommagement du composant électronique lors du blocage de ce dernier.

II.4.2. Simulation par PSIM du convertisseur commandé monophasé à double alternance

Pour des puissances moyennes, on fait recours en général à des convertisseurs double alternance.

II.4.2.1. Avec charge résistive-inductive :

a. Equipement requis :

- 1 1 Cadre profilé à deux étages, de largeur 120 cm.
- 2 1 Transformateur triphasé 45/90, 30N.
- 3 2 Branche de convertisseur à thyristors.
- 4 1 Rhéostat à curseur 350 Ω /1,5A.
- 5 1 Alimentation stabilisé $\pm 15V$ /3A.
- 6 2 Appareils de mesure A.
- 7 1 Oscilloscope bi canal, par ex. HAMEG HM 412-5.
- 8 1 Alimentation continue 220V.

b. Montage (tous thyristors):

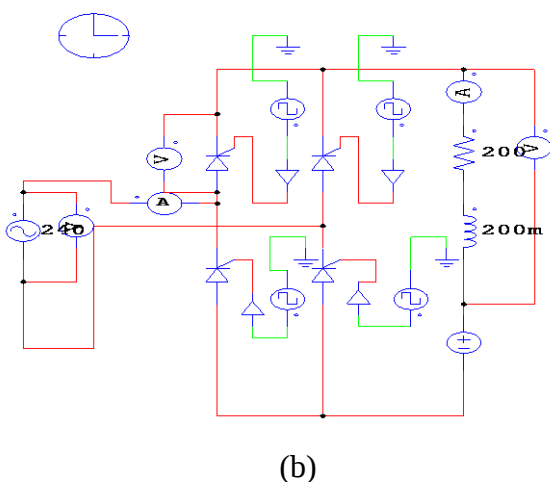
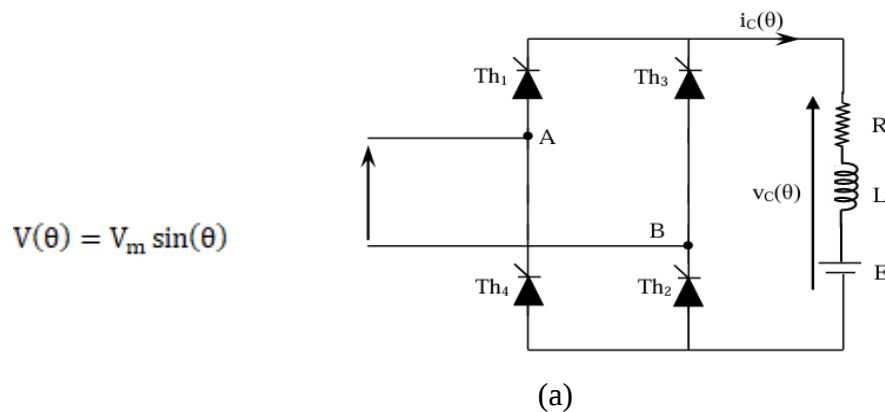
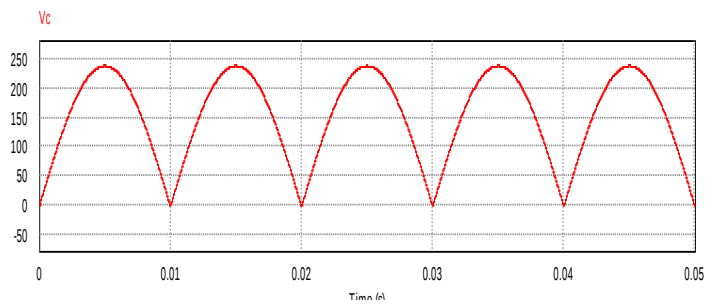
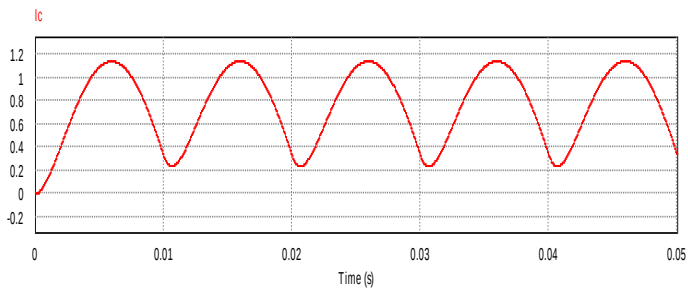


Figure (III.38) : Montage double alternance commandé avec charge inductive, (a) théorique, (b) simulation, (c) pratique.

c. Résultats des simulations et pratiques :

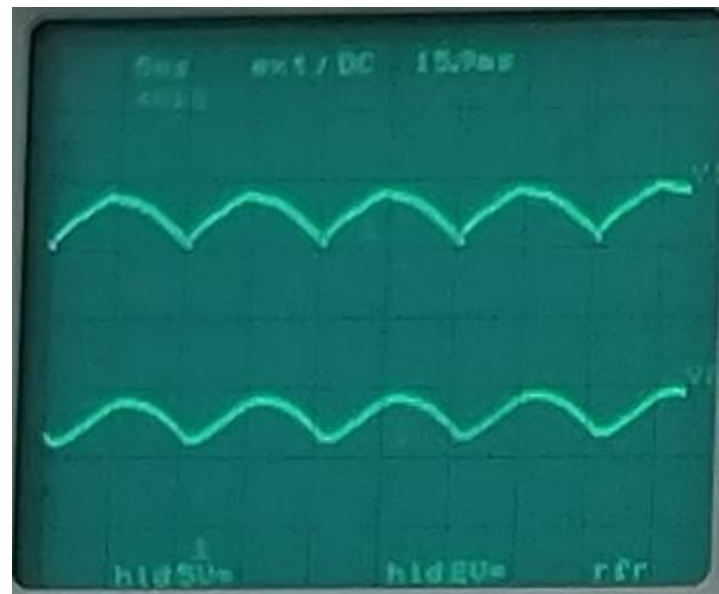


(a)



(b)

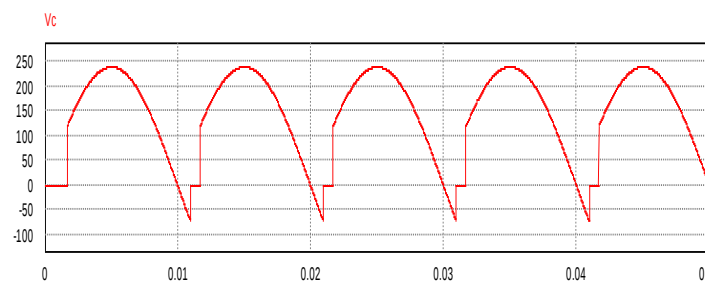
Figure (III.39) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = 0$.



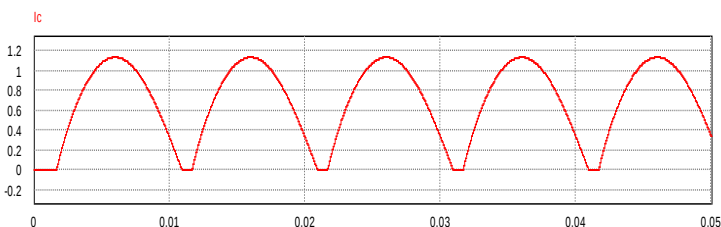
CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.40) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive pour $\psi = 0$.

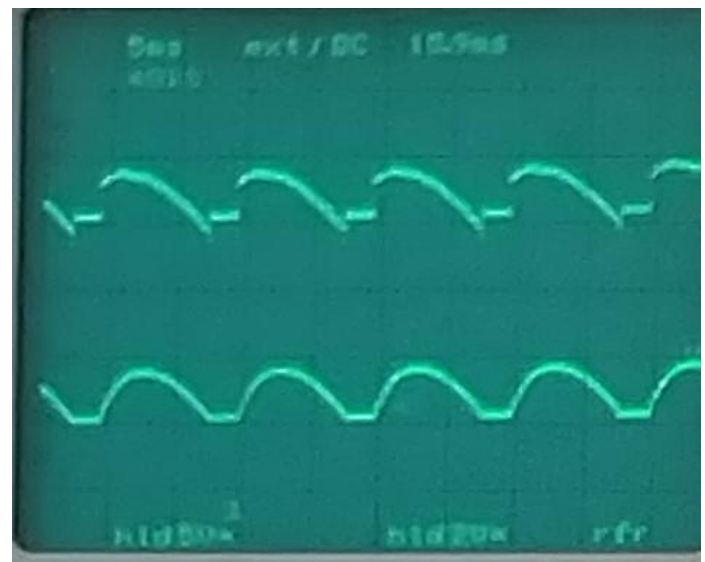


(a)



(b)

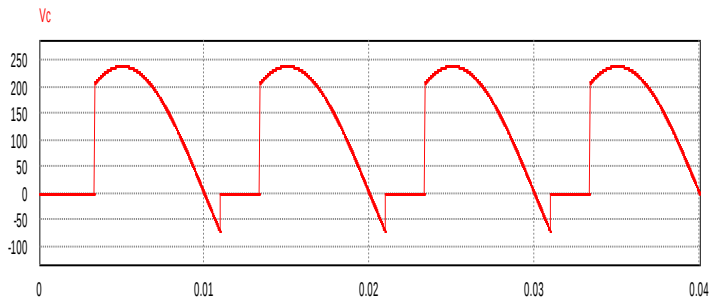
Figure (III.41) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/6$.



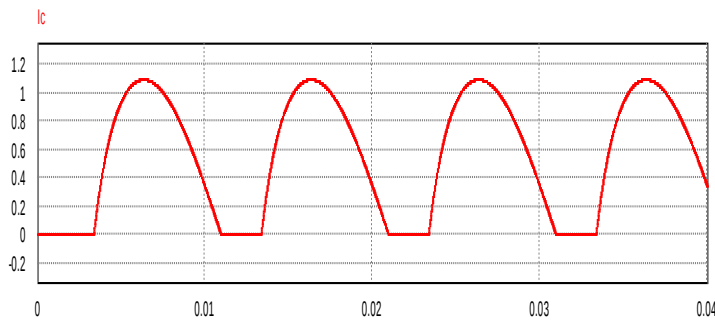
CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.42) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive pour $\psi = \pi/6$.

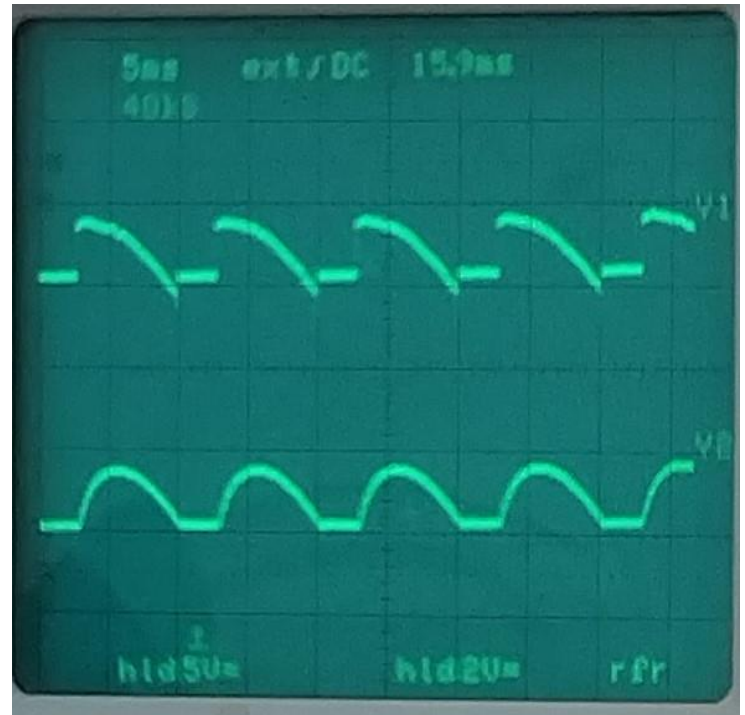


(a)



(b)

Figure (III.43) : (a) tension de sortie et (b) courant de sortie pour $\psi = \pi/3$.



CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.44) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive pour $\psi = \pi/3$.

c. Valeurs moyenne et efficace :

On a :

$$V_m = 240V$$

➤ Pour $\psi = 0$

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \cos(\psi) = \frac{240 \times 2}{\pi} \cos(0) = 152,78V$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{240}{\sqrt{2}} = 169.7V$$

➤ Pour $\psi = \pi/3$:

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \cos(\psi) = \frac{240 \times 2}{\pi} \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) = 76.4V$$

II.4.2.2. Interprétation :

Dans le premier essai, la tension de sortie obtenue alimente une charge purement résistive de valeur $200\ \Omega$, alors concernant la simulation la tension visualisée par PSIM de valeur maximale approximative est **239 V** et en comparant cette valeur par celle qui est lue de l'oscilloscope de 4.8V est multipliée par le gain de l'amplificateur 50, on trouve une tension maximale de **$4.8 \times 50 = 240\text{ V}$** approximative qui est presque identique à celle de la simulation. Concernant la valeur du courant maximal visualisé par PSIM est 1.14 A qui est très proche de la valeur pratique 1.5A.

On note également qu'au fur et à mesure l'angle d'amorçage augmente la valeur moyenne diminue.

II.4.3. Pont mixte symétrique (2 diodes / 2 Thyristors) :

Généralement, ce convertisseur est utilisé point de vue économique et on va remarquer que la tension de sortie ne devient jamais négative peu importe la charge, c'est-à-dire ce convertisseur il fonctionne uniquement comme redresseur.

II.4.3.1. Charge résistive :

a. Montage :

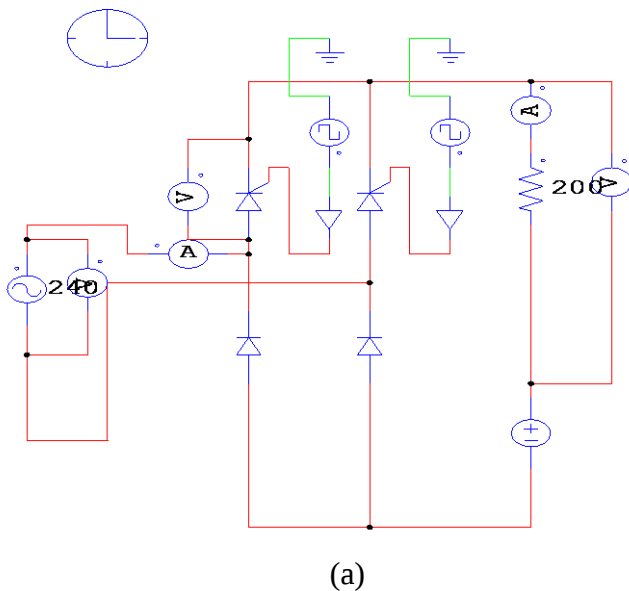
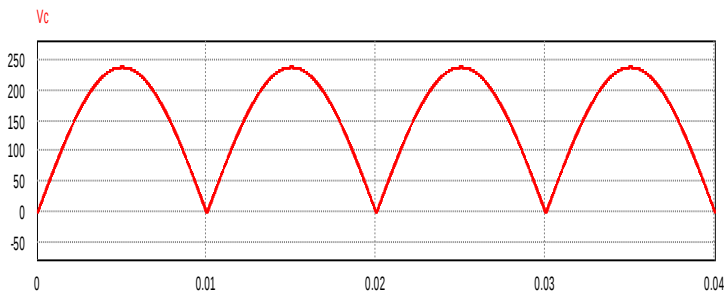
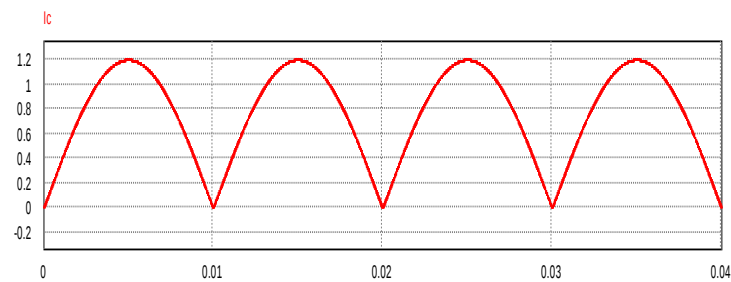


Figure (III.45) : Schéma d'un pont monophasé mixte PT2 avec charge résistive, (a) simulation, (b) pratique.

b. Résultats des simulations et pratiques :

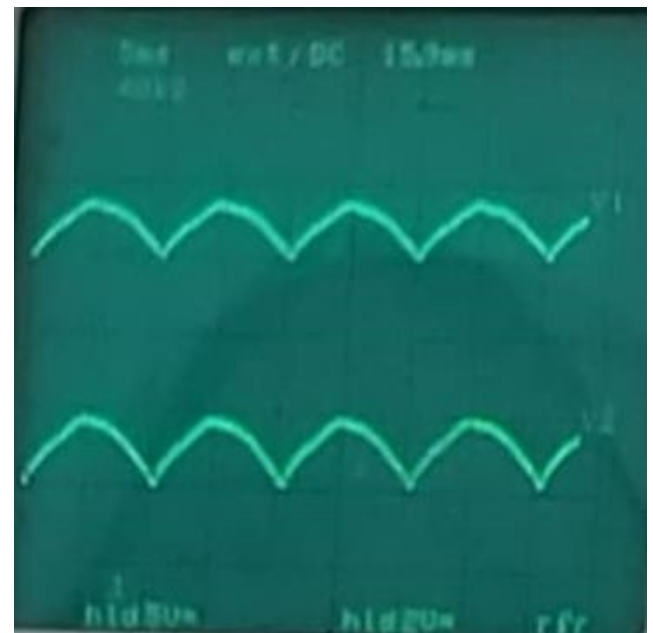


(a)



(b)

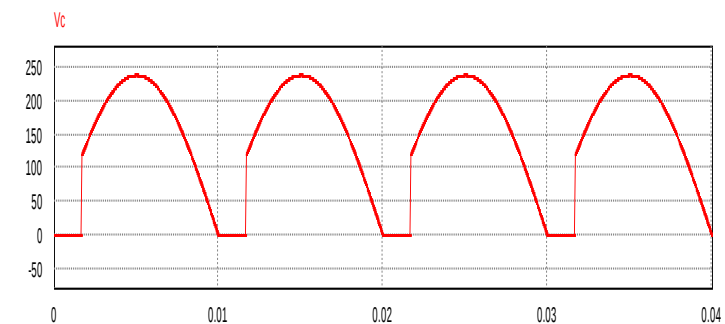
Figure (III.46) : (a) Tension de sortie (b) et courant de sortie avec charge résistive pour $\psi = 0$



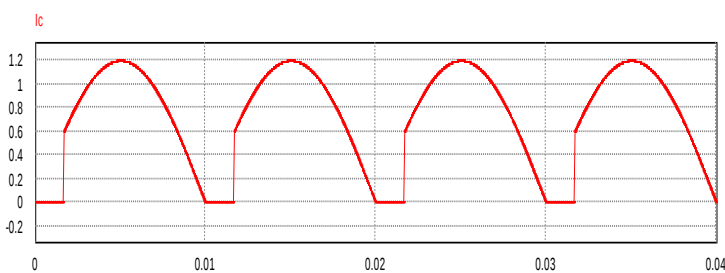
CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.47) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge résistive pour $\psi = 0$

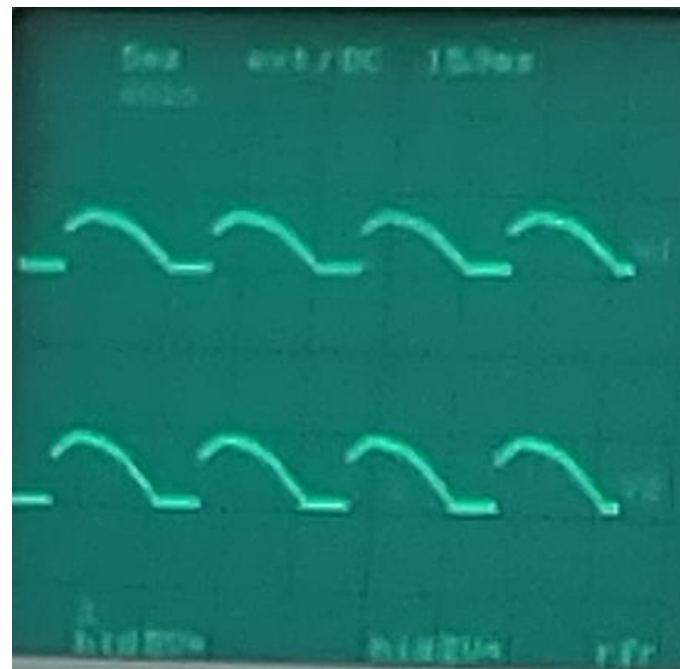


(a)



(b)

Figure (III.48) : (a) Tension de sortie (b) et courant de sortie avec charge résistive pour $\psi = \pi/6$



CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.49) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge résistive pour $\psi = \pi/6$

c. Valeur moyenne et efficace ($\psi = 0$) :

On a :

$$V_{\max} = 240 \text{ V}$$

$$V_{\text{dc}} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \psi)$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \psi + \frac{\sin 2\psi}{2})}$$

➤ Pour $\psi = 0$:

$$V_{\text{dc}} = \frac{240}{\pi} (1 + \cos 0) = 152.78 \text{ V} \quad \text{et} \quad V_{\text{rms}} = \frac{240}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - 0 + \frac{\sin 2.0}{2})} = 169.70 \text{ V}$$

Average Value

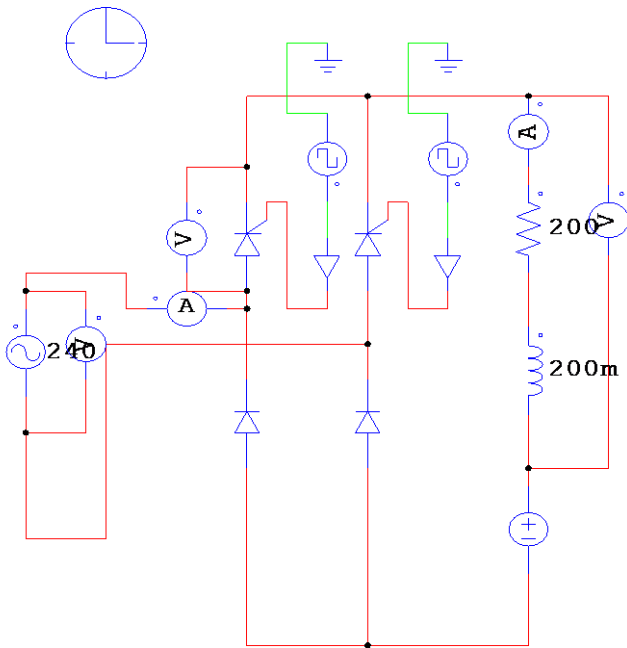
Time From	1.0000000e-005
Time To	4.0000000e-002
Vc	1.5179010e+002

RMS Value

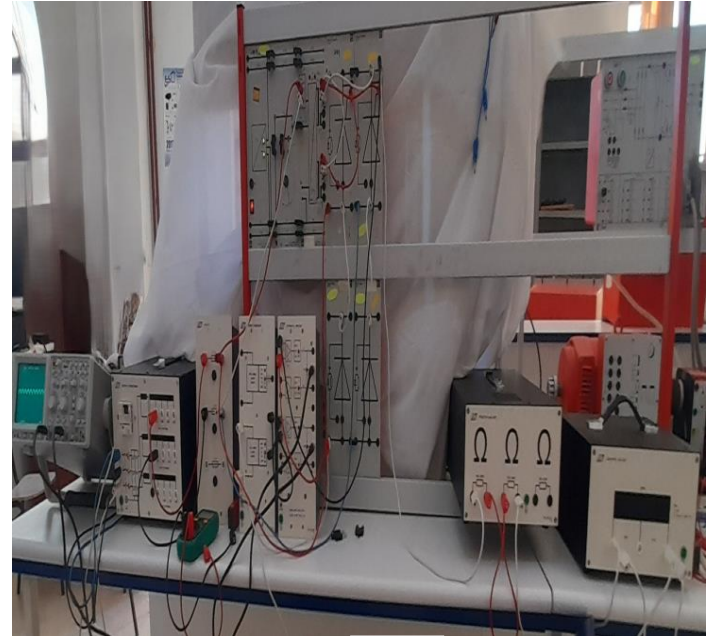
Time From	1.0000000e-005
Time To	4.0000000e-002
Vc	1.6880585e+002

II.4.3.2. Avec charge inductive :

a. Montage :



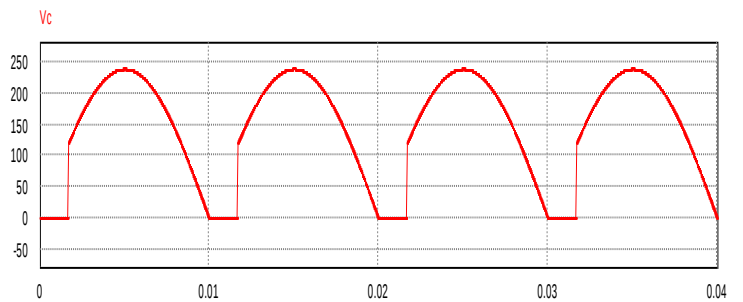
(a)



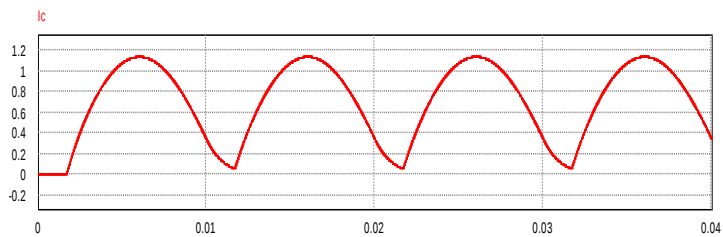
(b)

Figure (III.50) : Schéma d'un pont monophasé mixte avec charge inductive, (a) simulation par Psim, (b) réalisation pratique.

b. Résultats des simulations et pratiques :

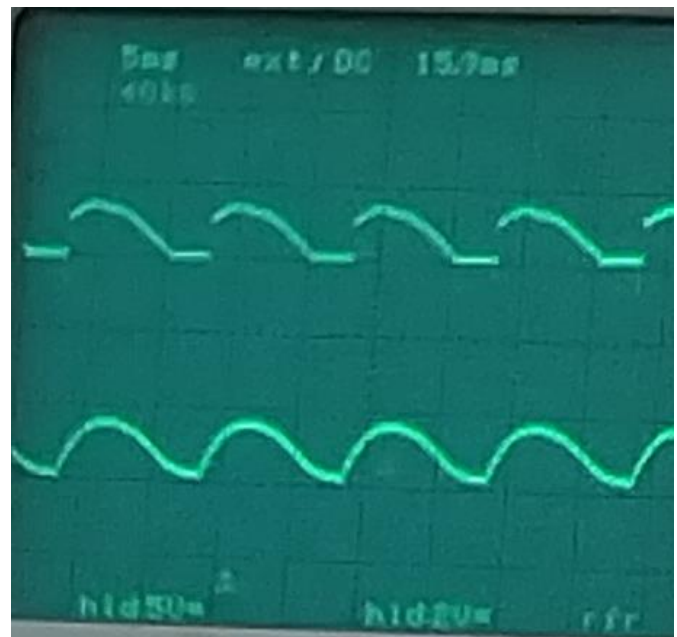


(a)



(b)

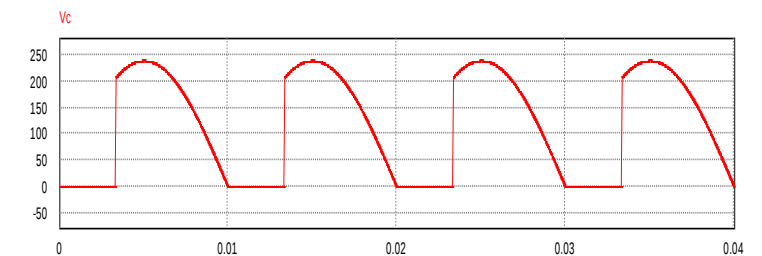
Figure (III.51) : (a) Tension de sortie (b) et courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = \pi/6$



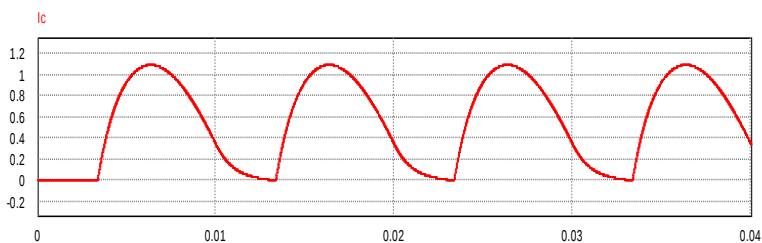
CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.52) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive pour $\psi = \pi/6$

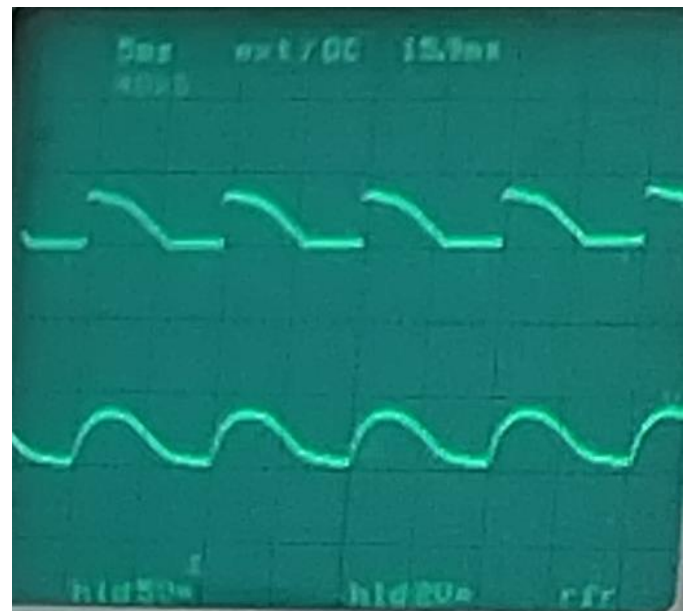


(a)



(b)

Figure (III.53) : (a) Tension de sortie (b) et courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = \pi/3$



CH1 5V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.54) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) charge inductive pour $\psi = \pi/3$

II.4.3.3. Interprétation :

Pour $\psi = 0 \Rightarrow$ PD2 (pont complet à diode). Il est observable que, progressivement, la tension moyenne se réduit à mesure que l'angle d'amorçage augmente. De plus, on note que la portion négative de la courbe disparaît lorsqu'il y a une charge résistive-inductive.

II.4.4. Redressement triphasé commandé, P3:

Ce convertisseur est rarement utilisé à l'industrie. Mais néanmoins il sert comme base à la théorie pour faciliter la compréhension du convertisseur triphasé à pont complet. Les mêmes démarches concernant la simulation et pratique seront effectuées.

II.4.4.1. Avec charge résistive :

a. Equipement requis :

1. 1 Cadre profilé à deux étages, de largeur 120 cm.
9. 1 Transformateur triphasé 45/90, 30N.
10. 3 Branche de convertisseur à thyristors.
11. 1 Rhéostat à curseur 350 Ω /1,5A.
12. 1 Alimentation stabilisée $\pm 15V/3A$.
13. 2 Appareils de mesure A.
14. 1 Oscilloscope bi canal, par ex. HAMEG HM 412-5.
15. 1 Alimentation continue 220V.

b. Montage :

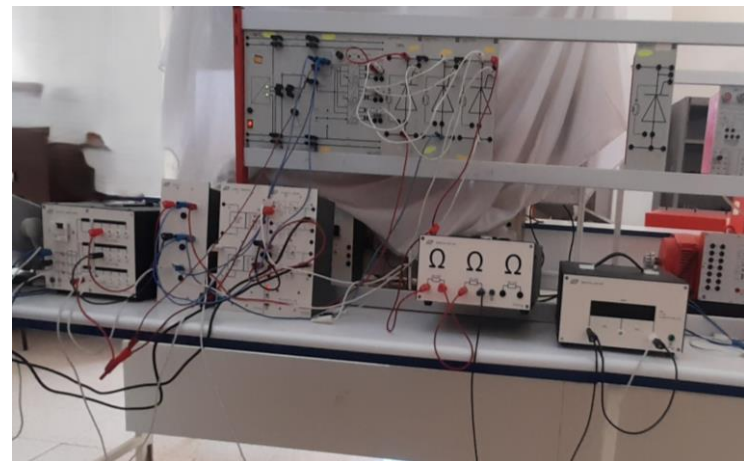
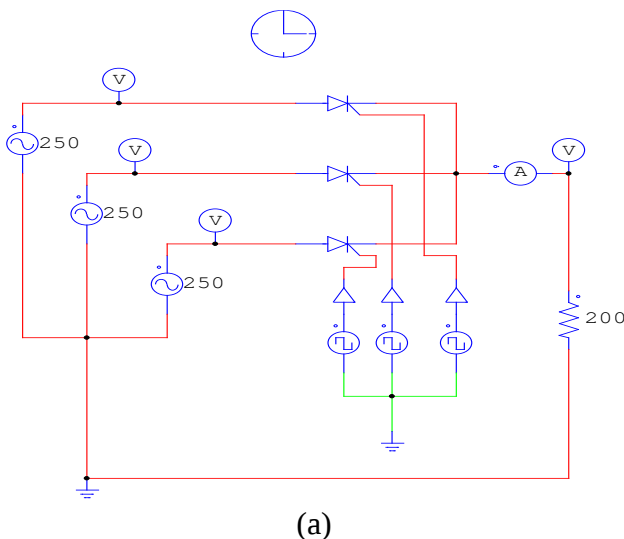
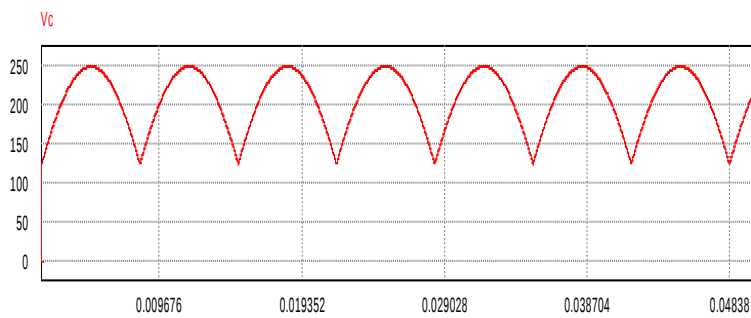
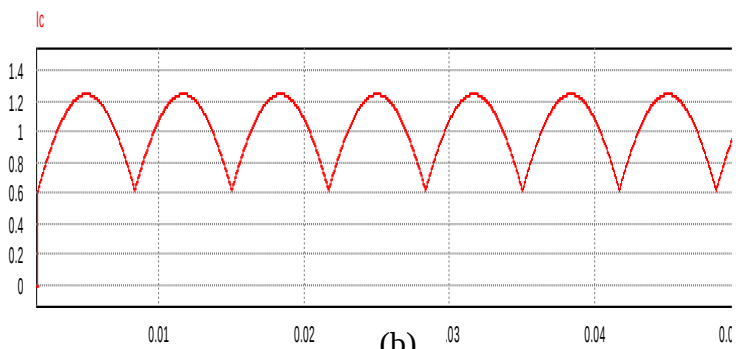


Figure (III.55) : Schéma d'un redresseur triphasé P3 avec charge résistive (a) simulation, (b) pratique.

q. c. Résultats des simulations et pratiques :

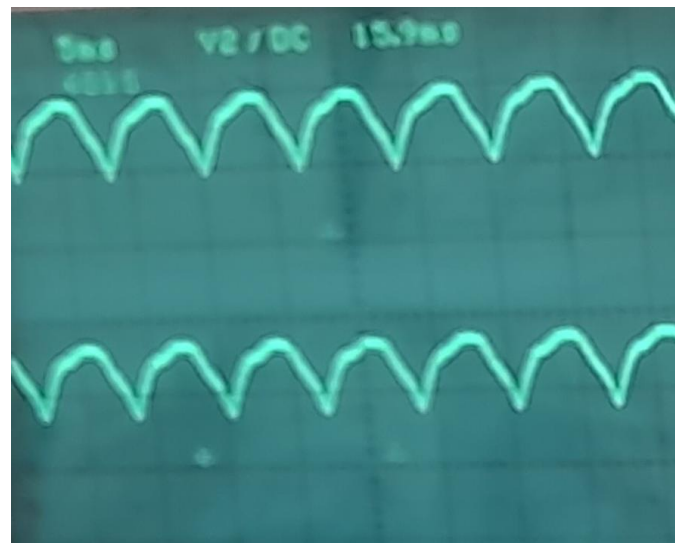


(a)



(b)

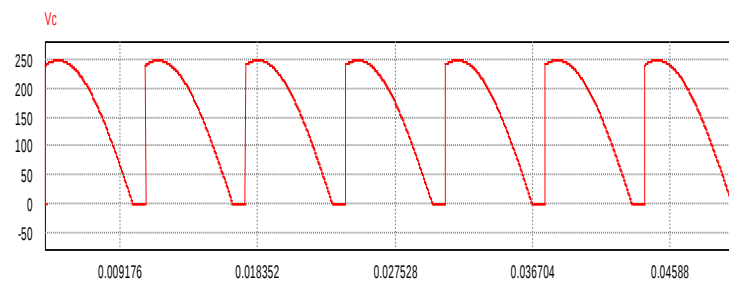
Figure (III.56) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge résistive pour $\psi = 0$.



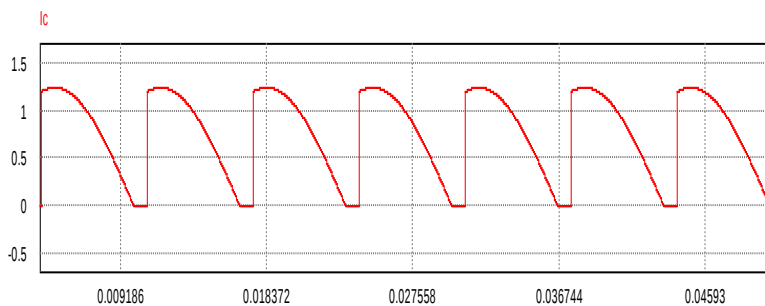
CH1 1V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.57) : Tension de sortie et courant de sortie charge résistive pour $\psi = 0$.



(a)



(b)

Figure (III.58) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge résistive pour $\psi = \pi/4$



CH1 1V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.59) : Tension de sortie et courant de sortie charge résistive pour $\psi = \pi/4$.

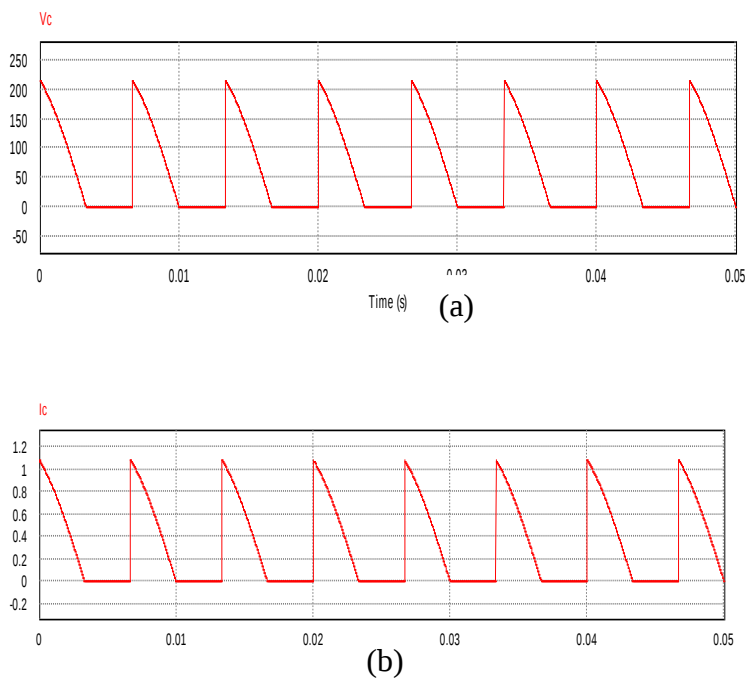


Figure (III.60) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge résistive pour $\psi = \pi/2$

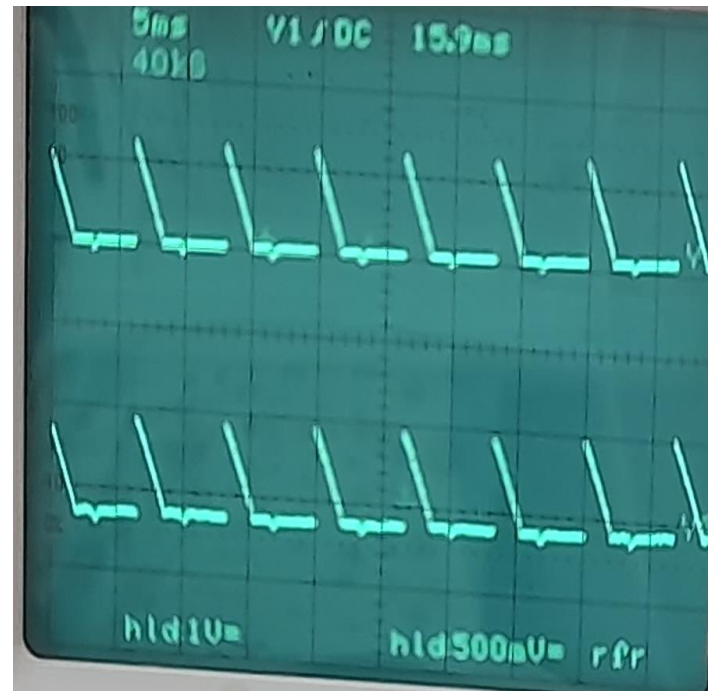


Figure (III.61) : Tension de sortie et courant de sortie charge résistive pour $\psi = \pi/2$.

r. Valeurs moyennes et efficaces :

On a :

$$V_{max} = 250V$$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos(\psi)$$

et

$$V_{rms} = \sqrt{3} V_m \sqrt{\left(\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\psi\right)}$$

Pour $\psi = 0$:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} 250 \cos 0 = 206.7V$$

et

$$V_{rms} = \sqrt{3} \cdot 250 \sqrt{\left(\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cos 0\right)} = 210.1V$$

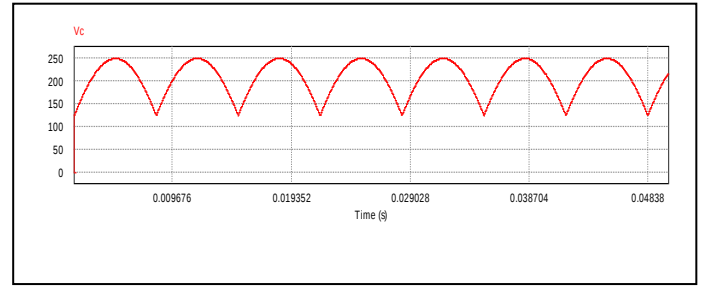
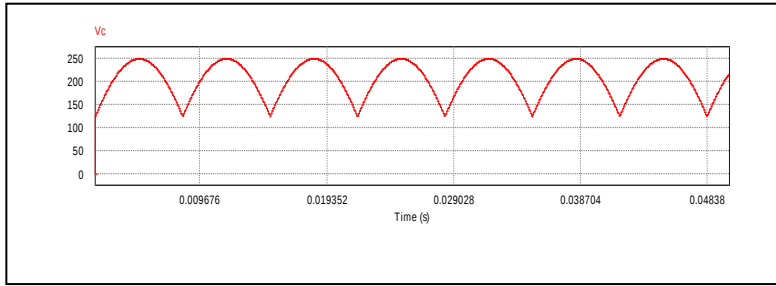
Par simulation

Average Value

Time From	1.6200000e-003
Time To	5.0000000e-002
Vc	2.0543129e+002

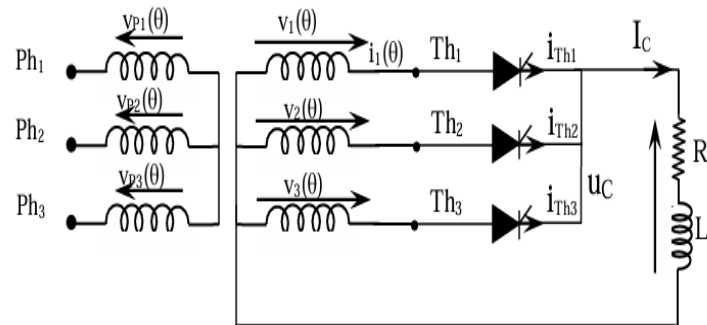
RMS Value

Time From	1.6200000e-003
Time To	5.0000000e-002
Vc	2.0899848e+002

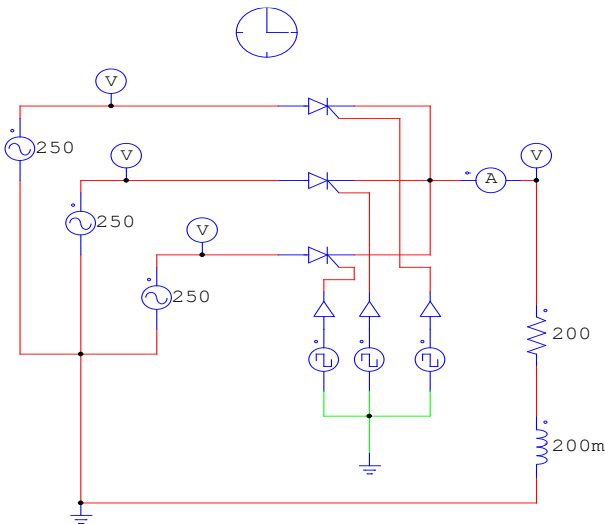


II.4.4.2. Avec charge résistive-inductive :

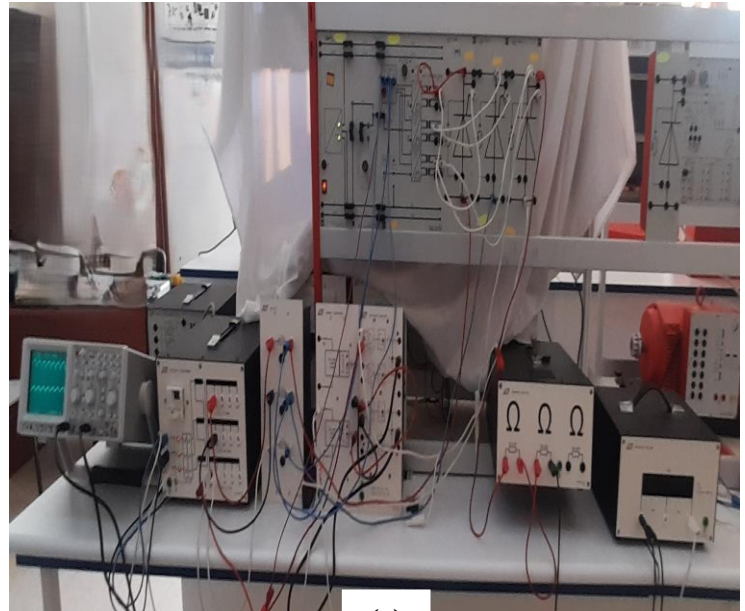
a. Montage :



(a)



(b)



(c)

Figure (III.62) : Schéma d'un redresseur triphasé P3 avec charge résistive-inductive
(a) théorique (b) simulation, (c) pratique.

a. Résultats des simulations :

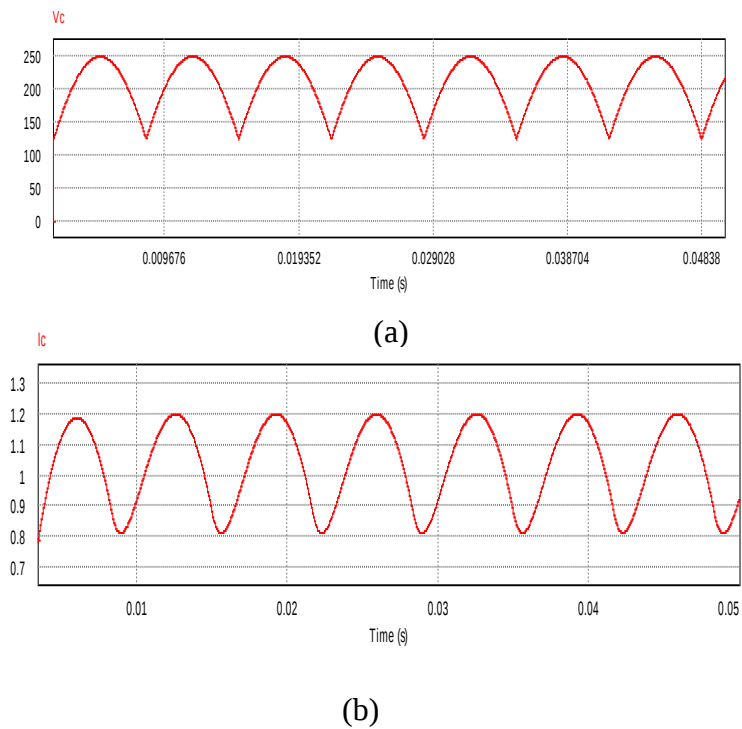


Figure (III.63) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = 0$.

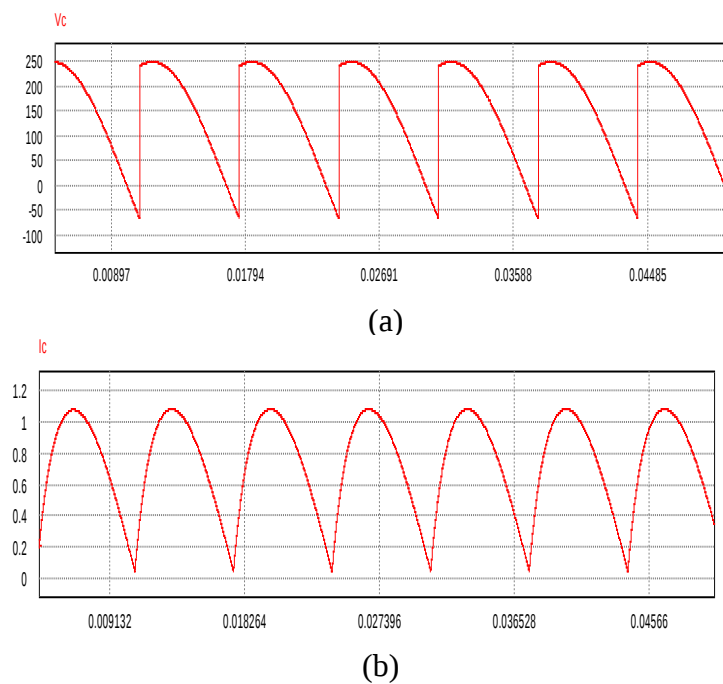
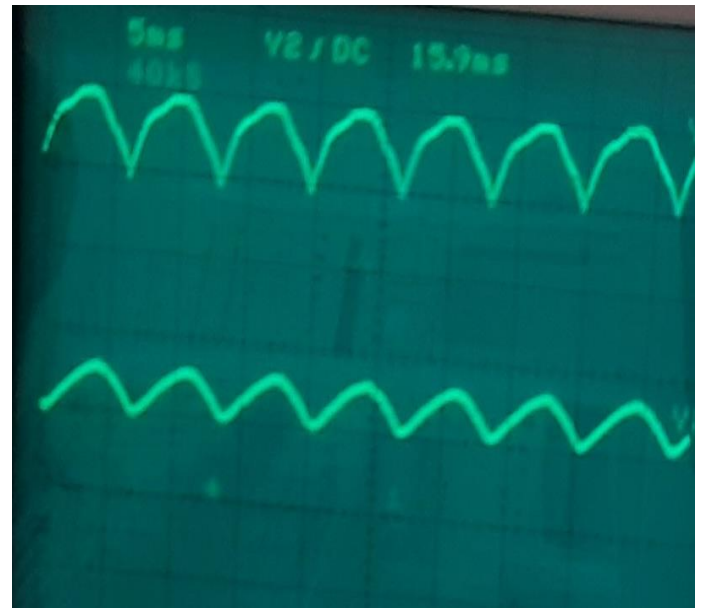
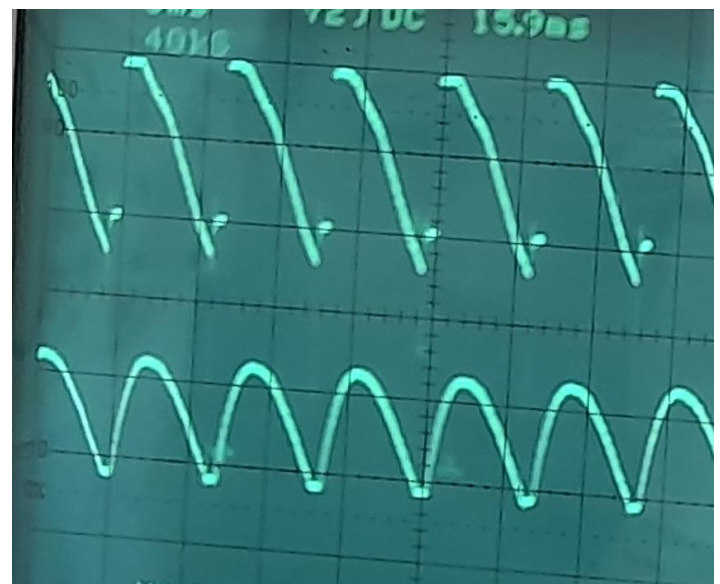


Figure (III.65) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = \pi/4$



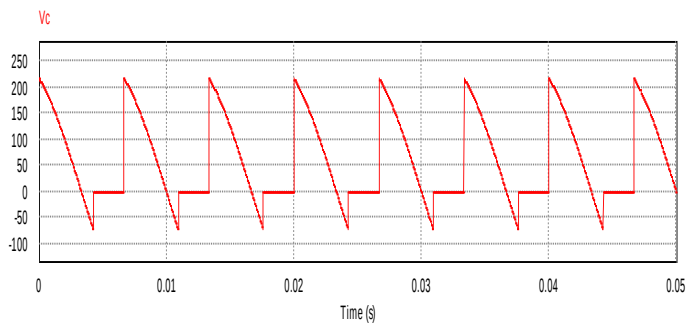
CH1 1V 5ms
CH2 2V 5ms

Figure (III.64) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = 0$.

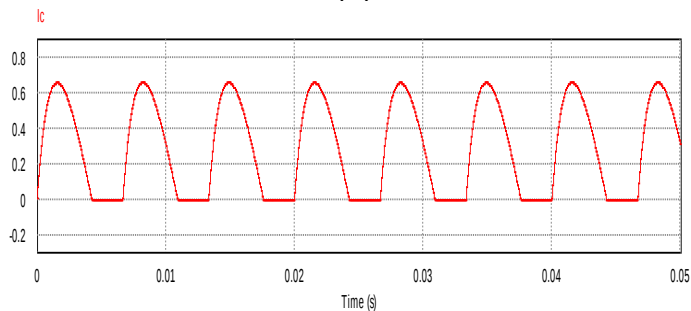


CH1 1V 5ms
CH2 2V 5ms

Figure (III.66) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = \pi/4$.

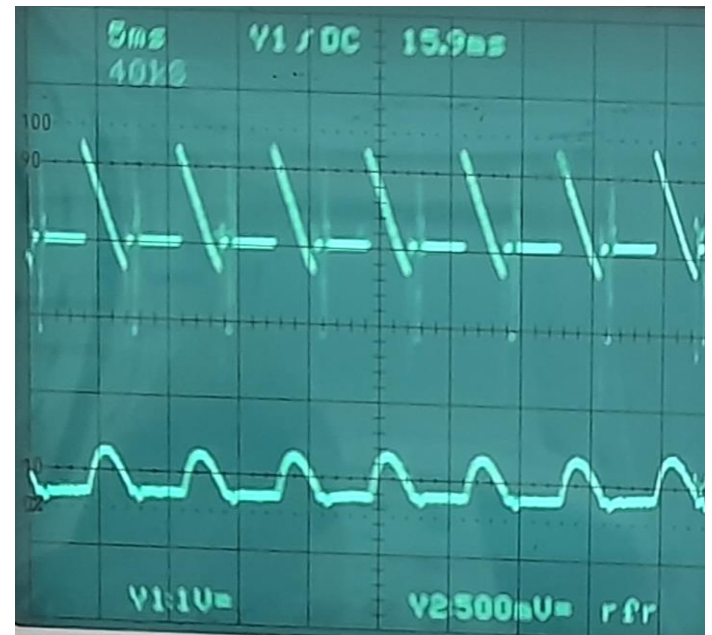


(a)



(b)

Figure (III.67) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = \pi/2$



CH1 1V 5ms

CH2 2V 5ms

Figure (III.68) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = \pi/2$.

III.4.4.3. Interprétation :

Dans cette expérience, le redressement triphasé trois thyristors a été utilisé.

La tension maximale de simulation est 250 V

Dans le premier essai la tension obtenue à la sortie alimente une charge purement résistive de valeur 200 Ω , alors concernant la simulation la tension visualisée par PSIM de valeur maximale est **249.5 V** en va comparer cette valeur pratiquement. 1 carreau sur l'oscilloscope représente **1 V** c'est à dire on a une tension maximale 5V qui est multipliée par le gain de l'amplificateur qui est 50 donc on aura comme tension maximale **250 V** qui est presque identique à la valeur simulée. Pour la lecture de la valeur de courant on a visualisée par PSIM valeur maximale de 1.24 A et pratiquement on a trouvé 1.5A approximativement.

On voit clairement que les valeurs simulées correspondent parfaitement à la pratique.

Quand au deuxième essai charge inductive avec une résistance, on note que le courant devient continu sans interruption et cela bien entendu dépendra de la valeur de l'inductance.

III.4.5. Redressement commandé PT3 (tous thyristors) :

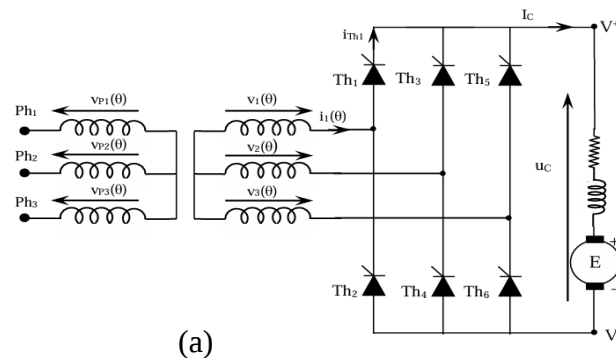
Ce convertisseur est très utilisé pour la commande de vitesse d'un moteur à courant continu comparativement à celui de trois thyristors (P3). Dans ce cas, on va faire les essais avec une charge résistive-inductive qui est utilisée industriellement au lieu d'une résistance pure.

III.4.5.1. Avec charge résistive-inductive :

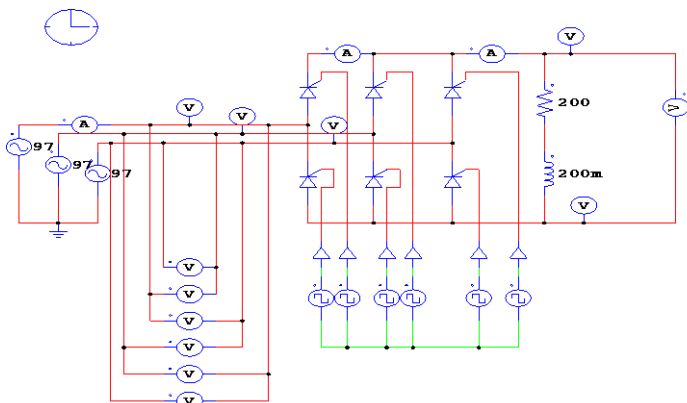
a. Equipement requis :

1. 1 Cadre profilé à deux étages, de largeur 120 cm.
1. 1 Transformateur triphasé 45/90, 30N.
1. 6 Branche de convertisseur à thyristors.
1. 1 Rhéostat à curseur $350 \Omega/1,5A$.
1. 1 Alimentation stabilisé $\pm 15V/3A$.
1. 2 Appareils de mesure A.
1. 1 Oscilloscope bi canal, par ex. HAMEG HM 412-5.
1. 1 Alimentation continue 220V.

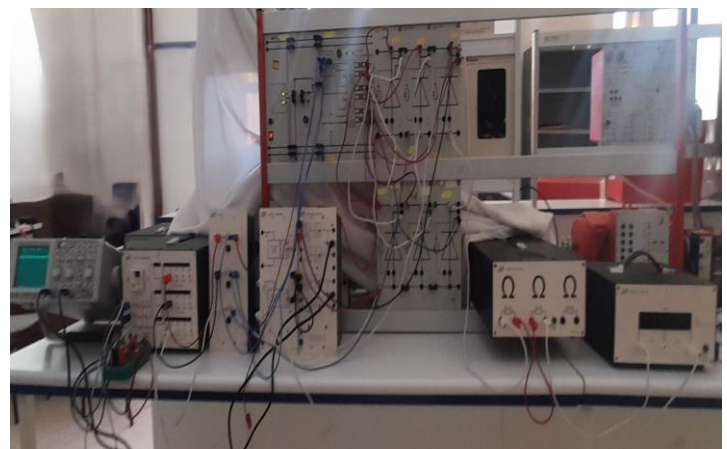
b. Montage



(a)



(b)



(c)

Figure (III.69) : Schéma d'un redresseur triphasé PD3 avec charge inductive (a) théorique (b) simulation, (c) pratique.

Résultats des simulations et pratique :

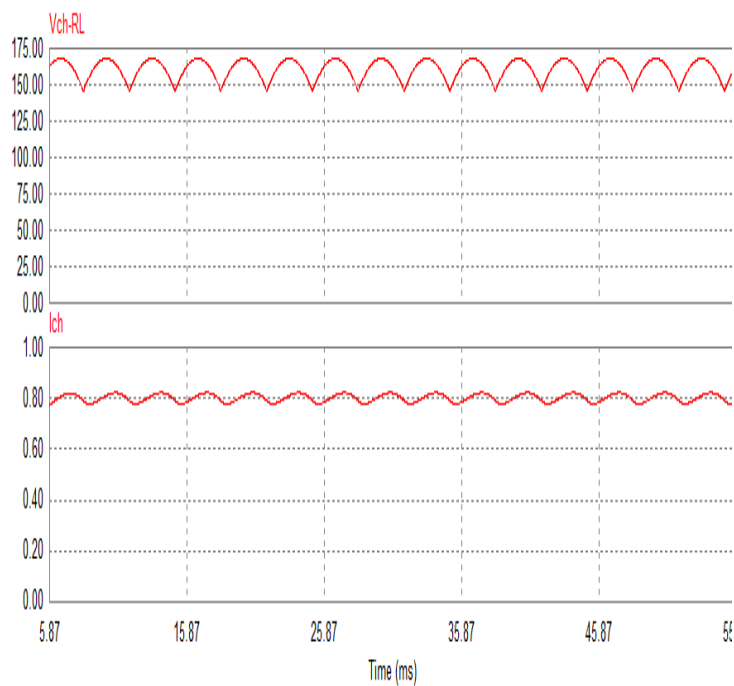
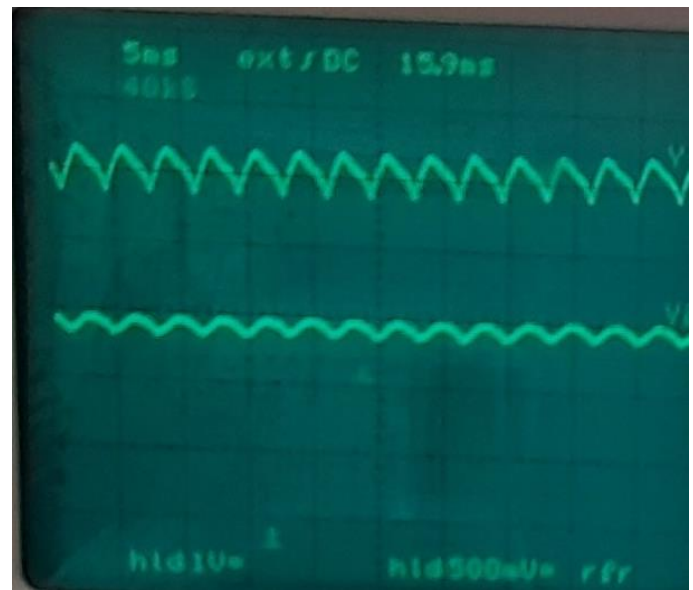


Figure (III.70) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = 0$.



CH1 1V 5ms
CH2 500mV 5ms

Figure (III.71) : Tension et courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = 0$

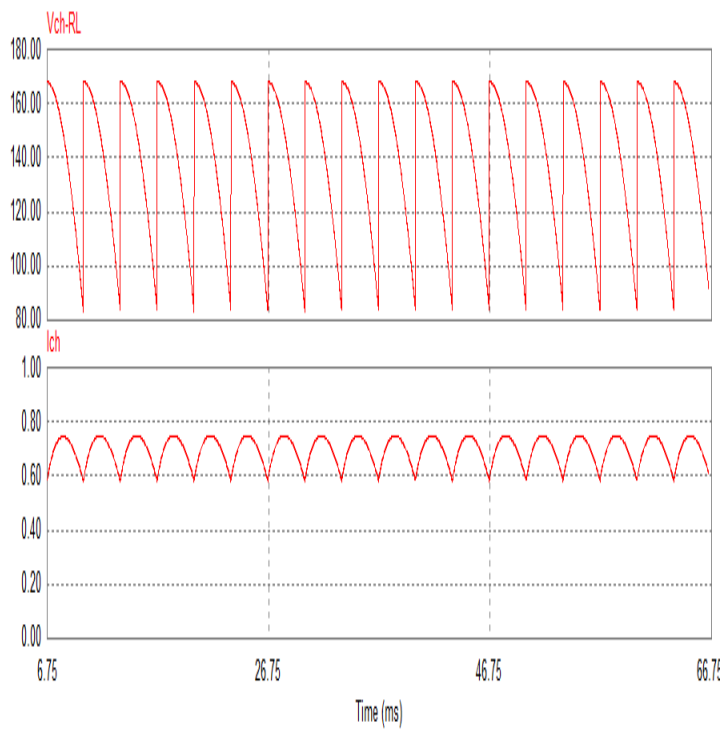


Figure (III.72) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = \pi/6$



CH1 1V 5ms
CH2 500mV 5ms

Figure (III.73) : Tension et courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = \pi/6$

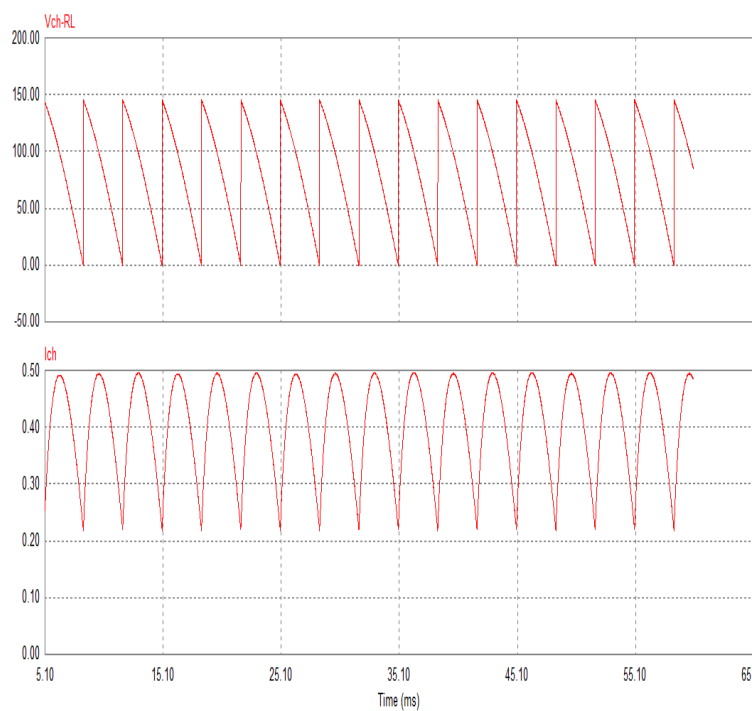
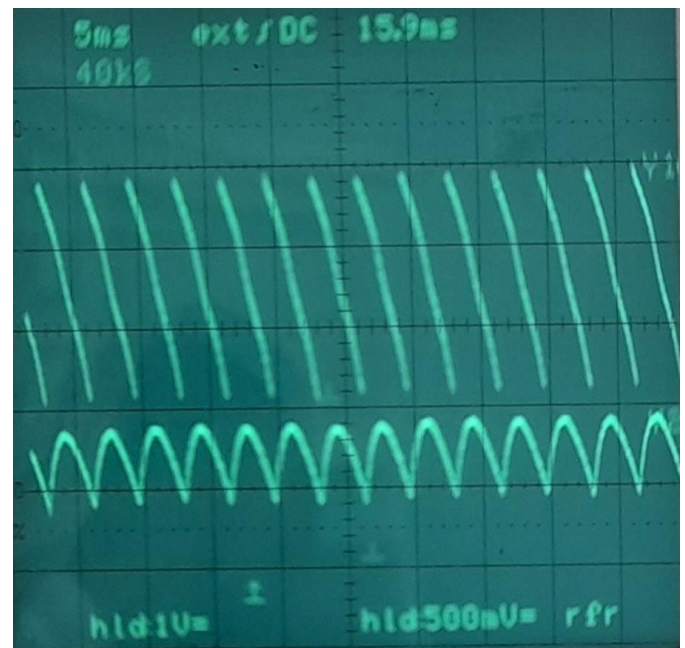


Figure (III.74) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = \pi/3$



CH1	1V	5ms
CH2	2V	5ms

Figure (III.75) : Tension et courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = \pi/3$

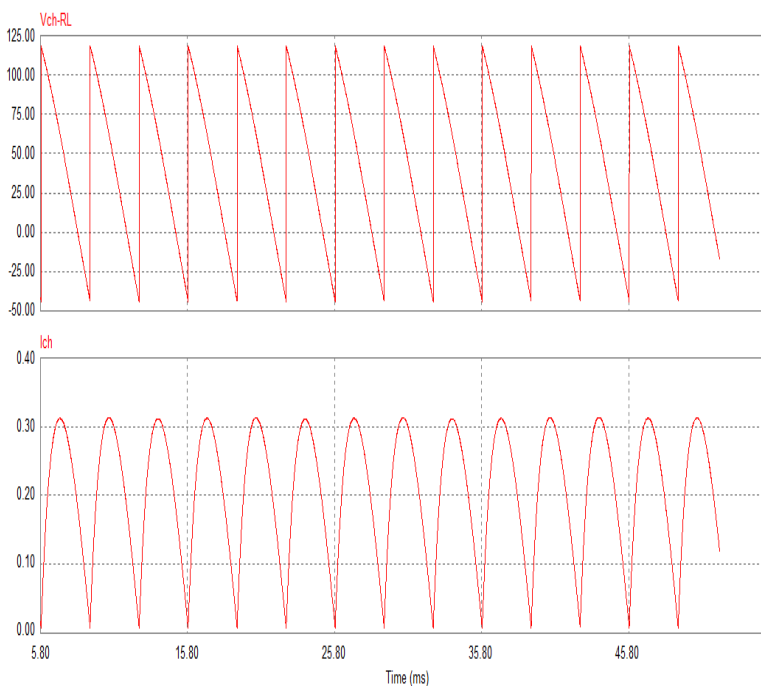
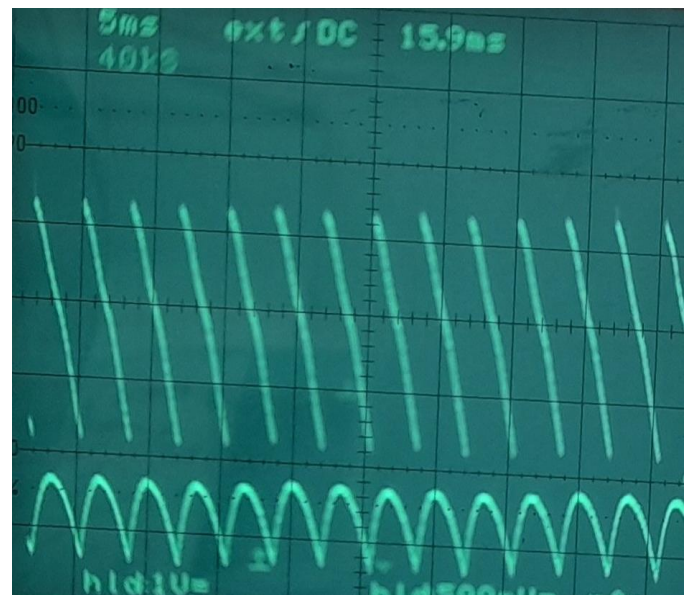


Figure (III.76) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie charge inductive pour $\psi = 75^\circ$



CH1	1V	5ms
CH2	2V	5ms

Figure (III.77) : Tension et courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = 75^\circ$

III.4.5.2. Interprétation :

Dans cette expérience, le redresseur triphasé six thyristors est alimenté par une tension de phase $V_{ph} = 119\text{v}$, alors $V_{max} = 119 \times \sqrt{2} = 168\text{v}$ (la tension qui est visualisée par PSIM)

La tension maximale de simulation est $168 \div \sqrt{3} = 97\text{v}$

Pour visualiser la tension maximale pratiquement figure (III.71) , on a 3,4 carreaux, c'est-à-dire 3,4 V et cette tension est multipliée par le gain de notre amplificateur qui est 50, donc la tension maximale est égale $50 \times 3,4 = 170\text{ V}$ approximative. Cette tension s'approche de celle visualisée par le logiciel Psim.

Quand au courant, on a 1 carreau qui représente 0.5A ce qui donne comme valeur maximale approximative 1.5A et la divise par 2 de l'amplificateur donc on obtient comme courant maximal 0.75A approximative qui est presque identique à celui de la simulation.

On remarque également, à chaque fois que l'angle se réduit, la tension et le courant subissent également une diminution. Lorsque l'angle est de 60 degrés, le graphe coïncide avec l'axe des X, quand l'angle est de 75 degrés, on aura une portion de tension négative, et enfin on a une similarité entre la partie positive et négative de la tension si l'angle est de 90 degrés.

On conclusion, la partie pratique valide parfaitement celle obtenus par simulation.

III.4.6. Redresseurs triphasés PT3 mixte :

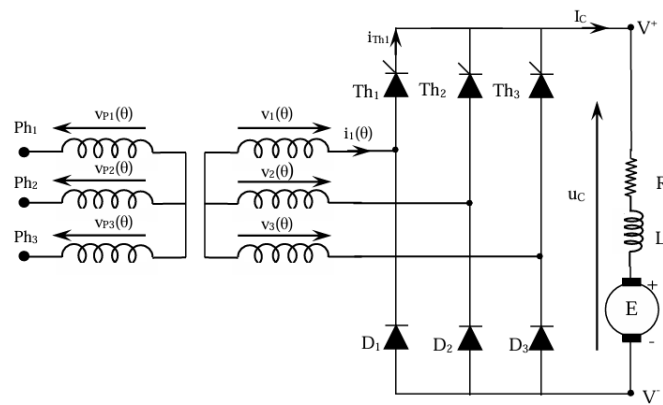
Point de vue économique, on utilise un convertisseur triphasé mixte pour des puissances élevées. On va noter que la tension ne devient jamais négative peu importe la charge.

III.4.6.1. Avec charge inductive :

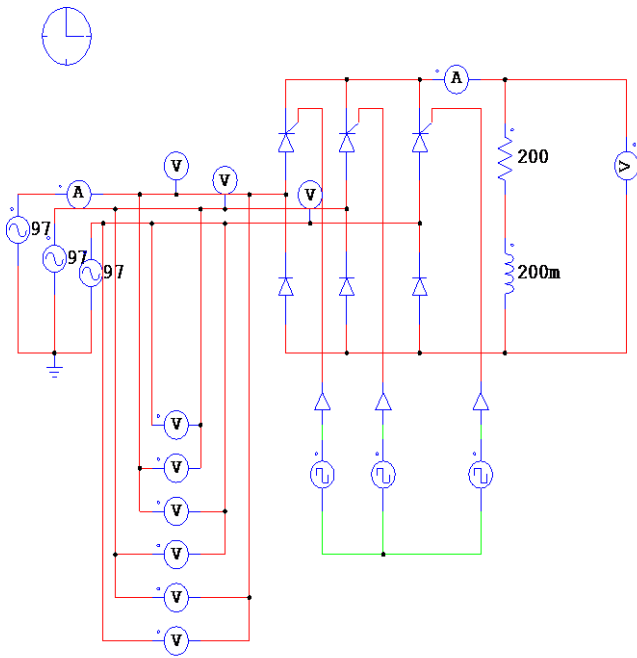
a. Equipement requis :

- 1 Cadre profilé à deux étages, de largeur 120 cm.
- 1 Transformateur triphasé 45/90, 30N.
- 3 Branche de convertisseur à thyristors / 3 de diodes.
- 1 Rhéostat à curseur $350\ \Omega/1,5\text{A}$.
- 1 Alimentation stabilisé $\pm 15\text{V}/3\text{A}$.
- 2 Appareils de mesure A.
- 1 Oscilloscope bi canal, par ex. HAMEG HM 412-5.
- 1 Alimentation continue 220V.

b. Montage :



(a)



(b)



(c)

Figure (III.78) : Schéma d'un redresseur triphasé PT3 mixte avec charge inductive (a) théorique (b) simulation, (c) pratique.

c. Résultats des simulations et pratique :

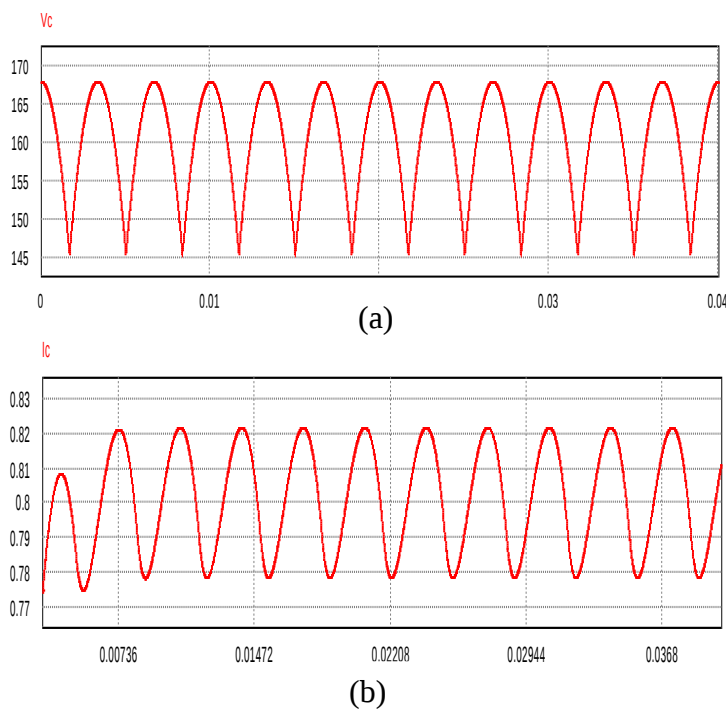
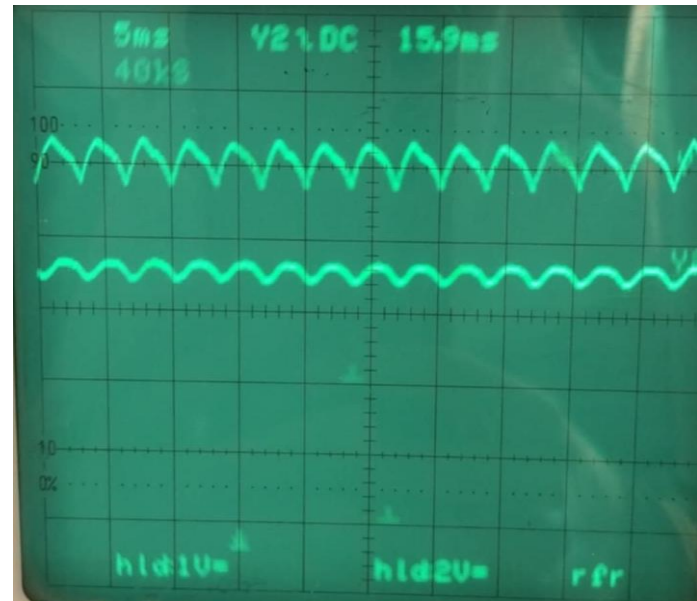


Figure (III.79) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = 0$



CH1 1V 5ms
CH2 2V 5ms

Figure (III.80) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = 0$

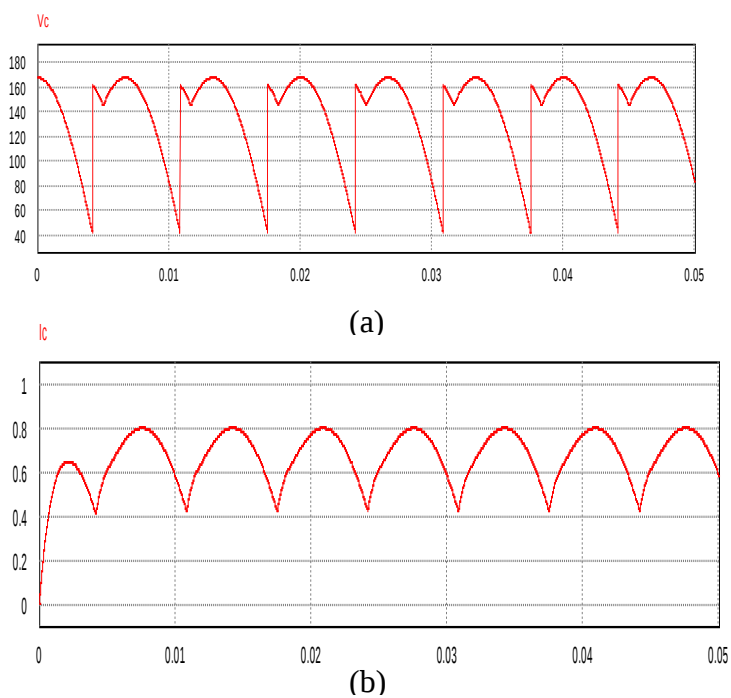
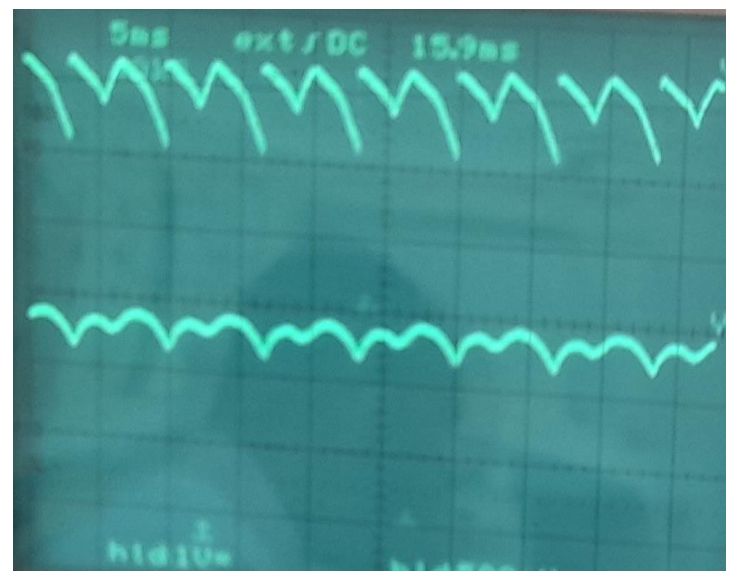
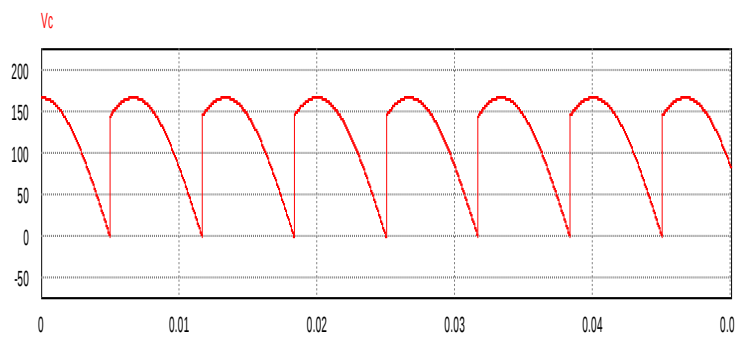


Figure (III.81) : (a) Tension de sortie et (b) courant de sortie avec charge inductive pour $\psi = \pi/4$

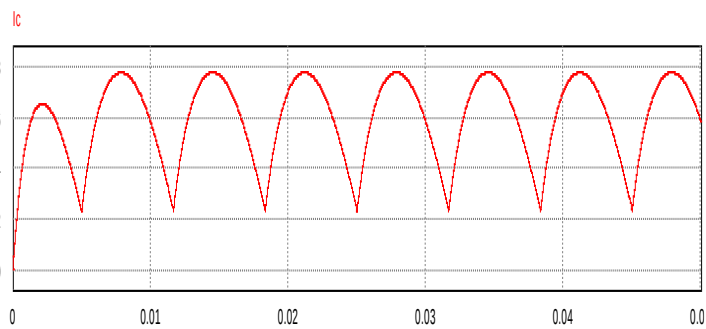


CH1 1V 5ms
CH2 2V 5ms

Figure (III.82) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = \pi/4$

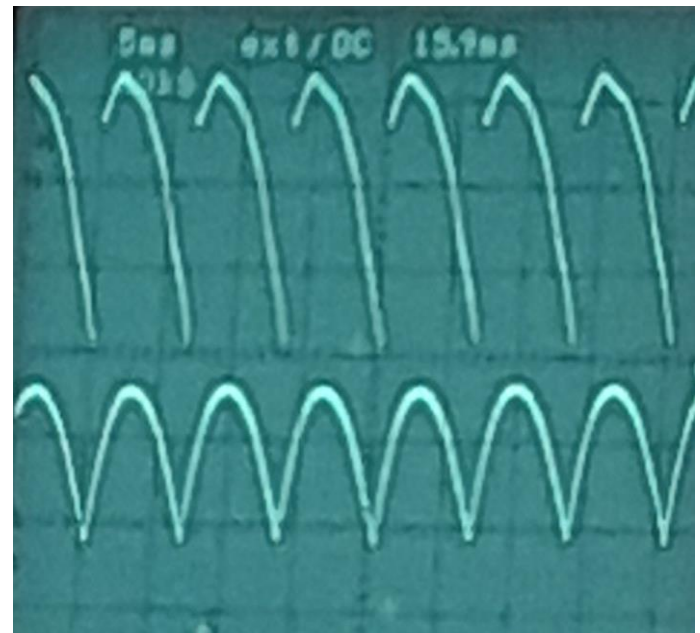


(a)



(b)

Figure (III.83) : (a) tension de sortie et (b) courant de sortie avec charge inductive, pour $\psi = \pi/3$



CH1 1V 5ms

CH2 1V 5ms

Figure (III.84) : Tension de sortie (CH1) et courant de sortie (CH2) avec charge inductive pour $\psi = \pi/3$

III.4.6.2. Interprétation :

Dans cette expérience, le redresseur triphasé six diodes est alimenté également par une tension de phase $V_{ph} = 119 \text{ V}$ ce qui donne une tension maximale de : $V_{max} = 119 \times \sqrt{2} = 168 \text{ V}$

La tension de simulation ainsi par Psim est $168 \div \sqrt{3} = 97 \text{ V}$.

Dans le premier essai la tension obtenue à la sortie alimente une charge résistive de valeur 200Ω avec une inductance de valeur de 200 mH , alors concernant la simulation la tension visualisée par PSIM de valeur maximale est 167 V en va comparer cette valeur pratiquement. 1 carreau représente 1 V c'est à dire 3.35 V et cette tension est multipliée par le gain de notre amplificateur qui est 50, donc la tension maximale est égale à $3.35 \times 50 = 167.5 \text{ V}$ approximative figure(III.79), et pour la lecture du courant, on a visualisé par PSIM une valeur maximale de 0.82 A

Cette valeur trouvée par simulation sera comparée pratiquement.. 1 carreau représente 2 A ce qui donne comme valeur maximale approximativement $7,8 \text{ A}$ et puisque l'amplificateur du courant est ajusté à un gain de rapport de division par 10, donc le courant maximal est $7,8 \text{ A} \div 10 = 0,78 \text{ A}$ qui est presque identique à celle de la simulation.

Si l'angle d'amorçage est zéro degré ($\psi=0^\circ$), le convertisseur se comporte exactement comme un redresseur à base des diodes et les résultats seront évidemment les mêmes.

Il à noter également que ce redresseur n'aura jamais une tension négative peu importe la charge et que la tension moyenne est toujours positive. Donc, ce convertisseur ne fonctionnera jamais comme onduleur.

III.5. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'étude théorique d'un redressement commandé à thyristors qui sert à convertir la tension de source alternative en tension continue variable. Nous avons étudié les différents types des circuits du redresseur commandé, Nous avons également analysé les caractéristiques, telles que la tension et courant de sortie, tension inverse et aussi identification de valeur moyenne et efficace.

D'après cette étude, on résume qu'importe le type de circuit du redresseur utilisé, monophasé ou triphasé, les résultats simulés par PSIM sont toujours validés parfaitement par la pratique.

Chapitre IV

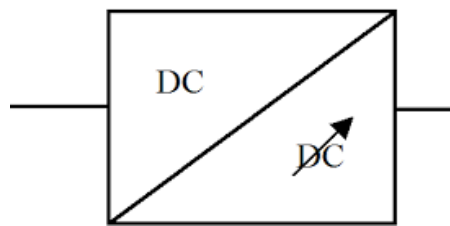
Hacheur Série

Hacheur Série

IV.1. Introduction :

Le hacheur est un dispositif de conversion DC-DC qui nous donne la possibilité de convertir une tension continue stable en une tension continue de niveau variable. La réalisation peut se faire en utilisant des interrupteurs électroniques qui sont contrôlés par l'ouverture et la fermeture, comme les transistors bipolaires, MOSFET ou IGBT, en fonction de l'application ; [8].

IV.2. Symbole de l'hacheur :



IV.3. Hacheur série :

IV.3.1. Principe du fonctionnement, [5] :

Le cycle opérationnel, ou période du hacheur ($T = 1/f$), comprend deux phases.

- La première phase :

Le transistor est en mode passant tandis que la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette étape s'étend de ($0 \leq t \leq \alpha T$)

- La deuxième phase :

On rend le transistor non conducteur, la diode commence à conduire, cette étape dure de $\alpha T \leq t \leq T$

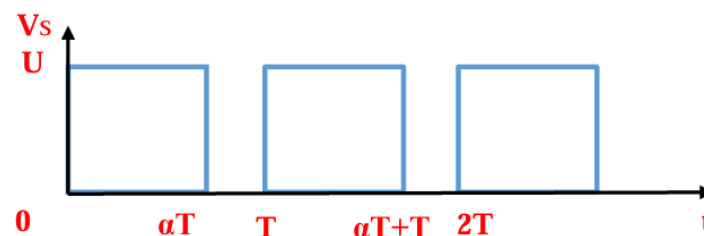


Figure (IV.1) : Tension aux bornes de la charge avec un hacheur série.

IV.3.2. Valeur moyenne de la tension :

On peut déterminer la valeur moyenne en utilisant une équation intégrale. (IV.1),

$$V_{s_{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_s(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0. dt$$

$$V_{s_{moy}} = \frac{U}{T} (\alpha T - 0) = \alpha E \quad (IV.1)$$

On peut modifier la valeur moyenne de la tension $V_{s_{moy}}$ en manipulant le rapport cyclique (α). Lorsque l'on modifie α de 0 à 1, $V_{s_{moy}}$ évolue linéairement de 0 à U.

IV.4. Rapport cyclique (α) :

On définit le rapport cyclique α comme étant le quotient du temps de fermeture de l'interrupteur H par la période T de l'hacheur.

La valeur du rapport cyclique se trouve dans l'intervalle suivant : $0 \leq \alpha \leq 1$.

IV.5. Hacheur série (dévolteur) :

IV.5.1.1. Principe du fonctionnement [7] :

L'assemblage de la figure (IV.2) inclut un générateur de tension E' ainsi qu'une charge (récepteur). L'interrupteur H, piloté lors de l'ouverture et la fermeture, garantit une connexion directe entre le générateur et la charge durant les périodes de fermeture ; [9].

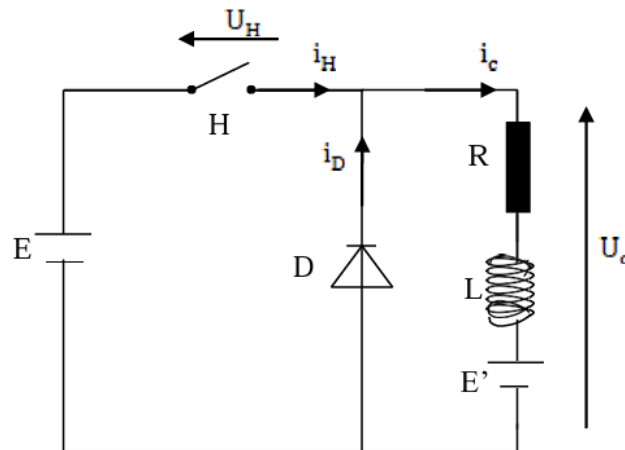


Figure (IV.2) : Hacheur série.

b. Tension aux bornes de la charge :

$$U_c = Ri(t) + L \frac{di}{dt} + E' \quad (IV.2)$$

$$U_c(t)dt = Ri(t)dt + Ldi(t) + E'dt \quad (IV.3)$$

Intégrons sur une période :

$$\int_0^T U_c(t) dt = \int_0^T Ri(t) dt + \int_{I_{\min}}^{I_{\min}} L di(t) + \int_0^T \dot{E} dt \quad (\text{IV.4})$$

D'où :

$$E\theta = RI_{\text{moy}}T + 0 + \dot{E}T \quad (\text{IV.5})$$

$$U_c = \alpha E = RI_{\text{moy}} + \dot{E} \quad (\text{IV.6})$$

$$\text{Ou } \alpha = \frac{\theta}{T}$$

IV.5.1.2. Ondulation du courant :

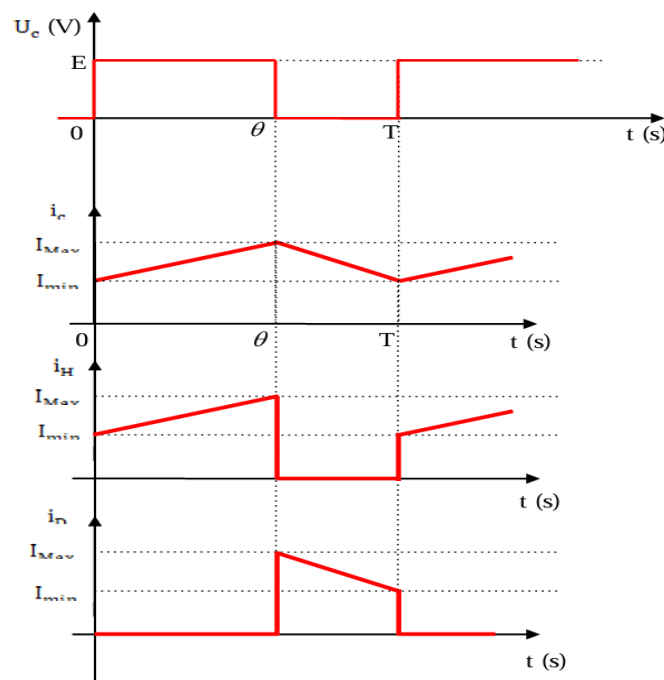


Figure (IV.3) : Schéma de la tension et courants d'un hacheur série.

Afin de simplifier cette analyse, nous ferons l'hypothèse que la résistance du récepteur est nulle, étant donné que la charge est de nature inductive. Le diagramme du courant se divise en deux sections séparées, figure IV.3.

a. $0 < t < \theta$ (H fermé) :

$$E - \dot{E} = L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow i(t) = \frac{E - \dot{E}}{L} t + I_{\min} \quad (i(0) = I_{\min}) \quad (\text{IV.7})$$

$$I_{\max} = i(\theta) = \frac{E - \dot{E}}{L} \theta + I_{\min} \quad (\text{IV.8})$$

b. $\theta < t < T$ (H ouvert) :

$$-\dot{E} = L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow i(t) = -\frac{\dot{E}}{L} (t - \theta) + I_{\max} \quad (\text{IV.9})$$

$$I_{\min} = I(T) = -\frac{\dot{E}}{L} (T - \theta) + I_{\max} \quad (\text{IV.10})$$

Des relations (1) et (2) donnent l'ondulation

$$\Delta I = I_{\max} - I_{\min} \quad (\text{IV.11})$$

Soit $\dot{E} = \alpha E = U_c$ (Puisque $R=0$)

On peut aisément déterminer l'ondulation ΔI crête à crête en utilisant la formule suivante :

$$\Delta I(\alpha) = \frac{\alpha E T (1 - \alpha)}{L} \quad \text{Elle est maximale pour } \alpha = \frac{1}{2}$$

$$\text{Soit } (\Delta I)_{\max} = \Delta I(\alpha = \frac{1}{2}) = \frac{ET}{4L} = \frac{E}{4.f.L} \quad (\text{IV.12})$$

Pour réduire l'ondulation et obtenir un courant lisse, on a intérêt à augmenter la fréquence de « hachage ». Dans ce qui suit la partie pratique, on a utilisé un IGBT comme hacheur et nous allons acquérir les signaux à différentes fréquences de hachage pour faire conduire le hacheur.

IV.6.1. Matériel utilisé :

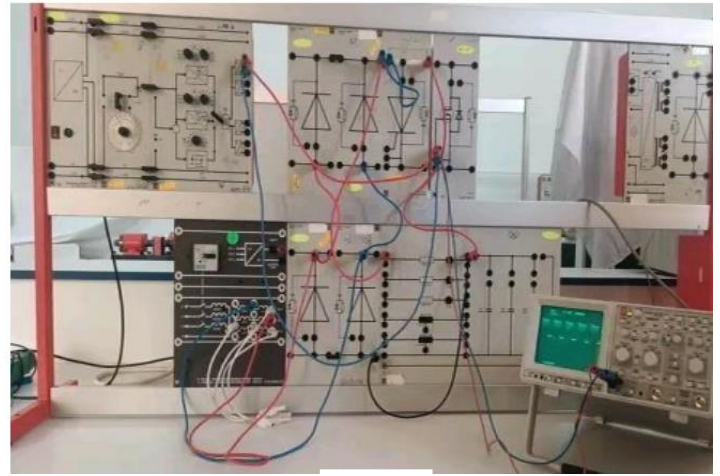
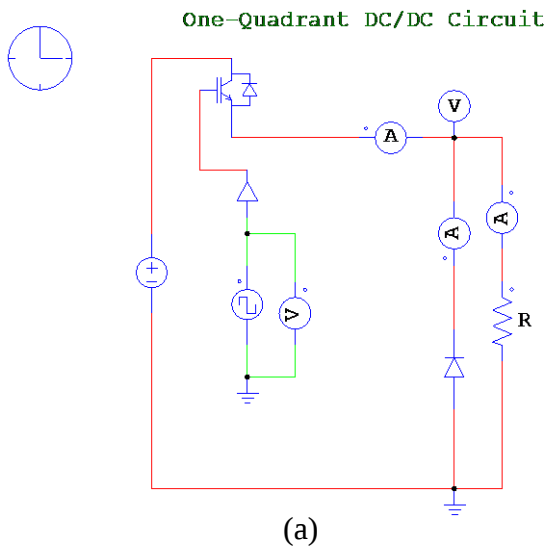
- 1 cadre profilé à deux étages, de largeur 120cm.
- 2 branches de convertisseur à deux diodes.
- 1 capacité de 990μF.
- IGBT.
- Oscilloscope bi canal.
- Appareils de mesure (A, V).
- Alimentation continue 220V.
- Charge résistive 100Ω/1A.

IV.6.2. Pont complet à diodes avec un hacheur série :

Le hacheur est alimenté par une tension fixe obtenue par un redresseur à pont complet et cette tension est filtrée à travers un condensateur.

Notre hacheur est commandé par un IGBT. Donc, on devrait avoir des signaux appliqués entre la grille et l'émetteur de l'IGBT. Ces signaux peuvent avoir différentes fréquences sous forme MLI (PWM). Ainsi, on peut varier la tension de sortie de l'hacheur en variant le rapport cyclique α .

a. Montage :



(b)

Figure (IV.4) : Montage expérimentale du pont complet à diodes avec un hacheur série, (a) simulation, (b) pratique.

b. Analyse:

Ce montage est destiné au premier lieu à produire des signaux carrés pour commander l'IGBT. En ce qui concerne la fréquence de hachage, on peut opter celle qui nous convient en fonction du semi-conducteur employé. Ainsi, le diagramme suivant illustre deux fréquences 500Hz et 1KHz respectivement. Dans le cadre de notre projet, nous avons opté pour une fréquence de 500 Hz et celle-ci reste constante. Il est essentiel de modifier la largeur d'impulsion (MLI) tout en maintenant la période constante. Pour les deux fréquences, on a déterminé la période correspondante qui sera représentée sur l'oscilloscope par les signaux.

$$\text{Donc : } T = \frac{1}{f} \quad T = \frac{1}{500} = 0.002s = 2ms$$

$$\text{Pour : } f = 1000Hz \quad T = \frac{1}{1000} = 0.001s = 1ms$$

c. Résultats des simulations et pratiques des signaux à MLI pour commander le

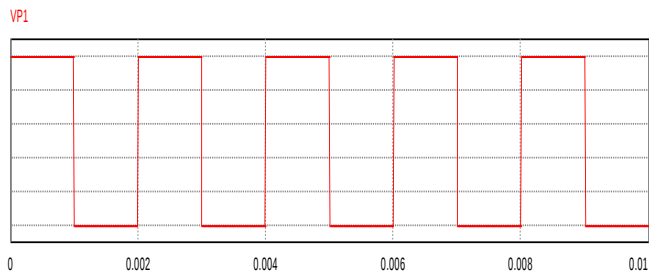


Figure (IV.5) : Signal MLI à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.5 par simulation.

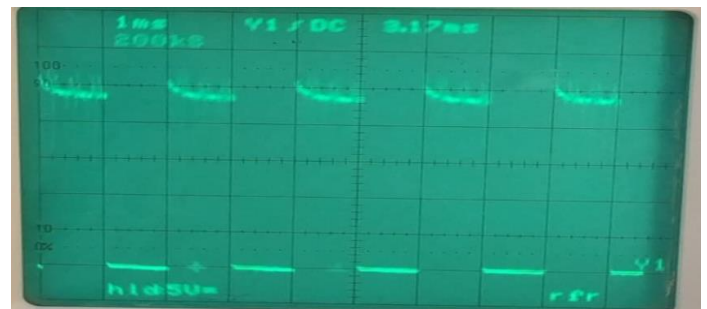


Figure (IV.6) : Signal MLI à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.5.

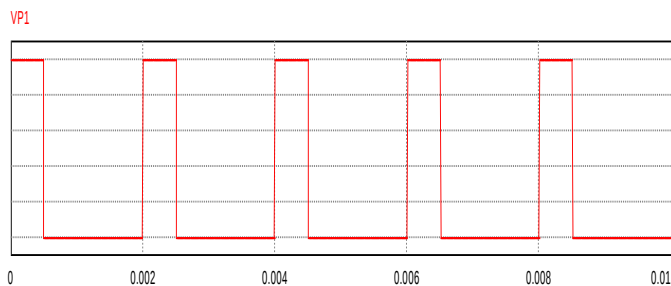


Figure (IV.7) : Signal MLI à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.25 par simulation.

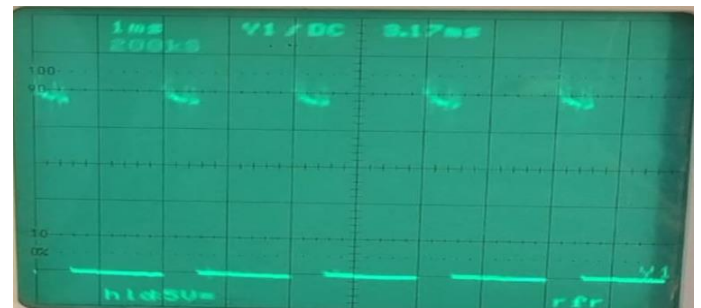


Figure (IV.8) : Signal MLI à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.25.

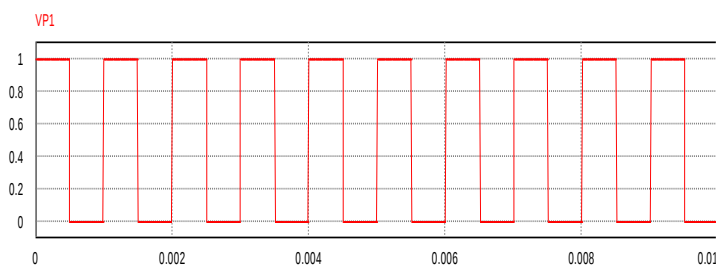


Figure (IV.9) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.5 par simulation.

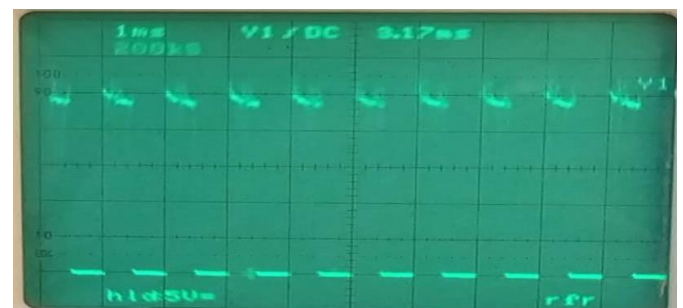


Figure (IV.10) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.5.

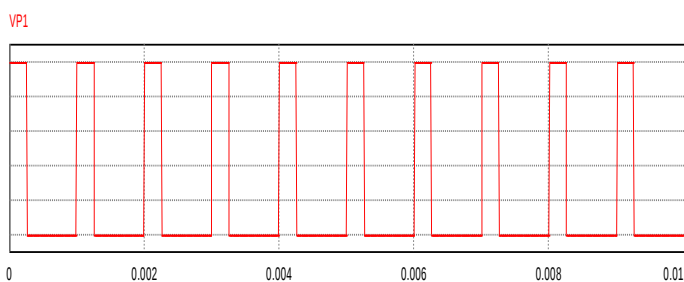


Figure (IV.11) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.25 par simulation.

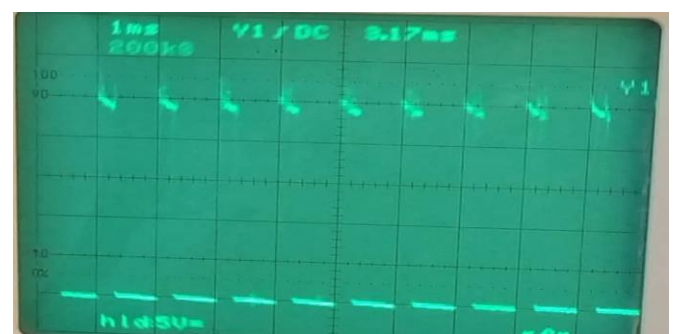


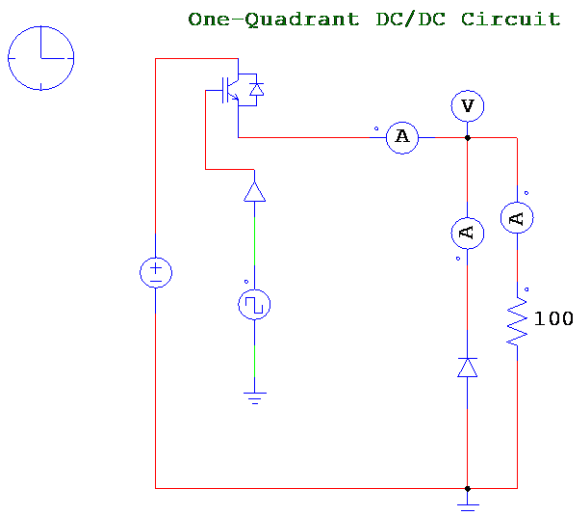
Figure (IV.12) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.25.

IV.6.2.1. Interprétation des résultats :

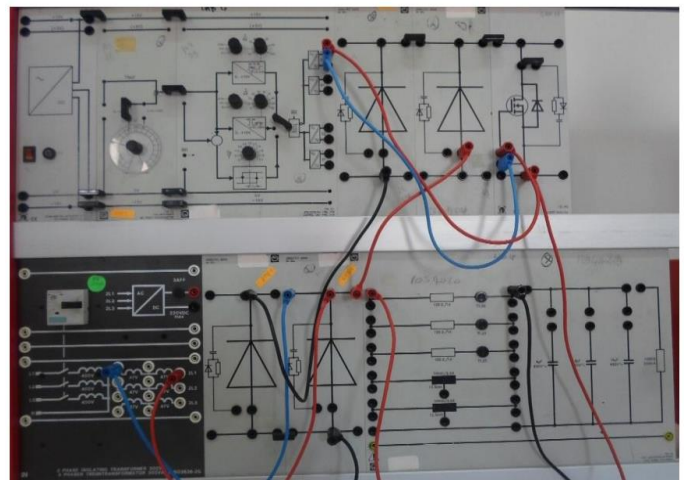
Selon les données expérimentales recueillies, nous avons sélectionné deux fréquences comme illustration, 0.5KHz et 1KHz respectivement, en les gardant constants, c'est-à-dire en maintenant la période constante tout en modifiant simplement la largeur de l'impulsion (le rapport cyclique). C'est cette modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui nous fournira évidemment une tension moyenne à la sortie du hacheur pour commander la vitesse du moteur à courant continu.

IV.6.3 Avec une charge purement résistive :

a. Montage :



(a)



(b)

Figure (IV.13) : Montage du hacheur alimentant une charge purement résistive (a) simulation, (b) pratique.

b. Résultats des simulations et pratique :

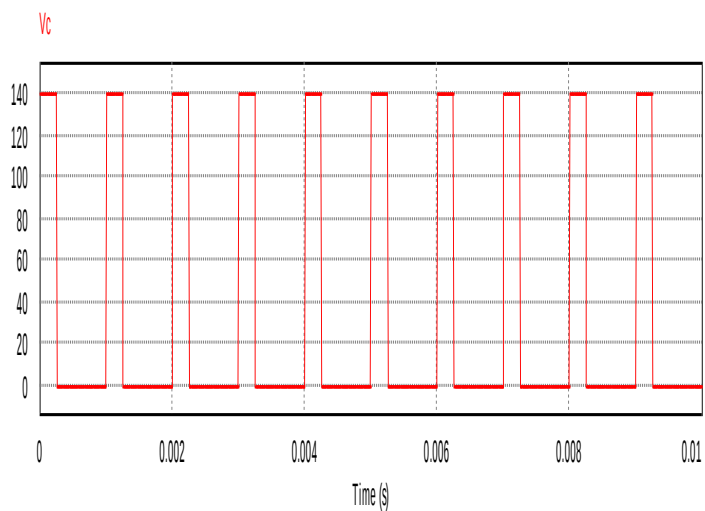


Figure (IV.14) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.25-charge R par simulation.

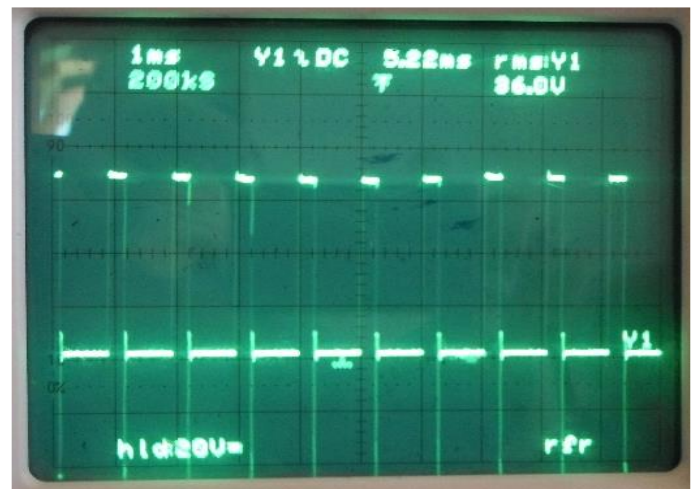


Figure (IV.15) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.25-charge R.

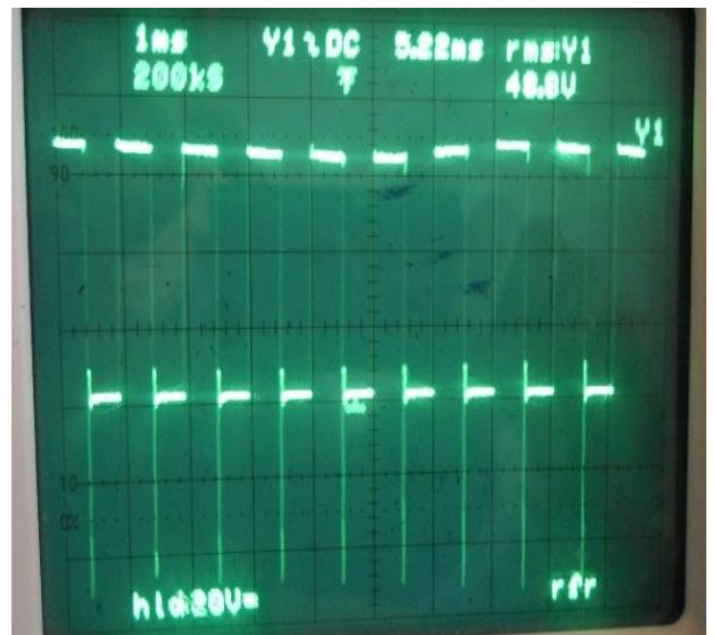
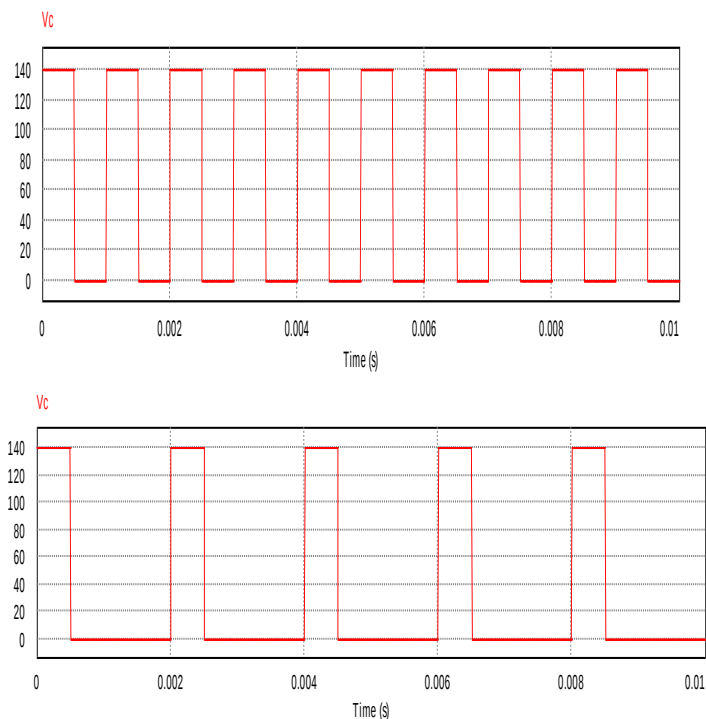


Figure (IV.16) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.5-charge R par simulation.

Figure (IV.17) : Signal MLI à fréquence 1000 Hz et rapport cyclique 0.5-charge R.

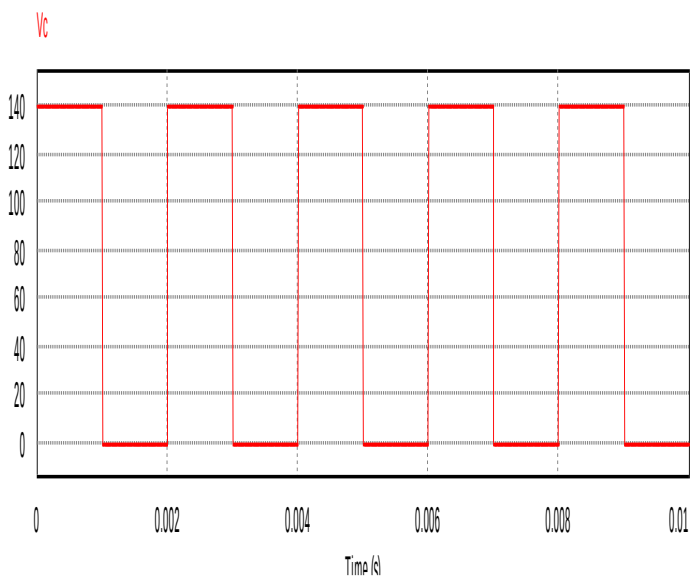


Figure (IV.18) : Signal PWM à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.5-charge R par simulation.



Figure (IV.19) : Signal PWM à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.5-charge R.

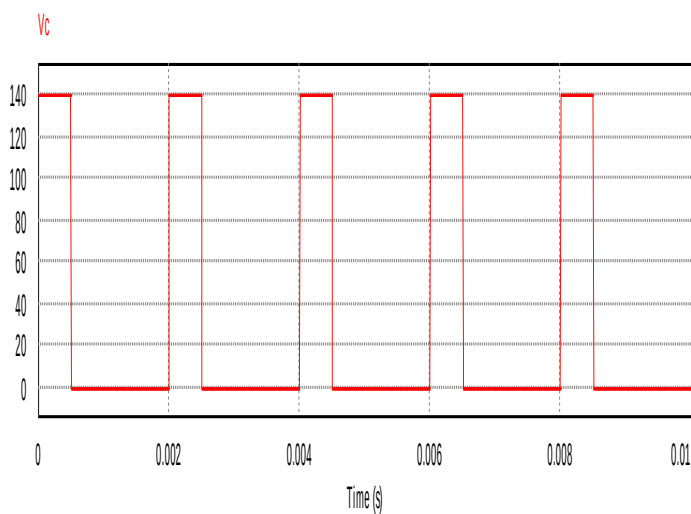


Figure (IV.20) : Signal PWM à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.25-charge R par simulation.

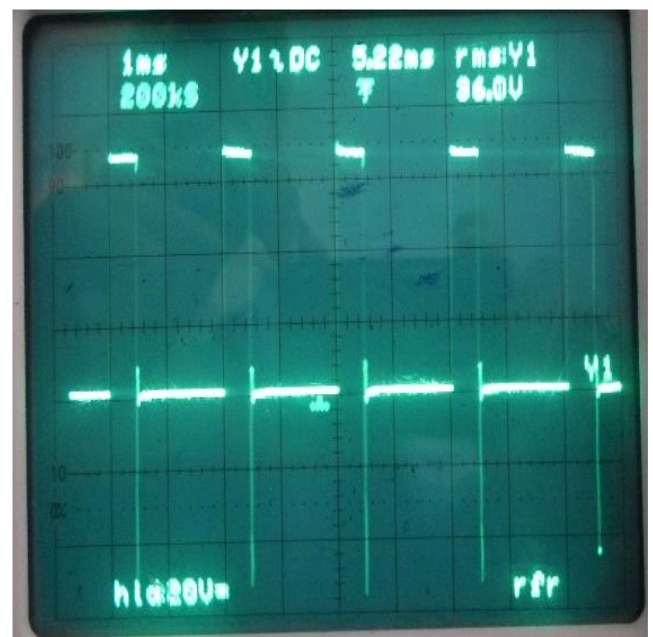


Figure (IV.21) : Signal PWM à fréquence 500 Hz et rapport cyclique 0.25-charge R.

IV.6.3.1. Interprétation :**IV.6.4. Conclusion :**

Le but principal de cette partie est d'obtenir la tension moyenne à la sortie du hacheur, qui sera par la suite utilisée pour commander la vitesse du moteur à courant continu. La théorie a été exposée succinctement, suivie de la mise en pratique.

Les résultats obtenus sont hautement satisfaisants et illustrent de manière évidente la concordance entre la théorie et l'application pratique.

IV.7. Partie de Commande de vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparée à boucle ouverte.

V.7. Moteur à courant continu à excitation séparée :

IV.7.1. Introduction :

La machine à courant continu est la première machine électrique, elle utilise comme source d'énergie (source continue), celle-ci a été créée par VOLTA, son fonctionnement est basé sur un phénomène simple : les forces de LAPLACE.

- En fonctionnement moteur, l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique.
 - En fonctionnement générateur, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique ;
- [10].

IV.7.2. Constitution de la machine à courant continu :

La machine à courant continu est constituée de trois parties :

a. Stator : C'est la partie fixe qui crée le champ magnétique par le l'intermédiaire d'une inductance. Cette inductance peut être constituée d'un aimant permanent ou d'une bobine alimentée en courant continu.

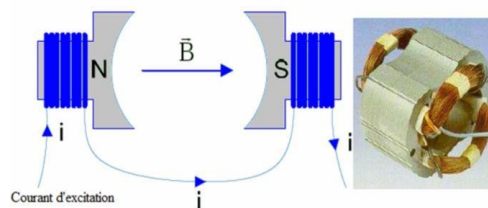


Figure (IV.22) : Circuit d'excitation d'une machine bipolaire (inducteur).

b. Rotor :

C'est le point d'ancrage de l'appareil. Le rotor de l'appareil est composé de conducteurs, et lorsqu'il est en rotation, une tension induite E se produit aux extrémités de tous les conducteurs.

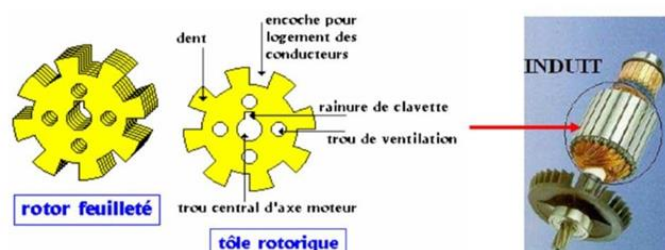


Figure (IV. 23) : La partie tournante (induit).

c. Collecteur et les Balais :

- **Le collecteur :** Il s'agit d'un ensemble de plaques de cuivre où sont connectées les extrémités du bobinage de l'induit.

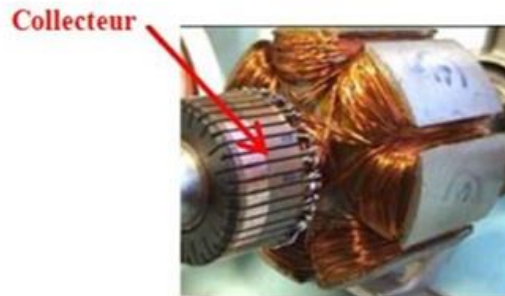


Figure (IV. 24) : Collecteur d'un MCC.

- **Les balais :** Les balais garantissent la transmission du courant électrique entre l'alimentation et les bobinages de l'induit par le biais d'un contact de friction. Ils sont généralement fabriqués à partir de graphite. Le port balais fixe le balai sur le collecteur.

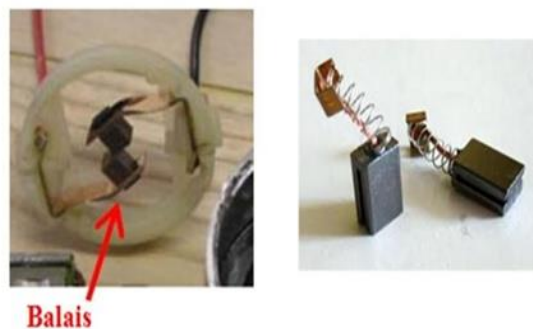


Figure (IV.25) : Balais d'un MCC.

IV.8. Equations de fonctionnement :

Dans cette machine les principales relations qui y résident sont :

IV.8.1. La force électromotrice (f.é.m.) E :

L'inducteur crée le flux magnétique en Weber [Wb]. Le rotor est composé de N conducteurs et tourne à la vitesse angulaire Ω en [rad /s]. On montre que l'expression de E :

$$E = k \cdot \phi \cdot \Omega \quad (IV.13)$$

$$\text{Ou } k = \frac{p N}{2\pi a} \quad (IV.14)$$

Avec :

ϕ : flux magnétique maximum traversant les enroulements de l'induit (Webers – Wb).

P : nombre de paires de pôles

N : le nombre de conducteurs (ou de brins-deux par spires)

a : nombre de paires de voies d'enroulement

E : f.é.m. (V)

Ω : vitesse de rotation du rotor (rad .s⁻¹)

IV.8.2. Le couple électromagnétique :

On montre que le moment du couple électromagnétique T_{em} exercé sur l'induit est :

$$T_{em} = k\phi I \quad (\text{N.m}) \quad (\text{IV.15})$$

K : la même constante que dans la formule précédente.

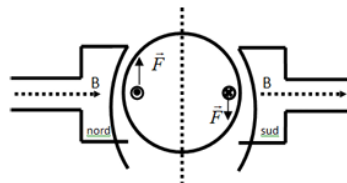
ϕ : Flux créé par un pôle inducteur, en webers (Wb).

I : intensité du courant dans chaque conducteur de l'induit, en ampères (A).

IV.9. Principe de fonctionnement :

IV.9.1. En moteur :

Un conducteur d'induit, immergé dans un champ radial produit par une inductance et traversé par un courant d'induit, est soumis à une force la placcienne. Deux conducteurs diamétralement opposés produisent un couple électromagnétique dont l'impulsion entraîne la rotation du rotor.



IV.9.2. En génératrice :

L'inductance, alimentée par une tension continue, génère un champ magnétique stable (Figure IV.26). Un moteur entraîne la rotation de l'armature. C'est l'endroit où les variations de flux sont causées par les convolutions qui le constituent. Ceci génère une force électromotrice à la sortie de la génératrice.

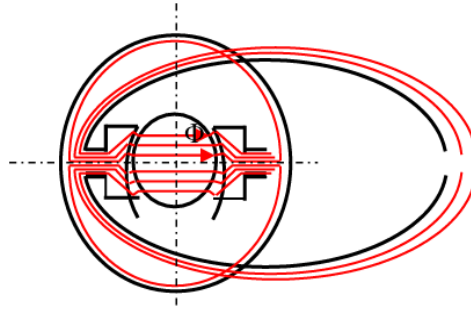


Figure (IV.26) : Ligne de champ magnétique inducteur.

IV.10. Réglage de la vitesse d'un MCC à excitation séparée :

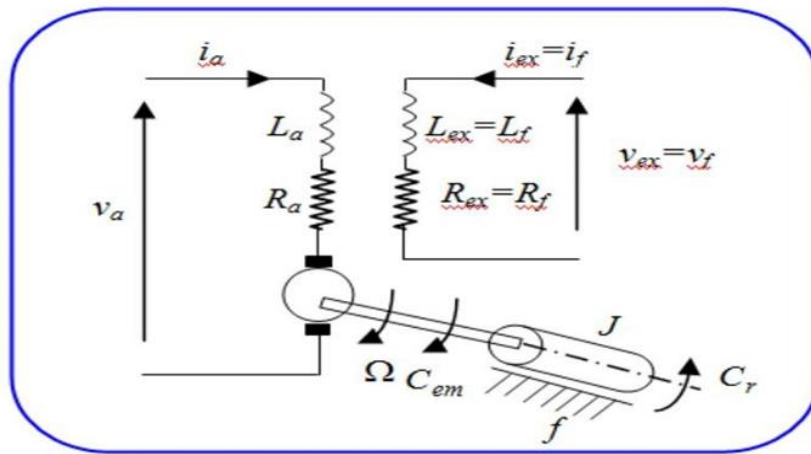


Figure (IV.27) : Circuit équivalent du moteur à excitation séparée.

IV.10.1. Equations mathématiques d'un moteur à C.C à excitation séparée :

Tension d'induit est donnée par :
$$V_a = R_a i_a + l_a \frac{di_a}{dt} + E \quad (IV.16)$$

La F.é.m est exprimée par :
$$E = k. \phi. (i_{ex}). \Omega \quad (IV.17)$$

Tension d'inducteur est donnée par :
$$V_{ex} = R_{ex} i_{ex} + l_{ex} \frac{di_{ex}}{dt} \quad (IV.18)$$

En régime permanent :

$$V_{ex} = R_{ex} i_{ex} \quad (IV.19)$$

$$V_a = R_a i_a + E \quad (IV.20)$$

Avec :

$$E = k. \phi. (i_{ex}). \Omega$$

L'équation (IV.20) devienne :

$$V_a = R_a i_a + k \cdot \phi \cdot (i_{ex}) \cdot \Omega \quad (IV.21)$$

De l'équation (IV.21), l'expression de la vitesse d'un moteur à excitation séparée est :

$$\Omega = \frac{V_a - (R_a i_a)}{k \cdot \phi \cdot (i_{ex})} \quad (IV.22)$$

L'expression générale de la vitesse montre les trois paramètres R_a , U_a et ϕ que l'on peut régler ce qui donne les trois procédés pour la variation de vitesse du moteur à courant continu ; [12].

- a. Réglage rhéostatique (R_a).
- b. Réglage par flux ϕ .
- c. Réglage par la tension (V_a).

a. Réglage rhéostatique :

On peut diminuer la vitesse en augmentant la résistance de l'induit grâce à un rhéostat en série avec l'induit, tout en maintenant la tension et le flux à des niveaux standards. La formulation de la vitesse est :

$$\Omega = \frac{V_a - ((R_a + R_h) i_a)}{k \cdot \phi \cdot (i_{ex})} \quad (IV.23)$$

Remarque : Une des limites de cette approche est la grande quantité d'énergie dissipée dans le rhéostat.

b. Réglage par flux :

Le flux varie de : $\phi_{min} < \phi < \phi_{nominal}$; il s'ensuit que la vitesse varie de :

$$\Omega_{nominal} < \Omega < \Omega_{max}.$$

Quand le courant de l'inducteur baisse, le flux magnétique dans le moteur décroît également, ce qui entraîne une hausse de la vitesse de rotation pouvant aboutir à un emballement du moteur et éventuellement à sa destruction.

c. Réglage par la tension d'alimentation:

Il s'agit d'appliquer une tension dont l'intensité moyenne oscille entre zéro et la valeur maximale, tout en réglant le flux à sa valeur maximale. Ce genre de régulation de vitesse est plus avantageux économiquement, étant donné qu'aucune énergie n'est dépensée dans le rhéostat. Il n'est possible de le ralentir qu'en modifiant la tension.

La tension est proportionnelle à la vitesse. Comme U varie de 0 à U_n , la vitesse Ω varie de 0 à Ω_n , donc $0 < U < U_n$ et $0 < \Omega < \Omega_n$.

L'ajustement de la tension d'alimentation permet de maintenir un couple nominal constant indépendamment de la vitesse. $P_n = T_{em} \cdot \Omega$. La puissance augmente avec la vitesse.

C'est la forme de variation la plus couramment employée, car elle permet de maintenir les propriétés mécaniques, c'est-à-dire le couple maximal de la machine, comme illustré dans la figure (IV.28).

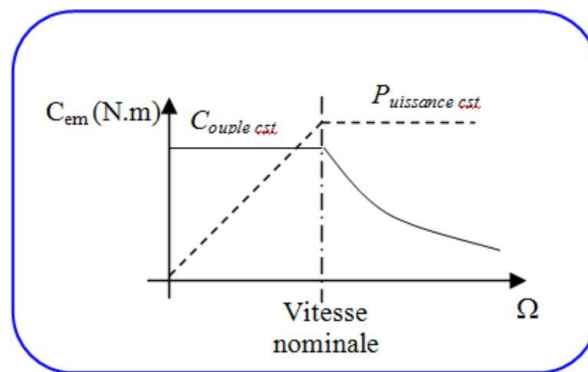


Figure (IV.28) : Action conjuguée sur la tension et le flux.

IV.11. Réalisation pratique :

Nous allons maintenant procéder à des tests pratiques pour contrôler la vitesse du moteur à courant continu en employant le hacheur série à rapport cyclique variable. Le premier essai se déroulera sans charge, puis une charge sera introduite.

IV.11.1. Le matériel utilisé :

- 1 Cadre profilé à deux étages, de largeur 120 cm.
- 2 Branche de convertisseur à deux diodes.
- 1 Capacité de 990 μ F.
- 1 IGBT
- 1 Rhéostat à curseur $\Omega/1,5A$.
- 1 Unité de commande à MLI
- 1 Alimentation stabilisé $\pm 15V/3A$.

- 2 Appareils de mesure (A-V).
- 1 Ampli-séparateur.
- 1 Oscilloscope bi canal, par ex. HAMEG HM 412-5.
- 1 Moteur à CC et 1 Génératrice à CC.

IV.12 Montage complet

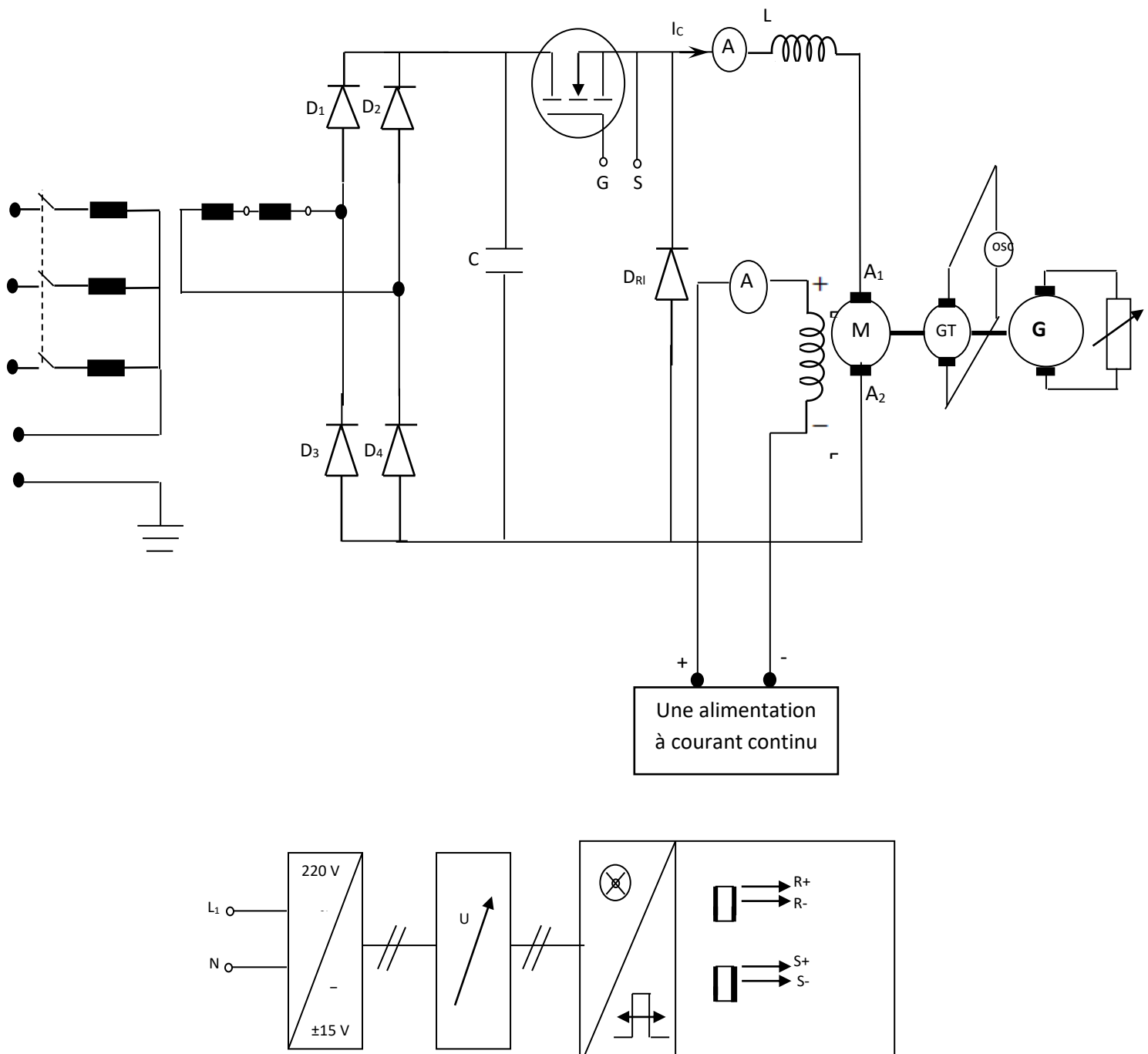


Figure (IV.29) : Schéma complet (boucle ouverte).

Ce montage est divisé en deux parties essentielles. Le pont complet (PD2) pour fournir la tension continue fixe à l'entrée du hacheur et ce dernier à son tour fournit une tension continue variable pour commander la vitesse du moteur à courant continu soit à vide ou à charge avec une boucle ouverte. Le moteur et génératrice utilisés dans cette réalisation pratique sont montrés au-dessous.

LEYBOLD-DIDACTIC GMBH				
Typ	731 16			
— MOTOR/Nr. 200 26 956				
	220	V	0.55	A
	0.1	KW	S 1	COS φ —
	2030	min ⁻¹	—	Hz
ERR.	220	V	0.1	A
I.K.L.	B	IP 23		
VDE 0530				

Moteur

LEYBOLD-DIDACTIC GMBH				
Typ	731 21			
— MOTOR/Nr. 200 26 957				
	220	V	0.63	A
	0.1	KW	S 1	COS φ —
	2000	min ⁻¹	—	Hz
ERR.	220	V	0.08	A
I.K.L.	B	IP 23		
VDE 0530				

Génératrice

IV.11.2. Montage :

a. à vide :

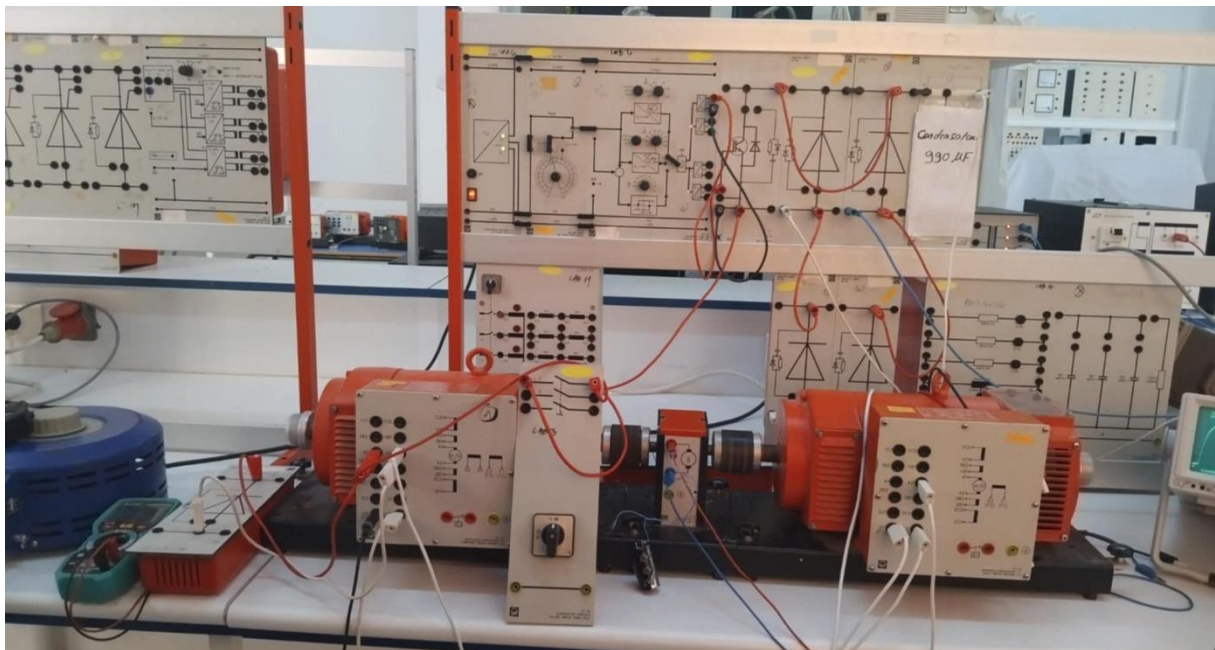


Figure (IV.30) : Montage pratique pour la commande de vitesse du MCC à vide.

La figure (IV.30) illustre l'implémentation pratique de la commande de vitesse d'un moteur à courant continu, qui est alimenté par un convertisseur à pont de Graetz. Le hacheur en série est à la base d'un commutateur électronique à IGBT. Le hacheur, alimenté par la tension redressée et filtrée obtenue dans le chapitre II, génère un signal carré de fréquence constante et de largeur

variable grâce à la MLI. Ce signal permet d'obtenir une tension moyenne variable à la sortie du hacheur qui est utilisée pour commander la vitesse du MCC.

La fréquence de l'hacheur est 500 HZ pour une période de 2ms.

On a mesuré la tension d'entrée et la tension de sortie pour l'alimentation du moteur :

$$V_s = 136.3V \text{ (Fixe)}$$

$$V_{dc} = 82V. \text{ (Variable)}$$

$$\alpha = \frac{V_{dc}}{V_s} = \frac{82}{136.3} = 0.6, \alpha : \text{le rapport cyclique.}$$

La vitesse peut être déterminée de trois façons : soit directement par le tachymètre, soit à l'aide de la dynamo tachymétrie (1V correspond à 1000 tr/min), ou simplement en utilisant un oscilloscope. Un carré équivaut à 0,2V et avec 5.7 carrés, nous obtenons approximativement 1140 tr/min.

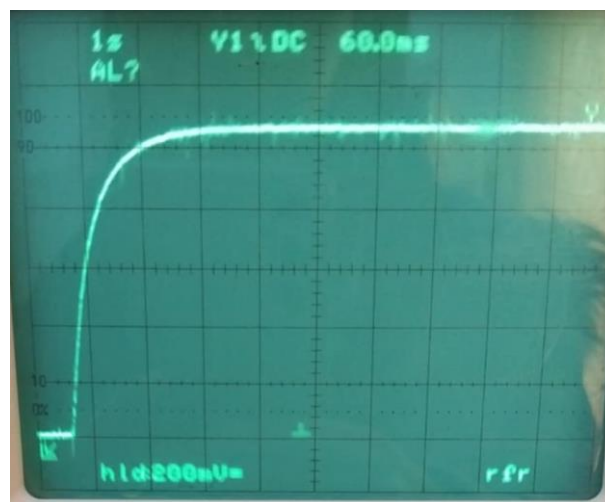


Figure (IV.31) : La courbe de la vitesse du MCC à vide pour $\alpha = 0.6$.

Nous allons maintenant effectuer une variation du rapport cyclique pour moduler la vitesse du moteur à courant continu, et voici les résultats obtenus :

$$V_s = 136.3V;$$

$$V_{dc} = 135.5V$$

$$\text{Donc } \alpha = 0.99$$

$$\text{Et } \omega = 1440 \text{ tr/min}$$

La figure (IV.32) illustre l'affichage de la vitesse pour ce nouveau rapport cyclique. Comme nous l'observons, en augmentant le rapport cyclique de 0.6 à 0.99, la vitesse augmente elle aussi de 1140 tr/mn à tr/min à 1440 tr/min. Il est donc évident que le rapport cyclique a un impact direct sur la vitesse.

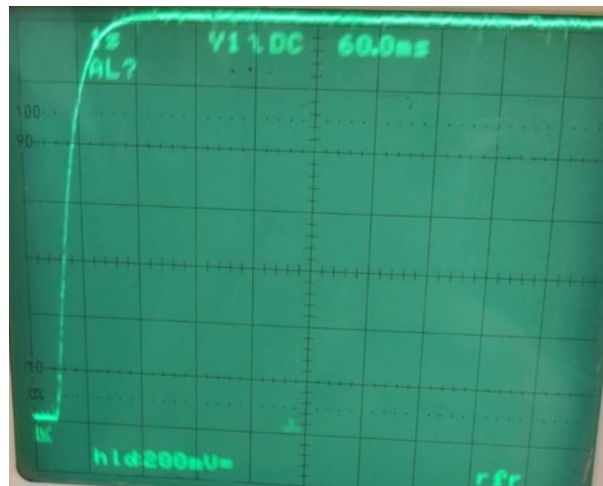


Figure (IV.32): La courbe de la vitesse du MCC à vide pour $\alpha = 0,99$.

b. En charge :

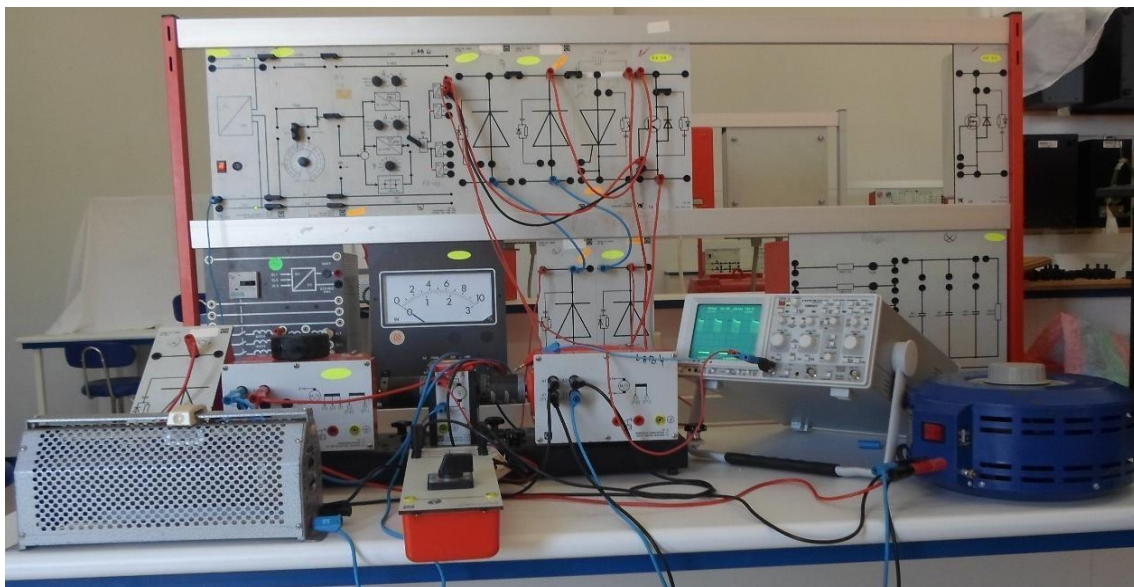


Figure (IV.33) : MCC à charge (résistive).

La figure (IV.33) illustre la même mise en œuvre que la figure (IV.30), à l'exception qu'une charge résistive de 135Ω a été ajoutée.

En conservant le même rapport cyclique, c'est-à-dire la même tension d'entrée et de sortie, mais cette fois en utilisant une charge résistive (135Ω), nous constatons que la vitesse a baissé de 1140 tr/min à 750 tr/min avec le rapport cyclique 0.6, comme indiqué à la figure (IV.34) et de 1440 tr/mn à 1000tr/mn avec un rapport cyclique de 0.99, figure(IV.35).



Figure (IV.34) : La courbe de la vitesse du MCC en charge pour $\alpha = 0,6$.



Figure (IV.35) : La courbe de la vitesse du MCC en charge pour $\alpha = 0,99$.

Finalement, nous avons mis le moteur en marche à vide, puis nous avons imposé une charge. Il est évident qu'il y a une baisse de vitesse sans toutefois revenir à son niveau d'origine, ce qui est le cas dans une boucle ouverte, comme le montre la figure (IV.36).

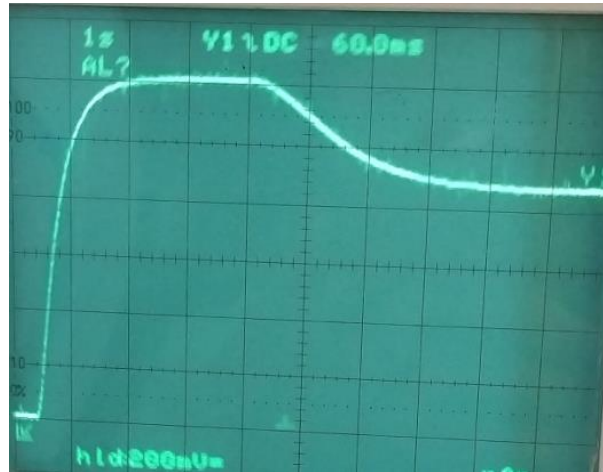


Figure (IV.36) : Démarrage à vide puis application d'une charge avec un rapport cyclique Quelconque.

IV.11.3. Interprétation :

Nous avons sélectionné une fréquence de hacheur fixée à 500 Hz. Nous avons lancé notre moteur avec une tension d'entrée de 136V. En variant le rapport cyclique α , la tension de sortie varie également, ce qui entraîne une variation de la vitesse du moteur. Nous avons donc effectué deux essais :

Pour $\alpha = 0,6$ et sans charge, on observe que la vitesse varie autour de 1140 tr/min, tandis qu'en charge, elle est de 750 tr/min.

Pour $\alpha = 0,99$ et sans charge, on observe que la vitesse fluctue autour de 1440 tr/min, tandis qu'en charge, elle atteint 1000 tr/min.

Lors du dernier essai réalisé, nous avons d'abord fait démarrer le moteur à vide, puis après un certain temps en charge, nous avons imposé une charge. Lors de l'application de ce couple résistant, la vitesse a évidemment baissé et n'est pas retournée à sa valeur initiale, ce qui est tout à fait compréhensible étant donné qu'il s'agit d'une boucle ouverte.

Nous concluons que la variation du rapport cyclique entraîne automatiquement la variation de vitesse soit à vide ou à charge

IV.11.4. Conclusion :

Ce chapitre a été réservé principalement pour la commande de la vitesse d'un moteur à courant continu. Un hacheur série à base d'un IGBT a été utilisé dans cette réalisation.

Les résultats obtenus ainsi sont très satisfaisants et confirment la validité de la partie théorique.

Conclusion

générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire qu'on a élaboré était axé principalement sur la simulation par le logiciel PSIM et la réalisation pratique des redresseurs non commandés et commandés, ainsi qu'un hacheur série commandé par un composant électronique à base d'IGBT. Différentes charges ont été prises en compte à savoir : résistive, résistive-inductive et enfin un moteur à courant continu est utilisé à vide et en charge pour commander sa vitesse.

On a débuté ce travail par l'initiation du logiciel PSIM afin de simuler les différents convertisseurs non commandés à base des diodes, commandés utilisant des thyristors et enfin le hacheur série. La simulation est ensuite validée par la réalisation pratique dans notre laboratoire.

Il est à noter que la simulation des différents convertisseurs avant de faire une réalisation pratique est indispensable afin de mener à bien cette réalisation, le bon choix des composants utilisés et surtout pour préserver les équipements en bon état.

D'ailleurs, les résultats obtenus pratiquement valident et confirment les simulations effectuées par le logiciel Psim.

Finalement, pour commander la vitesse d'un moteur à courant continu en agissant sur le rapport cyclique, nous avons utilisé un hacheur série à base d'un IGBT.

Les résultats obtenus ainsi point de vue pratique sont très satisfaisants et valident clairement la partie théorique.

Nous espérons que ce mémoire sera très utile et très bénéfique pour ceux qui sont concernés par la pratique de l'électronique de puissance soit dans notre université ou bien d'autres universités au niveau national.

En perspective, nous souhaitons la continuation de ce travail pour compléter ce mémoire en tenant compte de l'onduleur monophasé et triphasé pour commander la vitesse d'un moteur à induction.

Bibliographiques

Bibliographie

- [1] INITIATION A "PSIM". Claude Lahache.
- [2] Power Electronics Circuit Devices And Applications, Muhammad H.Rashid-Prentice-Hall 2004.
- [3] Principales and Elements of Power Electronics.Borry W. Williams. 2006.
- [4] Guy Séguier ,'' Electronique de puissance, 9^e édition. DUNOD
- [5] Aide mémoire,''Electricité, Electronique de commande et de puissance, ELCTROTECHNIQUE'.2^e édition, DUNOD
- [6] Gy.Chateiger , Michel Boes, Daniel Bouix, Jaque Vaillant ; »Manuel de Génie Electrique',DUNOD 2006
- [7] Christofophe FRANCOIS, 'Electronique analogique et numérique, Electronique de puissance et Electrotechnique, Automatique'', 2008, ellipes
- [8] Henry Ney, Noel Morel, ''Equipement de puissance'', Nathan/VUEF,2001
- [9] M.Lavabre, '' Electronique de puissance convertisseur de l'énergie'', 1988,Eleducalivre
- [10] Gy.Seguir, ''les convertisseurs de l'électronique de puissance Tom1''(TEC&DOC),1995
- [11] Gy.Seguir, ''les convertisseurs de l'électronique de puissance Tom3''(TEC&DOC),1995
- [12] Gy.Seguir, ''les convertisseurs de l'électronique de puissance Tom4''(TEC&DOC),1995
- [13]Phillippe Barrade, ''Electronique de puissance'', première édition, 2006
- [16] Francois BERNOT ''Machine à courant continu constitution et fonctionnement, Technique de l'Ingénieur 11-1996 D3-II-génie électrique, machine électrique,
WWW. Technique.ingénieur-fr D3 555pp2-16

ANNEXES

TECHNIQUE DE LA COMMANDE MLI :

La qualité de la tension de sortie d'un hacheur dépend fortement de la technique de contrôle utilisée pour contrôler les commutateurs du hacheur. Il existe plusieurs techniques de contrôle, et le choix de l'une parmi toutes les possibilités dépend essentiellement du type

d'application auquel l'appareil est destiné. La technique la plus courante dans les convertisseurs de fréquence MCC est le contrôle de modulation de largeur d'impulsion MLI.

Principe de la commande MLI :

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion MLI est basé sur un découpage parfait des ondes carrées. La tension de sortie est ainsi formée d'une série d'impulsions rectangulaires de largeur variable d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation.

La technique la plus courante pour générer un signal PWM consiste à comparer deux signaux.

- Le premier, appelé signal de référence, est un signal continu qui varie entre deux seuils définis selon l'application.
- Un second signal, appelé signal porteur, définit la vitesse de commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. Il s'agit d'un signal haute fréquence par rapport au signal de référence.
- L'intersection de ces signaux indique le temps de commutation de l'interrupteur. Le signal de sortie vaut 1 si le modulateur est supérieur à la porteuse et 0 sinon. Par conséquent, le signal de sortie change d'état chaque fois que la modulation traverse la porteuse.

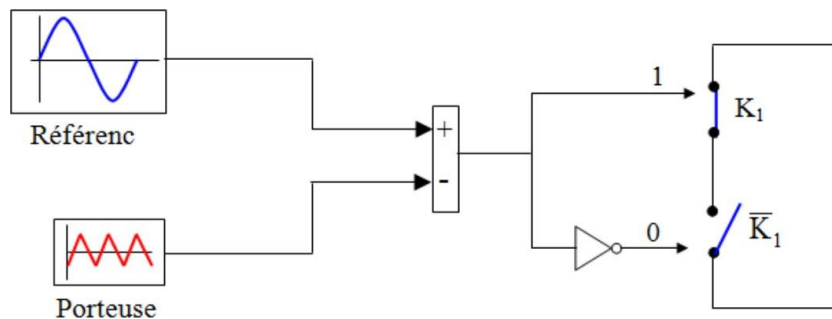


Figure (A.1) : Schéma de principe de la commande MLI

L'intersection de la porteuse montante et de la référence commande l'ouverture du transistor (T), et l'intersection de la porteuse descendante commande la fermeture de (T). Le principe se fait en comparant deux signaux à l'aide d'un amplificateur opérationnel. Ceci nous permet de modéliser la commande MLI sous Matlab/Simulink, de la manière suivante :

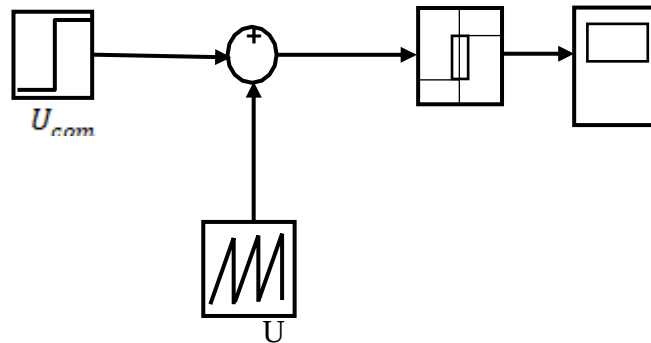


Figure (A.2) : Génération des signaux de commande MLI du hacheur

