

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE HASSIBA BEN BOUALI DE CHLEF



Faculté des Sciences & Sciences de l'Ingénieur

Département d'Electrotechnique

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

ECOLE DOCTORALE

Option : Réseaux électriques

Présenté par

Kheira HEMICI

Ingénieur d'état en électrotechnique

Thème

***Commande d'un compensateur actif série à base
d'un onduleur à cinq niveaux***

Soutenu le : 05 Avril 2011 devant le jury composé de :

BELMADANI Bachir	Professeur	UHB Chlef	Président
MAHMOUDI Mohand Oulhadj	Professeur	ENP, Alger	Encadreur
DAHMANE Rabah	M.A.A	UHB Chlef	Co. encadreur
BOUCHERIT Mohamed Seghir	Professeur	ENP, Alger	Examineur
TADJINE Mohamed	Professeur	ENP, Alger	Examineur

-Année Universitaire 2010/2011-

REMERCIEMENTS

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

Je tiens à remercier vivement

Mon père, ma mère, mon promoteur Monsieur M.O.Mahmoudi et copromoteur Monsieur R.Dahmanee , pour ses orientations éclairées, ses conseils constructifs, son esprit critique et son aide précieuse.

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

Tous les enseignants qui ont contribué à notre formation pendant notre cycle de formation ,*en particulier A.Aissa ; Bokhetache ;M.Bidrrar ;*

M .Chirifi ; kLatrach ;.

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

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

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

A la mémoire de mon père et ma mère ;

A ma grande mère ;

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

A mon mari Abderrahmane et ma fille Asma ;

A les enseignants Bedrar Mohamed et Aissa Boretache Aicha

A tous mes amis en particulier Amina, Asma, Rachida ,radhia ,Soumia, houria, Zohra..

A tous ceux qui me sont chers.

RESUME

En vue d'améliorer la qualité du transfert d'énergie de la source vers la charge, et de réduire les effets néfastes des harmoniques engendrés par des perturbations de tensions, ce travail a été fait.

Dans ce mémoire nous exposons le problème de la déformation du forme tension dans les installations électrique, qui découle directement de la prolifération des charges non linéaires et des différent phénomènes perturbatrice, pour le résoudre, nous avons utilisé un onduleur à cinq niveaux à structure NPC comme un compensateur actif série, qui injecte des tensions harmoniques en temps réel au point de connexion (compensateur actif série -réseau).

Nous proposons la source est perturbée due aux harmoniques d'ordre 5 et d'ordre 7, et la charge polluante est un redresseur triphasé à thyristor alimente un onduleur de tension à deux niveaux et un machine asynchrone.

On présentera une solution efficace à la pollution des réseaux produite par des charges non linéaires.

Mots clés : Pollution des réseaux, qualité de l'énergie, harmoniques de tension, onduleur à cinq niveaux, commande MLI, compensateur actif série, charge non linéaire, redresseur de courant à deux niveaux .onduleur de tension à deux niveaux

SUMMARY

In order to improve quality of the transfer of energy of the source towards the load, and to reduce the harmful effects of the harmonics generated by disturbances of tensions, this work was made.

In this memory we expose the problem of formation of the form tension in the installations electric, which rises directly from the proliferation of the nonlinear loads and from phenomena differ disturbing, to solve it, we used an inverter on five levels with structure NPC like active filter series, which injects harmonic tensions in real time at the point of connection (compensation credit series credit-network).

We propose the east source disturbs due to the harmonics of order 5 and order 7, and the polluting load is a three-phase rectifier has thyristor supplies an inverter of tension has two levels and an asynchronous machine.

One will present an effective solution at the pollution of the networks produced by nonlinear loads.

Key words : Pollution of the networks, quality of energy, voltage harmonics, five-level inverter, , series active compensator .load nonlinear, two level rectifier of voltage ,two level inverter of courant

ملخص

هذا العمل أنجز لتحسين نوعية تحويل الطاقة الكهربائية من المصدر إلى الحمل و تخفيض الاضطرابات الناتجة عن الحملات الكهربائية غير الخطية. في هذه المذكرة نعرض مشكل التغير والاضطراب في شكل التوتر الكهربائي في المنشآت الكهربائية التي

تنشأ عن حملات اللاخطية و ظواهر اضطرابية، ولحلها نستعمل موج خماسي المستويات NPC (النقطة الحياضية المترابطة) كمرشح متوازي يقوم بإدخال توترات توافقية في الوقت الحقيقي في نقطة ارتباط (مرشح نشيط، دارة) مع المعوض للطاقة المتفاعلة

فرضنا ان منبع التوتر مضطرب بسبب التوترات التوافقية من الدرجة 5 والدرجة 7، والحمولة المسببة لاضطرابات هي مقوم بتيرستور يغذي موج ثنائي المستويات NPC (النقطة الحياضية المترابطة) و محرك لا تزامني

قمنا بتقديم حل فعال لمشكل تلوث الشبكات الكهربائية بسبب لحملات اللاخطية

كلمات المفتاح: تلوث الدارات، نوعية الطاقة، توافقيات التوتر، موج ذو خمس مستويات، التحكم بتغيير عرض النبضات، مرشح نشيط متوازن، معوض الطاقة الفعالة التسلسلي، الحملات غير الخطية، مقوم التيار ثنائي المستويات ، موج ثنائي المستويات.

LISTE DE SYMBOLE

α	Angle d'amorçage de thyristors
ϕ	Déphasage entre le courant et la tension
δ	Coefficient d'amortissement
τ	Constante de temps
δ	Coefficient d'amortissement
ω	Pulsation du réseau
Ω_{nom}	Vitesse nominale
D	Puissance déformante
E	Tension continue appliquée à l'onduleur
e_1, e_2, e_3	Tension réseau sur la phase 1, 2,3
e	L'erreur entre V_{h1-inj} et V_{h1-ond}
f_c	Fréquence de coupure
f	Fréquence fondamentale du réseau (Hz)
f_p	Fréquence de la porteuse
F_{ks}	Fonction de connexion de l'interrupteur T_{ks}
F_{km}^b	Fonction de connexion du demi-bras k
F_c	Fonction de commutation
q	Puissance réactive
F_{cg}	Fonction génératrice de commutation
F_p	Facteur de puissance
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actif série
FPP	Filtre passif parallèle
I_d	Courant redressé
i_c	Courant de charge
i_1, i_2, i_3	Courant de ligne d'un système triphasé équilibré
i_h ou i_{inj}	Courant harmonique
$i_{h_mesuré}$	Courant harmonique de mesurée
$I_{ref1,2,3}$	Courants de référence
$i_{d0}, i_{d1}, i_{d2}, i_{d3}, i_{d4}$	Courants d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux
i_c	Courant de charge
I_d	Courant redressé
L_f, R_f	Impédance de la sortie du filtre
L_{cc}	Inductance d'une phase de réseau (H)
$[M(t)]$	Matrice de conversion composée
$[N_g(t)]$	Matrice génératrice de conversion simple
$[M_g(t)]$	Matrice génératrice de conversion composée
MLI	Modulation de largeur d'impulsion

m	Indice de modulation
$[N(t)]$	Matrice de conversion simple
NPC	Neutral Point Clamping (point neutre des sources continues M)
n	Rang harmonique
p	Puissance active
\bar{p}	Puissance active continue
\tilde{p}	Puissance active alternative
q	Puissance réactive
\bar{q}	Puissance réactive continue
\tilde{q}	Puissance réactive alternative
R	Résistance d'induit
R_{mn}	Réceptivité de transition entre la configuration (m) et (n)
R_{cc}	Résistance d'une phase de réseau (Ω)
r	Taux de modulation
S	Puissance apparente
T_p	Période des porteuses
THD	Taux de distorsion harmoniques
$U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}, U_{c4}$	Tensions d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux
$UPQC$	Unified Power Quality Conditionner
U_{pm}	Décalage entre les deux porteuses
U_d	Tension redressée
v_f	tension fondamentale
v_h	tension harmonique
V_s	tension simple de la source perturbée
V_{inj}	Tension harmonique
$V_\alpha, V_\beta, I_\alpha, I_\beta$	Composante de Concordai

Liste des figures

Figure I.1: Creux de tension.....	6
Figure(I.2): Exemple de variations rapide de la tension.....	9
Figure (I.3): Exemple de cas de sursensions transitoires.....	10
Figure (I.4): Représentation de la déséquilibre du système triphasé de tensions.....	11
Figure (I.5): Exemple de fluctuation de la fréquence.....	13
Figure (I.6) : représentation de l’harmonique et l’inter harmonique.....	13
Figure (I.7): Représentation de la déformation de la tension.....	17
Figure (I.8) : Diagramme de Fresnel des puissances.....	18
Figure (I.9) : Filtre passif amorti ou passe-haut.....	22
Figure (I.10) : Filtre passif résonnant.....	23
Figure (I.11) : Filtre actif parallèle.....	24
Figure (I.12): Filtre actif série.....	25
Figure (I.13) : Combinaison des filtres actifs série et parallèle.....	26
Figure (I.14): Filtre actif série assisté par filtre passif.....	27
Figure (I.15) : Filtre actif série et passif parallèle connectés en série assisté.....	28
Figure (I.16) : Filtre actif parallèle assisté par filtre passif.....	28
Figure (II.1): Schéma simplifier d’un réseau électrique.....	32
Figure (II.2): la déformation d’un tension de réseau électrique.....	32
Figure (II.3): Comparaison entre une tension de phase (a) pour une source perturbée et une tension de phase (a) pour une source une tension équilibre.....	32
Figure (II.4) : Principe du filtrage actif.....	33
Figure (II.5) : Structure générale du filtre actif série.....	34
Figure (II.6): Schéma de principe du filtre utilisé pour l’extraction des composantes harmoniques.....	40
Figure (II.7) : Méthode pq d’extraction des tensions de référence.....	41
Figure (II.8): Schéma d’un redresseur triphasé à thyristors.....	41
Figure (II.9) : Schéma du filtre LC.....	42
Figure (II.10): La tension de sortie de redresseur a thyristor et la tension de sortie du filtre passif avant la compensation.....	44

Figure (II.11): La tension de sortie de redresseur a thyristor et la tension de sortie du filtre passif pour une source de tension non perturbé.....	45
Figure (II.12) : l'influence d'un source perturbe a la tension de sortie d'un redresseur a thyristor et la sortie du filtre passif.....	46
Figure (III.1): Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire transistor – diode.....	49
Figure (III.2): Structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC.....	50
Figure (III.3) : Structure d'un bras d'onduleur à cinqniveaux.....	51
Figure (III.4) : Différentes configurations pour un bras l'onduleur à cinq.....	54
Figure (III.5): Réseau de pétri d'un bras d'onduleur à cinq niveaux.....	57
Figure (III.6) : Réseau de pétri réduit d'un bras d'onduleur à cinq niveaux	58
Figure (III.7) : Réseau de pétri réduit d'un bras d'onduleur à cinq niveaux	64
Figure (III.8): Modèle de commande de l'onduleur triphasé à cinq niveaux.....	65
Figure (III.9) : Principe de la commande MLI.....	67
Figure (III.10): Stratégie MLI à quatre porteuses bipolaires.....	68
Figure (III.11): La tension simple v_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires (algorithme1) pour $m=6, 9, 15, 30,36$	70
Figure (III.12): Caractéristiques de la tension de sortie V_a de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie MLI à quatre porteuses bipolaires (Algorithme1).(m=36).....	71
Figure (III.13) : Les différent signales de la stratégie de modulation vectorielle (Algorithme2)(m=6,r=0.8).....	72
Figure (III.14): La tension simple v_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires (algorithme2) pour $m=6, 9, 15, 30,36$	73
Figure (III.15): Caractéristiques de la tension de sortie V_a de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie MLI à quatre porteuses bipolaires (Algorithme 2),(m=36)	74
Figure (III.16) : Les différent signales de la stratégie de modulation vectorielle (Algorithme1)(m=6, r=0.8).....	75

Figure (III.17): La tension simple v_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie modulation vectorielle à quatre porteuses triangulaires (algorithme1) pour $m=6, 9, 15, 30,36$	77
Figure (III.18): Caractéristiques de la tension de sortie V_a de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la modulation vectorielle (Algorithme 1)($m=36$).....	78
Figure (III.19): Les différent signales de la stratégie de modulation vectorielle (Algorithme2).....	79
Figure (III.20): La tension simple v_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires (algorithme1) pour $m=6, 9, 15, 30,36$	81
Figure (III.21): Caractéristiques de la tension de sortie V_a de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie MLI à quatre porteuses bipolaires (Algorithme2) ;($m=36$).....	82
Figure (III.22): le taux de distorsion harmonique pour tout les stratège de commande proposé pour commande l'onduleur à cinq niveaux a structure NPC.....	83
Figure (IV.1): Structure de la cascade un redresseur de courant à deux niveaux- Onduleur de tension à cinq niveaux	84
Figure (IV.2): Structure du redresseur de courant à deux niveaux.....	85
Figure (IV.3): principe du contrôle par hystérésis d'un redresseur à deux niveaux de tension à cinq niveaux.....	86
Figure (IV.4): Structure du filtre intermédiaire.....	86
Figure(IV.5): les tensions de sortie de chaque bloc constituent le compensateur actif série.....	88
Figure (IV.6): l'alimentation et stratégie de commande de l'onduleur pour asservi le compensateur actif sérié.....	89
Figure (IV.7) : la tension de charge avant et après la compensation pour $\text{Alpha}=\{0^\circ, 30^\circ, 60^\circ\}$	90
Figure (IV.8) : les tensions d'alimentation de l'onduleur a cinq niveaux et son tension de sortie pour $\text{Alpha}=0^\circ$	91
Figure (IV.9): Les grandeurs simulées pour $\text{Alpha}=0^\circ$	92
Figure (IV.10) : les tensions d'alimentation de l'onduleur a cinq niveaux et son tension de sortie pour $\text{Alpha}=30^\circ$	93
Figure (IV.11): Les grandeurs simulées pour $\text{alpha}=30^\circ$	94

Figure (IV.12) : les tensions d'alimentation de l'onduleur a cinq niveaux et son tension de sortie pour $\text{Alpha}=60^\circ$	95
Figure (IV.13): Les grandeurs simulées pour $\text{Alpha}=60^\circ$	96
Figure(IV.14) : Structure du pont de clamping.....	98
Figure (IV.15): Structure de pont de clamping pour le cas d'un redresseur à deux niveaux	99
Figure (IV.16) : la tension de charge avant et après la compensation pour $\text{Alpha}=\{0^\circ, 30^\circ, 60^\circ\}$ (avec un pont de clamping).....	100
Figure(IV.17): Les grandeurs simulées pour $\text{Alpha}=0^\circ$ (avec pont de clamping).....	101
Figure (IV.18): Les grandeurs simulées pour $\text{Alpha}=30^\circ$ (avec pont de clamping).....	102
Figure (IV.19): Les grandeurs simulées pour $\text{Alpha}=60^\circ$ (avec pont de clamping).....	103
Figure(IV.20) : Emplacement du block de régulation	104
Figure(IV.21) : Model simplifies d'un réseau perturbé associée d'un compensateur actif sérié.....	105
Figure (IV.22) : model simplifié d'un onduleur et filtre de ortie.....	105
Figure (IV.23): Modélisation du block de régulation.....	106
Figure(IV.24): stratégie de placement de pôles de $D(s)$	108
Figure (IV.25): l'alimentation et stratégie de commande de l'onduleur pour asservi le compensateur actif sérié.....	110
Figure (IV.26): les tensions de sortie de chaque bloc constituent le compensateur actif sérié.....	111
Figure (IV.27) : la tension de charge avant et après la compensation pour $\text{Alpha}=\{0^\circ, 30^\circ, 60^\circ\}$ (commande en boucle fermé avec un pont de clamping)	112
Figure (IV. 28): Les grandeurs simulées pour $\text{Alpha}=0^\circ$ (commande en boucle fermé avec pont de clamping).....	113
Figure (IV.29): Les grandeurs simulées pour $\text{Alpha}=30^\circ$ (commande en boucle fermé avec pont de clamping).....	114
Figure (IV.30): Les grandeurs simulées pour $\text{Alpha}=60^\circ$ (commande en boucle fermé avec pont de clamping,).....	115

Sommaire

REMERCIEMENTS	(i)
DEDICACES	(ii)
RESUME	(iii)
LISTE DE SYMBOLE.....	(v)
LISTE DES FIGURES.....	(vii)
SOMMAIRE	(xi)
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Les perturbations et la dépollution dans les systèmes électriques

Introduction	3
I.1 La qualité de l'énergie électrique	4
I.1.1 Critères et définitions.....	4
I.1.2. les normes de la qualité d'énergie électrique	4
I.2 Caractérisation et identification des principales sources de perturbations électromagnétiques	5
I.2.1.Caractéristiques des phénomènes perturbateurs	5
I.2.2 Origines et conséquences des phénomènes perturbateurs	6
I.2.2.1 Creux de tension et coupures.....	6
I.2.2.2 Variation et fluctuation de tension	8
I.1.2.3. Surtensions temporaires ou transitoires	9
I.2.2.4 Déséquilibre du système triphase de tension	11
I.2.2.5 Variation de fréquence.....	12
I.2.2.6 Harmoniques et inter harmoniques	13
I.3 Les perturbations harmoniques en courant et/ou en tension	14
I.3.1 Origine des harmoniques	14
I.3.2 Conséquences des harmoniques	14
I.3.3 caractérisation des perturbations harmoniques	16
I.3.3.1 le taux de distorsion harmonique (THD)	16
I.3.3.2 le facteur de puissance	18
I.4 Solutions pour améliorer la qualité d'énergie électrique.....	20

I.4.1 Solutions traditionnelles de dépollution.....	20
I.4.1.1 Dépollution des courants perturbateurs.....	20
I.4.1.1.1 Rééquilibrage des courants perturbateurs.....	20
I.4.1.1.2 Compensation de la puissance réactive.....	21
I.4.1.1.3 Compensation des courants harmoniques.....	21
I.4.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices.....	23
I.4.2 Solutions modernes de dépollution	23
I.4.2.1 Le filtre actif parallèle	24
I.4.2.2 Le filtre actif série	25
I.4.2.3 La combinaison parallèle série actifs.....	25
I.4.2.4 Combinaison hybride active et passive	26
I.4.2.4.1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.....	26
I.4.2.4.2 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles....	27
I.4.2.4.3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	28
Conclusion.....	28

Chapitre II: Etude du compensateur actif série

Introduction.....	30
II.1 Mis on œuvre	31
II.2 Modélisation du réseau électrique perturbé	31
II.3 Principe de la compensation actif série	33
II.4. Topologie générale d'un compensateur actif série	34
II.4.1 Etude de la partie puissance	35
II.4.1.1 onduleur de tension	35
II.4.1.2 Système de stockage d'énergie	35
II.4.1.3 Filtre passif de sortie	35

II.4.2. Etude de la partie contrôle commande	37
II.4.2.1 Principe de la méthode	37
II.4.2.2 Séparation des puissances	39
II.4.2.3 Identification des tensions de référencées	40
II.5 Modélisation de la charge polluante	41
II.5.1 Modélisation du redresseur a thyristor	41
II.5.2 Modélisation du filtre	41
Résultats de simulation avant la compensation.....	44
Résultats de simulation pour une source perturbée	45
Interprétation.....	46
Conclusion	47

Chapitre III : Modélisation de l'onduleur à cinq niveaux et stratégie de commande

Introduction.....	48
III.1 Modélisation de l'onduleur triphasé à cinq niveaux	49
III.1.1 Structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux.....	49
III.1.2 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à cinq niveaux	51
III.1.3 Réseau de Pétri d'un bras d'onduleur à cinq niveaux.....	55
III.2 Modèle de commande de l'onduleur à cinq niveaux	57
III.2.1 Commande complémentaire	57
III.2.2 Modèle de connaissance de l'onduleur triphasé à cinq niveaux	58
III.3 Les différentes stratégies de commande de l'onduleur à cinq niveaux	67
III.3.1 Caractéristiques de la modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	67
III.3.1 Commande triangulo-sinusoidale a quatre porteuses triangulaires_ Algorithme 1.....	68
III.3.2 Commande triangulo-sinusoidale a quatre porteuses triangulaires_ Algorithme 2.....	72
III.3.3 Modulation vectorielle _ Algorithme 1	75
III.3.4 Modulation vectorielle _ Algorithme 2	79
III.3.6 Stratégies de commande adopté de l'onduleur à cinq niveaux	82
Conclusion	82

Chapitre IV : Commande d'un compensateur actif série

Introduction.....	84
IV.1 Cascade d'un redresseur de courant triphasé à deux niveaux –Onduleur Triphasé à Cinq Niveaux à Structure NPC	84
IV.1.1 Stratégie de contrôle du redresseur à deux niveaux.....	85
IV.1.2 Modélisation du filtre intermédiaire.....	86
Résultats de simulation.....	87
Interprétation.....	97
IV.2 Pont de clamping.....	98
Résultats de simulation.....	100
Interprétation	104
IV.3 Etude en boucle fermé.....	104
IV.3.1 Etude de la boucle de régulation.....	104
IV.3.2 Modélisation de l'onduleur de tension muni de son Filtre LC.....	105
IV.3.3 Calcul des paramètres de régulateur PI.....	106
Résultats de simulation	108
Interprétation	116
Conclusion	116
Conclusion générale	118
Annexe	120
Bibliographie	124

Introduction générale

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

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

En dehors des harmoniques traités par les compensateurs actifs, de nombreuses perturbations subsistent: creux de tension et coupures, surtensions temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (flicker), variations de la fréquence, déséquilibres du système triphasé, harmoniques et inter harmoniques. Ces perturbations ont des incidences économiques à ne pas négliger.

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

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

Il est essentiellement composé d'un onduleur de tension

Le travail présenté dans ce mémoire concerne particulièrement l'étude par simulation d'un compensateur actif série à basse fréquence d'un onduleur à cinq niveaux à structure NPC qui est destiné au filtrage des tensions harmoniques

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

Le premier chapitre décrit les phénomènes principaux qui dégradent la qualité de l'énergie électrique, leurs origines, les conséquences sur les équipements et les normes

inhérentes à ces perturbations seront également analysées. Dans ce chapitre, nous présenterons également les solutions actuelles de dépollution.

Le deuxième chapitre sera consacré au principe de compensation active série en utilisant comme organe de puissance de l'onduleur à cinq niveaux. En deuxième lieu l'étude des différentes méthodes d'identification des courants harmoniques et en particulier la méthode des puissances actives et réactives instantanées, En troisième lieu la modulation de la charge sensible propose qui comporte un redresseur de tension triphasé alimente un onduleur à deux niveaux et un moteur asynchrone

Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation d'onduleur triphasé à cinq niveaux. On présentera son modèle de connaissance et celui de commande. Ainsi que les stratégies de commande MLI.

Dans le dernier chapitre et on se met dans le cas le plus pratique où l'alimentation de l'onduleur connectée au réseau électrique est fournie par un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur.

pour réduire les harmoniques de tension, nous étudierons principalement le dimensionnement de bloc de régulation basé sur le régulateur PI qui est appliquée pour réguler ici la tension harmonique injectée au réseau pour diminuer les perturbations de tension ou autrement dit diminuer le taux d'harmonique de tension.

La validation de notre étude proposée sera effectuée par simulation à partir du logiciel MATLAB SIMULINK

Chapitre I :
Les perturbations et la dépollution dans
les systèmes électriques

Introduction

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différents clients et utilisateurs sur le réseau électrique.

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

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

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

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

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

Dans la quatrième partie nous donnerons une présentation des différentes solutions traditionnelles et modernes proposées dans la littérature pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques et les stratégies de dépollution afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Nous détaillerons l'approche de la dépollution la mieux adaptée à notre objectif de recherche

I.1 La qualité de l'énergie électrique

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

- la nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises,
- la généralisation d'équipements sensibles aux perturbations de la tension et/ou eux-mêmes générateurs de perturbations,

l'ouverture du marché de l'électricité. [FER-2001].

I.1.1 Critères et définitions

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

On parle de Compatibilité Electromagnétique (C. E. M.) afin de caractériser l'aptitude d'un appareil, d'un dispositif [OU A-2005] [YOU-2008], à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans produire lui même des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs.

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

La CEM classe ces perturbations selon deux groupes :

- basses fréquences (< 9 kHz) ;
- hautes fréquences (> 9 kHz) [FER-2001]

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

Afin de limiter les effets des perturbations électromagnétiques sur les réseaux électriques, des normes ont été mis en place. Les deux principaux organismes qui ont établi de telles normes sont la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) et l'IEEE. Les normes qu'ils ont établies sont, de façon respective, la série CEI 61000 et l'IEEE Standard 519 [BEA-2007]

De façon générale ces normes identifient les principales sources de perturbations électromagnétiques décrivent les effets de ces perturbations sur les réseaux, décrivent des méthodes d'analyse et de mesure pour les harmoniques et fournissent diverses

recommandations en vue de réduire la présence des phénomènes perturbatrices sur les réseaux électriques.

1.2 Identification et caractérisation des principales sources de perturbations électromagnétiques

1.2.1. Caractéristiques des phénomènes perturbateurs

La mesure de la qualité de l'énergie électrique consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites à basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau). [FER-2001]

Les phénomènes observés sont nombreux [FAT-2006] [YOU-2008]: creux de tension et coupures, surtensions temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (flicker), variations de la fréquence, déséquilibres du système triphasé, harmoniques et inter harmoniques, tensions continues dans les réseaux alternatifs, ...

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

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

Afin de bien analyser les pollutions des réseaux électriques en basse tension et, par conséquent, de trouver les meilleures méthodes de dépollution, on va distinguer deux types de perturbations, à savoir les perturbations de courant et celles de tension. [ALA-2002] [FAT-2006]

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

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

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

I.2.2 Origines et conséquences des phénomènes perturbateurs

I.2.2.1 Creux de tension et coupures

- **Origine du phénomène**

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise (par convention) entre 90 % et 1% (CEI 61000-2-1, CENELEC EN 50160), ou entre 90 % et 10 % (IEEE 1159) d'une tension de référence (H_{ref}) suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps compris entre la demi période fondamentale du réseau (10 ms à 50 Hz) et une minute comme il est représenté dans la figure (I.1) [FER-2001] [FAT-2006]

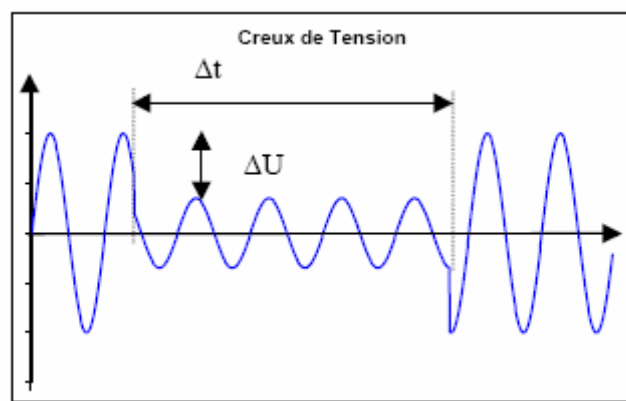


Figure (I.1): Creux de

Il est caractérisé par

- sa profondeur (ΔU)
- sa durée (Δt)

Une coupure de tension quand à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues [YOU-2008]

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

- **Causes du phénomène**

Les creux de tension et les coupures brèves sont principalement causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du

réseau une chute de tension d'amplitude d'autant plus faible que le point d'observation est électriquement éloigné de la source de la perturbation. [FER-2001]

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

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

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

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

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

Le Tableau (I.1) résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles [FAT-2006] [FET-2004] [MEY-1990]

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

Tableau. (I.1): Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles [[FAT-2006] [MAR-2000]

I.2.2.2 Variation et fluctuation de tension

- **Origine du phénomène**

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude, [FER-2001] [FAT-2006] [MAR-2000] comme illustré sur la figure (I.2)

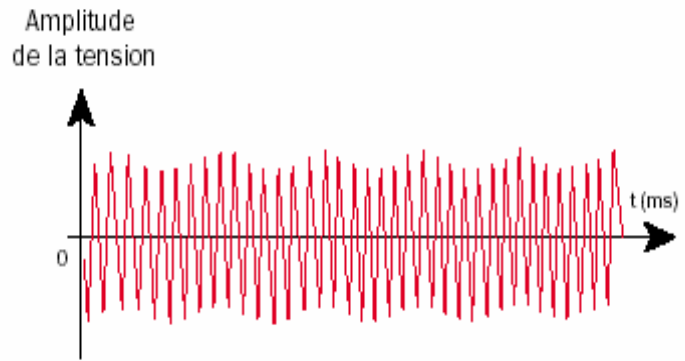


Figure (I.2): Exemple de variations rapide de la tension

- **Causes du phénomène**

Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau [FER-2001] [FAT-2006]; Les fluctuations de tension sont principalement dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants.

L'origine de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé *fliqué*. [YOU-2008]

- **Conséquences du phénomène**

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 10\%$, la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker). La gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse) dépend de l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation, [FAT-2006] [MAR-2000]

I.1.2.3. Surtensions temporaires ou transitoires

- **Origine du phénomène**

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension. Les surtensions sont de trois natures, [FAT-2006]:

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

Elles peuvent apparaître :

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

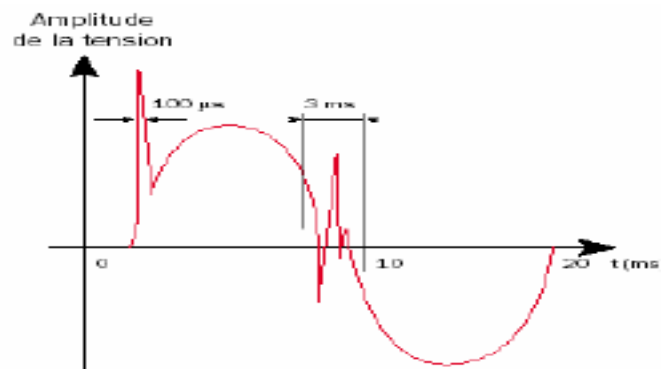


Figure (I.3): Exemple de cas de surtensions transitoires [CHA-1991]

- **Surtensions à fréquence industrielle :**

- Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz).Elles sont aussi causées par les défauts d'isolement ;
- Ferro résonance, Il s'agit d'un phénomène oscillatoire non linéaire rare, souvent dangereux pour le matériel, se produisant dans un circuit comportant un condensateur et une inductance saturable ;
- Rupture du conducteur de neutre ;
- Défauts du régulateur d'un alternateur ou d'un régleur en charge du transformateur ;
- Surcompensation de l'énergie réactive.

- **Surtensions de manoeuvre**

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

- Surtensions de commutation en charge normale ;
- Surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs ;
- Surtensions provoquées par la manoeuvre de circuits capacitifs (lignes ou câbles à vide, gradins de condensateurs). [FAT-2006]

- **Surtensions atmosphériques**

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

- **Conséquences du phénomène**

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

- Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques..) ;
- Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées) ;
- Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels) ;
- Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible ;
- Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par :

* La foudre essentiellement ;

* Les surtensions de manoeuvre qui est répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue, [FAT-2006] [MAR-2000]

I.2.2.4 Déséquilibre du système triphase de tension

- **Origine du phénomène**

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

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

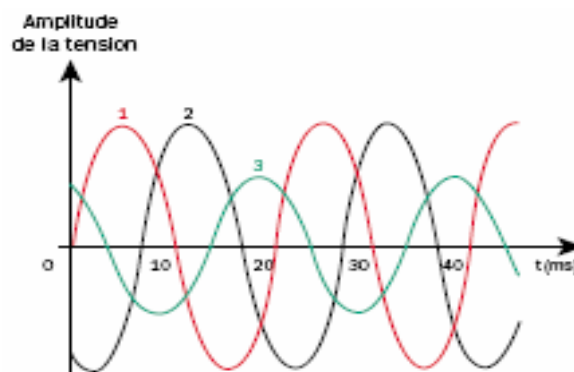


Figure (I.4): Représentation de la déséquilibre du système triphasé de tensions

- **Causes du phénomène**

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

- **Conséquence du phénomène**

Il est plus intéressant d'aborder le problème du déséquilibre du système tri phase de tension : par type d'équipement. Le déséquilibre dans une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectés, [FAT-2006] [MEY-1990] :

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

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

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

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

Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie. [ALA-2002]

I.2.2.5 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la

figure (I.4). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport [OU.A-2005] [YOU-2008], cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ comme illustre la figure (I.5). [FAT-2006]

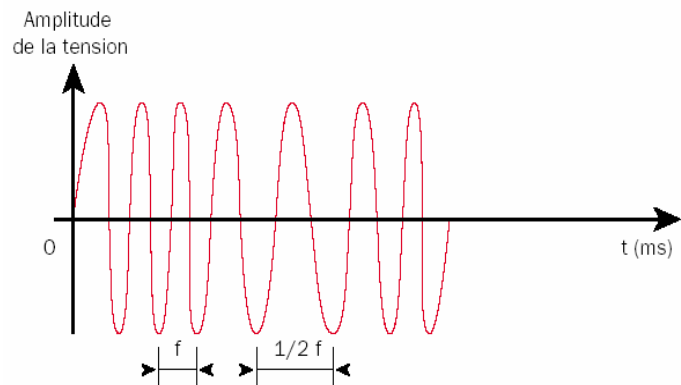


Figure. (I.5): Exemple de fluctuation de la fréquence

I.2.2.6 Harmoniques et inter harmoniques

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

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

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

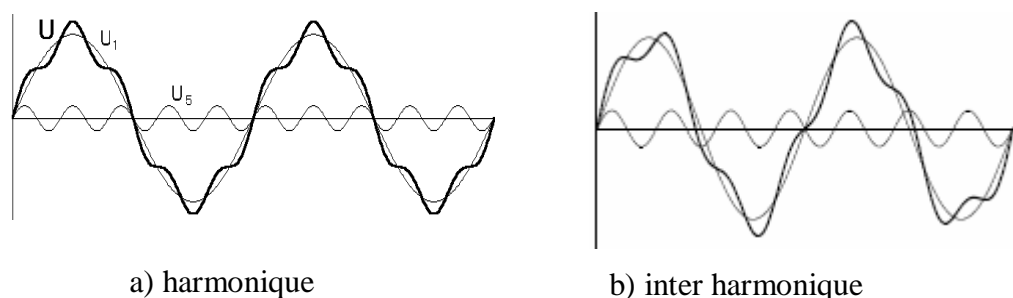


Figure (I.6): représentation de l'harmonique et l'inter

- **Origine des phénomènes**

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

- **Conséquences des phénomènes**

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

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

I.3.1 Origine des harmoniques

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques [FAT-2006]

I.3.2 Conséquences des harmoniques

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

Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l’appareillage du client et donner lieu à des surcoûts de production d’énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux type : les effets instantanés et les effets a terme [OU A-2005]

a) Conséquences instantanés

Les Conséquences instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

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

b) Conséquences à terme

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

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

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

I.3.3 caractérisation des perturbations harmoniques

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

- Le taux global de distorsion harmonique (THD) ;
- Le facteur de puissance $\cos(\varphi)$

I.3.3.1 le taux de distorsion harmonique (THD)

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

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

(I.1)

Avec :

V_0 : Valeur de la composante continue ;

h : est appel range harmonique ($h \geq 2$) ;

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

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

φ_h : Déphasage de la composante harmonique de range h

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

La valeur efficace du tension de charge :

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

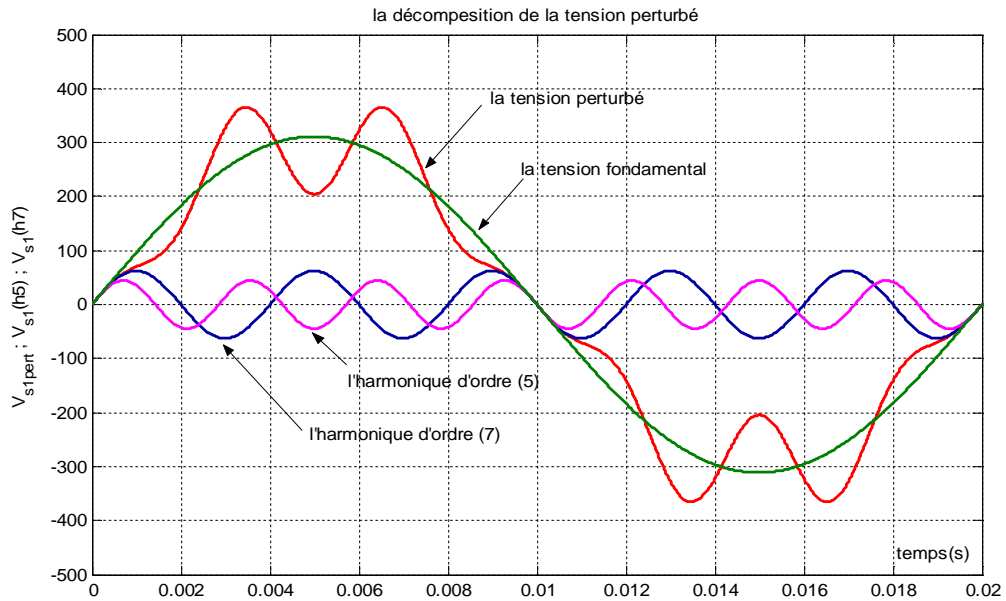


Figure (I.7) : Représentation de la déformation de la tension.

Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de tension déformée [OU.A-2005] [YOU-2008]

→ Le composant de rang (1) est le composant fondamental, sa valeur efficace est V_f

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

$$\text{THD}(\%_0) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_f}$$

(I.3)

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

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

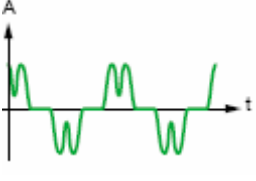
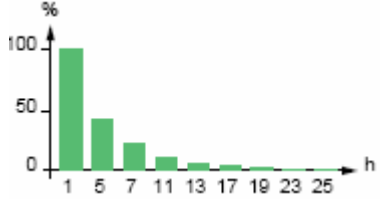
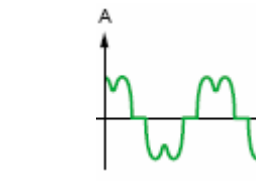
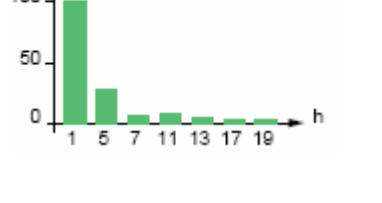

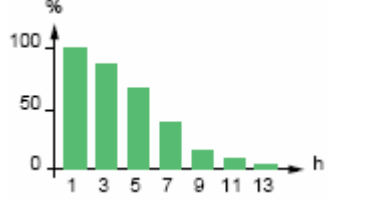
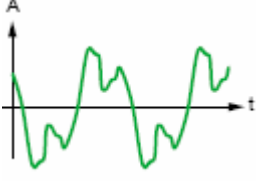

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	spectre	THD
Variateur de vitesse			44%
Redresseur/chargeur			28%
Charge informatique			115%
Eclairage fluorescent			53%

Tableau. (I.2) : Quelques générateurs d'harmoniques.

I.3.3.2 le facteur de puissance

En présence des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée puissance déformante (D), donnée par la relation (I.4) [OU.A-2005] apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure (I.8)

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

(I.4)

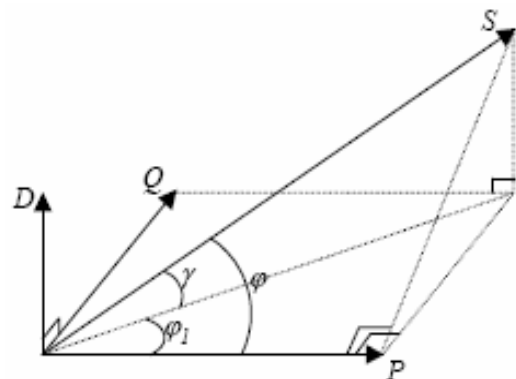


Figure (I.8) : Diagramme de Fresnel des puissances

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

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

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

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

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

5)

Le facteur de puissance sera toujours inférieurs a 1

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

I.6)

On aura :

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

)

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

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

Ou :

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

I.4 Solutions pour améliorer la qualité d'énergie électrique

Une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés dépendant avec les

conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques, ceci suppose que:

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

Ces solutions peuvent être mise en oeuvre pour :

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

I.4.1 Solutions traditionnelles de dépollution

I.4.1.1 Dépollution des courants perturbateurs

L'existence de perturbations dans un réseau électrique conduit à prendre impérativement des dispositifs afin d'atténuer ou d'éliminer leurs conséquences sur les équipements électriques et sur les réseaux électriques. Sur cette base on va décrire de manière sommaire les principaux dispositifs existants utilisés pour le traitement des perturbations:

I.4.1.1.1 Rééquilibrage des courants perturbateurs

- Répartition égale des charges sur les trois phases quand les charges monophasées et biphasées sont mal réparties à cause des courants déséquilibrés dans le réseau électrique basse tension.

Compensateur passif, ex : Montage de Steinmetz qui provoque un fort déséquilibre pour les fréquences différentes de 50Hz avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmonique [ALA-2002]

I.4.1.1.2 Compensation de la puissance réactive

La compensation d'énergie réactive consommée en générale par les charges non linéaires provoque des pertes, réduit la capacité de transport des lignes électriques et cause des chutes de tension par suite du caractère inductif du réseau d'où la nécessité de prévoir des moyens de compensation. Elle est utilisée pour relever le facteur de puissance.

La plus simple méthode de compensation consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau pour relever le facteur de puissance du réseau d'alimentation [2.13], à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance pour la compensation locale ou près d'un transformateur d'alimentation pour la compensation globale [CHA-1991]

Afin d'augmenter la performance dynamique et réaliser une compensation variable en fonction de la consommation d'énergie réactive de la charge, il est nécessaire d'utiliser des convertisseurs statiques de puissance réactive avancée [YOU-2008] [RIO-1993] [RIC-1997] [MAG-1996] [LEQ-1996] utilisés plus particulièrement pour injecter de la puissance réactive en un point du réseau, de façon à augmenter la puissance maximale transmissible et la stabilité du réseau; les machines synchrones triphasées sont également utilisées pour compenser la puissance réactive [B HA-2006]

Autant que le principale défaut de ce genre de compensation, est qu'elle fournit une puissance réactive fixe et ne peut pas s'adapter aux besoins des installations (variation de l'énergie réactive). Pour éviter ce problème, on utilise un stato-compensateur qui au moyen de grandeurs et de grosses inductances permet de consommer une partie de la puissance réactive qui s'adapte aux variations de celle-ci, mais ces dispositifs sont très encombrants et même générateurs d'harmoniques, on les trouve souvent sur les réseaux haute tension.

1.4.1.1.3 Compensation des courants harmoniques

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

Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, les filtres passifs; cette solution est la plus ancienne et la plus répandue aux problèmes d'harmoniques. Il s'agit d'utiliser un condensateur en série avec une inductance de façon à obtenir l'accord sur un harmonique de fréquence donné. Cet ensemble présente une impédance très faible pour sa fréquence d'accord et se comporte comme un court circuit pour l'harmonique considéré [HAS-2002]. Donc, le principe est de piéger les harmoniques, et de les empêcher de se propager dans le réseau et conserver le fondamental tel qu'il est [MAG-1996]

L'absorption des harmoniques peut être obtenue par la mise en place des filtres harmoniques, dont l'impédance est faible pour les harmoniques concernés et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau [ALI-1995]

Il est possible d'utiliser simultanément plusieurs ensembles accordés sur des fréquences différentes afin d'éliminer plusieurs rangs d'harmoniques. Les filtres passifs contribuent à la compensation d'énergie réactive [HAS-2002]

Parmi les filtres passifs, on peut citer:

1) Filtre passif parallèle

On place en parallèle avec le réseau d'alimentation une impédance très faible accordée à la fréquence d'harmonique à piéger [MAS-1985]

Filtre passif série

Le principe est le même que le précédent, mais au lieu de piéger les harmoniques, on les empêche de remonter à la source. Un exemple de filtre passif série est le circuit bouchon [MAS-1985]

2) Filtre passif amorti ou passe-haut

Le filtre passif amorti ou passe-haut (Figure I.6) compense les harmoniques supérieurs ou égales à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres résonants. Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques, et pour compenser la puissance réactive.

Leurs inconvénients sont les suivants:

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- Equipements volumineux [ALI-1995]
- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau [ALA-2002]; ce principe demande une étude soignée, car si le filtre se comporte bien comme un court circuit pour une fréquence désirée, il peut présenter des risques de résonance avec les autres inductances du réseau sur d'autres fréquences et ainsi fait augmenter des niveaux d'harmoniques non gênants avant sa mise en place [HAS-2002].

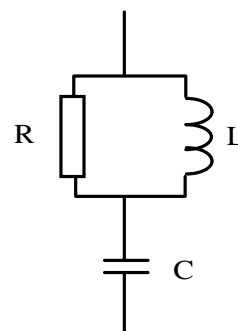


Figure (I.9) : Filtre passif amorti ou passe-haut

3) Filtre résonant

C'est un filtre très sélectif constitué d'un ensemble RLC en série voir la figure (I.10) et il est accordé sur une fréquence déterminée [CHA-1991]. Sa performance est caractérisée par la réduction de la tension harmonique entre ses bornes [BEA-2007]

.Cette solution consiste aussi à offrir au courant harmonique que l'on désire éliminer, un chemin moins résistant que la ligne. Elle exploite la résonance série des circuits formés par l'association d'éléments inductifs et capacitifs, ces circuits, pour chaque paire (L, C) une fréquence dite de résonance où l'impédance de circuit est très basse [ALI-1995]

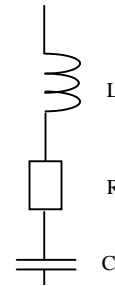


Figure (1.10) : Filtre passif résonnant

De même, leurs inconvénients se résument en :

Le filtrage passif se limite à l'atténuation d'harmoniques d'un rang bien déterminé; ce qui limite son effet, donc cette solution s'avère parfois inactive, à cause de la dérivation de la fréquence de résonance qui est due soit au changement de la structure du réseau ou bien au vieillissement des composants du filtre passif, pis encore cela peut engendrer l'effet inverse à savoir l'amplification des harmoniques, cela peut se traduire par une surintensité ou une surtension; son in adaptabilité nous contraint à concevoir un filtre spécifique pour chaque catégorie de charge selon les harmoniques qu'elles produisent [BET-1996]

I.4.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices

Pour dépolluer les réseaux électriques des tensions harmoniques et des tensions déséquilibrées, on peut limiter la circulation des tensions perturbatrices en utilisant les solutions traditionnelles présentées dans le cas des perturbations de courant.

Pour les creux de tension, la meilleure solution est d'utiliser des groupes électrogènes, mais la limitation de la puissance de ces groupes et la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie reste un problème [YOU-2008]

I.4.2 Solutions modernes de dépollution

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

Nous citerons quatre topologies possibles de filtres actifs :

- **Le filtre actif parallèle (FAP)** : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive,
- **Le filtre actif série (FAS)** : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension,
- **La combinaison parallèle série actifs** : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.
- **Combinaison hybride active et passive** : Ces structures sont conçues dans le but d'optimiser le rapport performance/coût.

I.4.2.1 Le filtre actif parallèle

Appelé aussi compensateur *shunt*, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution (figure(I.11)). Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques i_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau i_s soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure auto-adaptabilité, fiabilité et performance.

Le filtre actif parallèle empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibres de circuler à travers l'impédance du réseau. Il améliore ainsi les taux de distorsion en courant et en tension.

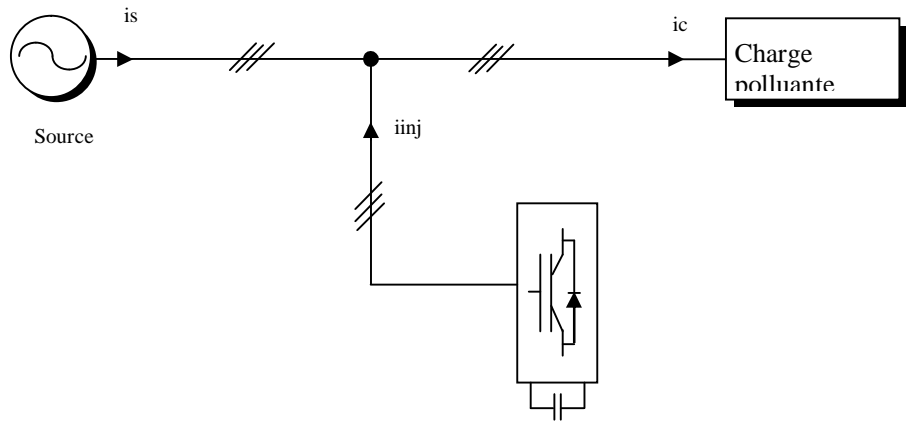


Figure (I.11) : Filtre actif parallèle

I.4.2.2 Le filtre actif série

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau (figure I.12). Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre : elle ne permet pas, par exemple, de compenser les courants harmoniques produites par la charge.

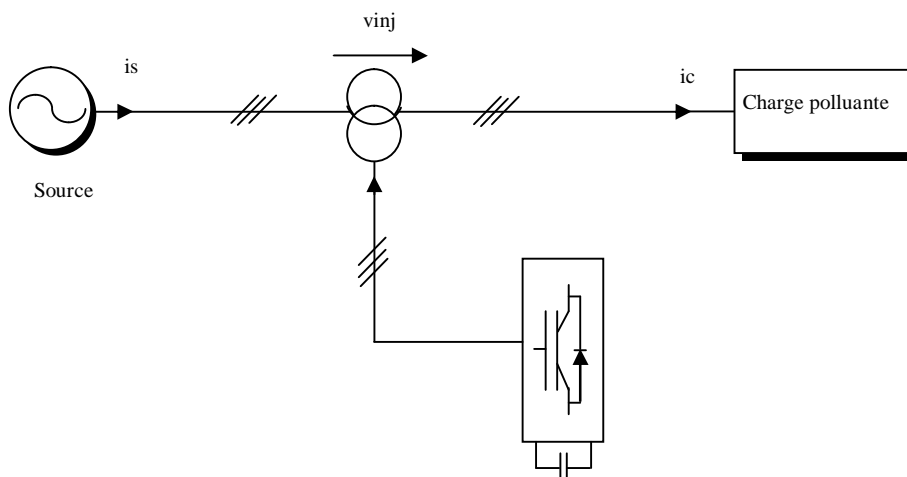


Figure (1.12): Filtre actif série

I.4.2.3 La combinaison parallèle série actifs

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série (figure I.13). Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actifs ou *Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*. L'UPQC possède les avantages des filtres actifs parallèle et série.

Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle comme montré sur la figure I.13, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée.

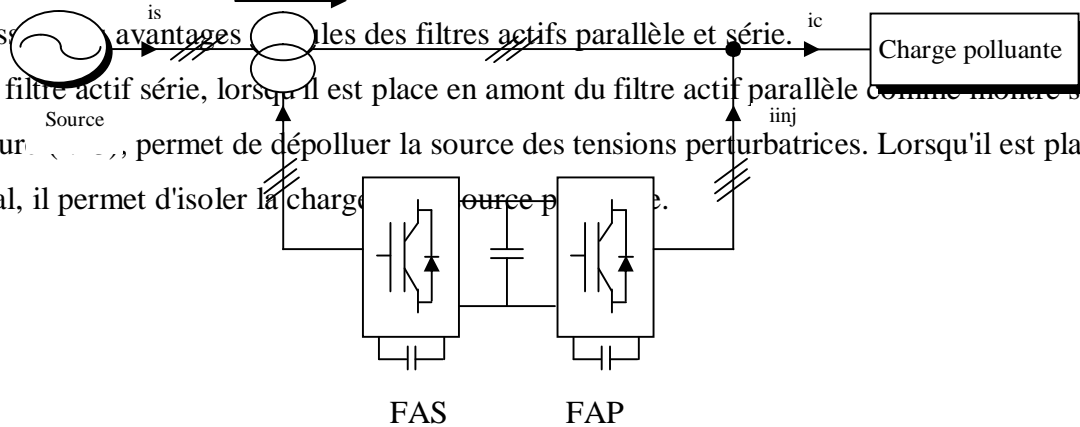


Figure (I.13) : Combinaison des filtres actifs série et

I.4.2.4 Combinaison hybride active et passive

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

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

- Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles,
- Filtre actif série connecte en série avec des filtres passifs parallèles,
- Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

I.4.2.4.1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Le schéma de principe de ce système de filtrage est donné par la figure (I.14), il est constitué de filtre passif accordé aux fréquences des harmoniques prédominantes et d'un filtre série. Plusieurs études ont confirmé que les performances des filtres actifs peuvent être amélioré par ce couplage [DAY-1997]

Cette configuration permet d'une part de minimiser la puissance du filtre actif car une grande partie des courants harmoniques est absorbée par les filtres passifs et d'autre part d'améliorer les performances des filtres passifs [LE R-1999]. Il réduit ainsi les risques d'anti-résonance entre les éléments du filtre passif et l'impédance du réseau.

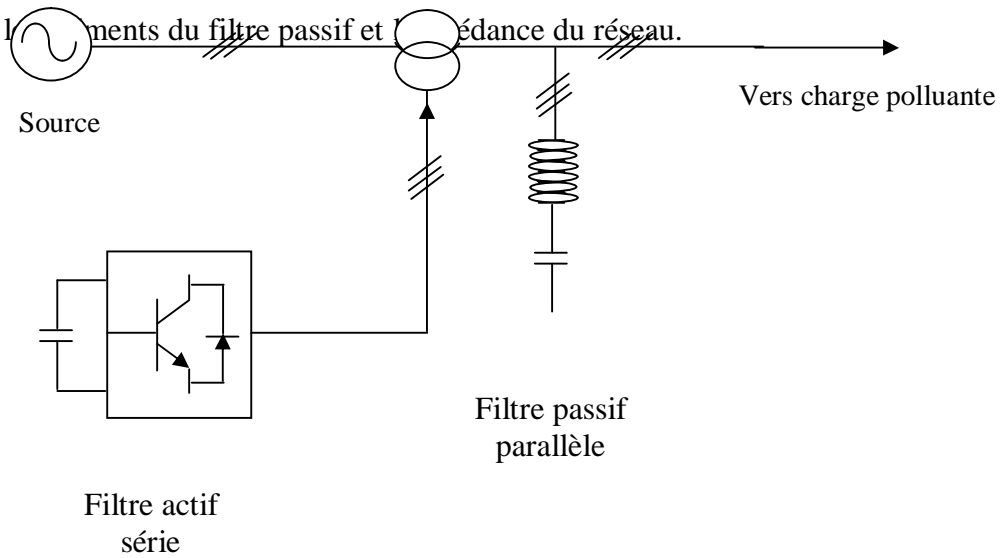


Figure (I.14): Filtre actif série assisté par filtre passif

I.4.2.4.2 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en Figure (I.15), est le même que le précédent avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série c'est à dire la puissance de ce filtre est plus faible que celle du filtre hybride car le courant qui le traverse est moins important [HIL-2002]. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [ALA-2002] [SAL-1995]

Dans cette configuration, le compensateur n'agit que sur les courants harmoniques, et améliore l'efficacité des filtres passifs: il évite l'amplification des tensions harmoniques amont aux fréquences d'anti résonance des filtres passifs, il atténue fortement les courants harmoniques entre charge et source par «abaissement» de l'impédance globale (filtres passifs plus compensateur actif). Puisque le compensateur actif n'est pas traversé par la totalité du courant réseau, son dimensionnement (et en particulier celui du coupleur magnétique) peut être réduit.

Cette structure est donc bien adaptée à traiter les réseaux de puissance et tension élevées, tout en assurant le ré phasage des composantes fondamentales. Son principal inconvénient est que les filtres passifs sont définis en fonction de la nature de chaque charge: une étude préalable est impérative. Enfin, la quasi-totalité des tensions harmoniques préexistantes (sur la source) sont présentes côté charge. Dans ce sens, cette configuration peut être assimilée au compensateur actif de type «shunt» [HAS-2002]

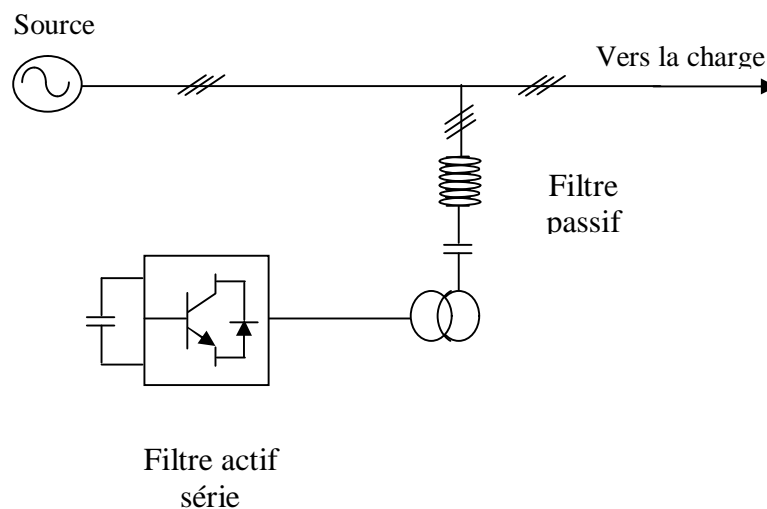


Figure (I.15) : Filtre actif série et passif parallèle connectés en série assisté

I.4.2.4.3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée dans la figure (I.16), est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle.

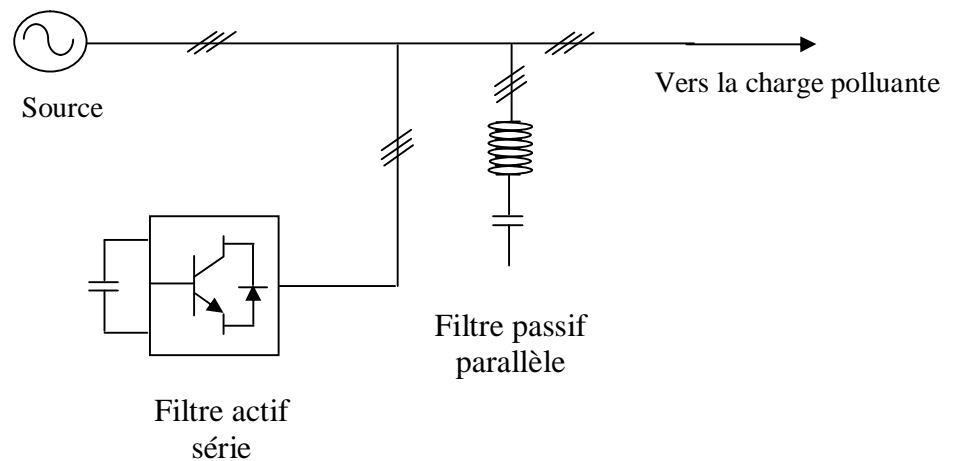


Figure (L.16) : Filtre actif parallèle assisté par filtre

Conclusion

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

Une de ces phénomènes perturbateurs est les perturbations harmoniques qui résultant de la présence des charges non linéaire tel que les convertisseurs statiques, Nous avons expliquées en détail les conséquences et les caractéristiques des harmoniques dans les réseaux électriques

Le traitement du problème a conduit à diverse solution classiques et moderne , les solutions classiques présentent de nombreuses contraintes pour répondre à un besoin actif de dépollution, elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Des nouvelles méthodes ont été mises au point: redresseur à MLI, compensateur actifs qui sont plus souple et performante (ex : compensateur actif série). C'est ainsi que dans l'objectif d'améliorer la qualité de l'énergie électrique qui doit être conforme aux nouvelles contraintes normatives,

Nous présentons, dans le chapitre suivant, comment déduire le problème des phénomènes des tensions perturbatrice tel que les harmoniques a l'aide d'un compensateur actif série.

Chapitre II:

Etude du compensateur actif série

Introduction

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

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

Dans le chapitre précédent, nous avons on a présenté les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques et les solutions de dépollution existantes.

Le présent chapitre sera consacré à la modélisation d'un réseau électrique perturbé, le principe de la compensation actif série, et ainsi la topologie générale d'un compensateur actif série. Puis on étudie la modélisation de la charge polluante proposé

II.1 Mis on œuvre

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

En 1976, une famille de filtres actifs séries avec onduleurs à transistors contrôlés en MLI a été présentée. Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985. La génération, par l'onduleur a thyristors, des composantes non désirées, ayant une faible fréquence de commutation, a découragé l'avancement pratique de cette solution [ALA-2002] [KOU-2006]

En 1990, un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension de réseau électrique. Depuis, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation du déséquilibre de la tension du réseau. D'autre articles ont introduit le problème des creux de tension set la solution de compensation par le compensateur actif série [KOU-2006].

II.2 Modélisation du réseau électrique perturbé

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

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

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

Avec

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

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

$$f = 50Hz$$

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

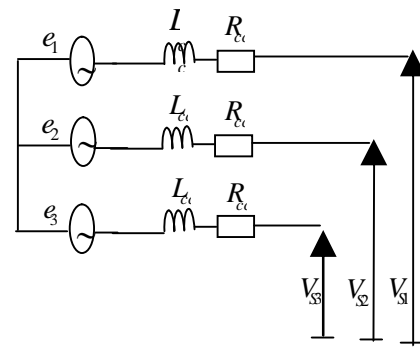
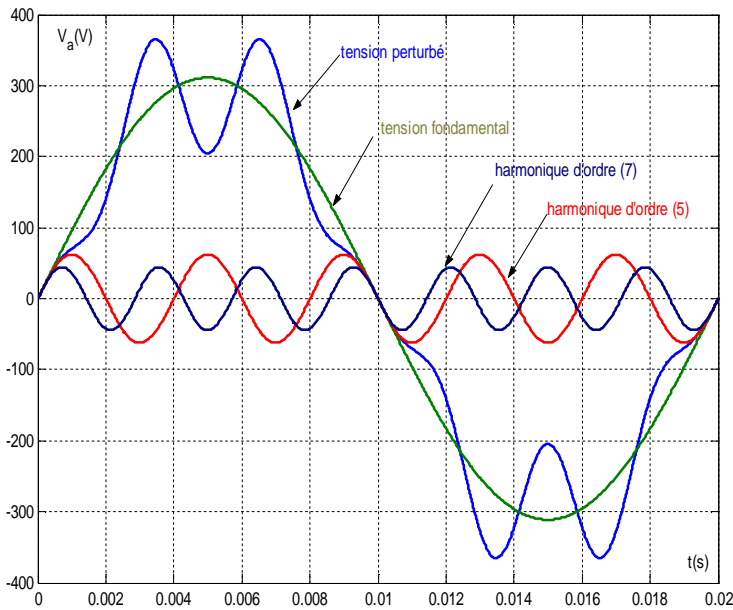


Figure (II.1): Schéma simplifier d'un réseau électrique

Figure (II.2): la déformation d'un tension de réseau électrique

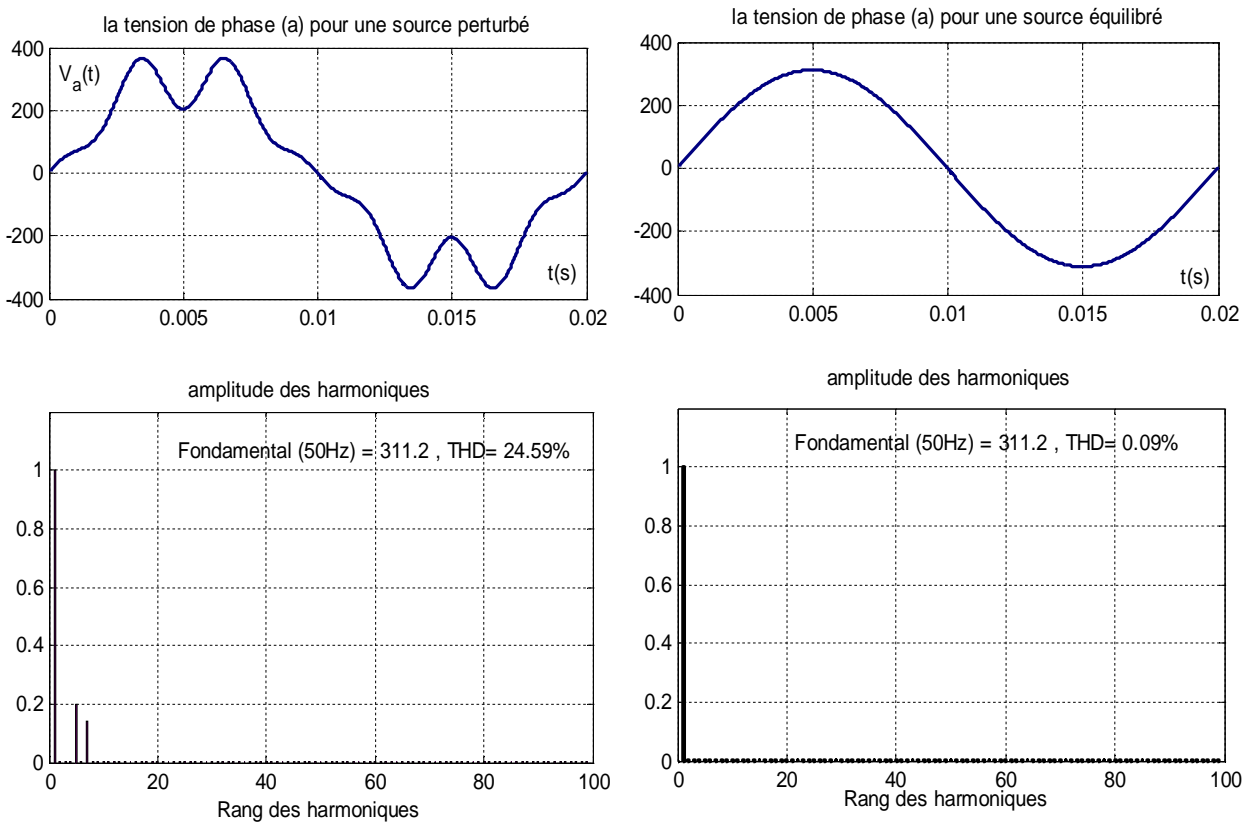


Figure (II.3): Comparisson entre une tension de phase (a) pour une source perturbé et une tension de phase (a) pour une source une tension équilibré

II.3 Principe de la compensation actif série

Le compensateur actif série est une solution pour protéger des charges sensible contre les perturbations de tension du réseau électrique. Il s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension. Il se comporte donc comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux de tension, déséquilibre, harmonique) venant de la source.

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

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

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

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

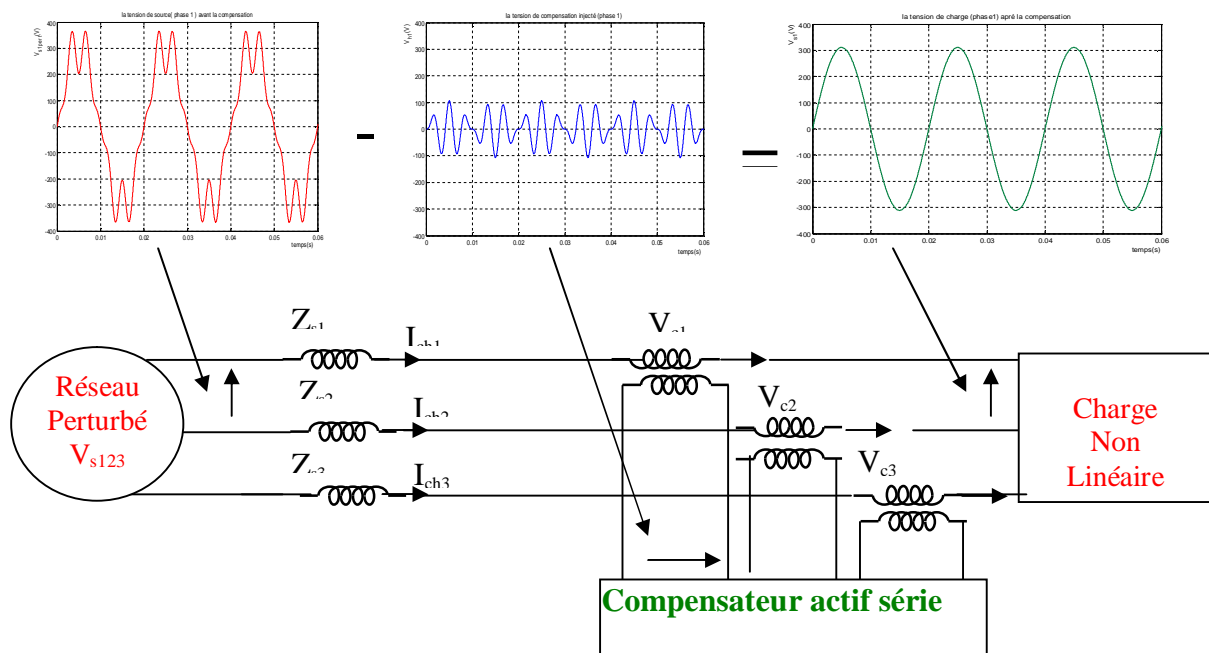


Figure (II.4) : Principe du filtrage actif

II.4 Topologie générale d'un compensateur actif série

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

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

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

- ❖ La partie commande, sert au contrôle de la commutation des éléments semi conducteurs formant l'onduleur de la partie puissance. Au moyen de stratégies de contrôle appropriées [BEA-2007]

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

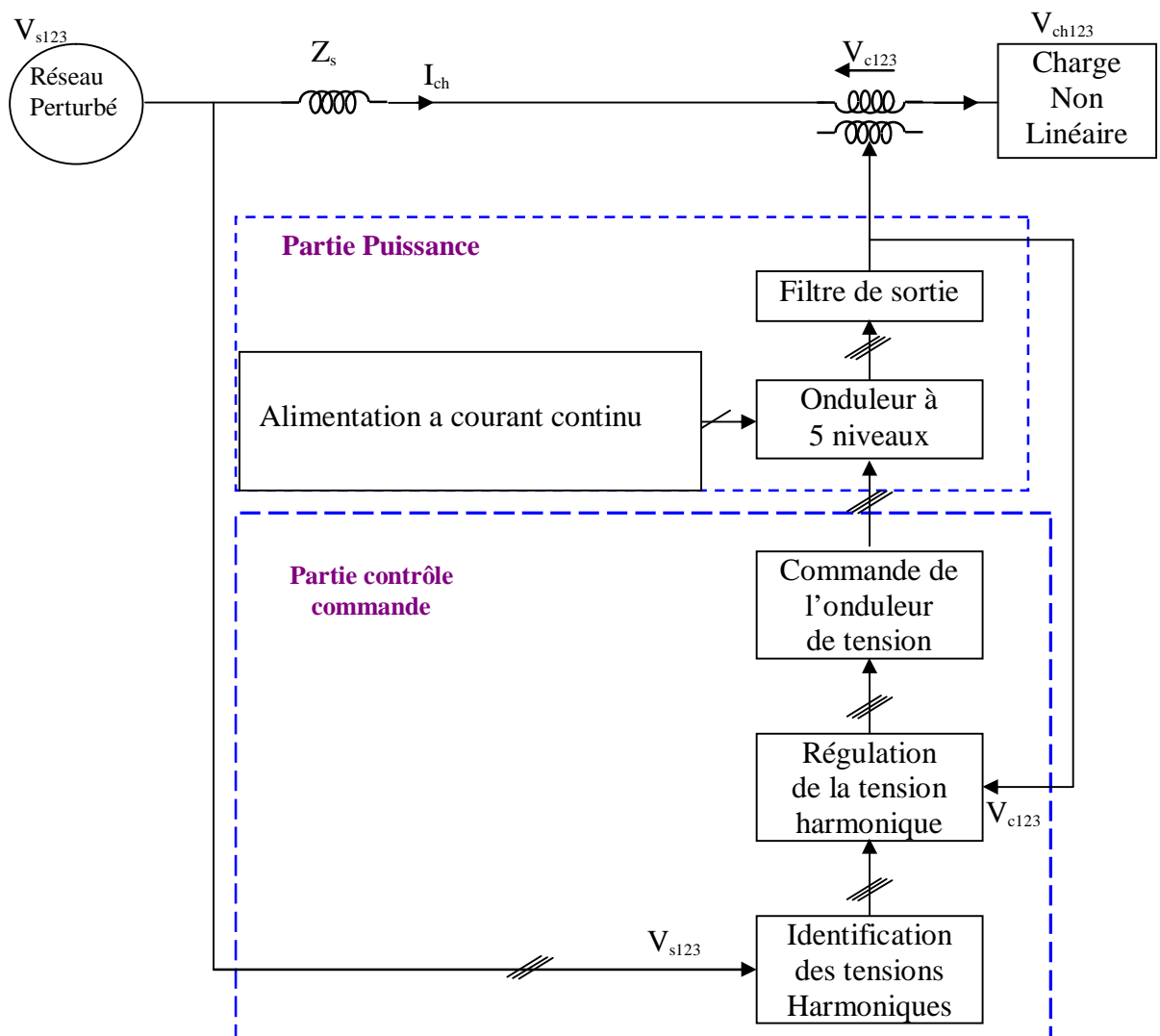


Figure (II.5) : Structure générale d'un filtre actif

II.4.1 Etude de la partie puissance

II.4.1.1 onduleur de tension

L'onduleur triphasé à structure tension en utilise dans notre travail un onduleur de tension à cinq niveaux, Le stockage d'énergie du coté continu est réalisé par un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} , le filtre de sortie est un filtre passif du premier ordre (L_f, C_f) par lequel l'onduleur de tension est connecté au réseau électrique.

II.4.1.2 Système de stockage d'énergie

Le stockage d'énergie du coté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle de source de tension continue V_{dc} .

Le choix des paramètres du système se répercute à la fois sur la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif série. Le cas d'une tension V_{dc} élevée, nous permet d'avoir une amélioration de la dynamique du filtre actif.

II.4.1.3 Filtre passif de sortie

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

- **Filtre du premier ordre**

Ce type de filtre est le plus utilisé dans la littérature. Il est composé d'une inductance L_f de résistance interne R_f comme le montre la figure (II.4). Un filtre de ce type ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie. En effet, seule une valeur relativement faible de L_f peut réaliser une bonne dynamique du compensateur actif. Le bon dimensionnement du filtre de sortie du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité compensateur actif série

II.4.2. Etude de la partie contrôle commande

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

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

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

Les trois méthodes les plus couramment utilisées dans les applications de compensation active sont :

La première méthode consiste à extraire la tension fondamentale du réseau à l'aide d'un filtre passe bande. Sachant que les fréquences des harmoniques ne sont pas assez éloignées de celle du fondamental, il est donc nécessaire d'employer un filtre très sélectif. Mais ce sera difficile d'obtenir une atténuation importante du signal fondamental sans que les harmoniques ne soient affectés ni en module, et surtout, ni en argument.

Une autre méthode est basée sur l'analyse spectrale de la tension perturbée. Lorsque le réseau perturbé crée des tensions non stationnaires, la Transformée de Fourier Glissante peut être utilisée. Cette méthode permet de calculer les amplitudes et les phases de tous les harmoniques, mais le temps de calcul, pour un processus numérique en temps réel, peut être trop important.

La troisième méthode utilise les notions des puissances réelle et imaginaire instantanées afin de séparer le fondamental dans le domaine fréquentiel. L'élimination de la composante fondamentale sera à ce moment là facile à mettre en œuvre. Cette méthode qui réalise dans la plupart des compensateurs actifs actuellement en service dans le monde. C'est cette méthode que nous allons utiliser tout au long de ce mémoire [MEK-2001] [OU A-2006] [OU A-2005]. La stratégie de commande d'un compensateur actif série se passe sur la détection des tensions perturbatrices dans le domaine temporel, deux possibilités d'identification des tensions perturbatrices

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

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

La première méthode est la plus appropriée au compensateur actif série installé par le consommateur pour compenser les tensions perturbatrices résultant par des phénomènes perturbateurs tels que les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension, c'est pourquoi cette méthode sera employée dans notre travail

II.4.2.1 Principe de la méthode d'identification des tensions perturbatrices

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation (II.2)

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

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

Pour définir les puissances instantanées active et réactive $q(t)$ et $p(t)$ on note

Respectivement

(v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}) : Les tensions simples du source perturbé ;

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

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

$$[v_{s\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$[i_{c\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

A partir des vecteurs $[v_{s\alpha\beta}]$ et $[i_{c\alpha\beta}]$ décrivant le système des tensions et le système des tension dans le repère $(\alpha\beta)$, on applique le concept des puissances instantanées défini par AKAGI [YOU-2008] [MEK-2001] [AKA-1983] [AKA-1986] [OU A-2005], valable aussi bien en régimes transitoires que dans le cas des régimes permanents. Cette théorie introduit

une décomposition de puissances instantanées dans le plan($\alpha\beta$). Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement p et q , sont définies par la relation suivante [OU A-2005]:

$$\begin{aligned}
 p &= v_s \cdot i_c \\
 q &= v_s \times i_c \\
 p &= v_{s1} \cdot i_{c1} + v_{s2} \cdot i_{c2} + v_{s3} \cdot i_{c3} \\
 q &= -\frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{s1} - v_{s2})i_{c3} + (v_{s2} - v_{s3})i_{c1} + (v_{s3} - v_{s1})i_{c2}]
 \end{aligned}$$

Ou bien

$$\begin{aligned}
 p &= v_{s\alpha} \cdot i_{c\alpha} + v_{s\beta} \cdot i_{c\beta} \\
 q &= v_{s\alpha} \cdot i_{c\beta} - v_{s\beta} \cdot i_{c\alpha}
 \end{aligned}$$

Ou par la relation matricielle suivante

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{c\alpha} & i_{c\beta} \\ i_{c\beta} & -i_{c\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{c\alpha} \\ v_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Les quantités $v_{s\alpha} \cdot i_{c\beta}$ et $v_{s\beta} \cdot i_{c\alpha}$ ne représentent pas des puissances instantanées conventionnelles dans le sens où elles sont le résultat du produit d'une tension définie sur un axe par un courant défini sur l'axe en quadrature. Par conséquent q n'est pas homogène à une grandeur électrique conventionnelle. C'est la raison pour laquelle ce nouveau concept est appelé « Puissance imaginaire instantanée » avec une nouvelle unité IVA (Imaginaire-Volt-Amper).

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

$$\begin{aligned}
 p &= \bar{p} + \tilde{p}(t) \\
 q &= \bar{q} + \tilde{q}(t)
 \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

Où :

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

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

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

La compensation d'harmoniques par le compensateur actif série se fait par la génération de ces dernières :

$$\begin{aligned} p_{ref} &= \tilde{p} \\ q_{ref} &= \tilde{q} \end{aligned} \quad (II.7)$$

De la relation (III.12) donnant les puissances réelle et imaginaire instantanées découle l'expression suivante pour les courants.

$$\begin{bmatrix} v_{c\alpha} \\ v_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

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

En considération les équations II.6 et II.7, on sépare les tensions de charge dans le repère $(\alpha\beta)$ en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} v_{c\alpha} \\ v_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

tension active *tension réactive* *tension harmonique*

Cette expression montre donc que l'identification des

différentes composantes du tension dans le repère $(\alpha\beta)$ revient à séparer les termes continus et les termes alternatifs des puissances réelle et imaginaire instantanées.

II.4.2.2 Séparation des puissances

En conséquence, l'élimination de la composante fondamentale dans l'équation (II.9) s'effectue à l'aide de deux filtres passe-haut de Butter Worth (figure II.6) d'ordre deux [OU.A-2005] [KOU-2006]



Figure (II.6): Schéma de principe du filtre utilisé pour l'extraction des composantes harmoniques

II.4.2.3 Identification des tension de référencées

Après le filtrage de la puissance instantanée active et réactive, la transformation inverse permet le calcul des références de tension. La relation II. 8 indique le calculs à effectuer afin d'obtenir les références dans le repère $(\alpha\beta)$.

$$\begin{bmatrix} v_{ref\alpha} \\ v_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{ref} \\ q_{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

La relation (II. 9) permet l'obtention de l'expression des signaux de référence utilisés pour la régulation des tensions dans le repère triphasé.

$$\begin{bmatrix} v_{href1} \\ v_{href2} \\ v_{href3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ref\alpha} \\ v_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

p_{ref}, q_{ref} : Les puissances active et réactive de référence, dépendent d'une part de la nature des tensions à compenser (éliminer les tensions harmoniques revient à compenser les composantes alternatives) et d'une autre part, le mode de régulation du tension.

Le schéma de la figure (II.7) illustre les différentes étapes permettant l'extraction des tensions de référence à partir des tensions V_{s123} et courants de charge i_{c123}

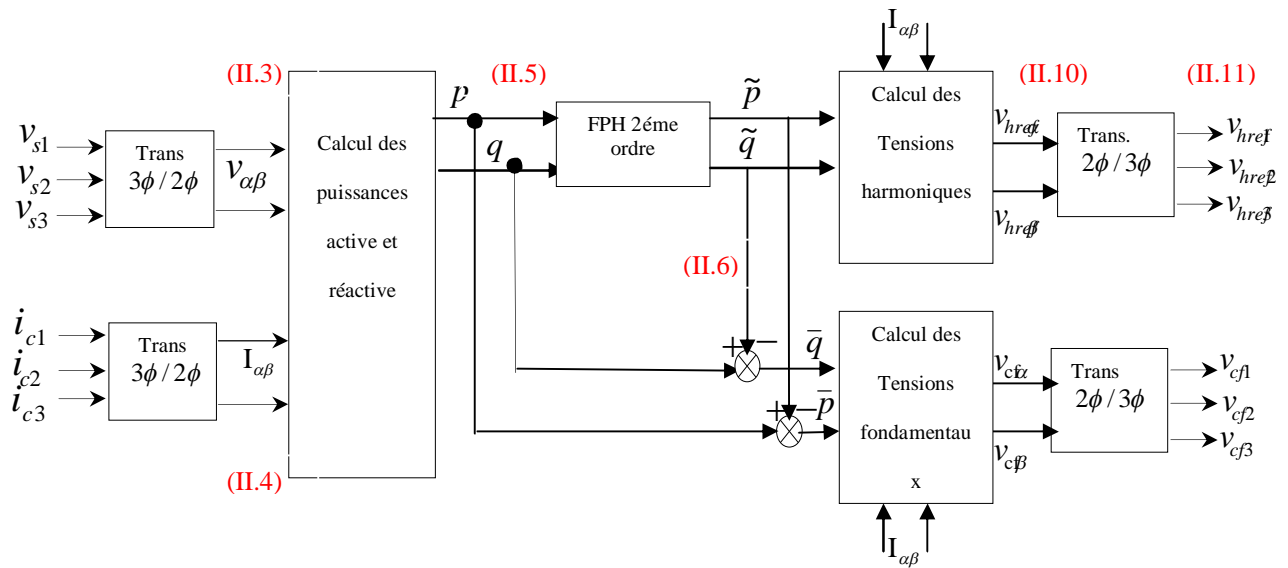


Figure (II.7) : Méthode pq d'extraction des tensions de référence

II.5 Modélisation de la charge polluante

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

Modélisation du redresseur a thyristor

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

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

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

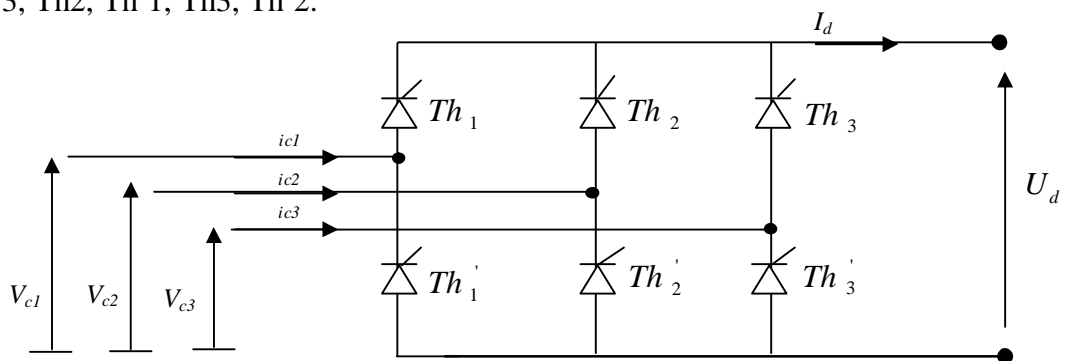


Figure (II.8): Schéma d'un redresseur triphasé à thyristors

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

$$\begin{aligned} i_{ci} &= X_i \cdot I_d \\ U_d &= \sum X_i \cdot V_i \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

X_i : Les fonctions de conversion des semi-conducteurs.

$$x_1 = \begin{cases} 1 & \alpha + \frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \alpha + 5 \cdot \frac{\pi}{6} \\ -1 & \alpha + 7 \cdot \frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \alpha + 11 \cdot \frac{\pi}{6} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

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

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$V_{redmoy} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{max} \quad (\text{II.14})$$

Modélisation du filtre

Entre le pont redresseur et l'onduleur de tension, on insère un filtre LC passe-bas comme le montre la figure (II.9).

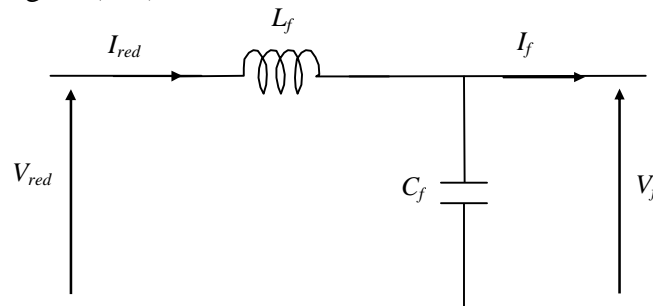


Figure (II.9) : Schéma du filtre LC.

Le rôle de la capacité C est d'assurer le caractère de source de tension à l'entrée de l'onduleur, de fournir l'énergie réactive à la machine et d'absorber le courant négatif restitué par la charge. Le rôle de l'inductance L est de lisser le courant I_{red} à travers la source de tension. De plus, le filtre est utilisé pour éviter la pollution du réseau à travers les harmoniques créés par l'onduleur de tension.

Ce filtre est modélisé par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{red} = L_f \frac{dI_{red}}{dt} + V_f \\ \frac{dV_f}{dt} = \frac{1}{C_f} (I_{red} - I_f) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par la relation suivante :

$$F(s) = \frac{V_f(s)}{V_{red}(s)} = \frac{1}{L_f C_f s^2 + 1} \quad (\text{II.16})$$

C'est une fonction du deuxième ordre dont la fréquence de coupure est :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (\text{II.17})$$

Le choix des valeurs, de l'inductance et de la capacité, peut être obtenu en posant la condition simple qui consiste à éliminer les harmoniques les plus gênants. On devra choisir $f_c = m \cdot f$; où m est l'indice de modulation de l'onduleur et f la fréquence du réseau.

On déduit que :

$$L_f C_f = 0.46 \cdot 10^{-6}$$

Pour un choix de

$$L_f = 40 \text{ mH},$$

On a

$$C_f = 16 \mu\text{F}.$$

Résultats de simulation avant la compensation

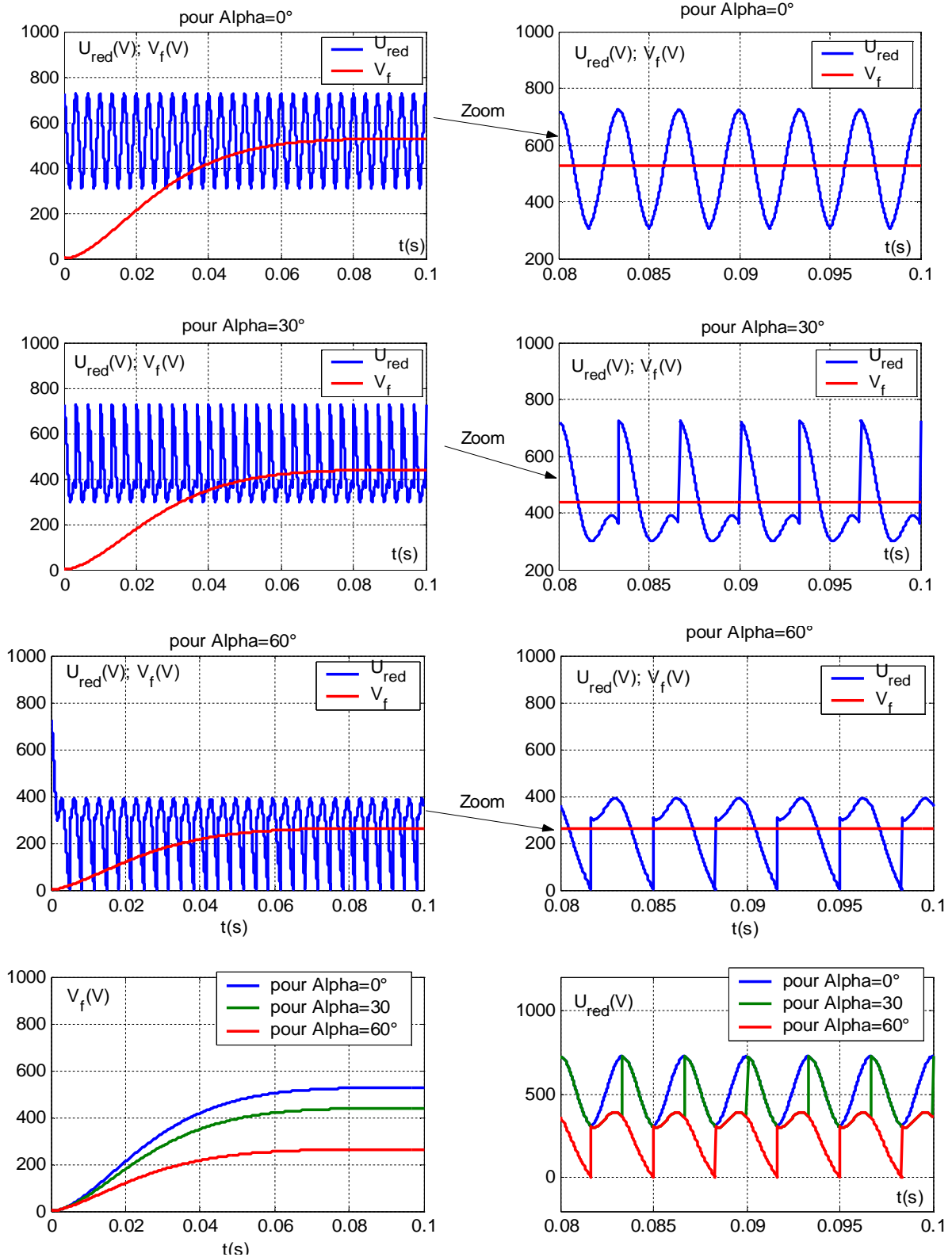


Figure (II.10): La tension de sortie de redresseur a thyristor et la tension de sortie du filtre passif avant la compensation

Résultats de simulation pour une source de tension non perturbé

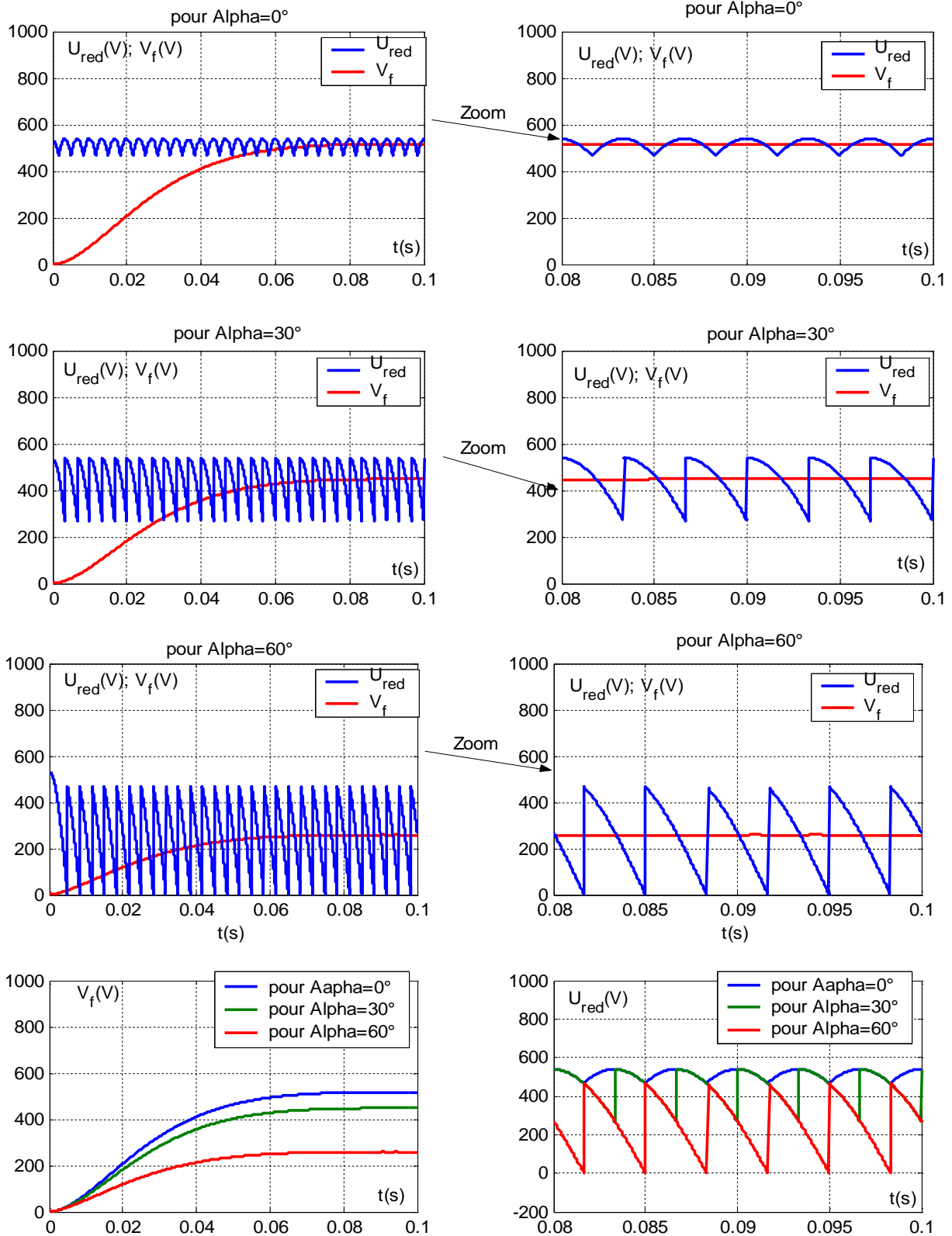


Figure (II.11): La tension de sortie de redresseur a thyristor et la tension de sortie du filtre passif pour une source de tension non perturbé

Interprétation

On remarque que a l'instant $t = T_n + T_n/6$; ($T = 0.02s$), la tension de sortie du redresseur a thyristor augmente Avec 34.31% pour $\alpha = 0^\circ$; avec 34.28% ; pour $\alpha = 30^\circ$ Avec 42.6% pour $\alpha = 60^\circ$. Ce qui peut entraîner du dégât immédiat au redresseur

La figure suivant montre une compassion pour $\alpha = \{0^\circ, 30^\circ, 60^\circ\}$

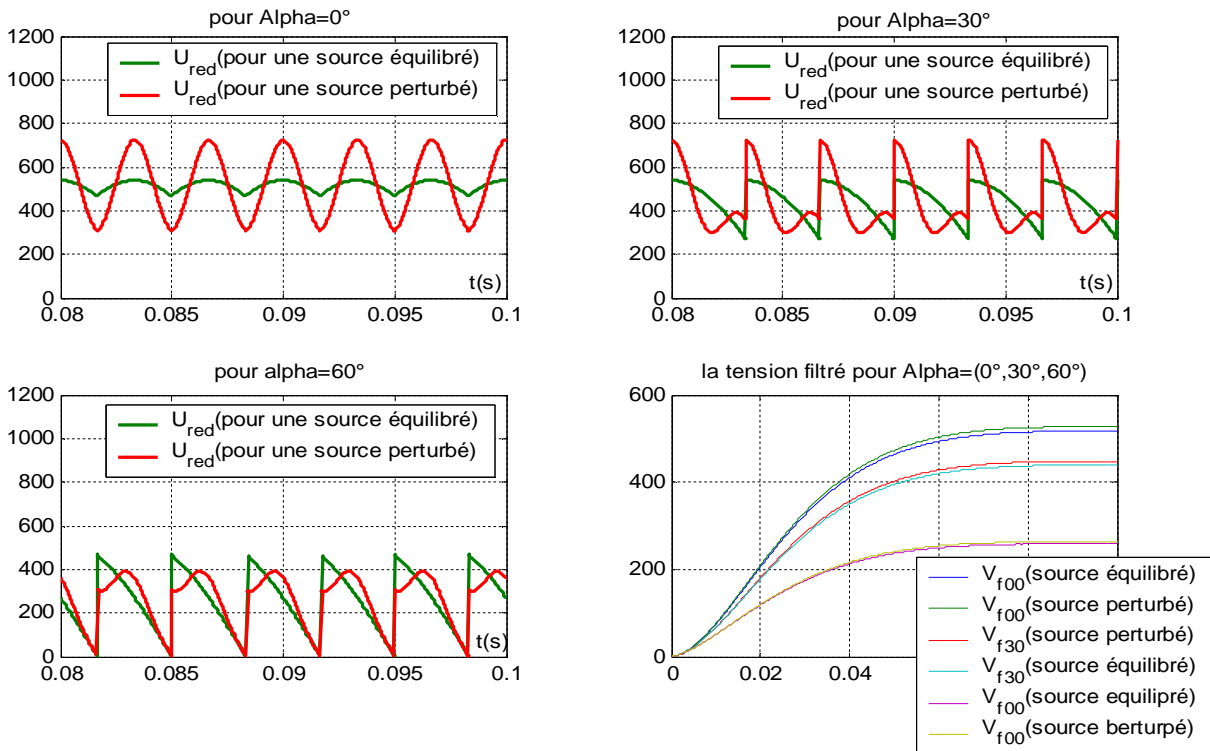


Figure (II.12) : l'influence d'un source perturbe a la tension de sortie d'un redresseur a thyristor e La tension de sortie de redresseur a thyristor avant la

Dans la table (II.1) on montre a une comparaison entre la tension de sortie du filtre passif alimenté par une source de tension perturbé et la tension de sortie du filtre passif alimenté par une source de tension équilibré, on remarque que le filtre passif démunie les harmoniques a la sortie du redresseur a thyristor ce qui implique qu'il n'y aucune risque aux charges et récepteurs mais ce ci n'est plus qu'une simulation, on réalité les harmoniques de tension sont capable de endommagé le redresseur avant que les harmoniques de tension se applique au filtre passif, du fait que les thyristor ne support plus des tensions élevé.

	$(V_f(pert))$ la tension de sortie du filtre passif alimenté par une source de tension perturbé	$(V_f(éq))$ la tension de sortie du filtre passif alimenté par une source de tension équilibré	(ΔV_f) Rapport de diminution de la tension filtré
Alpha=0°	524.7V	517 V	1.35%
Alpha=30°	436.9V	447.84 V	2.44%
Alpha=60°	262.4 V	258.55V	1.49%

Tableau (II.1) : Table de comparaison entre la tension de sortie du filtre passif alimenté par une source de tension perturbé et la tension de sortie du filtre passif alimenté par une source de tension équilibré

Avec
$$\Delta V_f = \frac{V_f(pert) - V_f(éq)}{V_f(éq)}$$

Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié la modélisation du réseau électrique perturbé à cause des tensions harmoniques, le principe, la topologie générale d'un compensateur actif série, On a aussi présenté la méthode d'identification des tensions perturbatrices et on a montré la modélisation de la charge polluante proposé

Les résultats de simulation dans l'environnement Matlab /Simulink qui permettent l'analyse du problème de perturbation des tensions en vue de comparaison entre :

- 🚦 La tension de sortie du redresseur a thyristor avant la compensation (pour une source perturbée) et pour une source de tension non perturbée (équilibrée)
- 🚦 La tension de sortie du filtre passif avant la compensation (pour une source perturbée) et pour une source de tension non perturbée (équilibrée)

Dans le chapitre qui suit on montre l'élément essentiel dans le compensateur actif série c'est l'onduleur de tension avec un niveau supérieur (cinq niveaux) pour augmenter les performances du compensation actif série

Chapitre III :

Modélisation de l'onduleur à cinq niveaux et stratégie de commande

Introduction

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

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

Dans ce chapitre, on étudiera l'onduleur de tension triphasé à cinq niveaux et les stratégies de commandes adaptées à ce dernier.

En premier lieu, on présentera la modélisation du fonctionnement de l'onduleur triphasé à cinq niveaux, puis on développera son modèle de connaissance et celui de commande.

En deuxième lieu, on s'intéressera aux stratégies de commande des onduleurs triphasés à cinq niveaux permettant d'élaborer les signaux de commande de ces onduleurs afin de générer une source de tension la plus sinusoïdale possible. Pour cela, on étudiera dans ce chapitre les stratégies de commande suivantes :

- commande triangulo-sinusoidale a quatre porteuses triangulaires_ Algorithme 1 ;
- commande triangulo-sinusoidale a quatre porteuses triangulaires_ Algorithme 2 ;
- Modulation vectorielle _ Algorithme 1 ;
- Modulation vectorielle _ Algorithme 2

III.1 Modélisation de l'onduleur triphasé à cinq niveaux

III.1.1 Structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux

L'onduleur triphasé à cinq niveaux étudié est constitué de trois (3) bras et quatre (4) sources de tension continue ($+2U_c, +U_c, 0, -U_c, -2U_c$).

Chaque bras comporte huit (8) interrupteurs, six (6) en série et les deux autres en parallèle, plus deux (2) diodes.

Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche. La figure (II.1) donne une représentation schématique de cet onduleur [YOU-2008] [BOU-2001]

La structure choisie dans cette étude est celle de l'onduleur de tension triphasé à cinq niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping), représentée par la figure (III.2).

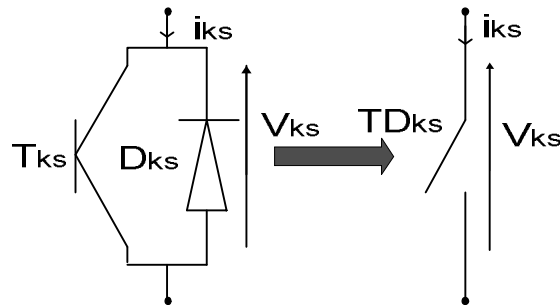


Figure (III.1): Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire transistor - diode

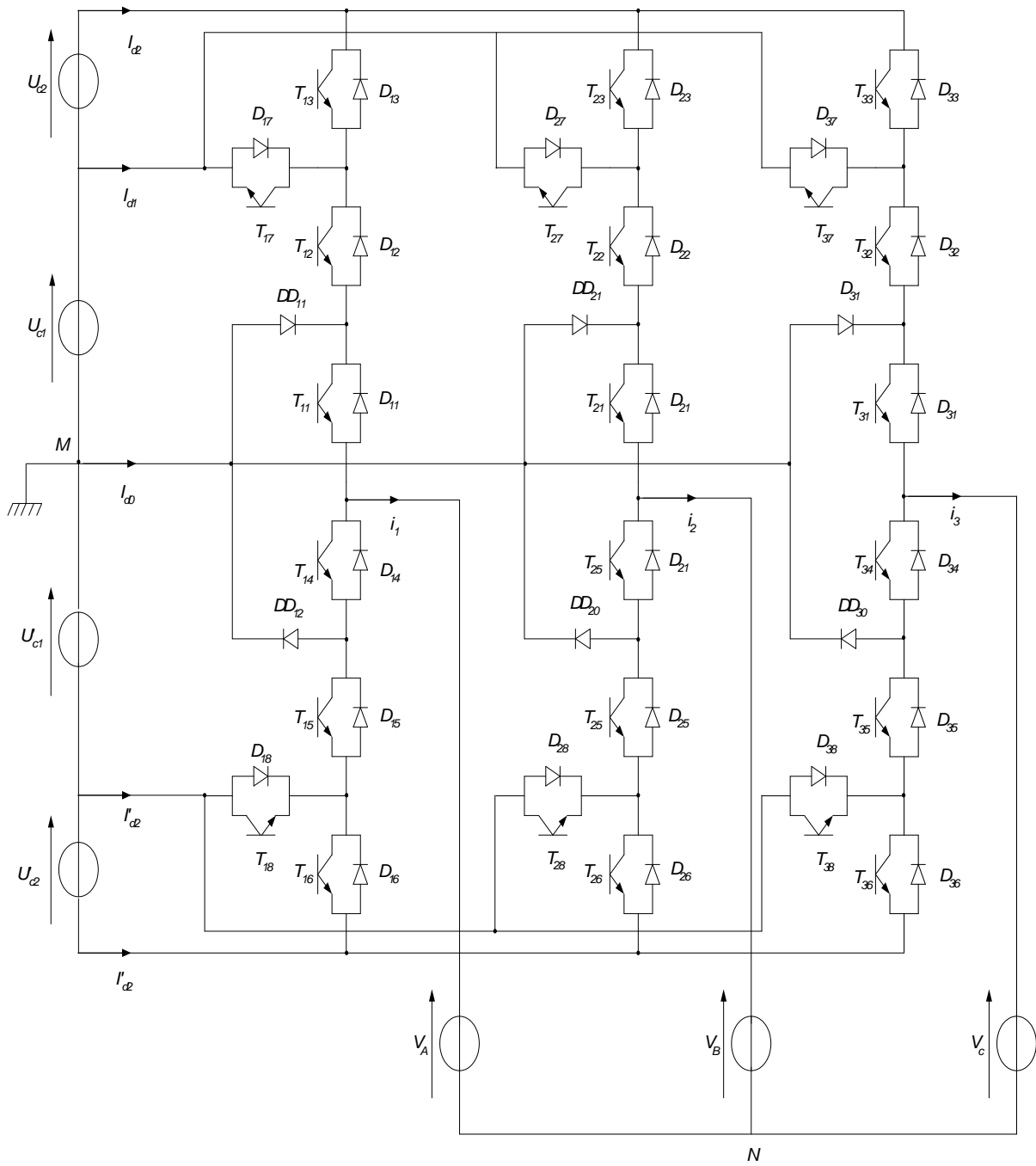


Figure (III.2): Structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC

III.1.2 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à cinq niveaux

Pour simplifier la modélisation, on modélisera d'abord un bras de l'onduleur triphasé sans a priori sur la commande et on déduira le modèle de la structure globale, figure (III.3).

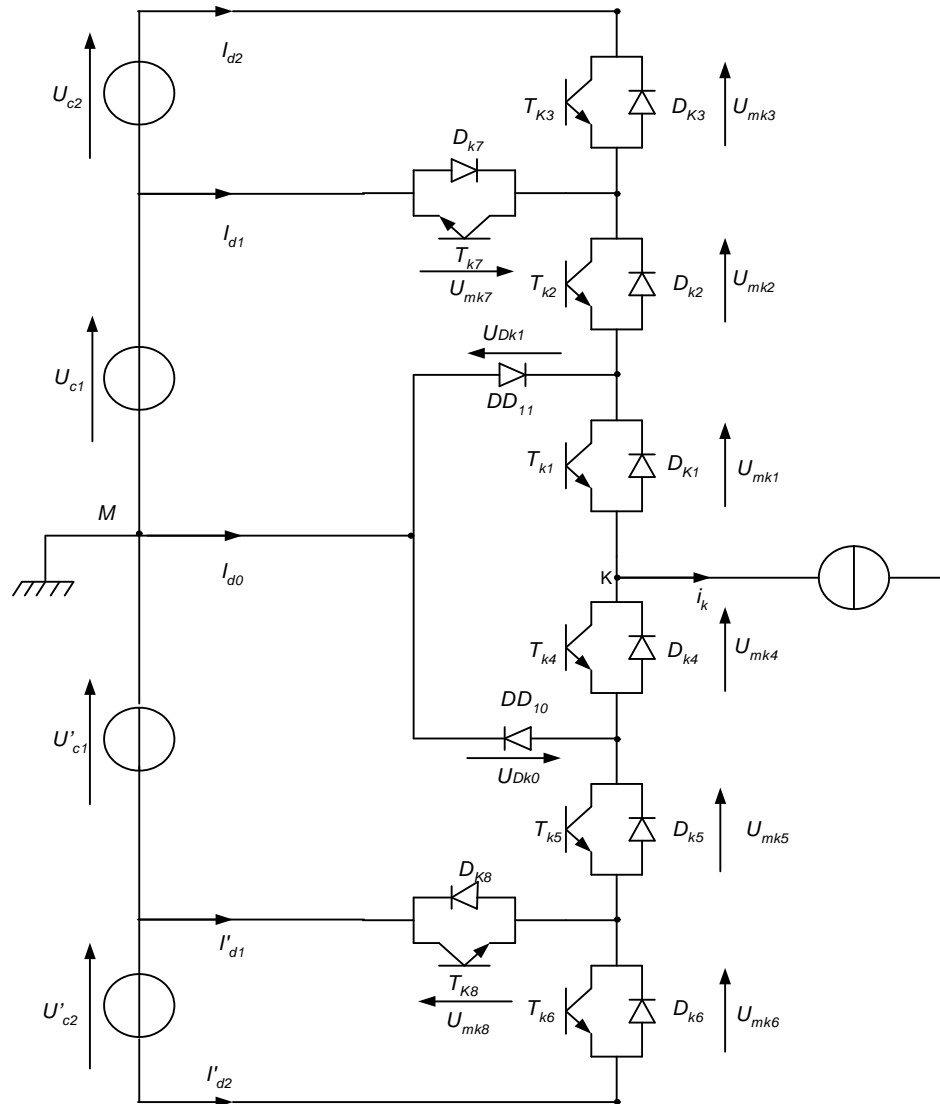
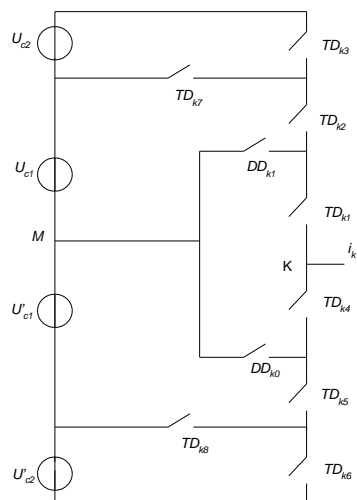


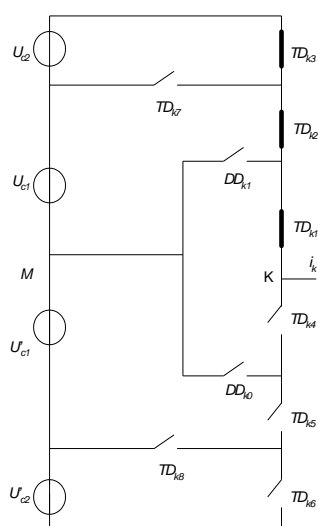
Figure (III.3) : Structure d'un bras d'onduleur à cinq niveaux



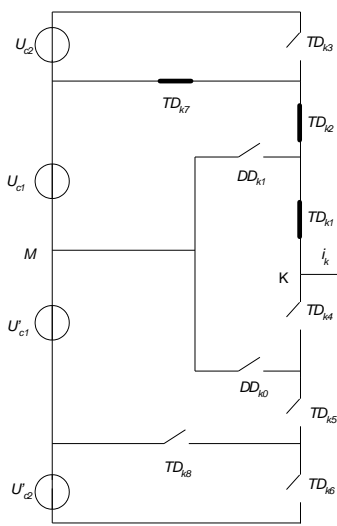
La configuration E0

configuration	Grandeurs électriques
E_0	$I_k=0$
E_1	$V_{km}=U_{c1}+U_{c2}=2U_c$
E_2	$V_{km}=U_{c1}=U_c$
E_3	$V_{km}=0$
E_4	$V_{km}=-U'_{c1}=-U_c$
E_5	$V_{km}=-U'_{c1}-U'_{c2}=-2U_c$
E_6	$V_{km}=0$

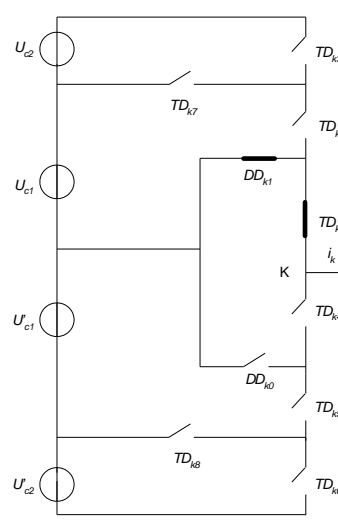
Tableau (III.1) Grandeurs électriques pour Chacune des configurations d'un bras k



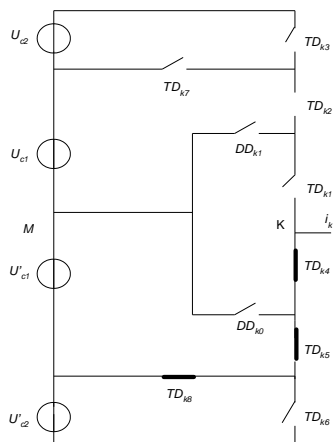
La configuration E1



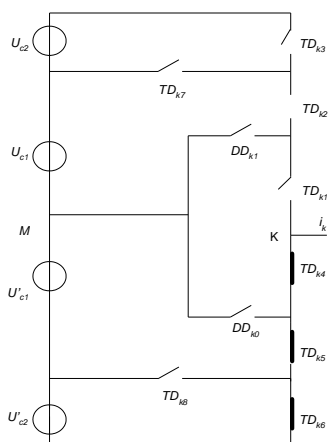
La configuration E2



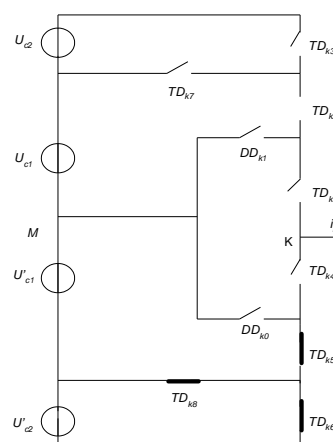
La configuration E3



La configuration E4



La configuration E5



La configuration E6

Figure (III.4) : Différentes configurations pour un bras l'onduleur à cinq

III.1.3 Réseau de Pétri d'un bras d'onduleur à cinq niveaux

La transition entre les différentes configurations donne le réseau de Pétri (figure III.5). La variable R_{mn} intervenant dans le réseau de Pétri représente la réceptivité de la transition de la configuration E_m à la configuration E_n . Les différentes variables sont explicitées ci – dessous [YOU-2008] [BOU-2001]:

$$R01=[(U_{mk1} >0 \& B_{k1}) \& (U_{mk2} >0 \& B_{k2}) \& (U_{mk3} >0 \& B_{k3})] \text{ ou } [(U_{mk1} <0) \& (U_{mk2} <0) \& (U_{mk3} <0)]$$

$$R02=[(U_{mk1} >0 \& B_{k1}) \& (U_{mk2} >0 \& B_{k2}) \& \bar{B}_{k3}] \text{ ou } [(U_{mk1} <0) \& (U_{mk2} <0) \& B_{k7}]$$

$$R03=[(U_{mk1} >0 \& B_{k1}) \& \bar{B}_{k2} \& (U_{Dk1} >0)]$$

$$R04=[(U_{mk4} >0 \& B_{k4}) \& (U_{mk5} >0 \& B_{k5}) \& \bar{B}_{k6}] \text{ ou } [(U_{mk4} <0) \& (U_{mk5} <0) \& B_{k8}]$$

$$R05=[(U_{mk4} >0 \& B_{k4}) \& (U_{mk5} >0 \& B_{k5}) \& (U_{mk6} >0 \& B_{k6})] \text{ ou } [(U_{mk4} <0) \& (U_{mk5} <0) \& (U_{mk6} <0)]$$

$$R06=[(U_{mk4} >0 \& B_{k4}) \& \bar{B}_{k5} \& (U_{Dk0} >0)]$$

$$R10=(i_k=0)$$

$$R12=[(i_k >0) \& B_{k1} \& B_{k2} \& \bar{B}_{k3}] \text{ ou } [(i_k <0) \& B_{k7}]$$

$$R13=[(i_k >0) \& B_{k1} \& \bar{B}_{k2}]$$

$$R14=[(i_k >0) \& \bar{B}_{k1} \& B_{k8}] \text{ ou } [(i_k <0) \& B_{k4} \& B_{k5}]$$

$$R15=[(i_k >0) \& \bar{B}_{k1}] \text{ ou } [(i_k <0) \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6}]$$

$$R16=[(i_k <0) \& \bar{B}_{k1} \& B_{k4}]$$

$$R20=(i_k=0)$$

$$R21=[(i_k >0) \& B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3}] \text{ ou } [(i_k <0) \& B_{k7}]$$

$$R23=[(i_k >0) \& B_{k1} \& \bar{B}_{k2}]$$

$$R24=[(i_k >0) \& \bar{B}_{k1} \& B_{k8}] \text{ ou } [(i_k <0) \& B_{k4} \& B_{k5}]$$

$$R25=[(i_k >0) \& \bar{B}_{k1} \& \bar{B}_{k8}] \text{ ou } [(i_k <0) \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6}]$$

$$R26=[(i_k <0) \& \bar{B}_{k1} \& B_{k4}]$$

$$R30=(i_k=0)$$

$$R31=[(i_k >0) \& B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3}]$$

$$R32=[(i_k >0) \& B_{k1} \& B_{k2}]$$

$$R34=[(i_k > 0) \& \bar{B}_{k1} \& B_{k8}]$$

$$R35=[(i_k > 0) \& \bar{B}_{k1} \& \bar{B}_{k8}]$$

R36= impossible.

$$R40=(i_k=0)$$

$$R41=[(i_k > 0) \& \bar{B}_{k8} \& B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3}] \text{ ou } [(i_k < 0) \& \bar{B}_{k4} \& \bar{B}_{k7}]$$

$$R42=[(i_k > 0) \& \bar{B}_{k8} \& B_{k1} \& B_{k2} \& \bar{B}_{k3}] \text{ ou } [(i_k < 0) \& \bar{B}_{k4} \& B_{k7}]$$

$$R43=[(i_k > 0) \& \bar{B}_{k8} \& B_{k1} \& \bar{B}_{k2}]$$

$$R45=[(i_k > 0) \& \bar{B}_{k8}] \text{ ou } [(i_k < 0) \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6}]$$

$$R46=[(i_k < 0) \& \bar{B}_{k5}]$$

$$R50=(i_k=0)$$

$$R51=[(i_k > 0) \& B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3}] \text{ ou } [(i_k < 0) \& \bar{B}_{k4}]$$

$$R52=[(i_k > 0) \& B_{k1} \& B_{k2} \& \bar{B}_{k3}] \text{ ou } [(i_k < 0) \& \bar{B}_{k4} \& B_{k7}]$$

$$R53=[(i_k > 0) \& B_{k1} \& \bar{B}_{k4}]$$

$$R54=[(i_k > 0) \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k8}] \text{ ou } [(i_k < 0) \& \bar{B}_{k6}]$$

$$R56=[(i_k < 0) \& \bar{B}_{k5}]$$

$$R60=(i_k=0)$$

$$R61=[(i_k < 0) \& \bar{B}_{k4}]$$

$$R62=[(i_k < 0) \& \bar{B}_{k4} \& B_{k7}]$$

R63= impossible.

$$R64=[(i_k < 0) \& B_{k4} \& B_{k5} \& \bar{B}_{k6}]$$

$$R65=[(i_k < 0) \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6}]$$

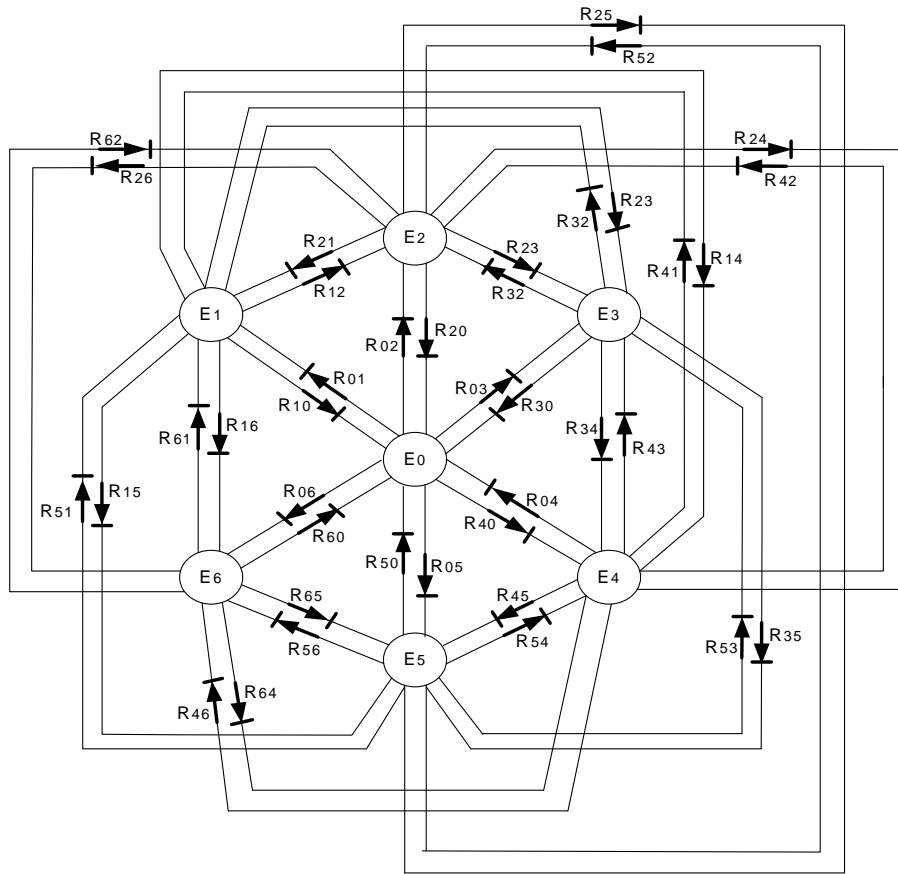


Figure III.5: Réseau de pétri d'un bras d'onduleur à cinq niveaux

III.2 Modèle de commande de l'onduleur à cinq niveaux

III.2.1 Commande complémentaire

Pour éviter des courts-circuits des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte une commande complémentaire.

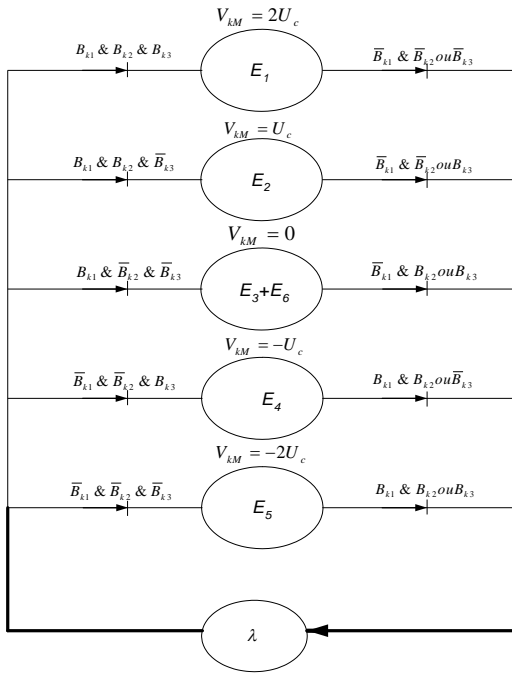
Pour un bras k de l'onduleur triphasé à cinq niveaux, figure (III.3), plusieurs complémentaires sont possible, la commande optimale est définie comme suit :

$$\begin{cases} B_{k4} = \overline{B_{k2}} \\ B_{k5} = \overline{B_{k1}} \\ B_{k6} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Pour un bras k , les fonctions de connexions des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit:

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \cdot F_{k3} \\ F_{k0}^b = F_{k4} \cdot F_{k5} \cdot F_{k6} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Avec la commande complémentaire et mode commandable, le réseau de Pétri du fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux se simplifie de sept à cinq configurations. Le réseau de Pétri obtenu dans ces conditions est représenté à la figure (III.6).



V_{KM}	B_{K1}	B_{K2}	B_{K3}
$2U_C$	1	1	1
U_C	1	1	0
0	1	0	0
$-U_C$	0	0	1
$-2U_C$	0	0	0

Tableau (III.2) : Table d'excitation des interrupteurs de l'onduleur triphasé à cinq

Figure (III.6) : Réseau de pétri réduit d'un bras d'onduleur à cinq niveaux

III.2.2 Modèle de connaissance de l'onduleur triphasé à cinq niveaux

Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à cinq niveaux par rapport au point milieu M sont donnés par le système suivant:

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}F_{12}(1-F_{13})U_{C1} + F_{11}F_{12}F_{13}(U_{C1} + U_{C2}) - F_{14}F_{15}(1-F_{16})U'_{C1} - F_{14}F_{15}F_{16}(U'_{C1} + U'_{C2}) \\ V_{BM} = F_{21}F_{22}(1-F_{23})U_{C1} + F_{21}F_{22}F_{23}(U_{C1} + U_{C2}) - F_{24}F_{25}(1-F_{26})U'_{C1} - F_{24}F_{25}F_{26}(U'_{C1} + U'_{C2}) \\ V_{CM} = F_{31}F_{32}(1-F_{33})U_{C1} + F_{31}F_{32}F_{33}(U_{C1} + U_{C2}) - F_{34}F_{35}(1-F_{36})U'_{C1} - F_{34}F_{35}F_{36}(U'_{C1} + U'_{C2}) \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Pour l'onduleur triphasé à cinq niveaux, les fonctions de connexion des demi-bras sont définies selon les relations suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{11}^b = F_{11} F_{12} F_{13} \\ F_{10}^b = F_{14} F_{15} F_{16} \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} F_{21}^b = F_{21} F_{22} F_{23} \\ F_{20}^b = F_{24} F_{25} F_{26} \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} F_{31}^b = F_{31} F_{32} F_{33} \\ F_{30}^b = F_{34} F_{35} F_{36} \end{array} \right. \quad (III.4)$$

Les fonctions de connexion des interrupteurs placée en parallèle sont définies comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{17} = F_{11} F_{12} (1 - F_{13}) \\ F_{18} = F_{14} F_{15} (1 - F_{16}) \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} F_{27} = F_{21} F_{22} (1 - F_{23}) \\ F_{28} = F_{24} F_{25} (1 - F_{26}) \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} F_{37} = F_{31} F_{32} (1 - F_{33}) \\ F_{38} = F_{34} F_{35} (1 - F_{36}) \end{array} \right. \quad (III.5)$$

En introduisant ces fonctions dans le système (II.3), on aboutit au système suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{AM} = F_{17} U_{C1} + F_{11}^b (U_{C1} + U_{C2}) - F_{18} U'_{C1} - F_{10}^b (U'_{C1} + U'_{C2}) \\ V_{BM} = F_{27} U_{C1} + F_{21}^b (U_{C1} + U_{C2}) - F_{28} U'_{C1} - F_{20}^b (U'_{C1} + U'_{C2}) \\ V_{CM} = F_{37} U_{C1} + F_{31}^b (U_{C1} + U_{C2}) - F_{38} U'_{C1} - F_{30}^b (U'_{C1} + U'_{C2}) \end{array} \right. \quad (III.6)$$

Sous forme matricielle (II.6) s'écrit:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{17} + F_{11}^b \\ F_{27} + F_{21}^b \\ F_{37} + F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C2} - \begin{bmatrix} F_{18} + F_{10}^b \\ F_{28} + F_{20}^b \\ F_{38} + F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{C2} \quad (III.7)$$

Dans le cas où $U_{C1}=U_{C2}=U'_{C1}=U'_{C2}=U_C$, la relation (II.7) s'écrit comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \quad (III.8)$$

Les équations de mailles du système source – onduleur - charge donnent:

$$V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} = V_A + V_B + V_C + 3V_{NM} \quad (III.9)$$

Puisque la charge triphasée est couplée en étoile avec neutre isolé :

$$V_{NM} = \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) \quad (III.10)$$

Les tensions simples aux bornes aux de la charge sont :

$$\begin{cases} V_A = V_{AM} - V_{NM} = \frac{1}{3}(2V_{AM} - V_{BM} - V_{CM}) \\ V_B = V_{BM} - V_{NM} = \frac{1}{3}(-V_{AM} + 2V_{BM} - V_{CM}) \\ V_C = V_{CM} - V_{NM} = \frac{1}{3}(-V_{AM} - V_{BM} + 2V_{CM}) \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

A partir des relations (II.7) et (II.11), on obtient le système matriciel ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{17} + F_{11}^b \\ F_{27} + F_{21}^b \\ F_{37} + F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C2} - \begin{bmatrix} F_{18} + F_{10}^b \\ F_{28} + F_{20}^b \\ F_{38} + F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{C2} \right\} \quad (\text{III.12})$$

Dans le cas $U_{C1} = U_{C2} = U'_{C1} = U'_{C2} = U_C$, cette relation se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \quad (\text{III.13})$$

Ainsi les courants d'entrée de l'onduleur, s'expriment en fonction des courants de la charge i_1, i_2, i_3 en utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{17}i_1 + F_{27}i_2 + F_{37}i_3 \\ i_{d2} = F_{11}F_{12}F_{13}i_1 + F_{21}F_{22}F_{23}i_2 + F_{31}F_{32}F_{33}i_3 \\ i'_{d1} = F_{18}i_1 + F_{28}i_2 + F_{38}i_3 \\ i'_{d2} = F_{14}F_{15}F_{16}i_1 + F_{24}F_{25}F_{26}i_2 + F_{34}F_{35}F_{36}i_3 \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

En remplaçant les fonctions de connexion des interrupteurs par les fonctions de connexion des demi-bras, le système (III.14) devient :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{17}i_1 + F_{27}i_2 + F_{37}i_3 \\ i_{d2} = F_{11}^b i_1 + F_{21}^b i_2 + F_{31}^b i_3 \\ i'_{d1} = F_{18}i_1 + F_{28}i_2 + F_{38}i_3 \\ i'_{d2} = F_{10}^b i_1 + F_{20}^b i_2 + F_{30}^b i_3 \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Le courant i_{d0} d'exprime en fonction des courants d'entrée et courants de charge par la relation :

$$i_{d0} + i_{d1} + i_{d2} + i'_{d1} + i'_{d2} = i_1 + i_2 + i_3 \quad (\text{III.16})$$

a. Relations de conversion simples :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i'_{d1} \\ i'_{d2} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [N(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

b. Relation de conversion composée :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i'_{d1} \\ i'_{d2} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [M(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

On appellera $[N(t)]$ et $[M(t)]$ données par (III.19) et (III.20) respectivement la matrice réduite de conversion simple et composée de l'onduleur triphasé à cinq niveaux.

Matrice de conversion simple

$$N(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}[\mathcal{A}F_{17} + F_{11}^b] - (F_{27} + F_{21}^b) - (F_{37} + F_{31}^b) & -\frac{1}{3}(42F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b) & -\frac{1}{3}[\mathcal{A}F_{18} + F_{10}^b] - (F_{28} + F_{20}^b) - (F_{38} + F_{30}^b) & -\frac{1}{3}(42F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3}[-(F_{17} + F_{11}^b) + \mathcal{A}F_{27} + F_{21}^b] - (F_{37} + F_{31}^b) & -\frac{1}{3}(-F_{11}^b + 2F_{21}^b - F_{31}^b) & -\frac{1}{3}[-(F_{18} + F_{10}^b) + \mathcal{A}F_{28} + F_{20}^b] - (F_{38} + F_{30}^b) & -\frac{1}{3}(-F_{10}^b + 2F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3}[-(F_{17} + F_{11}^b) - (F_{27} + F_{21}^b) + \mathcal{A}F_{37} + F_{31}^b] & -\frac{1}{3}(-F_{11}^b - F_{21}^b + 2F_{31}^b) & -\frac{1}{3}[-(F_{18} + F_{10}^b) - (F_{28} + F_{20}^b) + \mathcal{A}F_{38} + F_{30}^b] & -\frac{1}{3}(-F_{10}^b - F_{20}^b + 2F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{17} & F_{27} & F_{37} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{18} & F_{28} & F_{38} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - (F_{17} + F_{18} + F_{11}^b + F_{10}^b) & 1 - (F_{27} + F_{28} + F_{21}^b + F_{20}^b) & 1 - (F_{37} + F_{38} + F_{31}^b + F_{30}^b) \end{bmatrix}$$

(III.19)

Matrice de conversion composée

$$M_g(t) = \begin{bmatrix} [(F_{17} + F_{11}^b) - (F_{27} + F_{21}^b)] & (F_{11}^b - F_{21}^b) & [(F_{28} + F_{20}^b) - (F_{18} + F_{10}^b)] & (F_{20}^b - F_{10}^b) & 0 & 0 & 0 \\ [(F_{27} + F_{21}^b) - (F_{37} + F_{31}^b)] & (F_{21}^b - F_{31}^b) & [(F_{38} + F_{30}^b) - (F_{28} + F_{20}^b)] & (F_{30}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ [(F_{37} + F_{31}^b) - (F_{17} + F_{11}^b)] & (F_{31}^b - F_{11}^b) & [(F_{18} + F_{10}^b) - (F_{38} + F_{30}^b)] & (F_{10}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{17} & F_{27} & F_{37} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{18} & F_{28} & F_{38} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - (F_{17} + F_{18} + F_{11}^b + F_{10}^b) & 1 - (F_{27} + F_{28} + F_{21}^b + F_{20}^b) & 1 - (F_{37} + F_{38} + F_{31}^b + F_{30}^b) \end{bmatrix}$$

(III.20)

• **Schéma de connaissance globale de l'onduleur triphasé à cinq niveaux**

Dans cette partie, on montre par un schéma le modèle de connaissance globale de l'onduleur à cinq niveaux qu'on a abordé dans ce chapitre en mode commandable associé à sa source et à sa charge triphasée. On distingue la partie commande et la partie opérative avec deux blocs l'un continu et l'autre discontinu. Le bloc discontinu représente la fonction de l'onduleur triphasé.

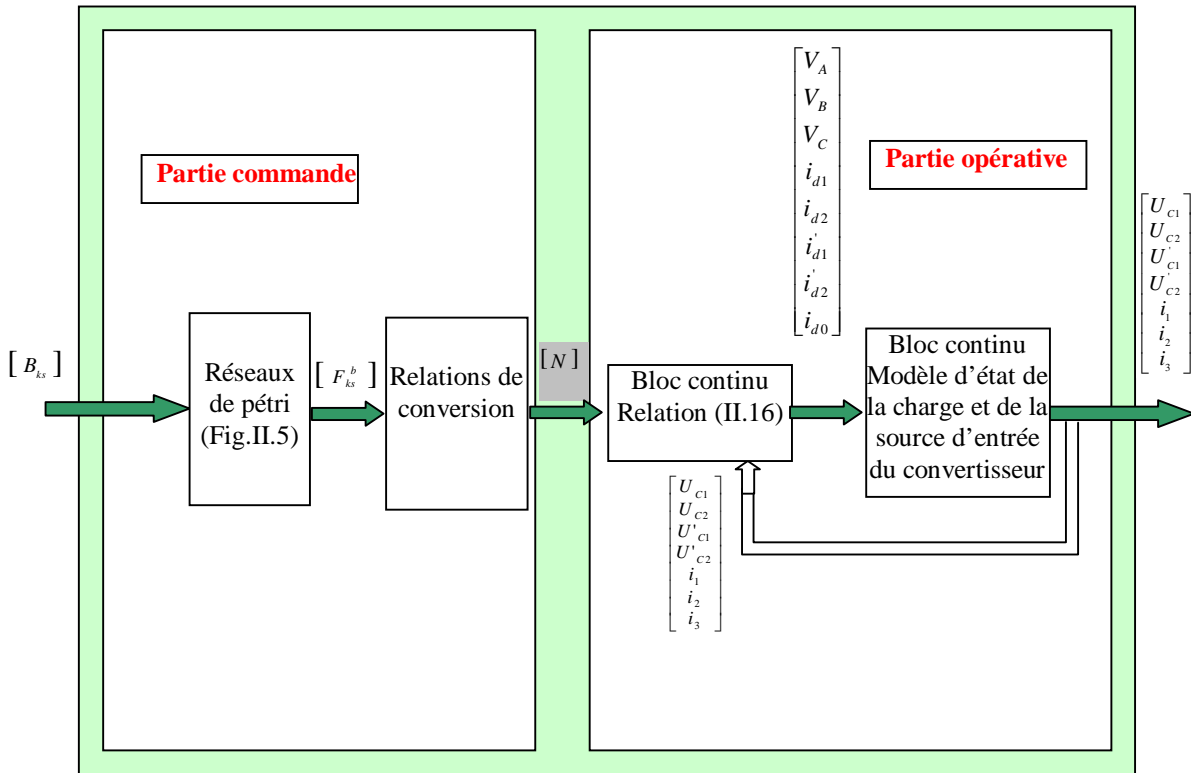


Figure (III.7) : Réseau de pétri réduit d'un bras d'onduleur à cinq niveaux

En utilisant ces fonctions génératrices et les valeurs moyennes instantanées des grandeurs électriques sur un intervalle T_e , les relations (II.17) et (II.18) de l'onduleur triphasé à cinq niveaux deviennent respectivement (II.21) et (II.22) avec $[N_g(t)]$ et $[M_g(t)]$ donne par (II.23) et (II.24) respectivement la matrice génératrice de conversion simple et composée [YOU-2008] [CHI-1999].

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i'_{d1} \\ i'_{d2} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [N_g(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.21}) \quad ;$$

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i'_{d1} \\ i'_{d2} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [M_g(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

La figure (II.8) présente le modèle de commande de l'onduleur triphasé à cinq niveaux, les grandeurs de ce modèle sont toutes continues [YOU-2008] [CHI-1999] [RAR-2002]

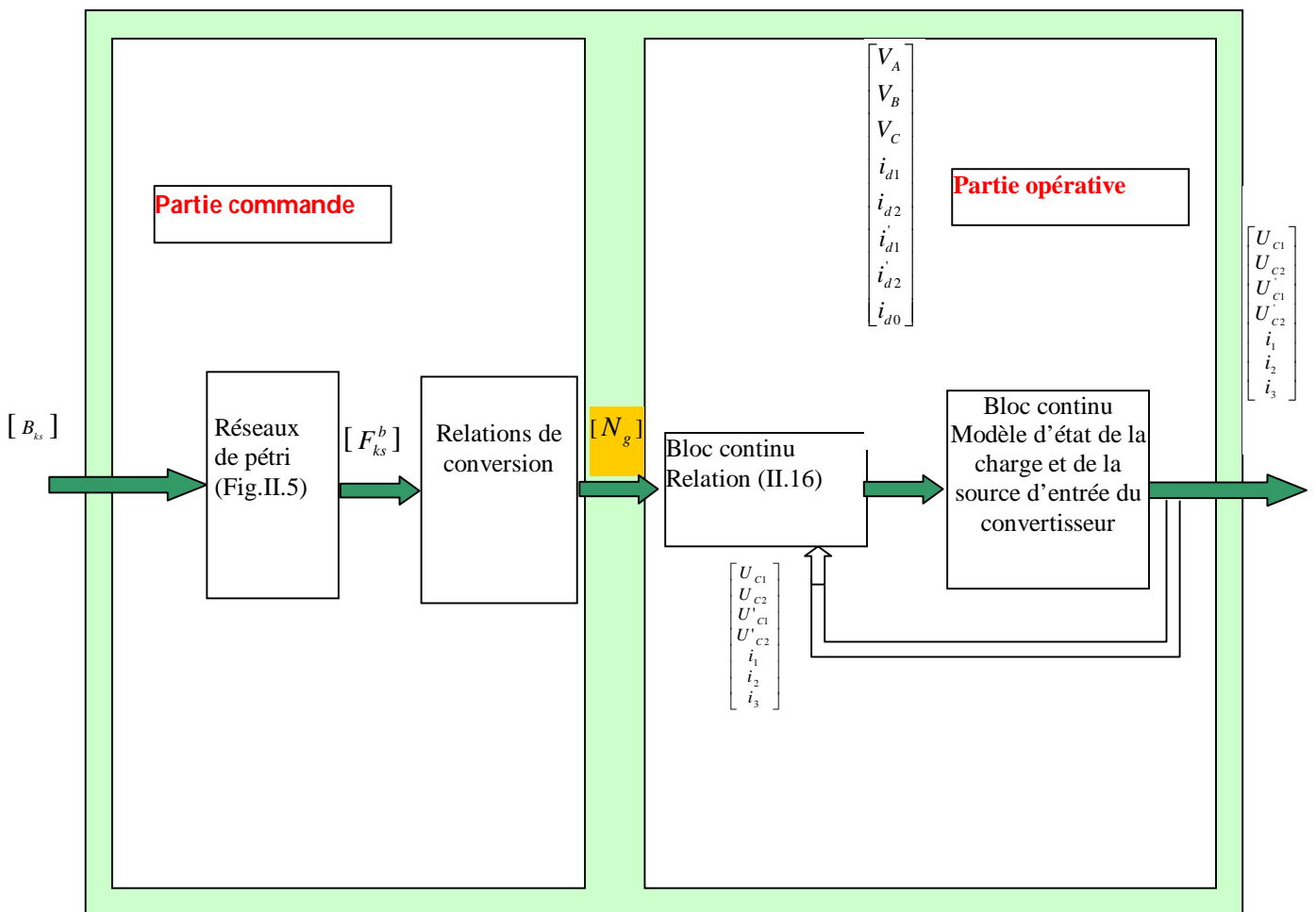


Figure (III.8): Modèle de commande de l'onduleur triphasé à cinq niveaux

Matrice génératrice de conversion simple

$$N_g(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}[(+2F_{1k} + F_{1k}^*) - (F_{2k} + F_{2k}^*) - (F_{3k} + F_{3k}^*)] & -\frac{1}{3}(2F_{1k}^* - F_{2k}^* - F_{3k}^*) & -\frac{1}{3}[(+2F_{1k} + F_{10k}^*) - (F_{2k} + F_{2k}^*) - (F_{3k} + F_{3k}^*)] & -\frac{1}{3}(2F_{10k}^* - F_{2k}^* - F_{3k}^*) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3}[-(F_{1k} + F_{1k}^*) + 2F_{2k} + F_{2k}^* - (F_{3k} + F_{3k}^*)] & -\frac{1}{3}(-F_{1k}^* + 2F_{2k}^* - F_{3k}^*) & -\frac{1}{3}[-(F_{1k} + F_{10k}^*) + 2F_{2k} + F_{2k}^* - (F_{3k} + F_{3k}^*)] & -\frac{1}{3}(-F_{10k}^* + 2F_{2k}^* - F_{3k}^*) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3}[-(F_{1k} + F_{1k}^*) - (F_{2k} + F_{2k}^*) + 2F_{3k} + F_{3k}^*] & -\frac{1}{3}(-F_{1k}^* - F_{2k}^* + 2F_{3k}^*) & -\frac{1}{3}[-(F_{1k} + F_{10k}^*) - (F_{2k} + F_{2k}^*) + 2F_{3k} + F_{3k}^*] & -\frac{1}{3}(-F_{10k}^* - F_{2k}^* + 2F_{3k}^*) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{1k} & F_{2k} & F_{3k} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{1k}^* & F_{2k}^* & F_{3k}^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{10k} & F_{20k} & F_{30k} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{10k}^* & F_{20k}^* & F_{30k}^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - (F_{1k} + F_{1k}^* + F_{10k} + F_{10k}^*) & 1 - (F_{2k} + F_{2k}^* + F_{20k} + F_{20k}^*) & 1 - (F_{3k} + F_{3k}^* + F_{30k} + F_{30k}^*) \end{bmatrix} \quad (III.23)$$

Matrice génératrice de conversion composée

$$M_g(t) = \begin{bmatrix} [(F_{17g} + F_{11g}^b) - (F_{27g} + F_{21g}^b)] & (F_{11g}^b - F_{21g}^b) & [(F_{28g} + F_{20g}^b) - (F_{18g} + F_{10g}^b)] & (F_{20g}^b - F_{10g}^b) & 0 & 0 & 0 \\ [(F_{27g} + F_{21g}^b) - (F_{37g} + F_{31g}^b)] & (F_{21g}^b - F_{31g}^b) & [(F_{38g} + F_{30g}^b) - (F_{28g} + F_{20g}^b)] & (F_{30g}^b - F_{20g}^b) & 0 & 0 & 0 \\ [(F_{37g} + F_{31g}^b) - (F_{17g} + F_{11g}^b)] & (F_{31g}^b - F_{11g}^b) & [(F_{18g} + F_{10g}^b) - (F_{38g} + F_{30g}^b)] & (F_{10g}^b - F_{30g}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{17g} & F_{27g} & F_{37g} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{11g}^b & F_{21g}^b & F_{31g}^b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{18g} & F_{28g} & F_{38g} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{10g}^b & F_{20g}^b & F_{30g}^b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - (F_{17g} + F_{18g} + F_{11g}^b + F_{10g}^b) & 1 - (F_{27g} + F_{28g} + F_{21g}^b + F_{20g}^b) & 1 - (F_{37g} + F_{38g} + F_{31g}^b + F_{30g}^b) \end{bmatrix} \quad (III.24)$$

III.3 Les différentes stratégies de commande de l'onduleur à cinq niveaux

Dans cette partie, nous élaborons quatre stratégies de commande de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC qui permettent de générer une source de tension la plus sinusoïdale possible et qui sont :

- commande triangulo-sinusoidale a quatre porteuses triangulaires_ Algorithme 1 ;
- commande triangulo-sinusoidale a quatre porteuses triangulaires_ Algorithme 2 ;
- Modulation vectorielle _ Algorithme 1 ;
- Modulation vectorielle _ Algorithme 2 ;

L'analyse de ces stratégies sera basée sur la bande de réglage et le taux d'harmonique des tensions de sortie.

Dans l'application de ces différentes stratégies, on posera: $U_{c1} = U_{c2} = U_{c3} = U_{c4} = 194V$.

III.3.1 Caractéristiques de la modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Dans le cas où les tensions de référence sont sinusoïdales, deux paramètres caractérisent cette modulation [YOU-2008] [BER-1995]

- L'indice de modulation m défini comme étant le rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f de la tension de référence, $m = f_p / f$.
- Le taux de modulation ou coefficient de réglage de tension r comme étant le rapport de l'amplitude V_m de la porteuse et de la tension U_{pm} de référence, $r = V_m / U_{pm}$.

Le schéma de la figure (III.9) présente le principe de la commande MLI.

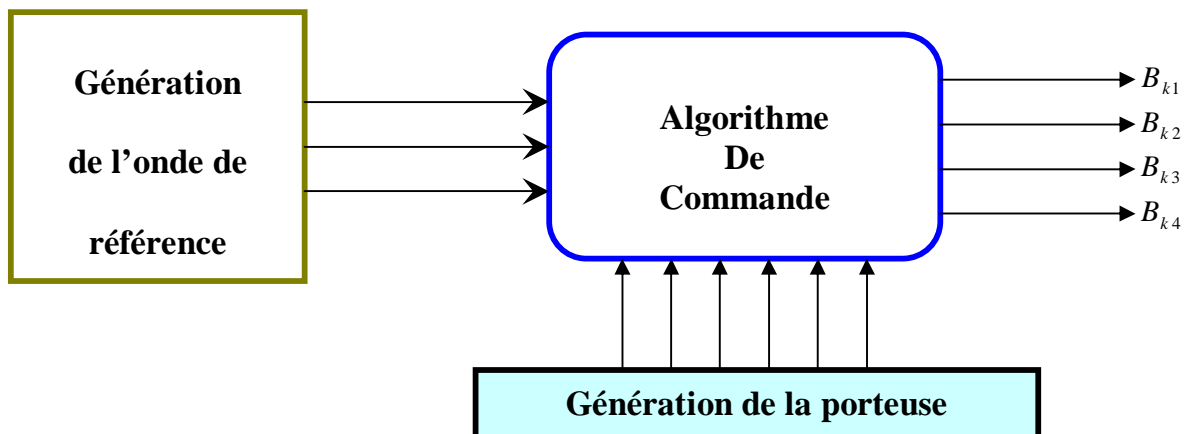


Figure (III.9) : Principe de la commande MLI

III.3.2 Commande triangulo-sinusoidale a quatre porteuses triangulaires_ Algorithme 1

Il existe différents types de commande pour la stratégie MLI à quatre porteuses. Le principe de cette stratégie consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante (qui est l'image de l'onde de sortie qu'on veut obtenir) généralement sinusoïdale avec quatre porteuses triangulaires bipolaires [YOU-2008] [BOU-2001] [CHI-1999] [RAR-2002]

Les quatre porteuses $U_{p1}; U_{p2}; U_{p3}; U_{p4}$ utilisées sont définies comme suit:

$$\begin{cases}
 U_{p1} = \begin{cases} U_{pm} \left(\frac{4t}{T_p} - 1 \right) & ; 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\
 U_{pm} \left(-\frac{4t}{T_p} + 3 \right) & ; \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \\
 U_{p2} = \begin{cases} U_{pm} \left(-\frac{4t}{T_p} \right) & ; 0 \leq t \leq \frac{T_p}{4} \\
 U_{pm} \left(\frac{4t}{T_p} - 2 \right) & ; \frac{T_p}{4} \leq t \leq \frac{3T_p}{4} \\
 U_{pm} \left(-\frac{4t}{T_p} + 4 \right) & ; \frac{3T_p}{4} \leq t \leq T_p \end{cases} \\
 U_{p3} = -U_{p1} \\
 U_{p4} = -U_{p2}
 \end{cases} \quad (III.25)$$

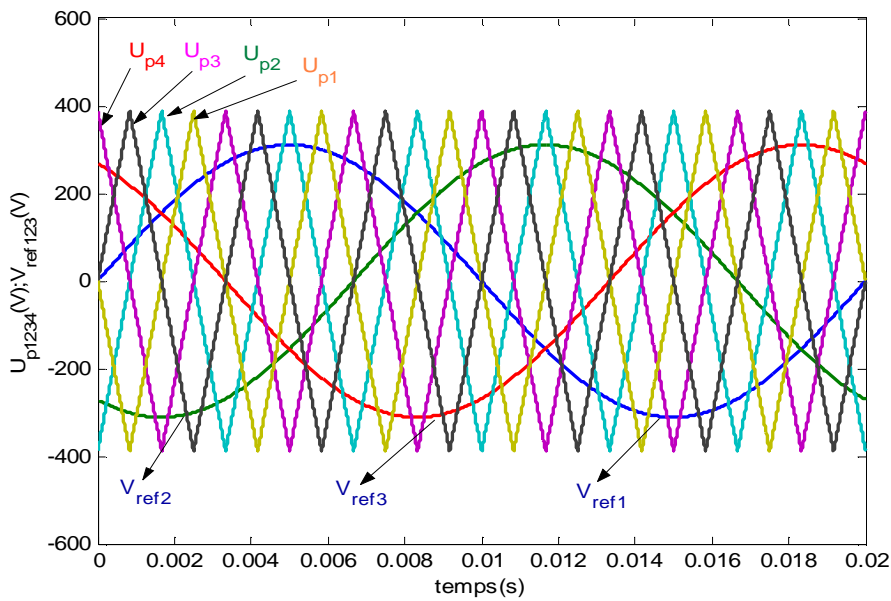


Figure (III.10): Stratégie MLI à quatre porteuses

L'algorithme de commande pour un bras k de l'onduleur se résume en deux étapes:

Etape1: Détermination des tensions intermédiaires: $(V_{k1}, V_{k2}, V_{k3}, V_{k4})$

$$\begin{cases}
 V_{refk} \geq U_{p4} & \Rightarrow V_{k4} = 2U_c \\
 V_{refk} \leq \pi U_{p4} & \Rightarrow V_{k4} = U_c \\
 \\
 V_{refk} \geq U_{p3} & \Rightarrow V_{k3} = U_c \\
 V_{refk} \leq \pi U_{p3} & \Rightarrow V_{k3} = 0 \\
 \\
 V_{refk} \geq U_{p2} & \Rightarrow V_{k2} = 0 \\
 V_{refk} \leq \pi U_{p2} & \Rightarrow V_{k2} = -U_c \\
 \\
 V_{refk} \geq U_{p1} & \Rightarrow V_{k1} = -U_c \\
 V_{refk} \leq \pi U_{p1} & \Rightarrow V_{k1} = -2U_c
 \end{cases} \quad (III.26)$$

Etape 2: Détermination du signal V_{kM} et les ordres de commande B_{ks} des interrupteurs

$$\begin{cases}
 V_{KM} = 2U_c \Rightarrow B_{K1} = 1, B_{K2} = 1, B_{K3} = 1 \\
 V_{KM} = U_c \Rightarrow B_{K1} = 1, B_{K2} = 1, B_{K3} = 0 \\
 V_{KM} = 0 \Rightarrow B_{K1} = 1, B_{K2} = 0, B_{K3} = 0 \\
 V_{KM} = -U_c \Rightarrow B_{K1} = 0, B_{K2} = 0, B_{K3} = 1 \\
 V_{KM} = -2U_c \Rightarrow B_{K1} = 0, B_{K2} = 0, B_{K3} = 0 \\
 \\
 avec: & V_{kM} = V_{k1} + V_{k2} + V_{k3} + V_{k4}
 \end{cases} \quad (III.27)$$

Résultats de simulation

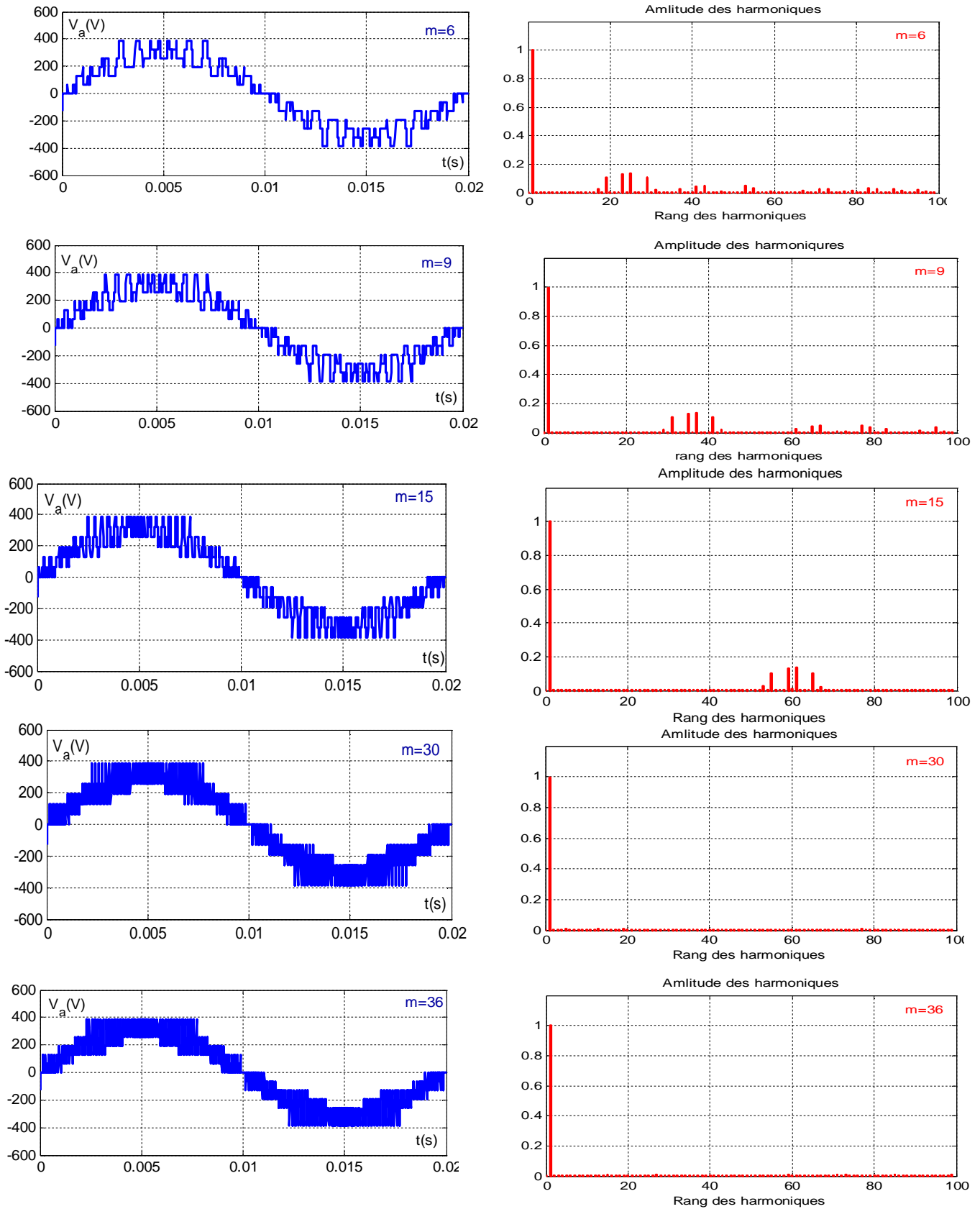


Figure III.11: La tension simple v_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires (algorithme1) pour $m=6$ 9 15 30 36

Interprétations

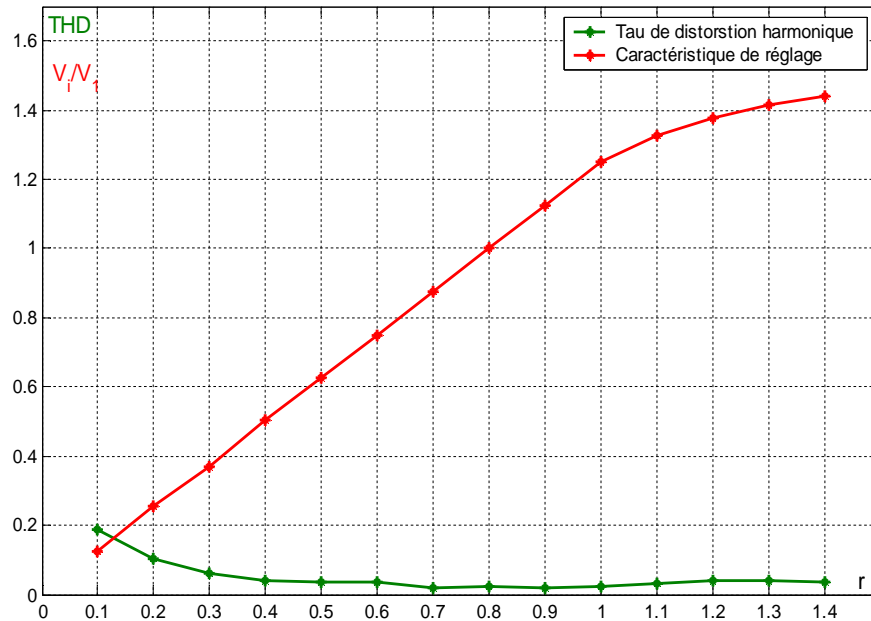


Figure (III.12): Caractéristiques de la tension de sortie V_a de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie MLI à quatre porteuses bipolaires (Algorithme 1). ($m=36$)

La Figure (II.14) représente la tension de sortie v_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires (algorithme1)

- On constate que quelque soit " m " pair ou impair, la tension V_a présente une symétrie par rapport à $T/4$ et donc seuls les harmoniques impairs existent. On remarque aussi que ces harmoniques se regroupent autour des fréquences multiples de $4mf$ (figure II.14).
- L'augmentation de l'indice de modulation " m " permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevées et donc facilement filtrées.

Les caractéristiques de la tension simple de sortie V_a de l'onduleur triphasé montre que:

- La caractéristique de réglage est linéaire de 0 à 1
- Le taux d'harmonique diminue quand " r " augmente. Il représente un minimum à $r=0.9$, et maximum à $r=0.1$

III.3.3 Commande triangulo-sinusoïdale a quatre porteuses triangulaires_

Algorithme 2

Dans cet algorithme on utilise quatre porteuses triangulaires ($U_{p1}; U_{p2}; U_{p3}$ et U_{p4}), décalées l'une par rapport à l'autre d'un niveau de tension U_{pm} (figure III.13).

Pour cet algorithme le coefficient de réglage r a pour expression

$$r = \frac{V_m}{2U_{pm}}$$

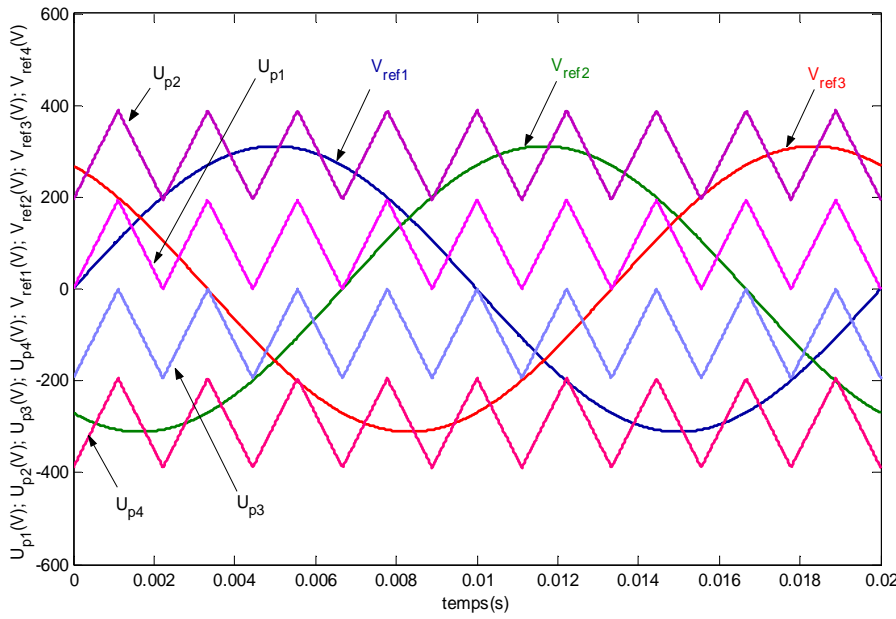


Figure (III.13) : Les différent signales de la stratégie de modulation vectorielle (Algorithme 2) ($m=6, r=0.8$).

Les équations des quatre porteuses sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{p1}(t) = \begin{cases} 2U_{pm} \frac{t}{T}; 0 \leq t < \frac{T_p}{2} \\ 2U_{pm} \left(1 - \frac{t}{T}\right); \frac{T_p}{2} \leq t < T_p \end{cases} \\ U_{p2}(t) = U_{p1}(t) + U_{pm} \\ U_{p3}(t) = U_{p1}(t) - U_{pm} \\ U_{p4}(t) = U_{p1}(t) - 2U_{pm} \end{array} \right. \quad (III.28)$$

L'algorithme de commande est le même que pour l'algorithme 1

Résultats de simulation

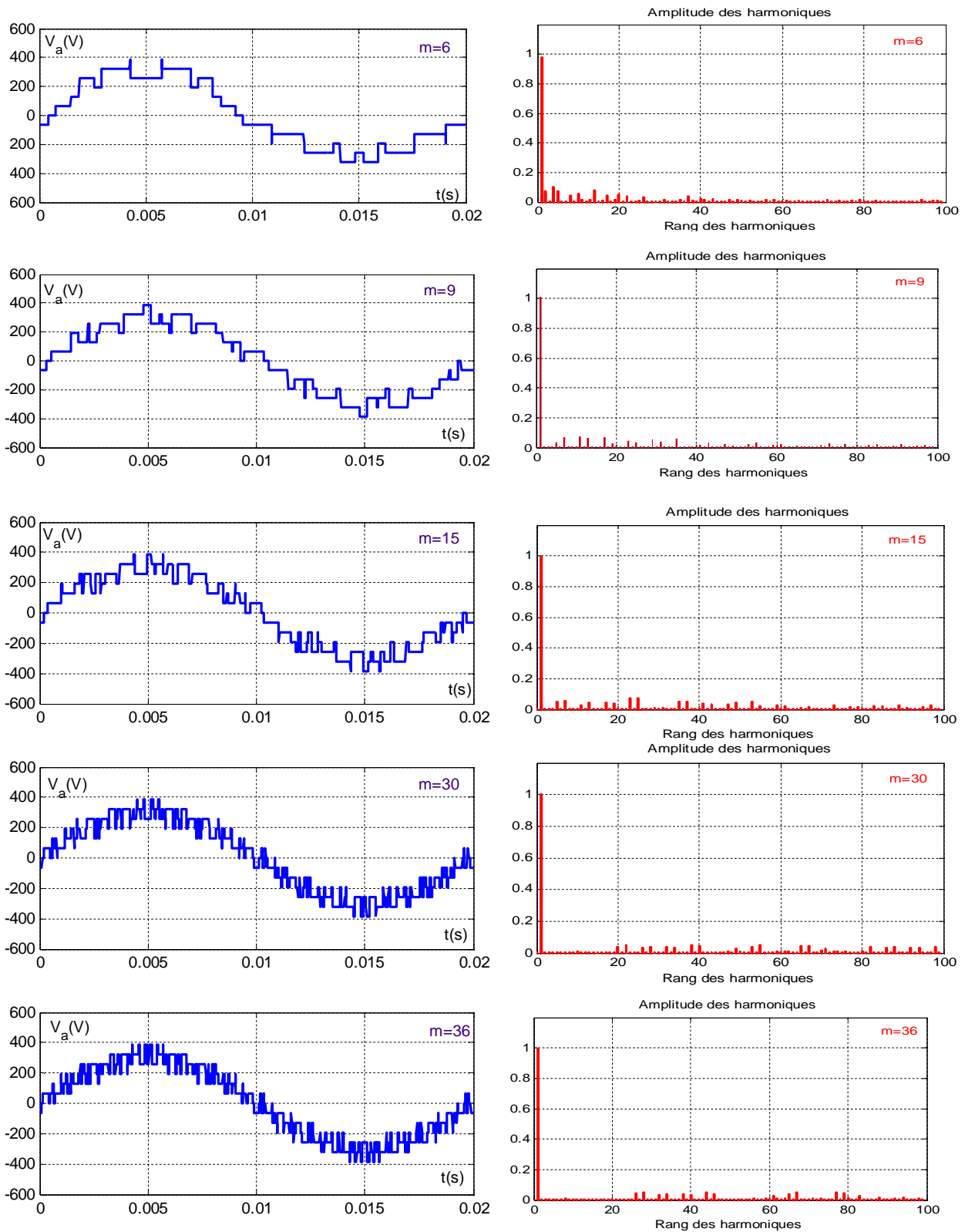


Figure (III.14): La tension simple v_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à quatre porteuses triangulaires (algorithme2) pour $m=6, 9, 15, 30, 36$.

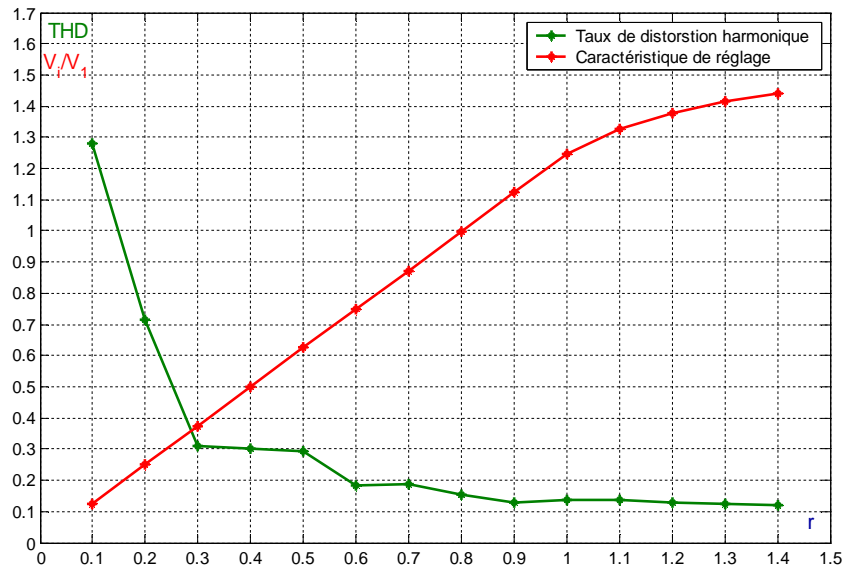


Figure (III.15): Caractéristiques de la tension de sortie V_a de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie MLI à quatre porteuses bipolaires (Algorithme 2), ($m=36$)

Interprétation

La Figure (III.14) représente la tension de sortie v_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à quatre porteuses triangulaires (algorithme2)

On remarque

- L'existence des harmoniques pairs et impairs pour les valeurs pairs de m et des harmoniques impairs seulement pour des valeurs impairs de m
- Les caractéristiques de réglage de l'amplitude du fondamental des tension est linéaire de $r = 0$ à 1.1 (Figure.III.15)
- le taux d'harmoniques est comme pour la stratégie triangulo-sinusoidale à quatre porteuses triangulaires (algorithme 1), Il représente un minimum à $r = 0.1$, et maximum à $r = 1.4$ (Figure.III.15).

II.3.4 Modulation vectorielle _ Algorithme 1

Cette nouvelle modulation vectorielle peut utiliser aussi bien une ou quatre porteuses. Nous présentons l'algorithme utilisant quatre porteuses bipolaires [YOU-2008] [CHI-1999].

La modulation vectorielle comme l'indique son nom permet de suivre le vecteur de tension de référence V_{Sref} , $V_{Sref} = (V_{ref1}, V_{ref2}, V_{ref3})$ et non pas chaque tension de référence de phase séparément.

Cette stratégie utilise la propriété que l'onduleur à cinq niveaux est la mise en série de quatre onduleurs à deux niveaux ou de deux onduleurs à trois niveaux.

On définit à partir du vecteur de référence $V_{Sref} [i]$, deux nouveaux vecteurs de références V_{Sref1} , V_{Sref0} [YOU-2008] [BER-1995]

Le vecteur V_{Sref1} (respectivement V_{Sref0}) est associé au demi bras du haut (respectivement du bas) et ces deux vecteurs sont définis par le système suivant:

$$\begin{cases} V_{sref1} [i] = V_{sref} [i] + V_0 \\ V_{sref0} [i] = V_{sref} [i] - V_0 \end{cases} \quad \text{Avec } i=1, 2, 3 \quad (III.29)$$

La tension V_0 de fréquence $3f$ (f : est la fréquence des tensions du vecteur de référence) est donnée par l'expression suivante:

$$V_0 = - \frac{\{ \max(V_{Sref}) + \min(V_{Sref}) \}}{2} \quad (III.30)$$

La figure III.16 représente les différents signaux de la modulation vectorielle

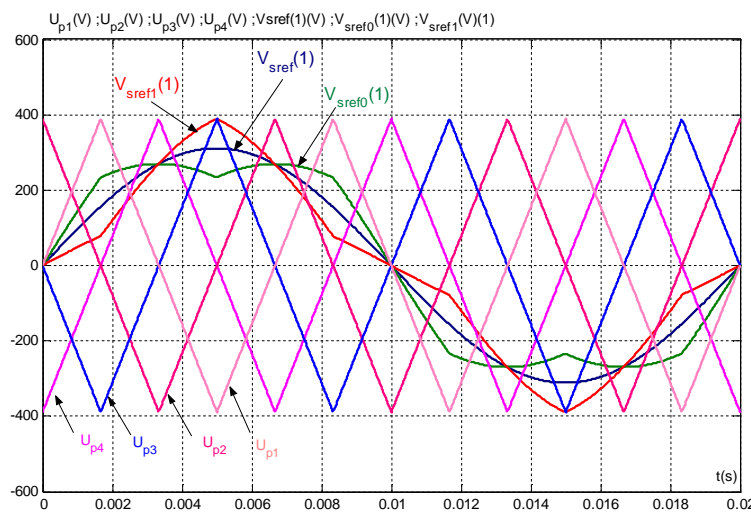


Figure (III.16) : Les différents signaux de la stratégie de modulation vectorielle (Algorithme1)($m=6$, $r=0.8$).

L'algorithme de commande de cette stratégie est similaire à celui de la commande MLI à quatre porteuses bipolaires en utilisant les tensions $V_{Sref1}[i]$ et $V_{Sref0}[i]$ comme signaux de référence pour la commande des demi-bras de l'onduleur. Il se résume en trois étapes [YOU-2008] [RAR-2002]:

Étape1 : Détermination des tensions intermédiaires:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sref1}[i] \geq U_{p1} \Rightarrow V_{11M}[i] = U_c \\ V_{sref1}[i] \pi U_{p1} \Rightarrow V_{11M}[i] = 0 \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{sref1}[i] \geq U_{p2} \Rightarrow V_{12M}[i] = 2U_c \\ V_{sref1}[i] \pi U_{p2} \Rightarrow V_{12M}[i] = U_c \end{array} \right. \quad (III.31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sref0}[i] \geq U_{p3} \Rightarrow V_{03M}[i] = 0 \\ V_{sref0}[i] \pi U_{p3} \Rightarrow V_{03M}[i] = -U_c \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{sref0}[i] \geq U_{p4} \Rightarrow V_{04M}[i] = -U_c \\ V_{sref0}[i] \pi U_{p4} \Rightarrow V_{04M}[i] = -2U_c \end{array} \right.$$

Étape2 : Détermination de la variable intermédiaire $V_{2M}[i]$, image de la tension de sortie de l'onduleur à cinq niveaux :

$$V_{2M}[i] = V_{1kM}[i] + V_{0kM}[i] \quad (III.32)$$

Étape3 : Détermination des ordres de commande B_{ks} des interrupteurs:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{2M}[i] = 2U_c \quad \Rightarrow B_{k1} = 1; B_{k2} = 1; B_{k3} = 1 \\ V_{2M}[i] = U_c \quad \Rightarrow B_{k1} = 1; B_{k2} = 1; B_{k3} = 0 \\ V_{2M}[i] = 0 \quad \Rightarrow B_{k1} = 1; B_{k2} = 0; B_{k3} = 0 \\ V_{2M}[i] = -U_c \quad \Rightarrow B_{k1} = 0; B_{k2} = 0; B_{k3} = 1 \\ V_{2M}[i] = -2U_c \quad \Rightarrow B_{k1} = 0; B_{k2} = 0; B_{k3} = 0 \end{array} \right. \quad (III.33)$$

Résultats de simulation

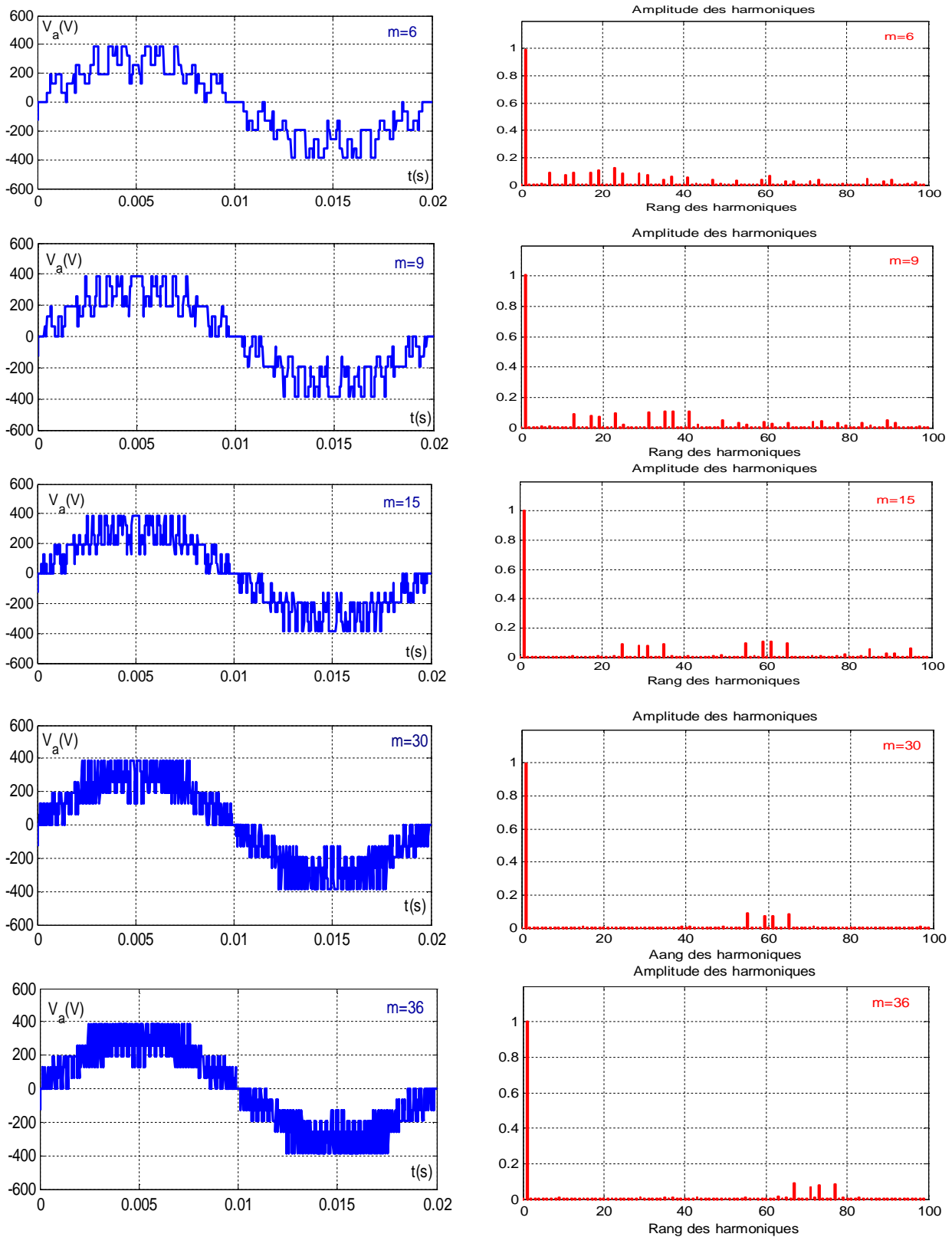


Figure (III.17): La tension simple v_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie modulation vectorielle à quatre porteuses triangulaires (algorithme1) pour $m=6, 9, 15, 30, 36$

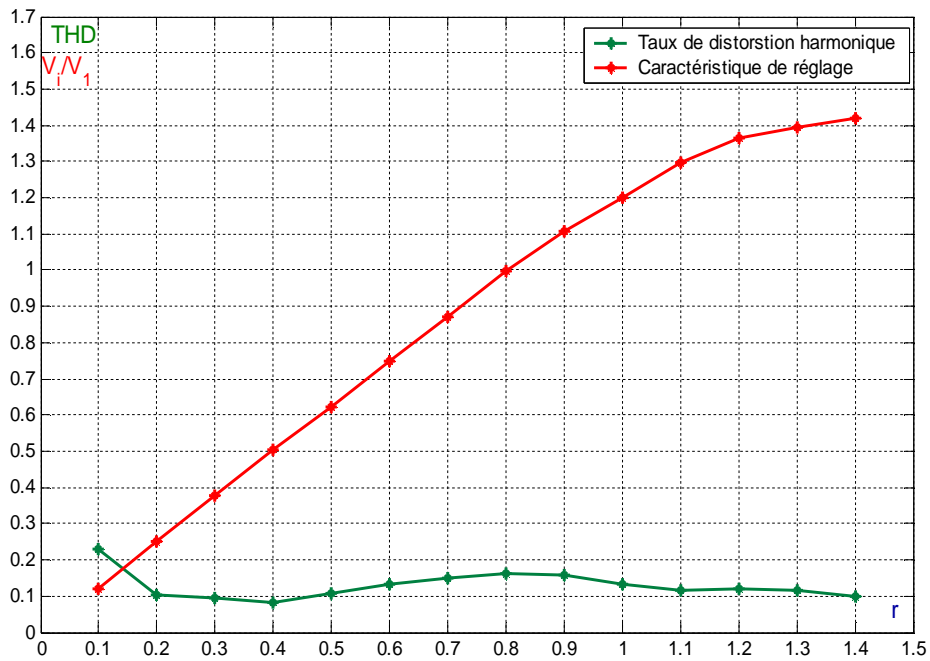


Figure (III.18): Caractéristiques de la tension de sortie V_a de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la modulation vectorielle (Algorithme 1)($m=36$)

Interprétations

La Figure (II.17) représente la tension de sortie v_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la modulation vectorielle (algorithme1)

On remarque

- On constate que la tension simple V_a ne possède que des harmoniques impairs pour toutes les valeurs de " m ", et se regroupent autour des fréquences multiples de $4mf$.
- L'augmentation de l'indice de modulation " m " permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevées, donc facilement filtrées.
- La caractéristique de réglage est linéaire jusqu'à $r_{max}= 1,1$ et le taux d'harmonique diminue quand " r " augmente (figure II.18).

II.3.5 Modulation vectorielle _ Algorithme 2

Cette nouvelle modulation vectorielle [BER-2004] peut utiliser aussi bien une ou quatre porteuses. Nous nous présentons l'algorithme utilisant quatre porteuses bipolaires triangulaires (figure.II.19)(comme déjà fait et vue (algorithme 1)).

Cette stratégie utilise la propriété que l'onduleur à cinq niveaux est une association en série de quatre onduleurs à deux niveaux ou de deux onduleur a trois niveaux.

On définit à partir du vecteur de référence V_{sref} $V_{sref} = (V_{ref1}, V_{ref2}, V_{ref3})$ quatre nouveaux vecteurs de référence $V_{sref1}, V_{sref2}, V_{sref3}, et V_{sref4}$.

Ces nouveaux vecteurs de références sont définis comme suit [BER-2004] :

$$\begin{cases} V_{sref1}[i] = V_{sref}[i] + 2V_0 \\ V_{sref2}[i] = V_{sref}[i] + V_0 \\ V_{sref3}[i] = V_{sref}[i] - V_0 \\ V_{sref4}[i] = V_{sref}[i] - 2V_0 \end{cases} \quad \text{Avec } i=1, 2, 3 \quad (III.34)$$

La tension de fréquence $3f$ est donnée par l'expression suivante :

$$V_0 = - \frac{\{ \max (v_{sref}) + \min (v_{sref}) \}}{4} \quad (III.35)$$

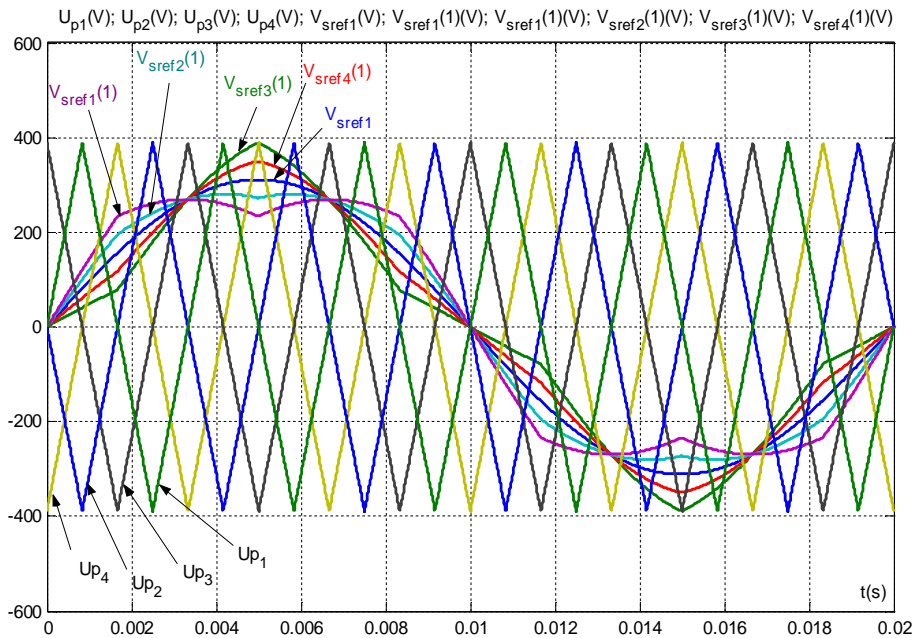


Figure (III.19): Les différents signaux de la stratégie de modulation vectorielle (Algorithme2).

Algorithme de la commande

L'algorithme de la génération des ordres de commande des interrupteurs avec cette stratégie se résume aux deux étapes suivantes :

Etape1 : détermination des tensions intermédiaires $v_{1M}[i], v_{2M}[i], v_{3M}[i]$ et $v_{4M}[i]$ (images de sortie des quatre onduleurs à deux niveaux équivalents de l'onduleur à cinq niveaux)

$$\begin{cases}
 V_{sref\ 1}[i] \geq U_{p1} \Rightarrow V_{1M}[i] = 2U_c \\
 V_{sref\ 1}[i] < U_{p1} \Rightarrow V_{1M}[i] = U_c \\
 \\
 V_{sref\ 2}[i] \geq U_{p2} \Rightarrow V_{2M}[i] = 2U_c \\
 V_{sref\ 2}[i] < U_{p2} \Rightarrow V_{2M}[i] = U_c \\
 \\
 V_{sref\ 3}[i] \geq U_{p3} \Rightarrow V_{3M}[i] = 2U_c \\
 V_{sref\ 3}[i] < U_{p3} \Rightarrow V_{3M}[i] = U_c \\
 \\
 V_{sref\ 4}[i] \geq U_{p4} \Rightarrow V_{4M}[i] = 2U_c \\
 V_{sref\ 4}[i] < U_{p4} \Rightarrow V_{4M}[i] = U_c
 \end{cases} \quad (III.36)$$

Etape 2 : détermination de la variable intermédiaire $v_{0M}[i]$ image de la tension de sortie de l'onduleur à cinq niveaux et des ordres de commande des interrupteurs :

$$V_{0M}[i] = V_{1M}[i] + V_{2M}[i] + V_{3M}[i] + V_{4M}[i]$$

D'où les commandes des interrupteurs :

$$\begin{cases}
 V_{2M}[i] = 2U_c & \Rightarrow B_{k1} = 1; B_{k2} = 1; B_{k3} = 1 \\
 V_{2M}[i] = U_c & \Rightarrow B_{k1} = 1; B_{k2} = 1; B_{k3} = 0 \\
 V_{2M}[i] = 0 & \Rightarrow B_{k1} = 1; B_{k2} = 0; B_{k3} = 0 \\
 V_{2M}[i] = -U_c & \Rightarrow B_{k1} = 0; B_{k2} = 0; B_{k3} = 1 \\
 V_{2M}[i] = -2U_c & \Rightarrow B_{k1} = 0; B_{k2} = 0; B_{k3} = 0
 \end{cases} \quad (III.37)$$

Résultats de simulation

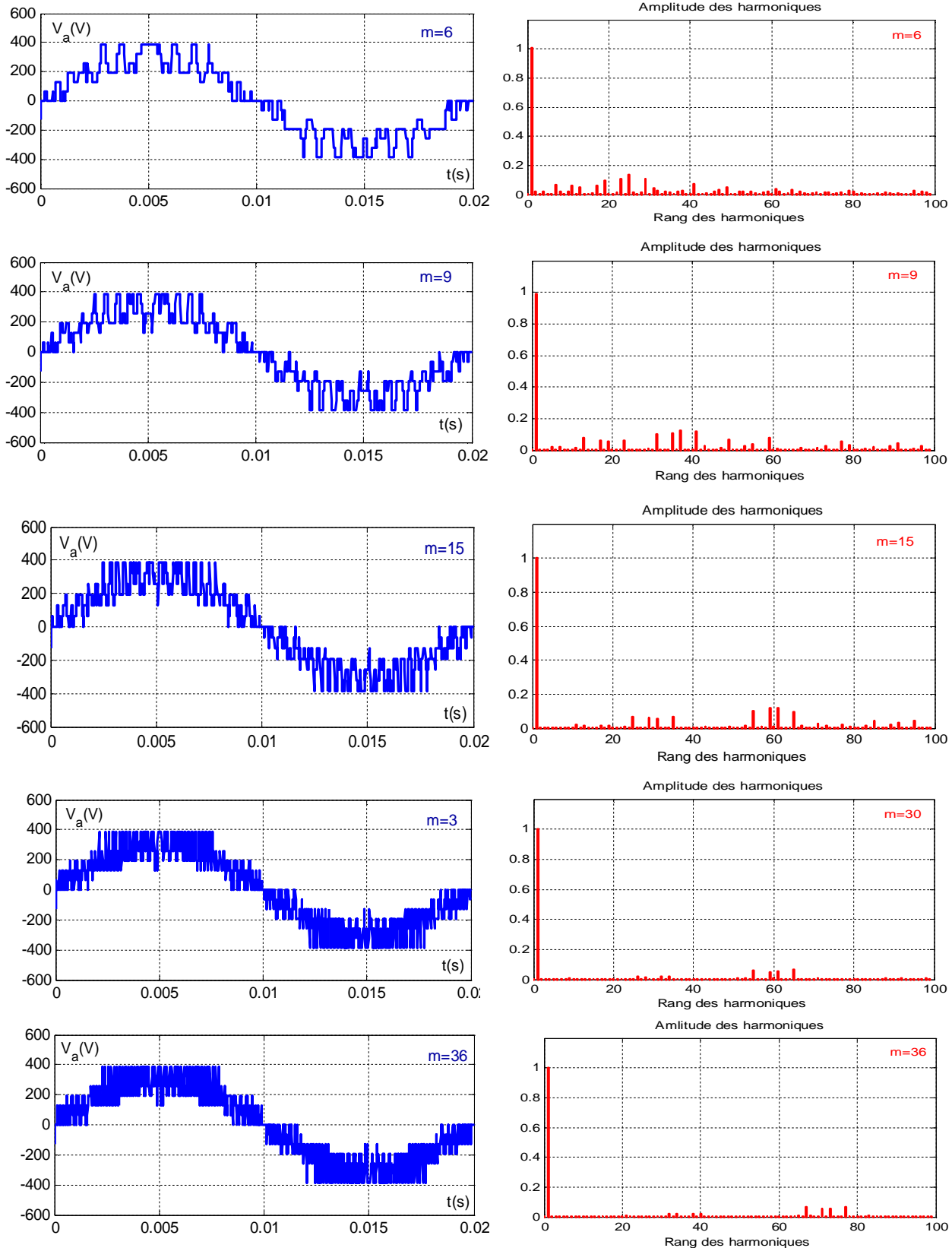


Figure (III.20): La tension simple v_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires (algorithme 1) pour $m=6, 9, 15, 30, 36$.

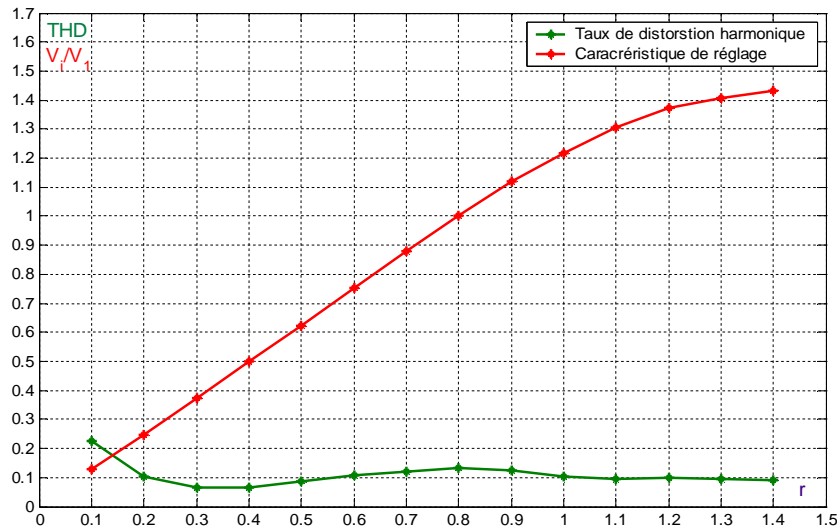


Figure (III.21): Caractéristiques de la tension de sortie V_a de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie MLI à quatre porteuses bipolaires (Algorithme 2) ;(m=36)

Interprétations

La Figure (II.20) représente la tension de sortie v_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la modulation vectorielle (algorithme2)

On constate que

- la tension simple V_a ne possède que des harmoniques impairs pour toutes les valeurs de " m ", et se regroupent autour des fréquences multiples de mf et non $4mf$
- L'augmentation de l'indice de modulation " m " permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevées, donc facilement filtrées
- La caractéristique de réglage est linéaire jusqu'à $r_{max} = 1,1$ et le taux d'harmonique diminue quand " r " augmente figure II.21.

III.3.6 Stratégies de commande adopter de l'onduleur à cinq niveaux

Dans notre étude on applique la stratégie de commande triangulo-sinusoidal à quatre porteuses (algorithme1) car il

1. Représente un faible taux de distorsion harmonique
2. harmoniques se regroupent autour des fréquences multiples de $4mf$
3. L'augmentation de $4mf$ et non de mf permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevées et donc facilement filtrées.

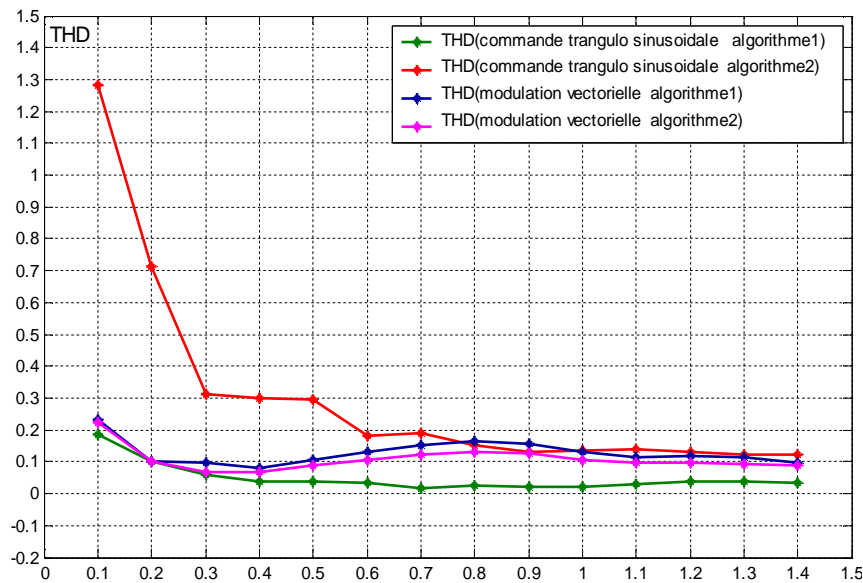


Figure (III.22): le taux de distorsion harmonique pour tout les stratégie de commande proposé pour commande l'onduleur à cinq niveaux a structure NPC

Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié différents stratégies de commande MLI pour l'onduleur triphasé à cinq niveaux et ces stratégies sont développer a partir des stratégies pour la commande des onduleur à deux et trois niveaux et on peut les utilisés pour des onduleur de plus de cinq niveaux [BER-2004] [OU C-2006]

La plus simple des stratégies de MLI pour la commande des onduleurs c'est la stratégie triangulo-sinusoidale, elle peut être réalisé avec des circuits analogiques, nous avons vu les commandes avec quatre porteuses triangulaires (nous avons appliqué deux algorithme), ensuite nous avons appliqué la modulation vectorielle (nous avons appliqué deux algorithme),

La meilleure stratégie est la stratégie triangulo-sinusoidale à quatre porteuses triangulaires algorithme 1 à cause de ses caractéristiques. Dans les chapitres suivants, on va adopter cette stratégie pour la commande de l'onduleur de tension triphasé à cinq niveaux à structure NPC.

On note ici qu'ils existent d'autres stratégies applicables pour la commande de l'onduleur à cinq niveaux qu'ils ne sont pas cités dans ce travail.

Chapitre IV :
Commande d'un Compensateur
Actif Série

Introduction

Dans le chapitre précédent, on a modélisé l'onduleur triphasé de tension à cinq niveaux à structure NPC on a supposé que toutes ces tensions sont égales et constantes et leur valeur est U_c . Mais ceci n'est vrai en pratique que pour le cas des petites alimentations qui utilisent des batteries. Pour cela, dans ce chapitre, on étudiera un dispositif permet de générer ces tensions à partir d'un réseau alternatif 50Hz. Ainsi, on étudiera cascade d'un redresseur de courant triphasé à deux niveaux - Onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC

Puis on applique cette cascade a notre système et on montre la réponse de l'onduleur a cinq niveaux et on global la réponse du compensateur actif série.

IV.1 Cascade d'un redresseur de courant triphasé à deux niveaux – Onduleur Triphasé à Cinq Niveaux à Structure NPC

Dans cette partie, on va présenter une cascade permettant de réaliser un changeur de fréquence ayant en sortie un onduleur de tension à cinq niveaux. Le pont d'entrée de cette cascade est constitué d'un redresseur de courant commande par la modulation de largeur d'impulsions à deux niveaux.

La structure de cette cascade est représentée par la figure (IV.1)

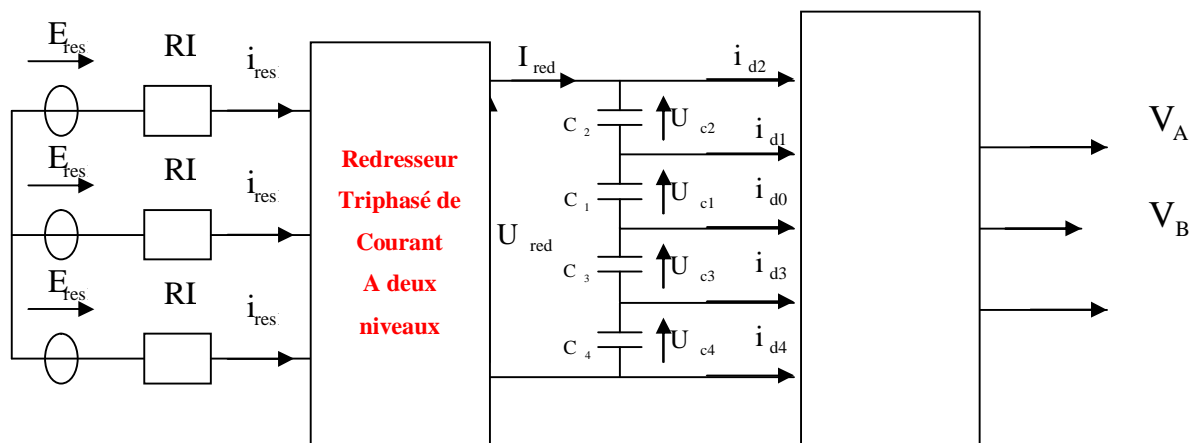


Figure (IV.1): Structure de la cascade un redresseur de courant à deux niveaux- Onduleur de tension à cinq niveaux

A cause de la réversibilité de l'onduleur de tension à deux niveaux, il peut fonctionner comme un redresseur à deux niveaux. La structure du redresseur est celle de la figure suivante :

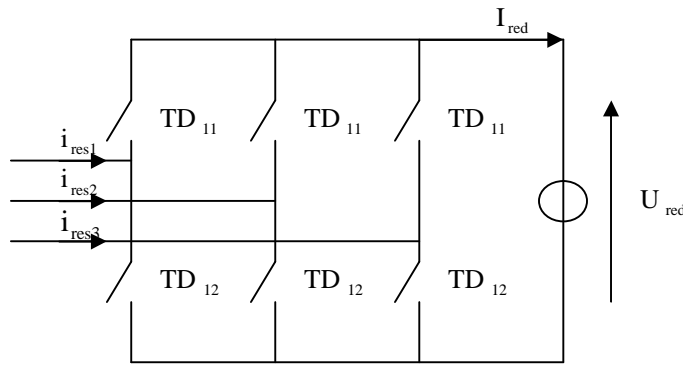


Figure (IV.2): Structure du redresseur de courant à deux niveaux

La commande complémentaire utilisée est la suivante :

$$\begin{cases} B_{11} = \overline{B_{10}} \\ B_{21} = \overline{B_{20}} \\ B_{31} = \overline{B_{30}} \end{cases} \quad (IV.1)$$

Les tensions d'entrée du redresseur sont données par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{U_{red}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} \quad (IV.2)$$

Avec F_{ki} : fonction de connexion de l'interrupteur TD_{ki} . Le courant de sortie du redresseur en fonction des fonctions de connexion des interrupteurs et des courants d'entrée, est donné par :

$$I_{red} = F_{11}i_{res1} + F_{21}i_{res2} + F_{31}i_{res3} \quad (IV.3)$$

IV.1.1 Stratégie de contrôle du redresseur à deux niveaux

Pour la commande de ce redresseur, toutes les stratégies de commande qu'elles sont possibles pour L'onduleur à deux niveaux sont utilisables pour ce redresseur [BER-1995] [OU C-2006]. Pour notre étude, et pour avoir un courant le plus sinusoïdale possible, on utilise la commande par hystérésis en courant dont l'algorithme est donné par la figure suivante :

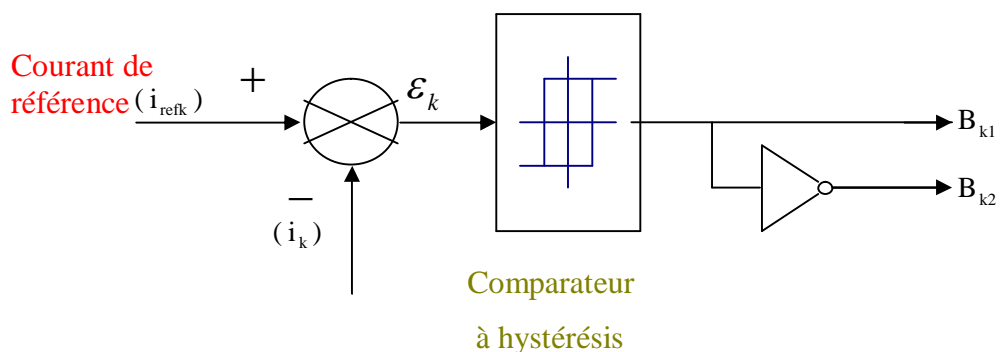


Figure (IV.3) : principe du contrôle par hystérésis d'un redresseur à deux niveaux

Les courants de référence sont donnés par le système suivant

$$\begin{cases} I_{ref1} = I_{max} \sin(\omega t - \varphi) \\ I_{ref2} = I_{max} \sin(\omega t - \varphi - 2\frac{2\pi}{3}) \\ I_{ref3} = I_{max} \sin(\omega t - \varphi + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (IV.4)$$

L'algorithme de cette stratégie est le suivant :

$$\begin{cases} si \zeta_k \geq \Delta i \Rightarrow B_{ki} = 1 \\ si \zeta_k \leq -\Delta i \Rightarrow B_{ki} = 1 \\ \zeta_k = i_{resk} - I_{refk} \end{cases} \quad (IV.5)$$

Δi : La largeur de la bande d'hystérésis.

IV.1.2 Modélisation du filtre intermédiaire

La structure du filtre est la suivante :

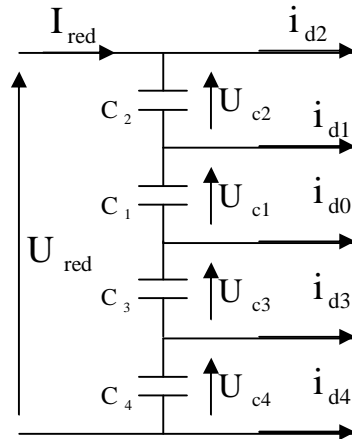


Figure (IV.4): Structure du filtre intermédiaire

Le modèle de filtre est défini par le système IV.6:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = I_{red} - i_{d1} - i_{d2} \\ C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = I_{red} - i_{d2} \\ C_3 \frac{dU_{c3}}{dt} = I_{red} + i_{d3} + i_{d4} \\ C_4 \frac{dU_{c4}}{dt} = I_{red} + i_{d4} \end{cases} \quad (IV.6)$$

Résultats de simulation

L'onduleur est alimenté par quatre tensions continue $U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}, et U_{c4}$ qui sont les quatre tensions de sortie d'un redresseur de courant à deux niveaux ces tensions sont des tensions variables et croissantes (figure IV.6.a)

Dans notre application les tensions de référence ne sont plus sinusoïdales elles sont les trois tensions de sortie du bloc identification comme il est montre dans la figure (IV.5.a) et la figure (IV.6.b), ces trois tension sont comparé par quatre porteuses comme on a montré dans de chapitre III (Figure (IV.6.b)).

La tension identifiée par la méthode des puissances réelles et imaginaire instantanée (figure (IV.5.c)) exprime la tension de référence de l'onduleur a cinq niveaux.

Finalement la tension harmonique identifiée et injectée par l'onduleur doit être filtrée par un filtre passif RLC pour filtrer les harmoniques de hautes fréquence figure (IV.5.a) et la figure (IV.6.d)

La tension présentée dans la figure (IV.5.a) ajouté à la tension du réseau perturbé figure (IV.5.d) mais de sens opposé pour améliorer la forme d'onde de la tension du réseau.

On fait la simulation de notre système proposé avec le logiciel MATLAB SIMUULINK pour trois valeurs d'angle d'amorçage Alpha ($0^\circ, 30^\circ$ et 60°).

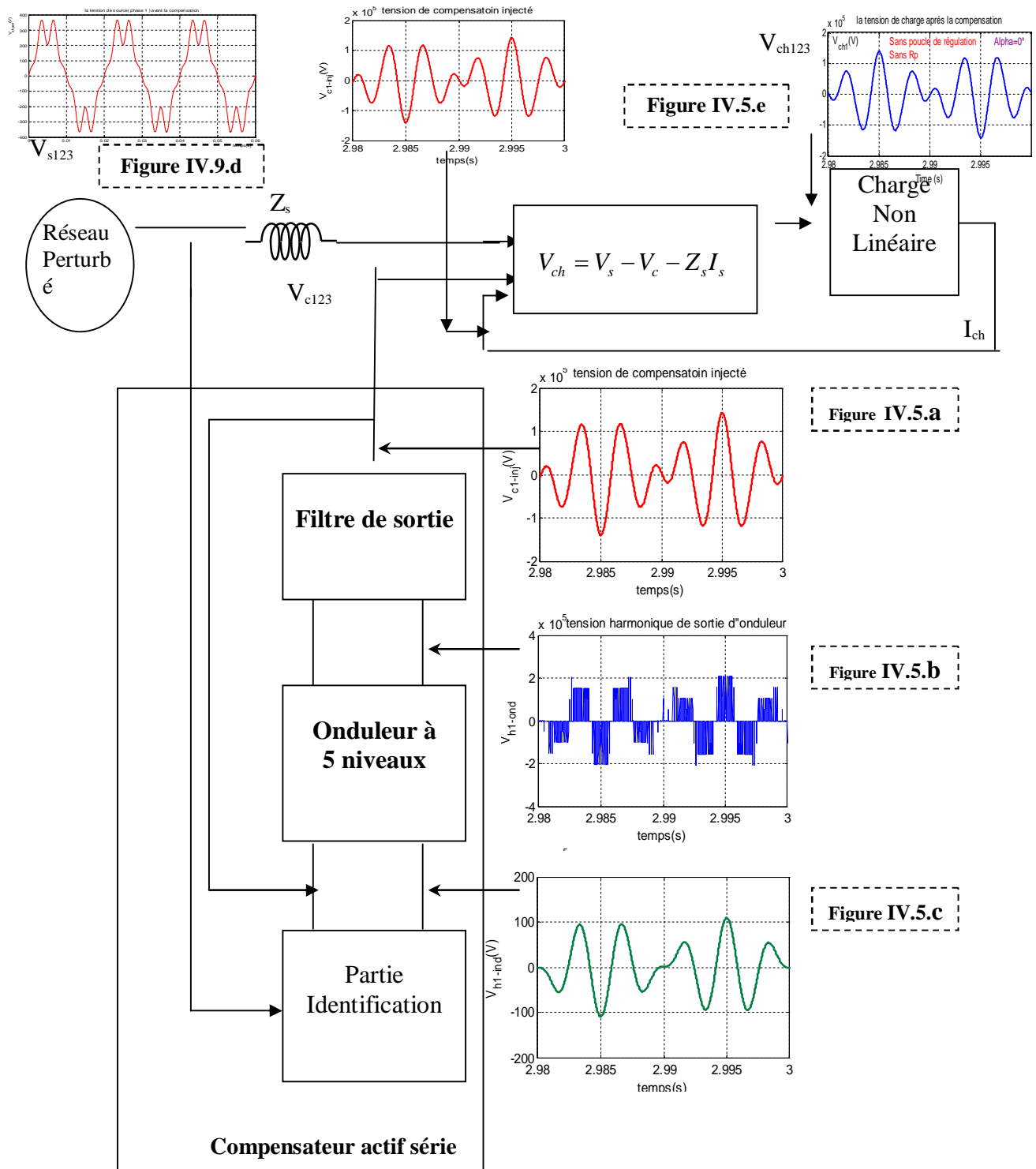


Figure (IV.5): les tensions de sortie de chaque bloc constituent le compensateur actif série

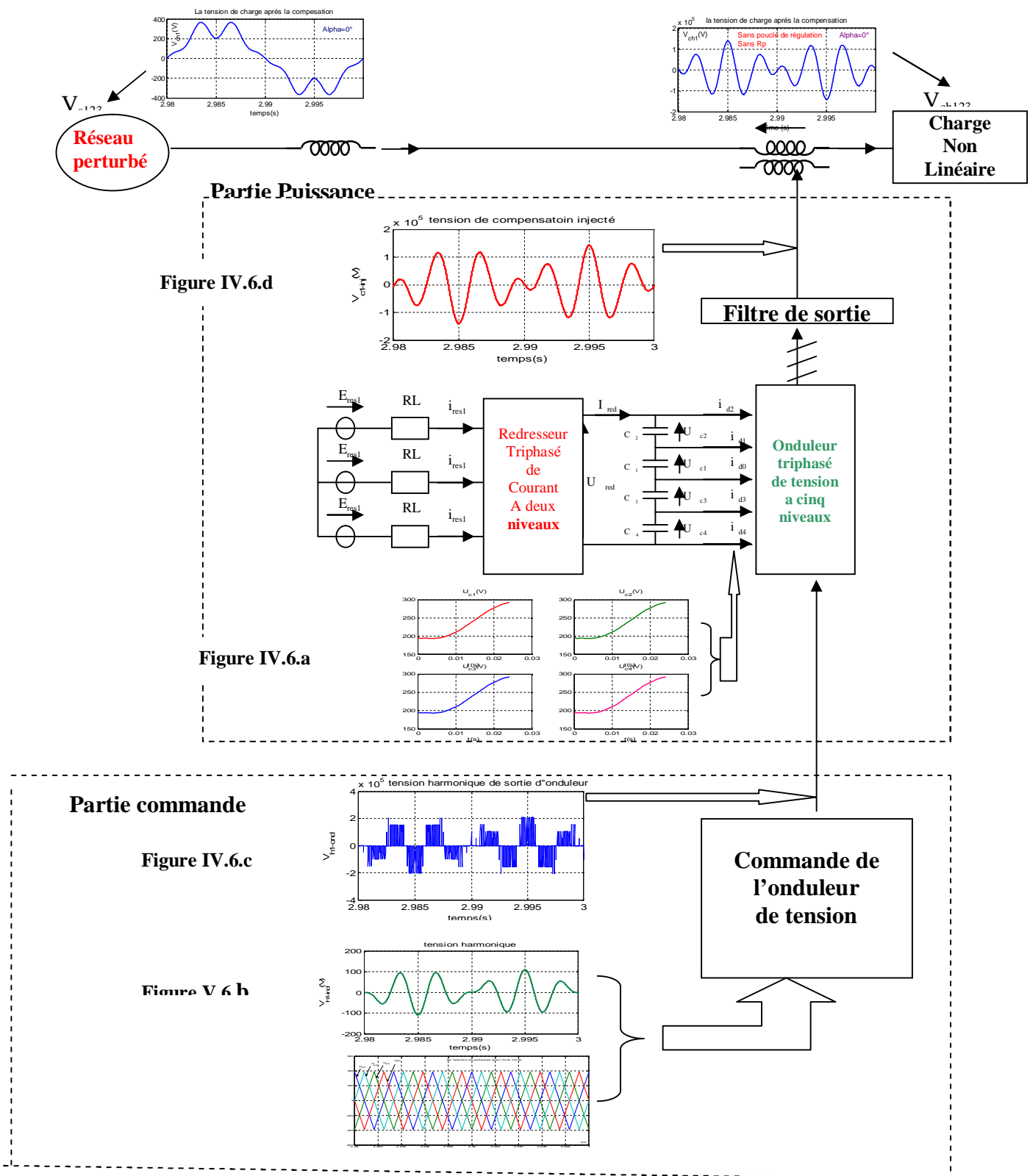


Figure (IV.6): l'alimentation et stratégie de commande de l'onduleur pour asservi le compensateur actif sérié

Résultats de simulation :

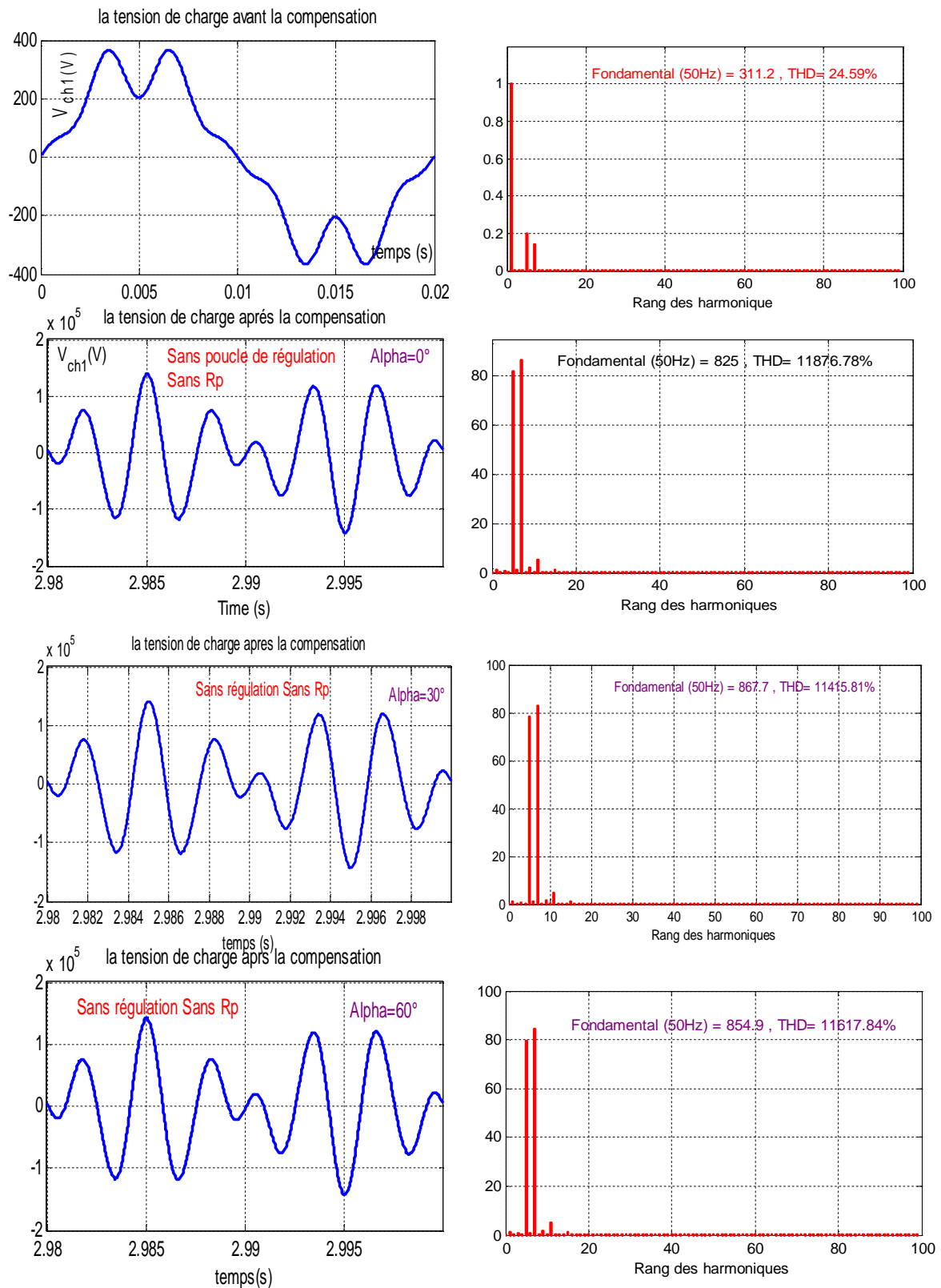


Figure (IV.7) : la tension de charge avant et après la compensation pour $\text{Alpha} = \{0^\circ, 30^\circ, 60^\circ\}$

Alpha=0

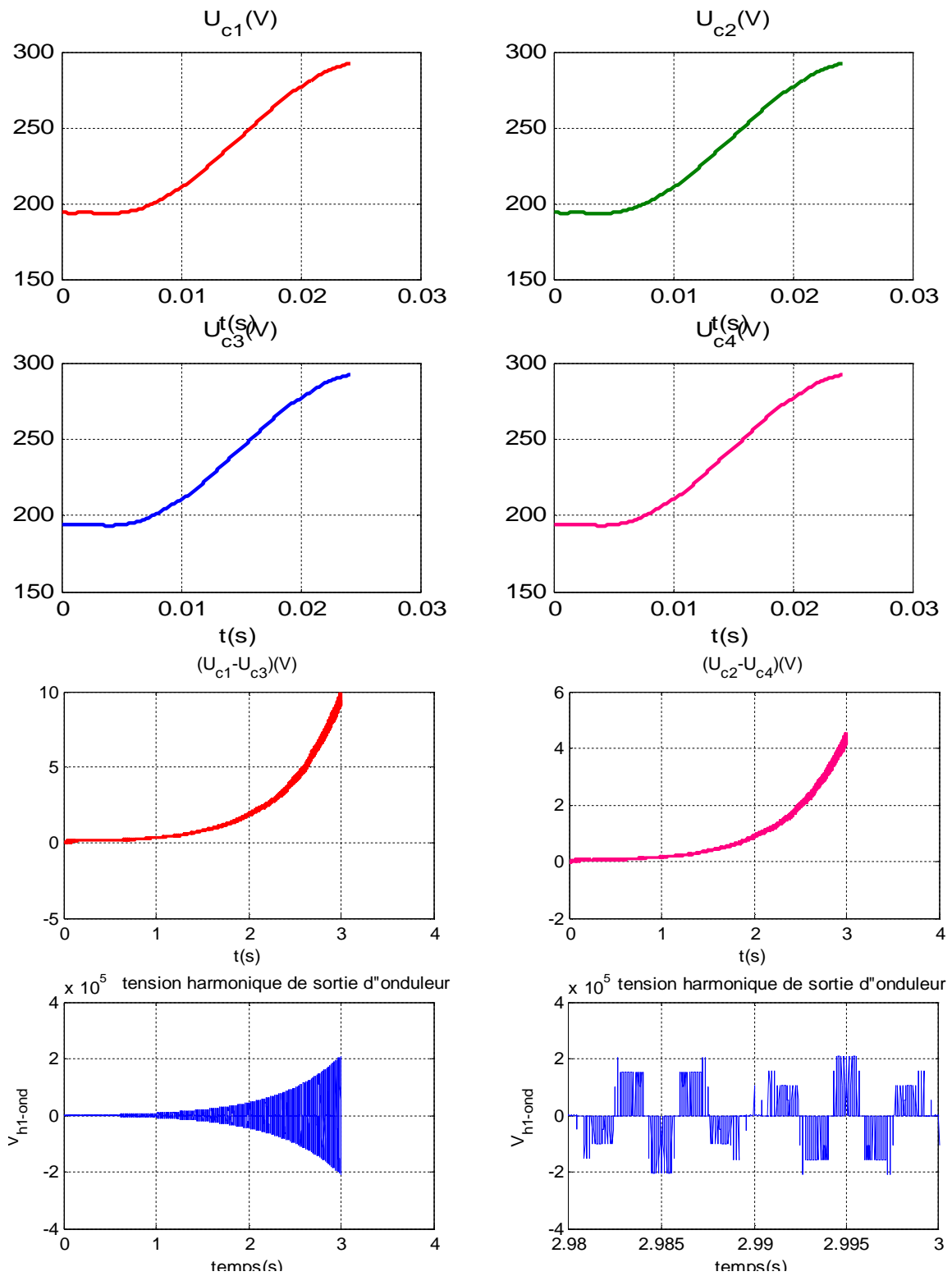


Figure IV.8 : les tensions d'alimentation de l'onduleur à cinq niveaux et sa tension de sortie pour Alpha=0°

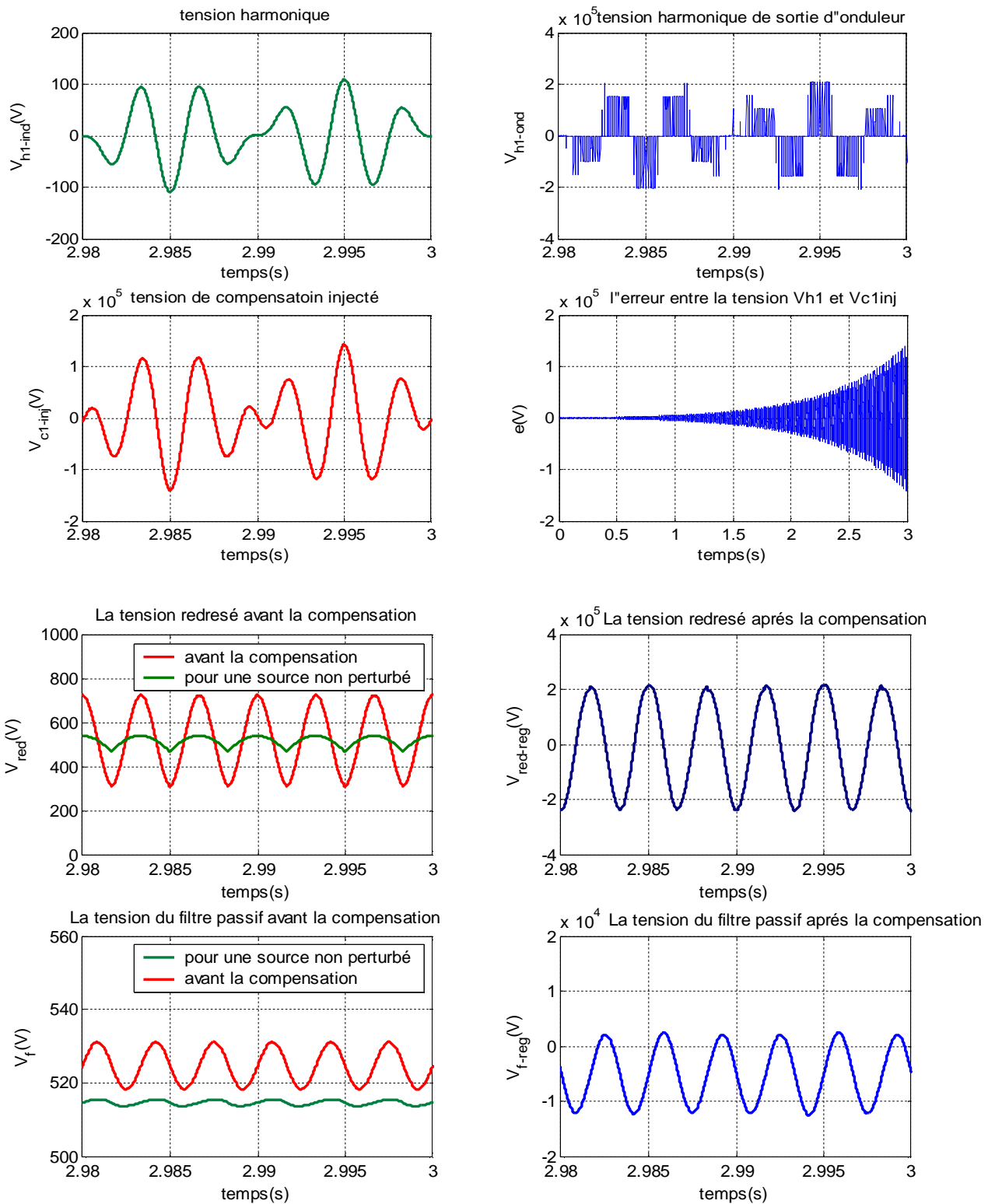


Figure (IV.9): Les grandeurs simulées pour $\alpha=0^\circ$

Alpha=30

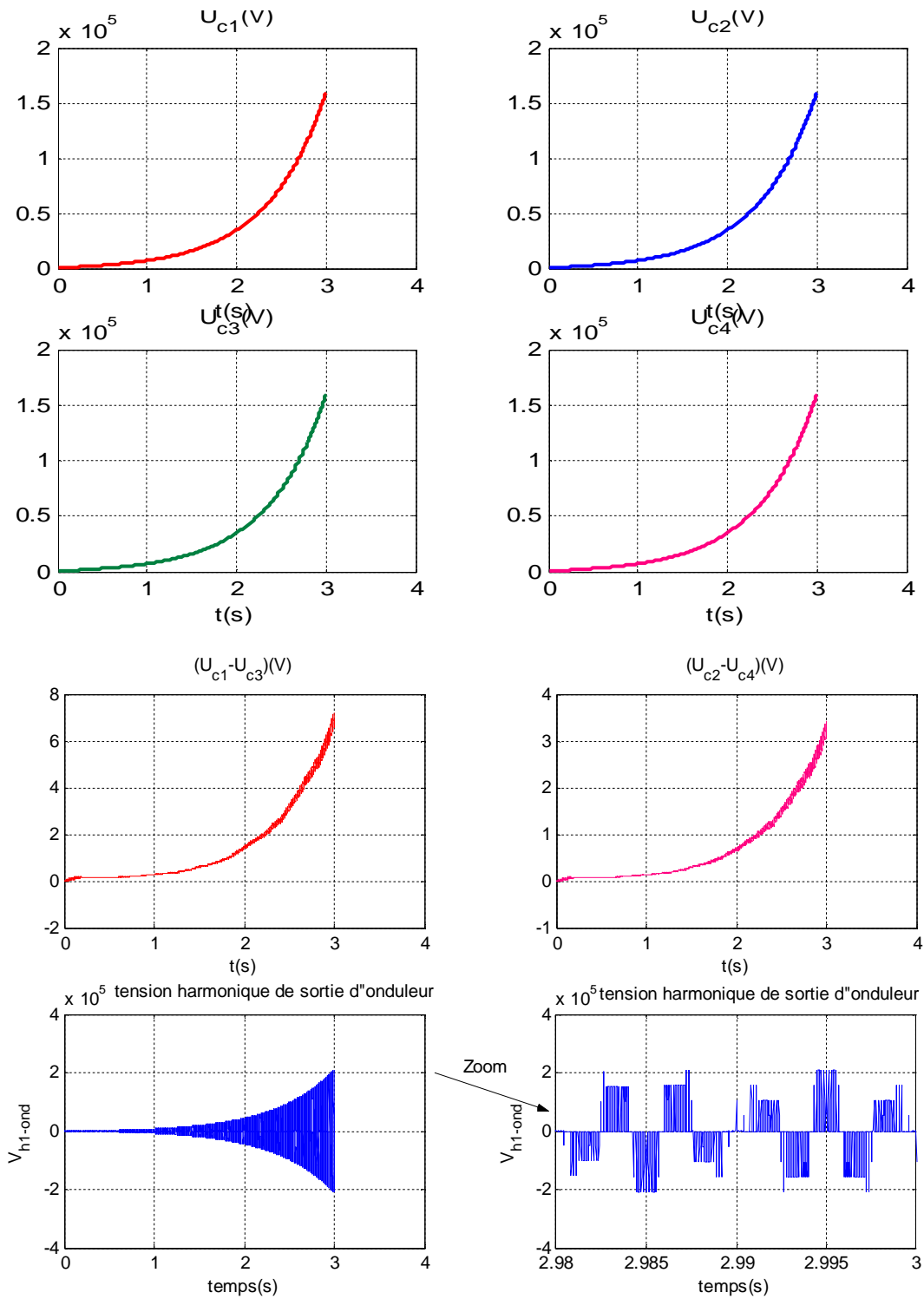


Figure (IV.10) : les tensions d'alimentation de l'onduleur à cinq niveaux et sa tension de sortie pour Alpha=30°

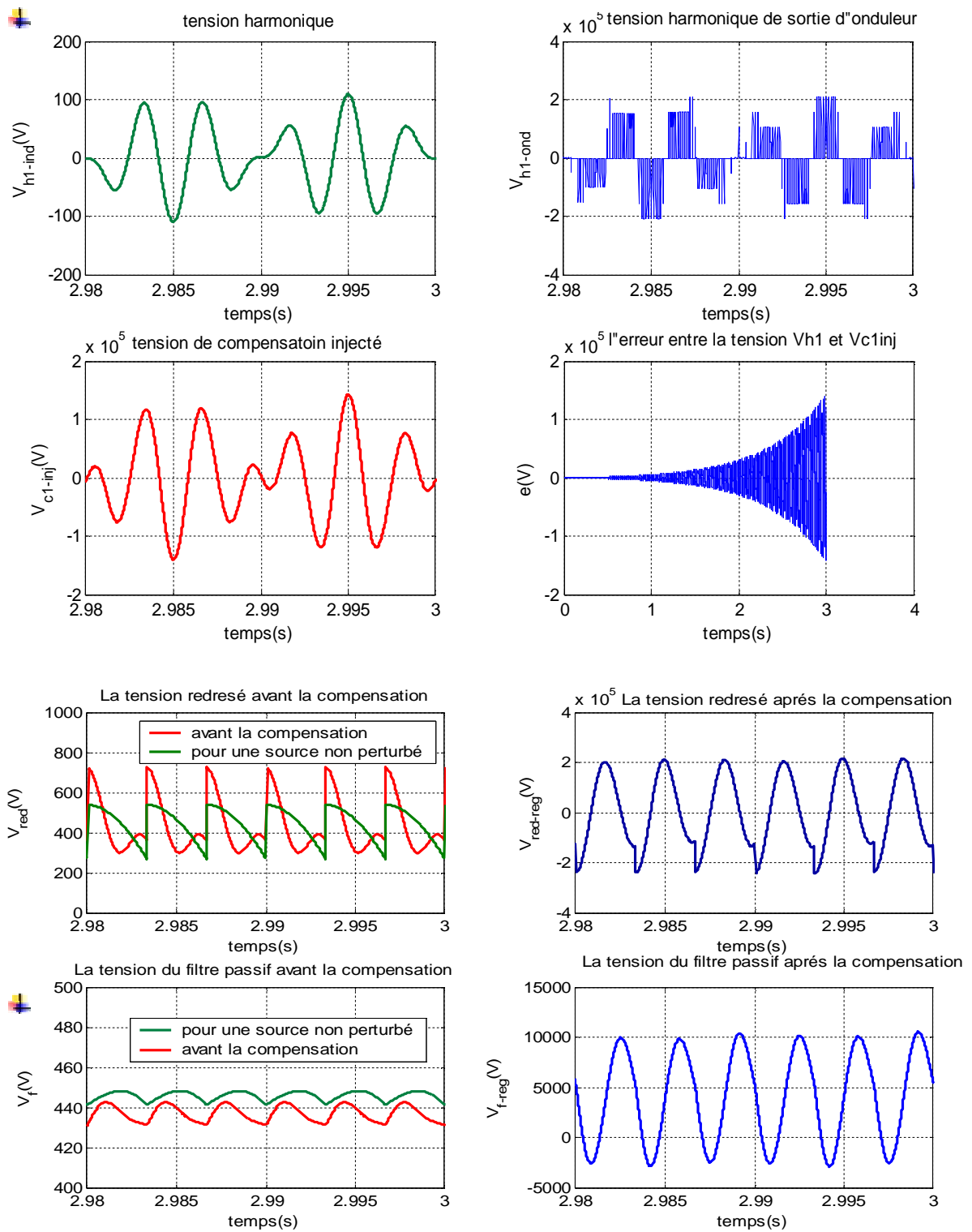


Figure (V.11): Les grandeurs simulées pour $\text{Alpha}=30^\circ$

Alpha=60

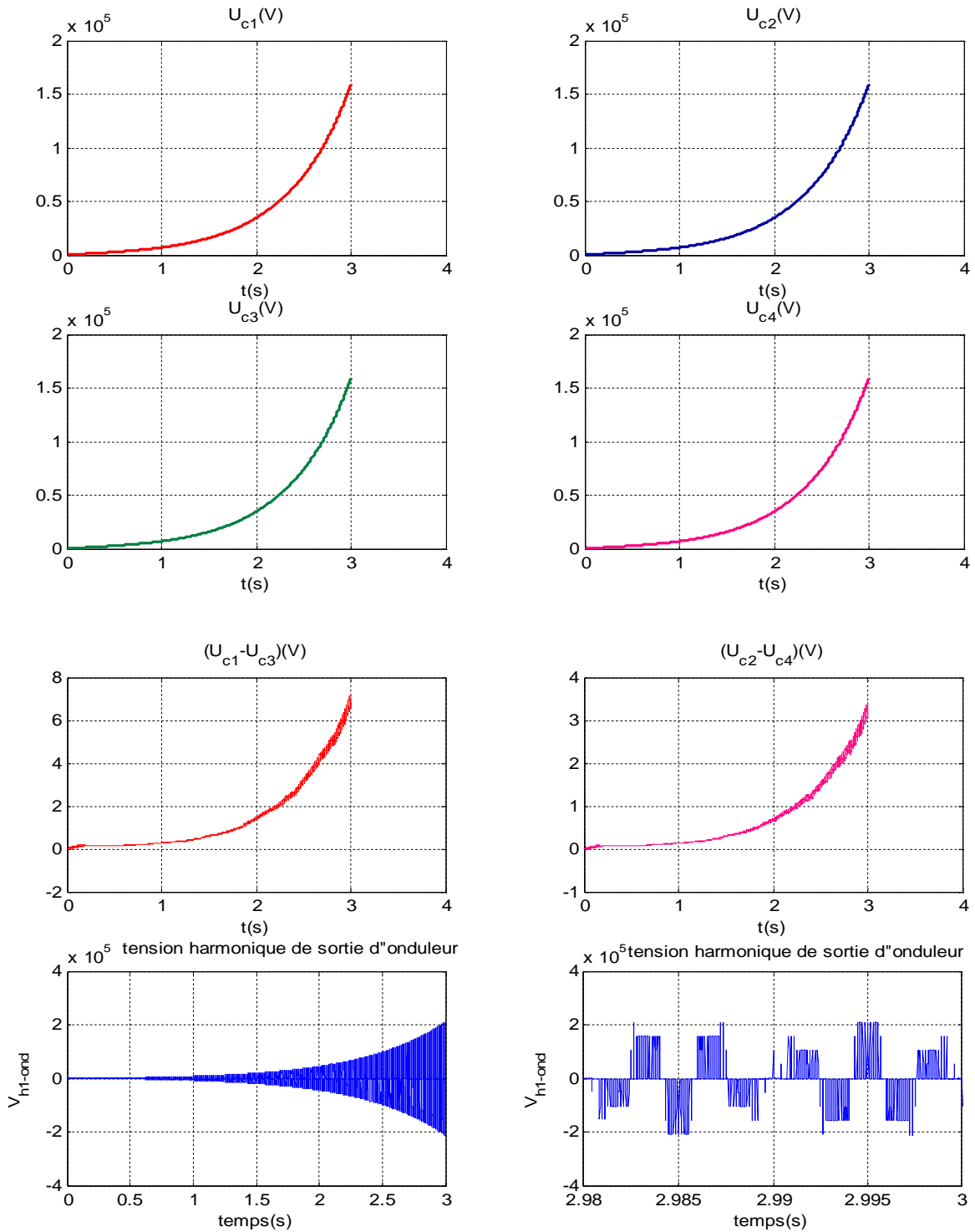


Figure (IV.12) : les tensions d'alimentation de l'onduleur à cinq niveaux et sa tension de sortie pour $\text{Alpha}=60^\circ$

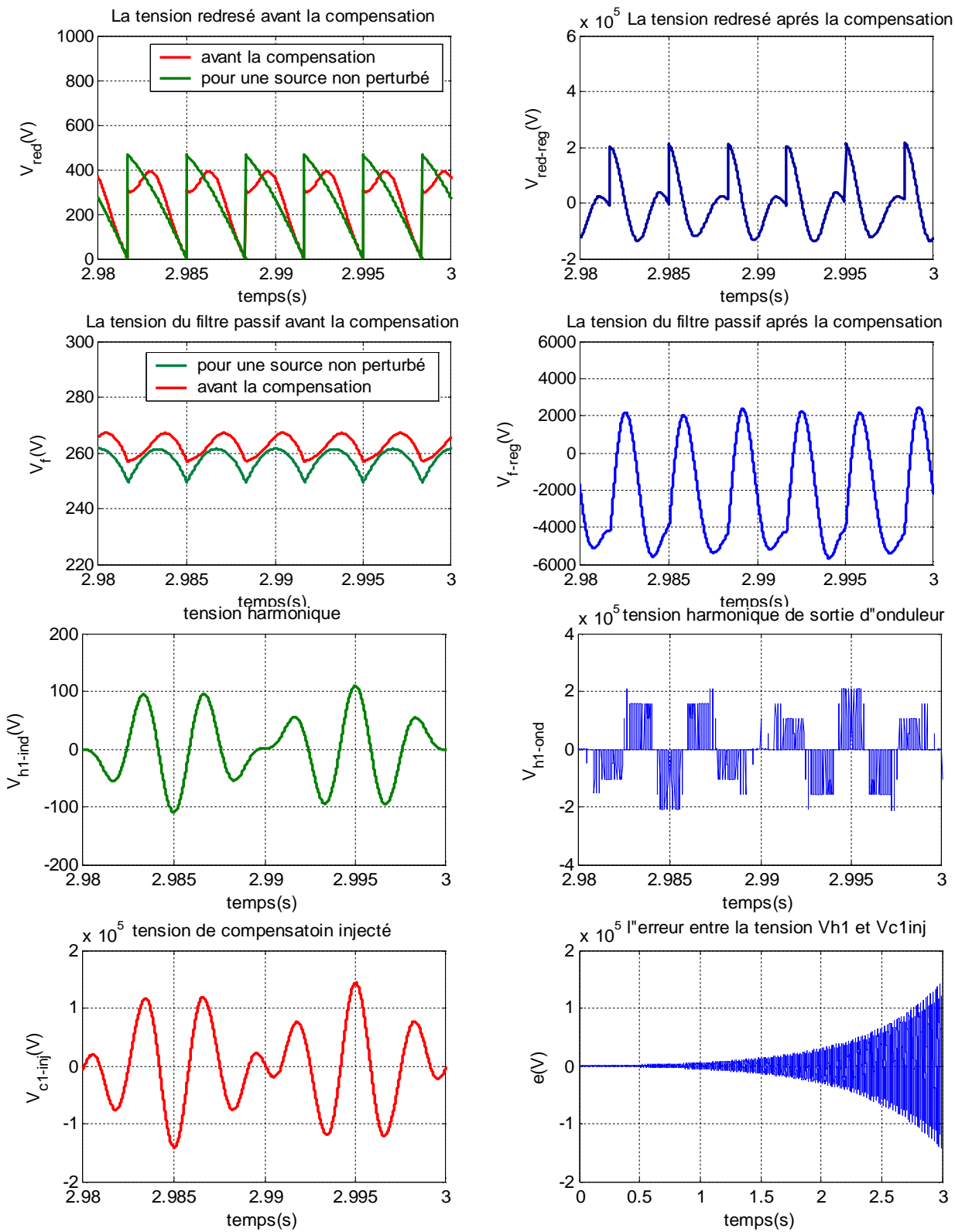


Figure (IV.13): Les grandeurs simulées pour $\text{Alpha}=60^\circ$

Interprétation :

Le compensateur actif série est commandé par la stratégie de commande triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires algorithme 1. On applique pour une charge non linéaire constituée d'un redresseur triphasé à base de thyristors alimenté par une source de tension perturbée a cause des harmoniques d'ordre 5 et 7

On remarque que la tension de sortie de l'onduleur a cinq niveaux n'est plus une image de sa tension d'entrée qui est une tension harmonique identifiée par le bloc d'identification, puisque les tensions d'alimentation de l'onduleur à cinq niveaux $U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}, U_{c4}$ sont des tensions variables et croissantes, la tension de sortie de l'onduleur a cinq niveaux est alors aussi variables et croissantes et prend des valeur élevée (d'ordre 10^5), ce ci donne une tension harmonique injectée (V_{c1inj}) élevée (d'ordre 10^5) et une erreur entre la tension identifiée (V_{hl}) et la tension de compensation injectée (V_{c1inj}) élevée.

- ✚ Il y a une différence remarquable entre la tension harmonique identifiée et la tension de compensation injectée.
- ✚ La tension redressée après la compensation est très loin de celle d'une source non perturbée.
- ✚ La tension de sortie du filtre passif après la compensation très loin de celle d'une source non perturbée.

On constate que la tension de charge après la compensation n'est plus sinusoïdale (elle prend une forme proche de la forme de la tension harmonique identifiée).

La solution de ce problème peut être réalisé selon trois chemins :

- ✚ Soit par la correction des tensions d'alimentation de l'onduleur à cinq niveaux $U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}, U_{c4}$ par un pont d'équilibrage (pont de clamping) ;
- ✚ Soit par la correction des tensions harmoniques a la sortie de l'onduleur pour qu'il soit plus proche de la tension identifiée (les tensions d'entre de référence) ce ci avec un régulateur PI ou d'autres régulateurs ;
- ✚ Soit par les deux solutions précédentes.

IV.2 Pont de clamping

Afin d'améliorer les tensions d'entrée de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC et par conséquent améliorer la compensation des tension harmoniques en minimisant le déséquilibre entre les tensions U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} et U_{c4} on propose l'utilisation d'un pont d'équilibrage (pont de clamping) [AKA-1986] [OU A-2005] [LEO-2005], On va shunter chaque condensateur par un transistor T_i et une résistance R_p (figure.(IV.14)).

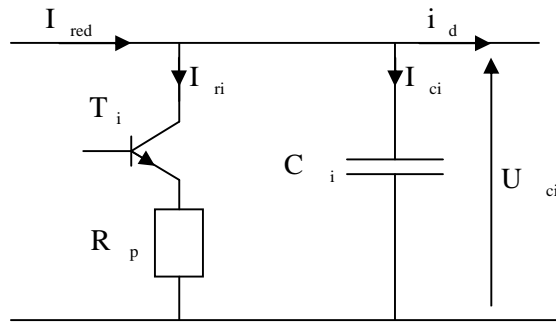


Figure (IV.14) : Structure du pont de clamping

Pour toutes les cascades utilisées, on définit

$$\begin{cases} I_{r1} = \frac{U_{c1}}{R_p} \\ I_{r2} = \frac{U_{c2}}{R_p} \\ I_{r3} = \frac{U_{c3}}{R_p} \\ I_{r4} = \frac{U_{c4}}{R_p} \end{cases} \quad (IV.9)$$

L'algorithme de commande du pont est le suivant :

$$\begin{cases} \Delta U_{12} > 0 \Rightarrow I_{r1} = 0 \& I_{r2} \neq 0 \dots\dots\dots (T_1 = 0 \& T_2 = 1) \\ \Delta U_{12} < 0 \Rightarrow I_{r1} \neq 0 \& I_{r2} = 0 \dots\dots\dots (T_1 = 1 \& T_2 = 0) \end{cases} \quad (IV.10)$$

$$\begin{cases} \Delta U_{34} > 0 \Rightarrow I_{r3} = 0 \& I_{r4} \neq 0 \dots\dots\dots (T_3 = 0 \& T_4 = 1) \\ \Delta U_{34} < 0 \Rightarrow I_{r3} \neq 0 \& I_{r4} = 0 \dots\dots\dots (T_3 = 1 \& T_4 = 0) \end{cases}$$

Avec :

$$\begin{cases} \Delta U_{12} = U_{c1} - U_{c2} \\ \Delta U_{34} = U_{c3} - U_{c4} \end{cases} \quad (IV.11)$$

La structure du pont de clamping est donnée par la figure (IV.15)

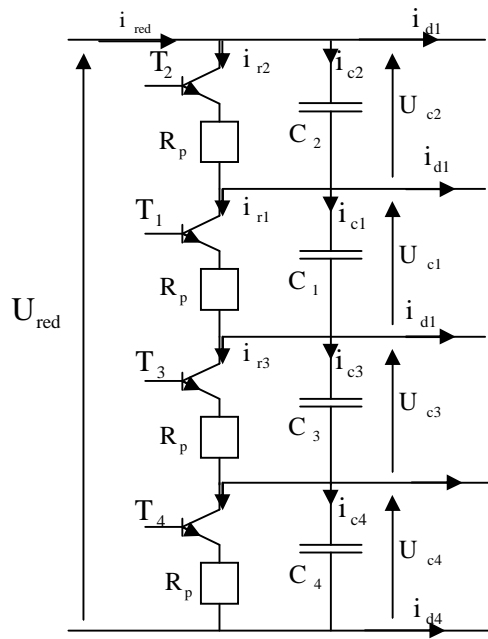


Figure (IV.15) : Structure de pont de clamping pour le cas d'un redresseur à deux niveaux

Le modèle du pont de clamping est comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = I_{red} - I_{r1} - i_{d1} - i_{d2} \\ C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = I_{red} - I_{r2} - i_{d2} \\ C_3 \frac{dU_{c3}}{dt} = I_{red} - I_{r3} + i_{d3} + i_{d4} \\ C_4 \frac{dU_{c4}}{dt} = I_{red} - I_{r4} + i_{d4} \end{array} \right. \quad (IV.12)$$

Les paramètres du pont de clamping sont :

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 20mF$$

$$R_p = 1\Omega$$

Résultats de simulation

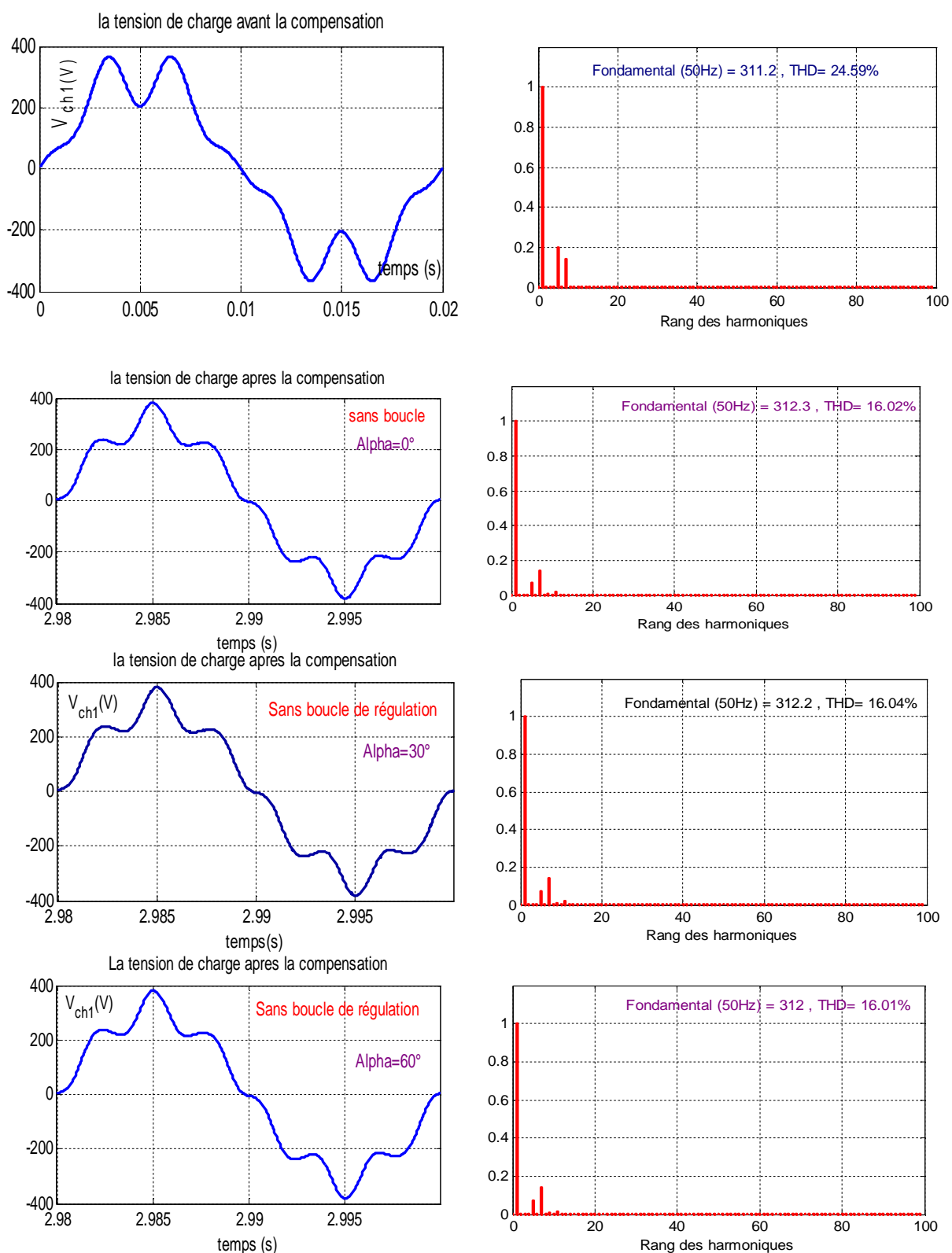


Figure (IV.16) : la tension de charge avant et après la compensation pour $\text{Alpha} = \{0^\circ, 30^\circ, 60^\circ\}$ (avec un pont de clamping)

Alpha=0°

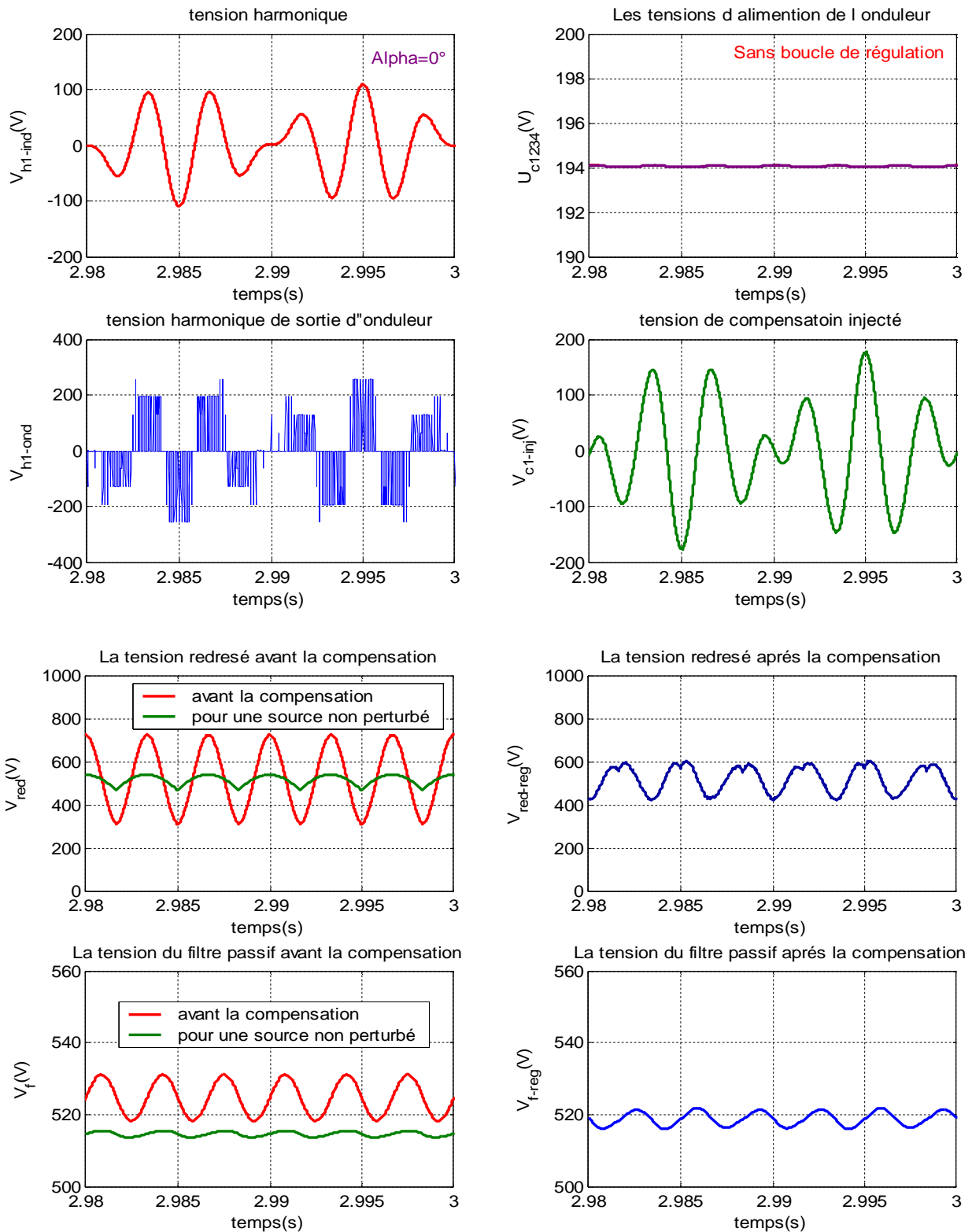


Figure (IV.17): Les grandeurs simulées pour $\alpha = 0^\circ$ (avec pont de clamping)

Alpha=30°

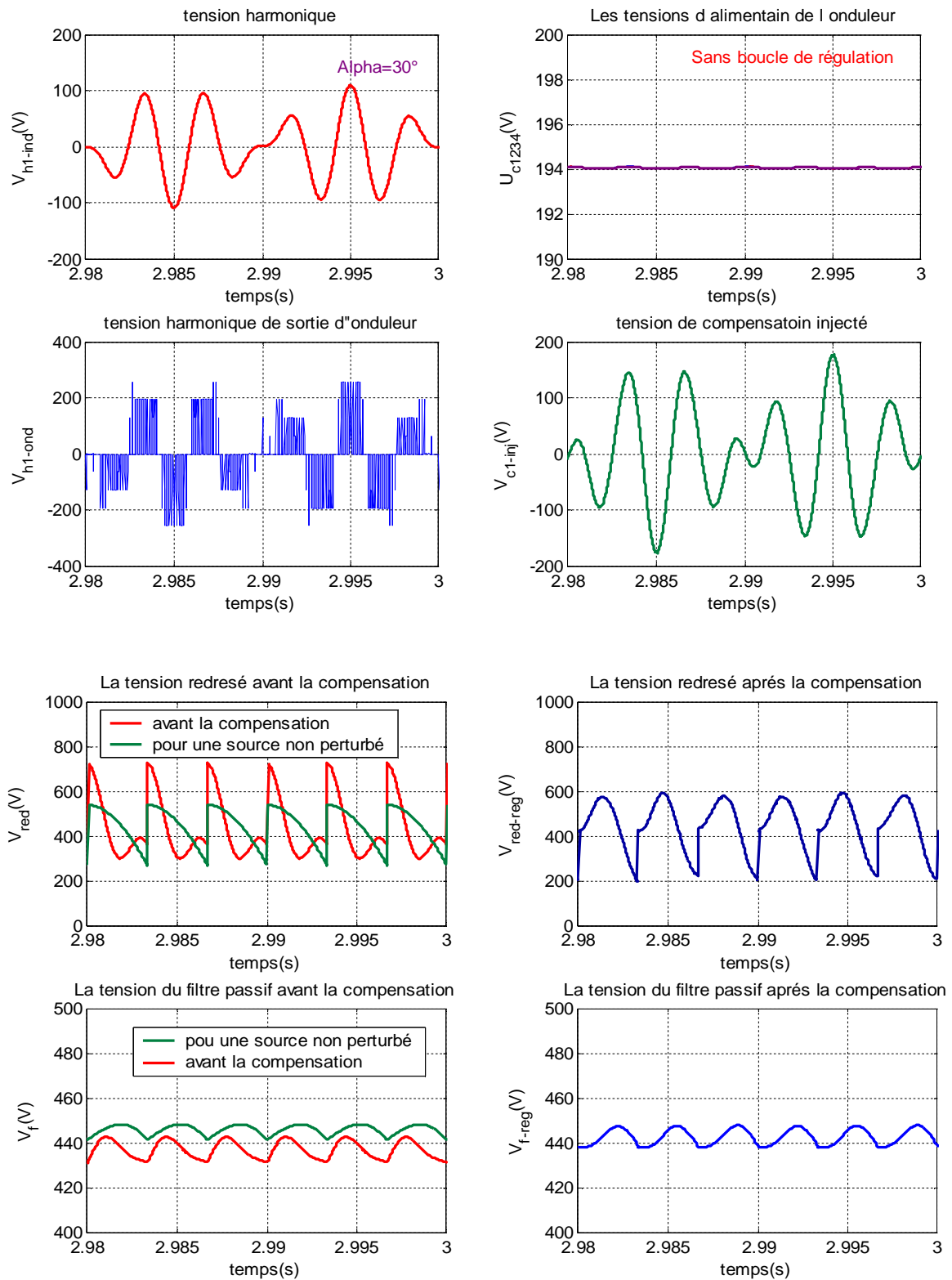


Figure (IV.18): Les grandeurs simulées pour Alpha=30° (avec pont de clamping)

Alpha=60°

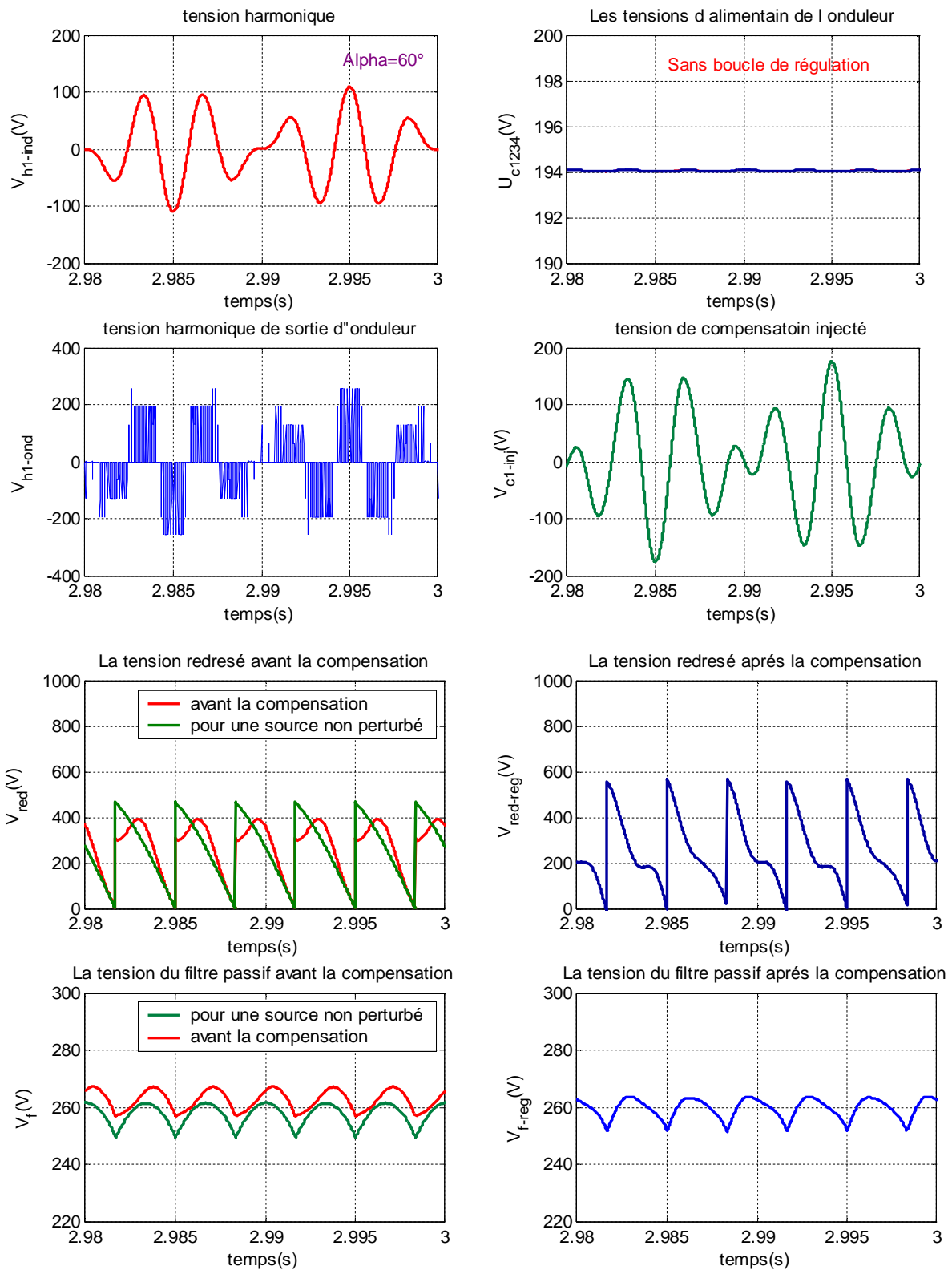


Figure (IV.19): Les grandeurs simulées pour Alpha=60° (avec pont de clamping)

Interprétation

Le compensateur actif série commandé par la stratégie de commande triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires algorithme 1. On l'applique pour une charge non linéaire constituée d'un redresseur triphasé à base de thyristors alimenté par une source de tension perturbée a cause des harmoniques d'ordre 5 et 7

On remarque :

- ✚ les tensions d'alimentation de l'onduleur à cinq niveaux $U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}, U_{c4}$ sont des tensions stables, la tension de sortie de l'onduleur à cinq niveaux est alors aussi stable (194V)
- ✚ Il y a une différence remarquable entre la tension harmonique identifiée et la tension de compensation injectée.
- ✚ La tension redressée après la compensation se rapproche de celle d'une source non perturbée
- ✚ La tension du sortie du filtre passif après la compensation se rapproche de celle d'une source non perturbée

Ce ci donne une amélioration de la forme de tension de charge et une diminution du taux de distorsion harmonique de 24.59% a 16.02% (c'est une amélioration de 40%), mais ces résultats peuvent être améliorer si on ajoute au système étudié un régulateur PI.

IV.3 Etude en boucle fermé

IV.3.1 Etude de la boucle de régulation

Après avoir identifier les tensions perturbatrices et afin d'assurer une injection rapide, précise et robuste de ces tensions, plusieurs méthodes de régulation de la tension de sortie de l'onduleur ont été proposées dans la littérature [ALA-2002]

Dans ce chapitre, et a fin de réaliser les objectifs de régulation, un régulateur PI a été étudié. Les problèmes ainsi que les limites de ce régulateur ont été analysées figure (IV.20).

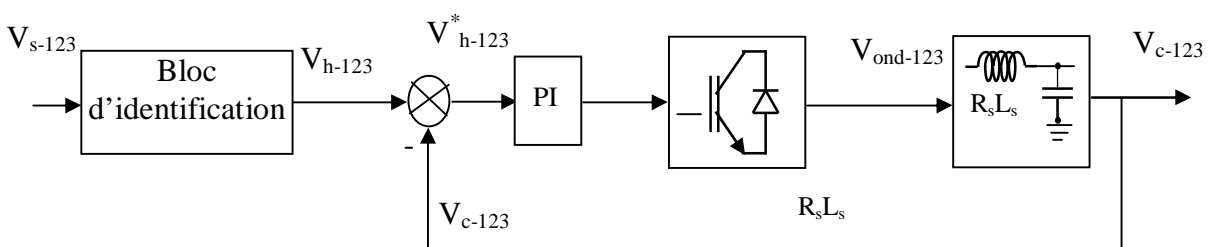


Figure (IV.20) : Emplacement du bloc de régulation

IV.3.2 Modélisation de l'onduleur de tension muni de son Filtre LC

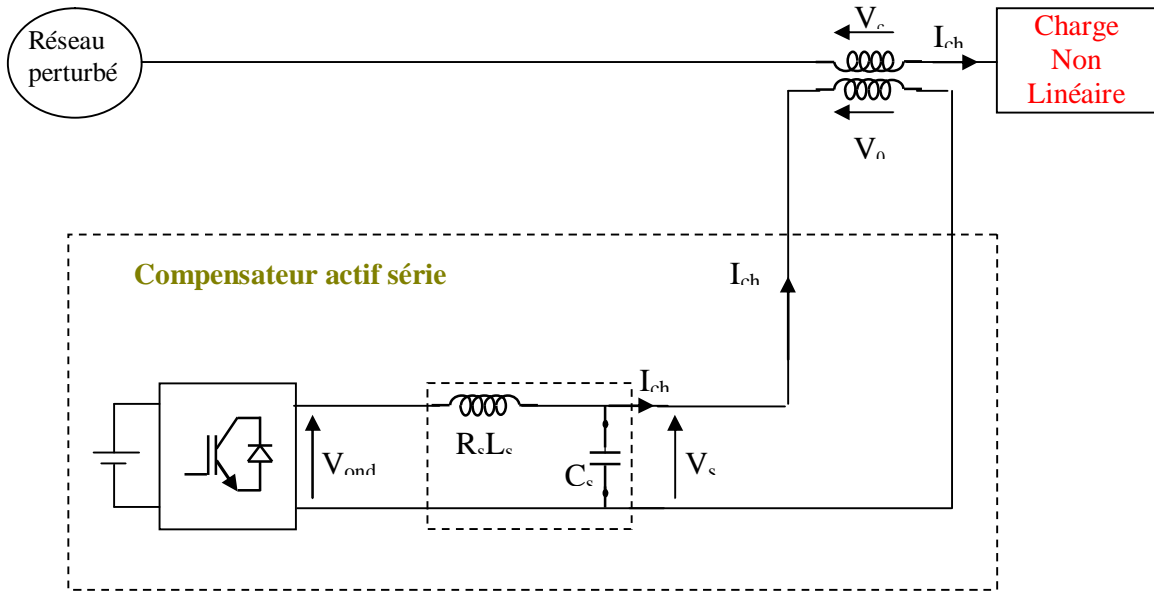


Figure (IV.21) : Model simplifiés d'un réseau perturbé associée d'un compensateur actif série

Le filtre de sortie d'un *compensateur actif série* est généralement un filtre passif du deuxième ordre (L_{sf}, R_{sf}, C_{sf}), comme le montre la figure (IV.21) et la figure (IV.22).

L'ensemble onduleur et filtre de sortie se comportant comme une source de tension, le filtre de sortie sert d'une part à atténuer les composantes dues aux commutations de l'onduleur, d'autre part à connecter le filtre actif au réseau électrique.

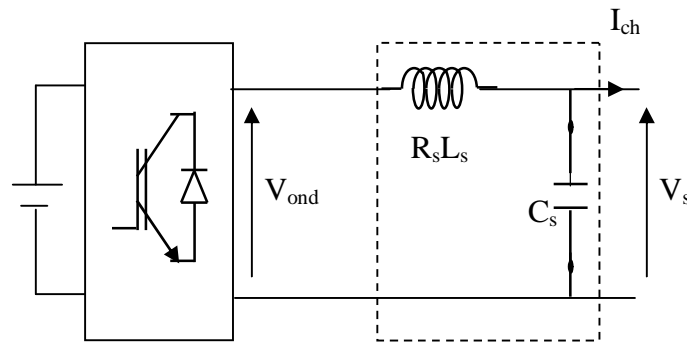


Figure (IV.22) : model simplifié d'un onduleur et filtre de sortie

Le système de la figure (IV.22) peut être modélisé en monophasé comme suit :

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + B_1 v(t) + B_2 I_{ch}(t) \quad (IV.1)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dI}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{fs}}{L_{fs}} & -\frac{1}{L_{fs}} \\ \frac{1}{C_{fs}} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{fs}} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot v_t + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_{fs}} \end{bmatrix} I_{ch}$$

(IV.2)

L'entrée du système est la tension de l'onduleur $V_t(t)$, $V_c(t)$ est la tension aux bornes du condensateur C_{fs} et I_{ch} est le courant de la charge à protéger qui se comporte comme une perturbation. La fonction de transfert du système est:

$$V_c(p) = \frac{1}{1 + R_{fs} C_{fs} p + L_{fs} C_{fs} p^2} V_t(p) + \frac{L_{fs} p + R_{fs}}{1 + R_{fs} C_{fs} p + L_{fs} C_{fs} p^2} I_{ch}(p) \quad (IV.3)$$

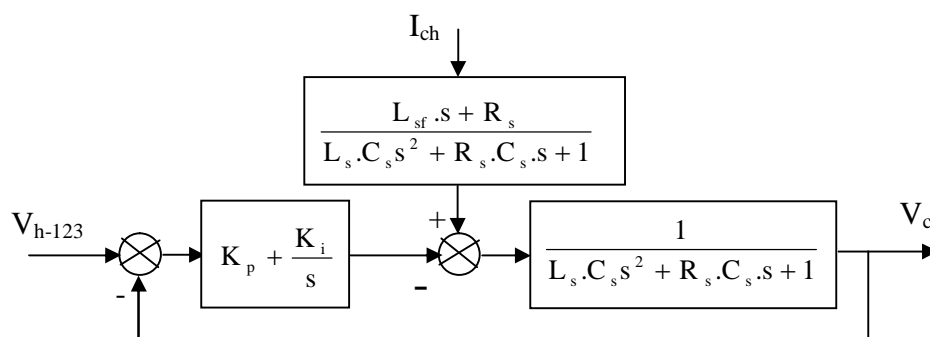


Figure (IV.23) : Modélisation du bloc de régulation

IV.3.3 Calcul des paramètres de régulateur PI

On utilise un régulateur PI conformément à la figure.

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

$$\frac{V_{inj}}{V_{ref}} = \frac{K_i}{L_{sf} C_{sf}} \cdot \frac{1 + \frac{K_p}{K_i} s}{s^3 + \frac{R_{sf}}{L_{sf}} s^2 + \frac{K_i}{L_{sf} C_{sf}}} \quad (IV.4)$$

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

Stratégie de la commande par placement de pôles :

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

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

On a inséré un régulateur PI dans la boucle de régulation, le schéma structurel en boucle fermée est montré dans la figure (IV.20)

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\frac{V_{inj}}{V_{ref}} = \frac{K_i}{L_{sf} C_{sf}} \cdot \frac{1 + \frac{K_p}{K_i} s}{s^3 + \frac{R_{sf}}{L_{sf}} s^2 + \frac{K_i}{L_{sf} C_{sf}}} = \frac{N(s)}{D(s)} = P(s) \quad (IV.5)$$

Avec :

$N(s)$: Le numérateur

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

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

On choisit deux pôles complexes conjugués P_1 et P_2 et de troisième P_3 réelle pour obtenir un bon amortissement, la racine réelle égale à partie réelle des racines complexes (figure (IV.5))

On obtient :

$$\begin{cases} P_1 = -\rho + j\rho \\ P_2 = -\rho - j\rho \\ P_3 = -\rho \end{cases} \quad (IV.6)$$

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

$$D(s) = (s - P_1)(s - P_2)(s - P_3) \quad (IV.7)$$

Par identification des termes des polynômes (équation (V.6) et équation (V.7)), on obtient :

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

Avec :

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

Pour chaque valeur de ρ on calcule les valeurs de K_p et K_i

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

Tableau (IV.1) : Choix de K_p et K_i

Permes les valeurs montré dans le tableau précédant on utilise dans les valeur suivant

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

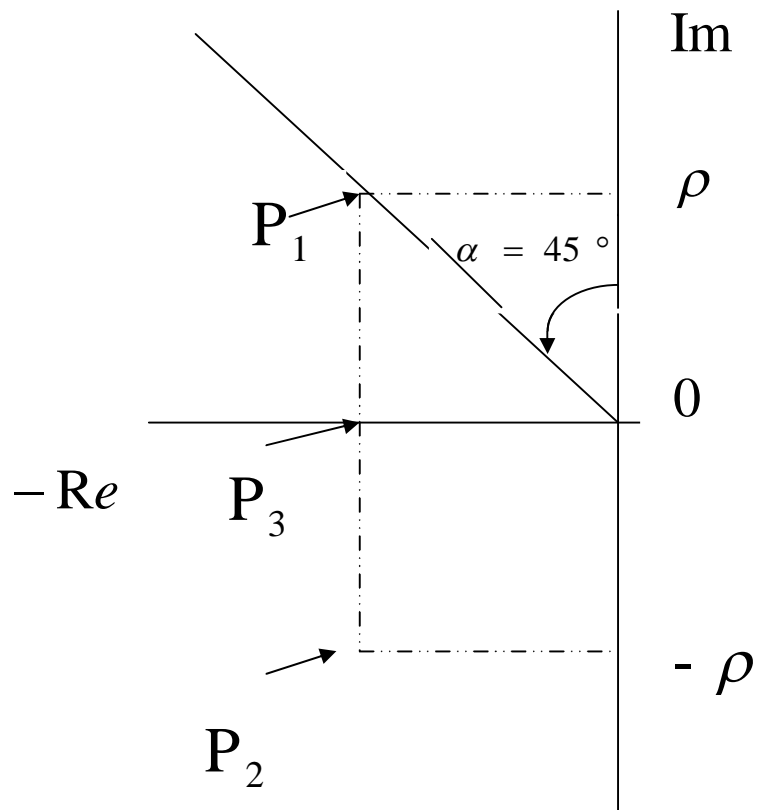


Figure (IV.24): stratégie de placement de pôles de $D(s)$

Résultats de simulation

L'onduleur est alimenté par quatre tensions continue et stable qui sont les quatre tensions de sortie d'un redresseur de courant à deux niveaux avec pont de clamping comme on a montré (figure IV.25.a)

Dans notre application les tensions de référence ne sont plus sinusoïdales ils sont les trois tensions de sortie du bloc de régulation comme il est montré dans la figure (IV.25.b), ces trois tensions sont comparées par quatre poresuses comme on a montré dans de chapitre III (Figure (III.10)).

La tension identifiée par la méthode des puissances réelles et imaginaire instantané (figure (IV.26.d) et réguler par un bloc de régulation suit ça référence à chaque instant (figure (IV.26.c))

La tension de sortie de ce bloc de régulation qui exprime évidemment la tension d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux, la sortie de l'onduleur est une image de cette tension, (figure (IV.26.b)).

Finalement la tension harmonique identifiée et régulée par le régulateur PI et injectée par l'onduleur doit être filtrer par un filtre passif RLC pour filtrer les harmoniques de hautes fréquences figure (IV.26.a).

La tension présentée dans la figure (IV.26.a) ajoutée à la tension du réseau perturbée figure (IV.26.e) mais de sens opposé pour améliorer la forme d'onde du tension de réseau ou bien autrement dit diminué le taux de distorsion harmonique dans la forme du tension de réseau pour qu'elle soit sinusoïdale figure (IV.26.f)

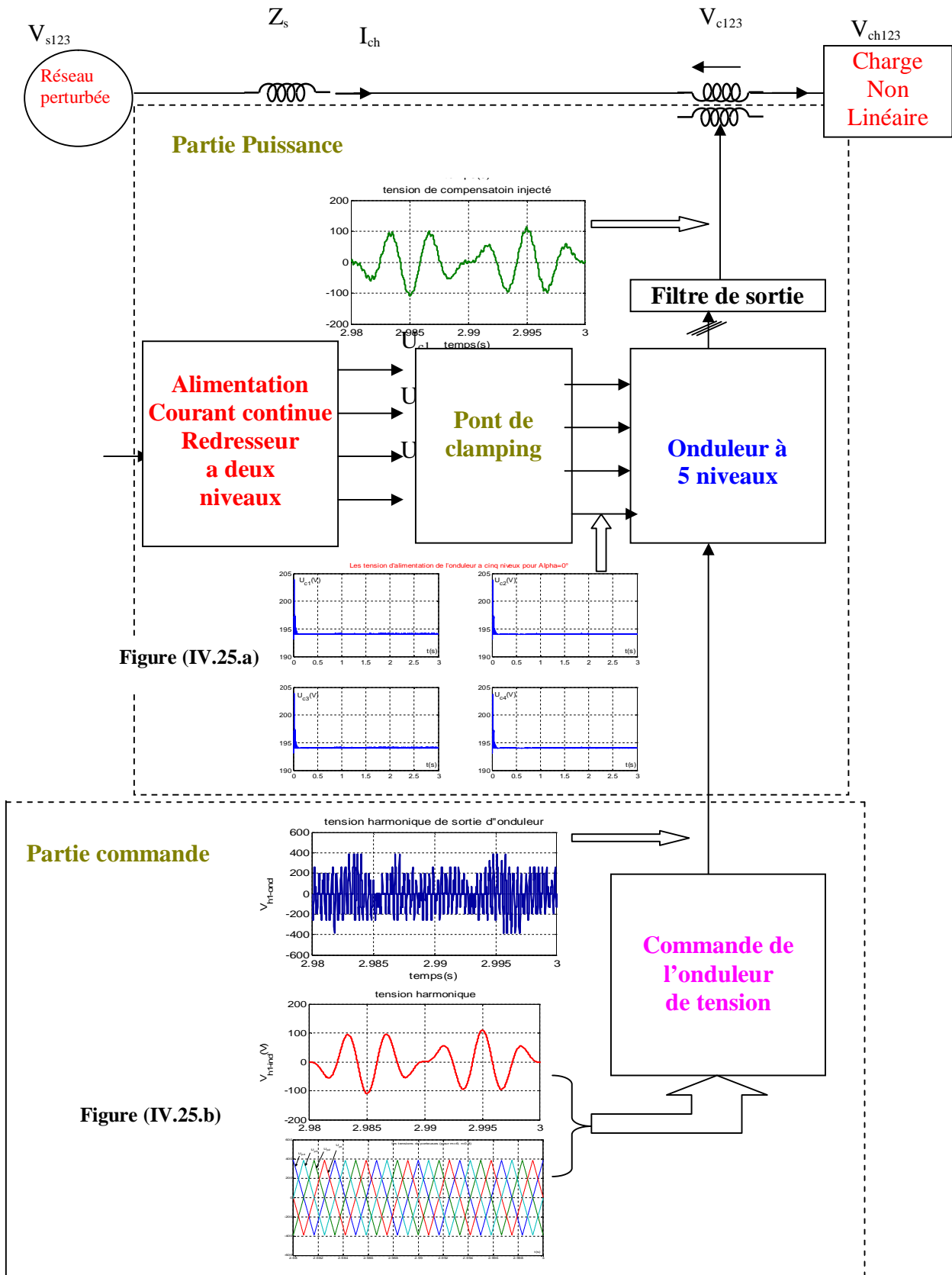


Figure (IV.25): l'alimentation et stratégie de commande de l'onduleur pour asservir le compensateur actif série

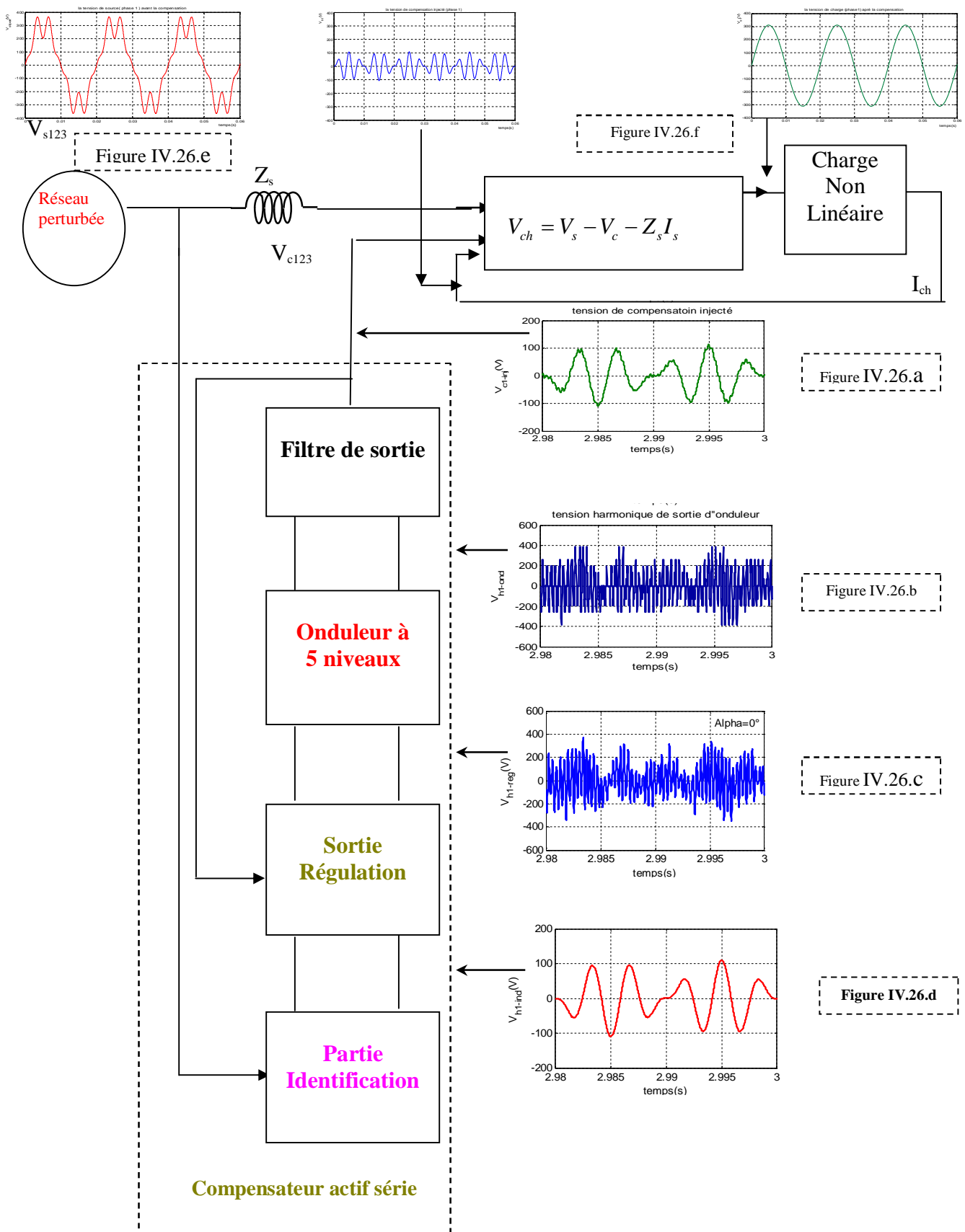


Figure (IV.26): les tensions de sortie de chaque bloc constituent le compensateur actif série

Résultats de simulation

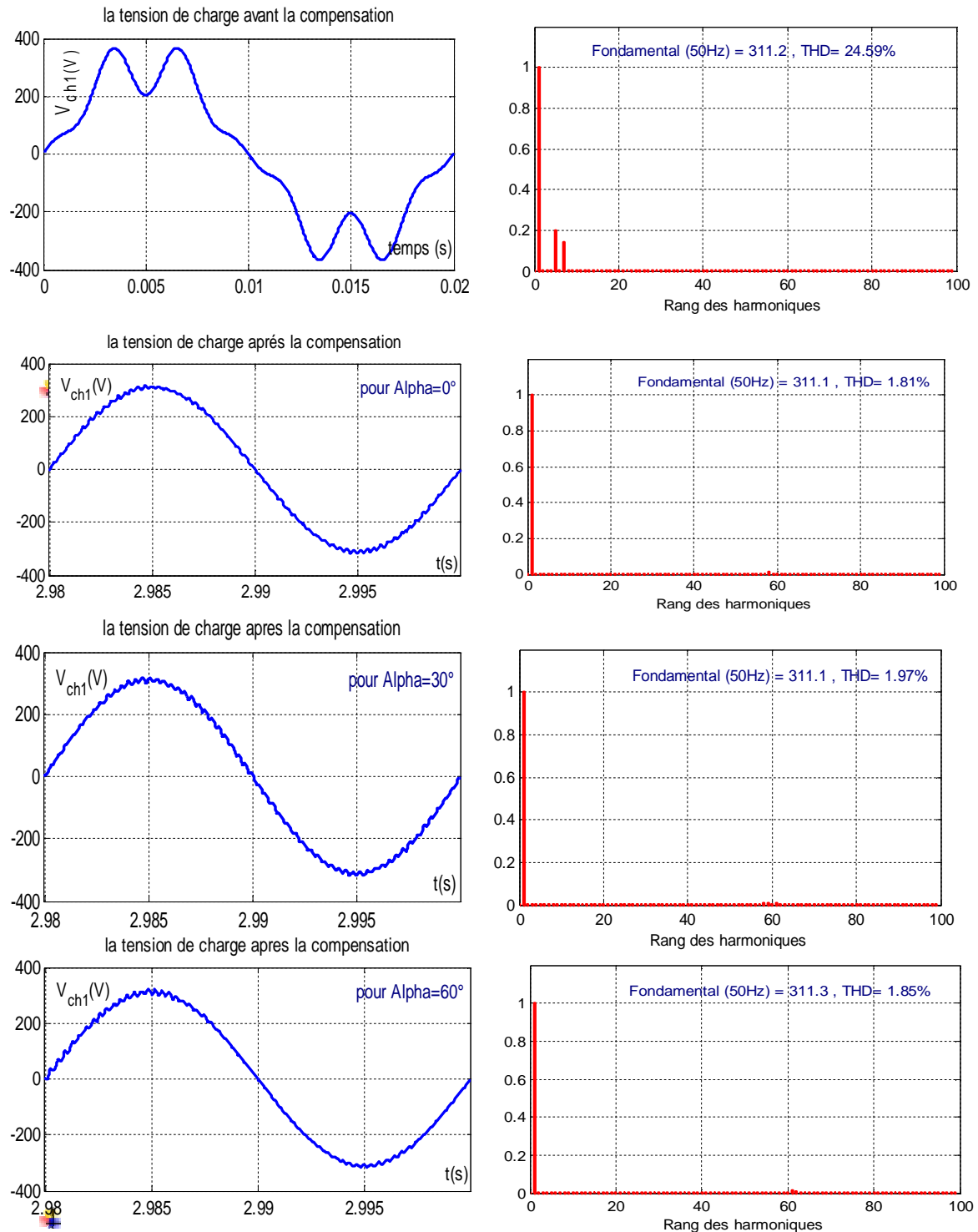


Figure (IV.27) : la tension de charge avant et après la compensation pour $\text{Alpha} = \{0^\circ, 30^\circ, 60^\circ\}$
(Commande en boucle fermée avec un pont de clamping)

Alpha=0°

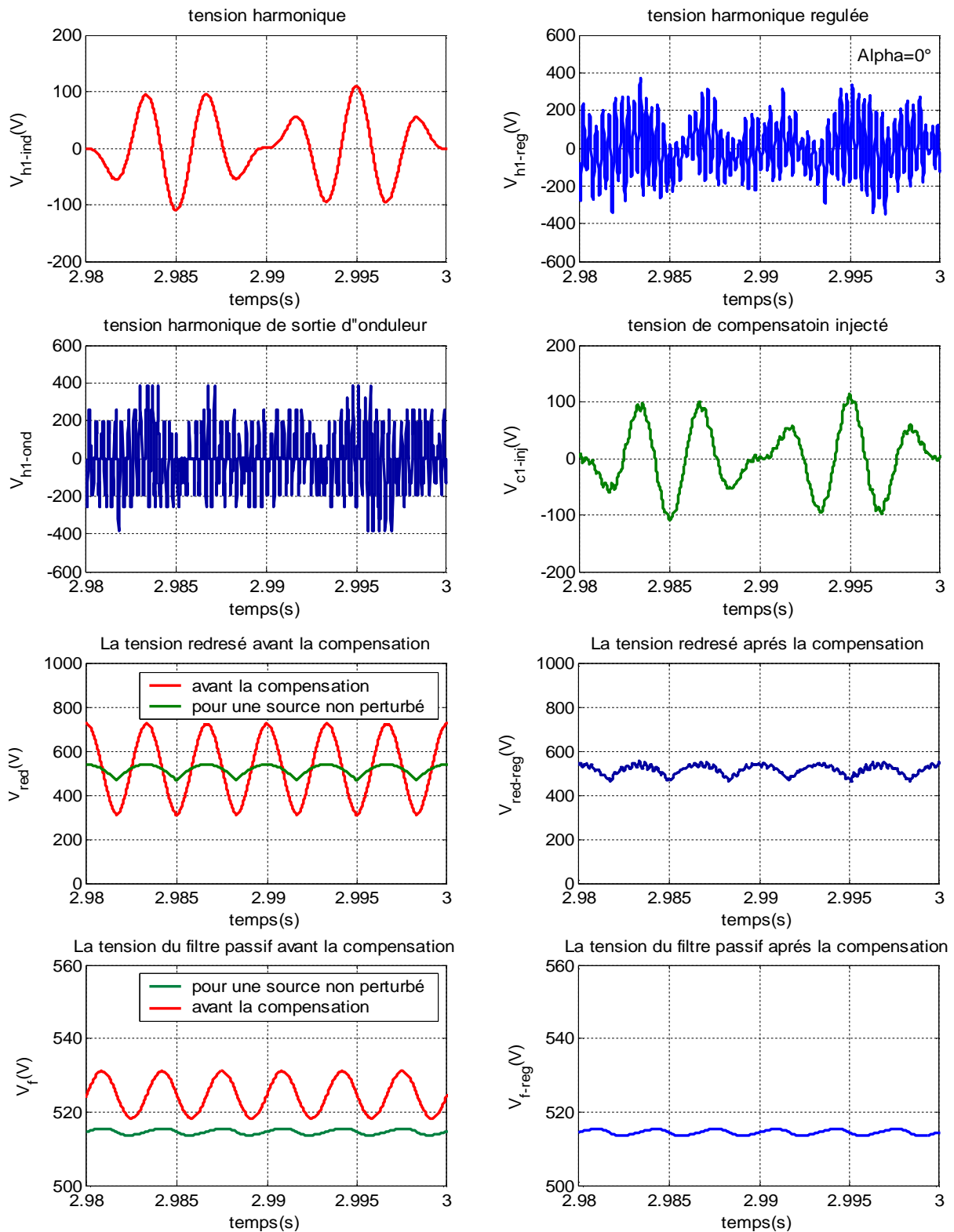


Figure (IV.28): Les grandeurs simulées pour $\text{Alpha}=0^\circ$
(Commande en boucle fermée avec pont de clamping)

Alpha=30°

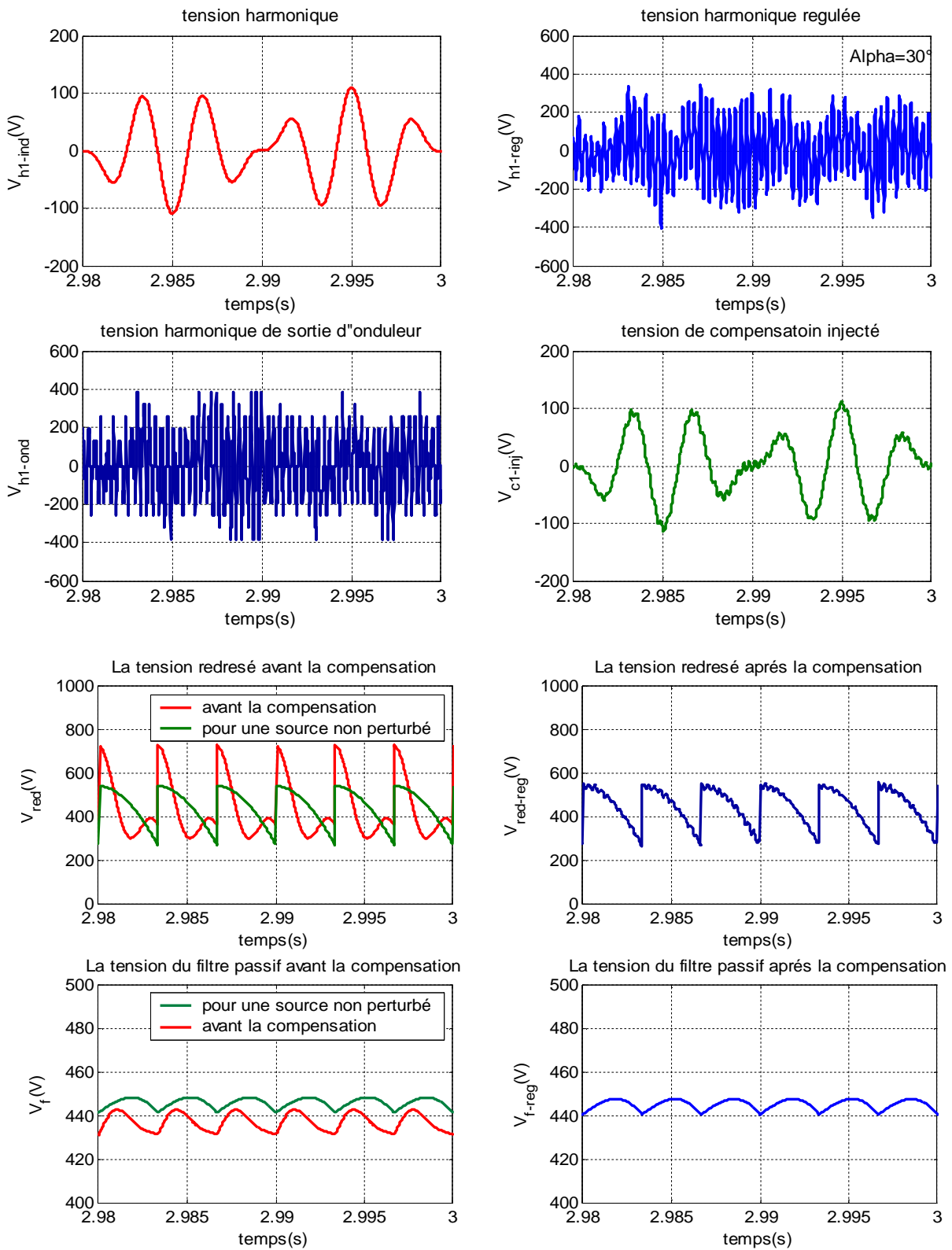


Figure (IV.29): Les grandeurs simulées pour Alpha=30°
(Commande en boucle fermée avec pont de clamping)

Alpha=60°

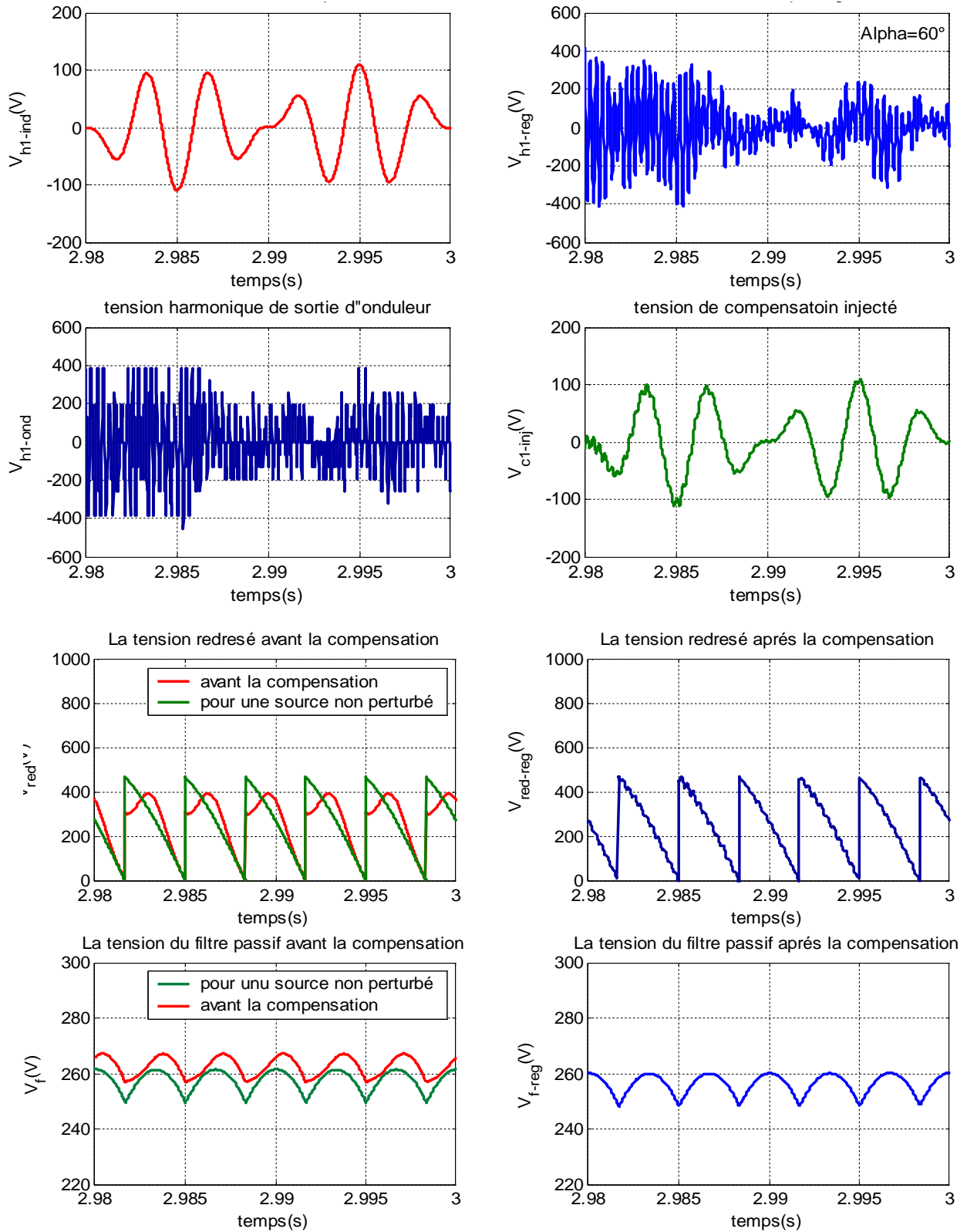


Figure (IV.30): Les grandeurs simulées pour Alpha=60°
(Commande en boucle fermée avec pont de clamping,)

Interprétation :

Le compensateur actif série est commandé par la stratégie de commande triangulo-sinusoidale à quatre porteuses triangulaires algorithme 1. On l'applique pour une charge non linéaire constituée d'un redresseur triphasé à base de thyristors alimenté par une source de tension perturbée à cause des harmoniques d'ordre 5 et 7

Les tensions d'alimentation de l'onduleur à cinq niveaux $U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}, U_{c4}$ sont des tensions stables, la tension de sortie de l'onduleur à cinq niveaux est alors aussi stable (194V)

On remarque :

- ✚ la tension harmonique identifiée se rapproche de la tension de compensation injectée
- ✚ La tension redressée après la compensation se rapproche de celle d'une source non perturbée.
- ✚ La tension de la sortie du filtre passif après la compensation se rapproche de celle d'une source non perturbée.

Ce ci donne une amélioration de la forme de tension de charge et une diminution du taux de distorsion harmonique de

24.59% à 1.81% pour Alpha=0°

24.59% à 1.97% pour Alpha=30° ;

24.59% à 1.85% pour Alpha=60° ;

On constate que le compensateur actif série avec un pont de rééquilibrage des tensions d'entrées de l'onduleur et commandé en boucle fermée par un régulateur PI donne une bonne compensation des tensions harmoniques (amélioration de 93%)

Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre une cascade d'un redresseur de courant triphasé à deux niveaux –Onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC et la stratégie de contrôle du redresseur à deux niveaux, on a montré le déséquilibre entre les tensions (U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} et U_{c4}) d'entrée de l'onduleur de tension à cinq niveaux et la variation de ces tensions et par la suite la variation des tensions de sortie de cet onduleur

Les résultats de simulation sous l'environnement MATLAB SIMULINK montrent que :

- un compensateur actif série à base d'un onduleur de tension alimenté par un redresseur de courant et sans pont de rééquilibrage des tensions ne compense plus les tensions harmoniques

- Avec un pont de rééquilibrage (pont de clamping) on améliore le taux de distorsion harmonique au niveau de la tension de charge et par suite la compensation des tensions harmoniques de 40%.
- Pour améliorer le degré de compensation des tensions harmoniques on a commandé notre compensateur en boucle fermé, les simulations montrent que le taux de distorsion est déminuer de 93%, le comportement du source de tension ce rapproche de celle d'une source de tension non perturbée du fait qu'on a éliminé les harmoniques d'ordre 5 et 7.

Conclusion générale

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

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

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

Afin d'aborder cette étude, nous avons commencé par présenter le principe détaillé de la compensation active série. D'abord, nous avons déterminé les tensions de références du compensateur actif série a été basée sur la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées qui offre un meilleur compromis entre l'efficacité, la souplesse et la simplicité d'implantation, On a terminé ce chapitre par les résultats de simulation d'une redresseur a thyristor alimenté par une source de tension perturbé a cause des harmoniques de tensions d'ordre 5 et 7, et le même redresseur mais alimenté par une source de tension non perturbé.

Dans le troisième chapitre, nous avons évoqué la structure de l'onduleur de tension à cinq niveaux de structure NPC, et leurs modèles de connaissance sans a priori sur la commande, en utilisant la méthode de DESIGN associée au réseau de pétri. Ensuite, nous avons développé quatre stratégies de commande de l'onduleur à cinq niveaux à savoir la commande triangulo-sinusoidale a quatre porteuses triangulaires_ Algorithme 1 ; commande triangulo-sinusoidale a quatre porteuses triangulaires_ Algorithme 2 ; Modulation vectorielle _ Algorithme 1 ; Modulation vectorielle _ Algorithme 2 .

Enfin, le dernier chapitre a montré notre conception de commande appliqué au compensateur actif série premièrement on a commandé on boucle ouvert le compensateur actif série sans un pont de rééquilibrage des tensions d'alimentation de l'onduleur les résultats de simulation montre aucun amélioration de la forme de tension de charge, mais deuxièmes et avec un pont de rééquilibrage (pont de clamping) on résulte une amélioration de la forme de tension de charge et une diminution de la taux de distorsion harmonique de 24.59% a 16.02%.

Finalelement la commande en boucle fermé avec un régulateur PI résulte une bonne amélioration de la forme de tension de charge et une diminution du taux de distorsion harmonique de

24.59% a 1.81% pour $\text{Alpha}=0^\circ$

24.59% a 1.97% pour $\text{Alpha}=30^\circ$;

24.59% a 1.85% pour $\text{Alpha}=60^\circ$;

On conclure que un compensateur actif série avec un pont de rééquilibrage des tensions d'entrée de l'onduleur et commandé en boucle fermé un régulateur PI se donne une bonne compensation des tensions harmoniques

Comme perspectives, on propose :

- Etude et simulation de la compensation active série des creux de tension utilisant l'onduleur à cinq niveaux.
- Utiliser ces compensateurs actifs dans les réseaux de transport (HT, voire THT).
- Une étude des filtres actifs hybrides devra être accomplie car, actuellement, ils apparaissent comme la meilleure solution pour les applications de filtrage actif.

A) Facteur de puissance

Indépendamment du régime sinusoïdal ou déformé, le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active et apparente. Cependant, le facteur de puissance s'en trouve modifié par la présence de la puissance de distorsion :

$$F_p = \frac{P}{S} \neq \cos \phi$$
$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{V_{eff} I_{1,eff} \cos \phi_1}{V_{eff} I_{eff}} = \frac{I_{1,eff}}{I_{eff}} \cos \phi_1$$
$$F_{dis} = \frac{I_{1,eff}}{I_{eff}}$$
$$F_{dép} = \cos \phi_1$$
$$F_p = F_{dis} \cdot F_{dép}$$

où : F_{dis} = Facteur de distorsion.

$F_{dép}$ = Facteur de déplacement.

En régime déformé, le facteur de puissance devient le produit du facteur de déplacement et du facteur de distorsion. Les définitions précédentes s'appliquent tout aussi bien en régime monophasé qu'en régime triphasé équilibré.

Commande complémentaire des onduleurs a cinq niveaux

- **Réflexion sur les différentes commandes complémentaires possibles pour l'onduleur à cinq niveaux**

Soit le bras k d'un onduleur à cinq niveaux figure (III.3). Pour une première vue, l'interrupteur T_{k1} par exemple peut être commandé d'une façon complémentaire avec chacun des trois interrupteurs du demi-bras du bas. Ainsi, on remarque que trois commandes complémentaires sont possibles pour chaque bras de l'onduleur à cinq niveaux.

- **Commande N°1**

Soit la commande complémentaire suivante :

$$\begin{cases} B_{k4} = \overline{B_{k2}} \\ B_{k5} = \overline{B_{k1}} \\ B_{k6} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \quad (A2.1)$$

n	B_{k1}	B_{k2}	B_{k3}	B_{k4}	B_{k5}	B_{k6}	V_{KM}
1	0	0	0	1	1	1	$-2U_c$
2	0	0	1	1	1	0	$-U_c$
3	0	1	0	0	1	1	Pas connue
4	0	1	1	0	1	0	Pas connue
5	1	0	0	1	0	1	0
6	1	0	1	1	0	0	0
7	1	1	0	0	0	1	U_c
8	1	1	1	0	0	0	$2U_c$

Tableau A2.1

Cette commande complémentaire rend le système commandable en cinq niveaux en interdisant les cas (n°1 et 2) où la configuration dépend en plus des grandeurs électriques du système (commande interne).

- **Commande N°2**

Soit la commande complémentaire :

$$\begin{cases} B_{k4} = \bar{B}_{k2} \\ B_{k5} = \bar{B}_{k1} \\ B_{k6} = \bar{B}_{k3} \end{cases} \quad (A2.2)$$

n	B_{k1}	B_{k2}	B_{k3}	B_{k4}	B_{k5}	B_{k6}	V_{KM}
1	0	0	0	1	1	1	$-2U_c$
2	0	0	1	1	1	0	$V=0$ ou $i=0$
3	0	1	0	0	1	1	Pas connue
4	0	1	1	0	1	0	Pas connue
5	1	0	0	1	0	1	Court-circuit
6	1	0	1	1	0	0	0
7	1	1	0	0	0	1	U_c
8	1	1	1	0	0	0	$2U_c$

Tableau A2.1

Cette commande complémentaire rend système commandable en quatre niveaux en interdisant les cas correspondants aux commandes n°1,2 (tableau A2.2), où la configuration dépend en plus des grandeurs du système (commande interne), et au cas n°3 (tableau A2.2) où la source de tension de tension est court –circuit .

- **Commande N°3**

Soit la commande complémentaire suivante :

$$\begin{cases} B_{k4} = \bar{B}_{k2} \\ B_{k5} = \bar{B}_{k1} \\ B_{k6} = \bar{B}_{k3} \end{cases} \quad (A2.3)$$

n	B_{k1}	B_{k2}	B_{k3}	B_{k4}	B_{k5}	B_{k6}	V_{KM}
4	0	1	1	0	1	0	Pas connue
5	0	0	0	0	0	0	$V=0$ ou $i=0$
6	0	0	0	0	0	0	Court-circuit
8	0	1	0	0	0	0	$2U_c$

Tableau A2.3

Ainsi cette analyse de ces trois commandes complémentaires possible, montre que seule la commande N°01 permet d'exploiter les cinq niveaux de tension de sortie possibles $(2U_c, U_c, 0, -U_c, -2U_c)$ pour un bras k .

Afin d'avoir la commandabilité totale de l'onduleur à cinq niveaux, on doit éliminer les cas correspondant aux commandes n°1 et 2 du tableau (A2.1).

Pour les différentes stratégie de commande de l'onduleur triphasé à cinq niveaux, on utilise cette complémentaire (commande1).

Bibliographie

[AKA 1983]: H.AKAGI, Y.KENZAWA, A.NABANE, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in tree-phase circuit", IPEC, Tokyo, 83, pp.1375-1384.

[AKA 1986]: H. AKAGI.H, NABAE.A, ATOH.S, "Control strategy of active power filters

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

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

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

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

[BET 1996] : E.BETTEGA, JEAN NOEL FIORINA, "Harmoniques : Convertisseurs propres et compensations actifs", Cahier Technique Merlin Guérin N° 183, édition Novembre, 1996.

[BHA 2006] : B.M CHOUKRI, " Nouvelle stratégie de commande d'un conditionneur actif de puissance", Mémoire de Magister, Université L'USTO. Oran 2006.

[BEA 2007] : S. BEAULIEU, "Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique" Thèse de doctorat de l'université de Batna Algérie Soutenue mai 2007

[BOU 2001] : S. BOULKHRACHEF, "Analyse et commande d'un onduleur à cinq niveaux à structure NPC. Application à la machine asynchrone commandée par logique floue". Mémoire de Magister, E.N.P .Alger, Mai 2001

[CHA 1991] : G. CHAMPIOT, " Les perturbations électriques et électromagnétiques : Conception et amélioration des installations et tertiaires" Collection Electra, Dopee Diffusion, 1991

[CHI 1999] : R. CHIBANI, "Modélisation et commande d'un onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC. Application à la conduite d'une machine synchrone à aimants permanents". Mémoire de magister, ENP, 1999

[DAY 1997] : I. DAYOUB, Rapport Bibliographie : " Filtrage Actif des harmoniques des réseaux électriques", Responsable du Stage S.SAADATE, mars 1997.

[FAT 2006] : C. FETHA," Analyse et amélioration de la non symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique " Thèse de doctorat de l'université de Batna Algérie Soutenue le: 27 Mai 2006

[FER 2001] : PH. FERRACCI, "La qualité de l'énergie électrique" , Cahier Technique n 199. 2001

[FET 2004]: C. FETHA," Analysis of Essential index on Electric Energy Quality In the case of Voltage Dips and Interruptions ", JEE , Vol.2, No.4, 2004.

[HAS 2002] : O.S. HASSANI, " Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle commandé par logique floue", Mémoire de Magister de l'ENP ; 2002.

[HIL 2002]: A. HILMY, "Vector control of static series compensator for mitigation of voltage dips" Chalmers University of Technology Gotburg, Sweden 2002

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

[KOU 2006] :H. KOUARA, "Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension " Mémoire de Magister, Batna 2006.

[LEQ 1996] : T. LEQUEU, " Etude du filtrage actif de puissance : application à la réalisation d'un compensateur parallèle", Thèse de Doctorat de l'université d'Aix Marseille III, 1996.

[LE R 1999] : A.D. LE ROUX, J.A.DU TOIT, J.H.R ENSLIN, "Integrate Active Rectifier and Power Quality Compensator With reduced current measurement" IEEE Transactions on industrial electronics, vol.46 n°3, 1999, PP.504-511

[LEO 2005]: L. PEI LING, "SVM based hysteresis current controller for three phase active power filter " Master of Engineering University Technology Malaysia.2005

[MAS-2000] : M.A. MASSINE , Méthodes de mesures des caractéristiques et cibles de qualité de tension fournie par le réseau d'Hydro-Québec. IREQ, 1er Décembre 2000

[MEY 1990] : P.MEYNAUD, "Qualité de la tension dans les réseaux électriques – creux de tension, flicker et harmoniques", Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 4 260, pp.1-25, 1990.

[MAG 1996]: M.D. OLIVEIRA, "Theoretical analysis and real-time simulator studies of an Advanced Static Var Compensator", Licentiate thesis, Royal institute of technology, Stockholm, ISSN-1100-1615, TRITA-EHE 9602.1996.

[MAS 1985]: MASADAE, HEYAFUNE.K, "A harmonic Control Scheme for the Active Power Filter", EPE Brussels, 1985, pp.229-234.

[MEK 2001] : M. FATIHA, " Etude et commande d'un filtre actif parallèle à structure tension", Mémoire Magister, université Oran, 2001.

[OUA 2005] : D. OULD ABDESLAM, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension", Thèse de doctorat de l'université de Haute-Alsace 08 décembre 2005.

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

[OUA 2006] : D. OULD ABDESLAM, D.WIRA, P.FLIELLER, D.AND MERCKLE, "Une nouvelle approche neuromimétique pour l'identification et la compensation des harmoniques dans les systèmes électriques.". International Conference on Electrical Engineering and its Applications, Sidi Bel-Abbes, Algeria, 2006.

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

[RAR-2002]: J. RDRIGUEZ, J S LAI, F Z PENG, " Multilevel inverter: A survey of topologies, controls and applications", IEEE Trans On Ind Electronics Vol 49, Aug 2002.

[RIC 1997] : F. RICARDEAU, N. AOUADA, T. MEYNARD, "Convertisseur de rééquilibrage de la tension d'un réseau", J.PHIS.III France 7, 1997, PP.5.66-5.71.

[RIO 1993] :P. RIOUAL, " Modélisation et commande d'un redresseur à MLI alimenté par un réseau déséquilibré", Thèse de doctorat de l'école nationale de Cachan, 1993.

[SAL 1995] : S. NIA AHMED, " Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel" Thèse de Doctorat de l'INP de lorraine, Nancy, 1995.

[TAL 2004] : A. TALHA, "Etude de Différentes Cascades de l'Onduleur à Sept Niveaux à Structure NPC. Application à la Conduite d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents ", Thèse de Doctorat, ENP, 2004.

[YOU 2008] : M. YOUSFI,"étude d'un filtre actif parallèle a basse d'un onduleur a cinq niveaux a structure PNC " , Mémoire de Magister, U.H.B.C de Chlef 2008.