



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et Technologies



MEMOIRE

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de la Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Intitulé

**COMMANDE D'UN SYSTEME FLEXIBLE
(UPFC) POUR L'AMELIORATION DU TRANSIT DE
PUISSANCE D'UN RESEAU ELECTRIQUE**

Présenté par :

- **KANZAH ABDELWAHAB**
- **AMRI LAKHDAR**

Soutenu publiquement le 15/06/2021

Devant le jury :

Encadré par : Dr Berbaoui Brahim M.C.A Univ. Adrar

Président : Dr Bourbaai. W M.C.A Univ. Adrar

Examineur : Mme Menasria Amel M.C.A Univ. Adrar

Année Universitaire : 2020/2021



شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): بوجاري ابراهيم

المشرف مذكرة الماستر.

الموسومة بـ: Commande d'un système flexible (UPFC) pour l'amélioration du transit de puissance d'un réseau électrique

من إنجاز الطالب(ة): كنزاح عبد الوهاب

و الطالب(ة): عمر ي لخرطر

كلية: العلوم والتكنولوجيا

القسم: كهرباء وتقنى

التخصص: محرك كهربائي

تاريخ تقييم / مناقشة:

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها. وبإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والأليكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

ادرار في:
مساعد رئيس القسم:

ب. صوري رضوان

مساعد رئيس قسم علوم التكنولوجيا بكلية العلوم والتكنولوجيا
والتعليم في التدرج بكلية العلوم والتكنولوجيا

Dédicace

❖ **Nous calmons ce travail pour:**

A nos très chers parents pour leur soutien moral et

financier, pour leurs encouragements et

les sacrifices qu'ils ont enduré,

que Dieu les garde et les protège.

A nos frères et sœurs

A nos grandes familles

A Tous ceux qui nous ont encouragés à poursuivre notre étude.

Et à ceux qui nous ont soutenus dans ce travail , ainsi que mes amis.

Remercîment

Avant tous, Nous remercions Allah de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail.

- ❖ Nous tenons à remercier vivement le Dr.Berbaoui Brahim, qui a manifesté sa disponibilité entière pour nous aider, nous orienter, aussi pour sa confiance et son compréhension qu'il nous a toujours prouvée.
- ❖ Nous voudrions également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.
- ❖ Nos vifs remerciements s'adressent également à tous les membres de nos familles notamment nos parents pour leur aide et pour leur soutien précieux.
- ❖ Nous remercions tous nos collègues et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, ce travail, nous les remercions tous.

 Kanzah

 Amri

Sommaire

La liste des Figures.....I
La liste des Tableaux.....III
Abréviations.....IV
Introduction générale.....1

CHAPITRE 1: Les Types des FACTS

I.1 Introduction:.....4
I.2 Définition et le rôle d'un dispositif FACTS :.....4
I.3 Les différents systèmes FACTS :.....4
I.3.1 Les compensateurs parallèles:.....5
I.3.2 Les compensateurs séries :.....6
I.3.3 Principe de fonctionnement7
I.3.3 Les compensateurs séries et parallèles (UPFC) :.....10
I.4 Besoin des systèmes FACTS au marché:10
I.4.1 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS:.....11
I.5 conclusion :11

CHAPITRE 2: Onduleur de type MLI

II.1 Introduction:.....13
II.2 Interrupteur de puissance:13
II.3. Le driver:.....13
II.3.1 Pilotage:13
II.3.2 Sécurité :13
II.3.3 Isolation galvanique :14
II.3.4 Récapitulatif :14
3.1 Classification des onduleurs:.....14
3.1.1 Onduleurs non autonome:.....15
3.1.2 Onduleur autonome:.....15
3.1.2.1 Les Onduleurs (autonomes) de tension:15
3.1.2.2 Les onduleurs (autonome) de courants:.....15
3.1.3 Les onduleurs à résonance :15
3.2 Types d'onduleurs autonomes de tension:.....16
3.2.1 Les onduleurs monophasés:.....16
3.2.2 Les onduleurs triphasés :16
3.3 Les onduleurs multi niveaux :17
3.4 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé:17
3.5 Types de commandes :18
3.6 Principe de la commande en MLI des onduleurs triphasés :19
3.7 La Modulation de largeur d'impulsion :20

| | |
|---|----|
| 3.7.1 Principe de la modulation de largeur d'impulsion :..... | 20 |
| 3.7.2 Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) | 20 |
| 3.7.3 Types de Modulation : | 22 |
| 3.7.3.1 Modulation naturelle..... | 22 |
| 3.7.3.2 Modulation Régulière : | 22 |
| 3.8 Technique de production d'onde MLI : | 22 |
| 3.8.1 Technique analogique : | 22 |
| 3.8.2 Technique numérique : | 23 |
| 3.8.3 Technique hybride : | 23 |
| 3.9 Différentes techniques de modulation de longueur d'impulsions : | 24 |
| 3.9.1 La modulation linéaire multiple (UPWM) | 24 |
| 3.9.2 La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM) | 24 |
| 3.9.3 La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée) (MSPWM) : | 25 |
| 3.10 Les avantages de la M.L.I : | 25 |
| Conclusion | 26 |

CHAPITRE 3: UPFC de la commande PI

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction : | 29 |
| III.2 Structure de l'UPFC : | 29 |
| III.3 Modélisation et Principe de fonctionnement de l'UPFC: | 30 |
| III.3.1 Modèle simplifié de l'UPFC : [Ben05]: | 30 |
| III.3.2 Principe de fonctionnement de l'UPFC: [All02], [Yia97], [Ben05]: | 30 |
| III.4 Modélisation de l'UPFC à deux niveaux: [Ben05], [Rah09], [Bel05]: | 32 |
| III.4.1 Technique de la modulation de largeur d'impulsion d'un onduleur simple: | 34 |
| III.5 Modélisation de l'UPFC à trois niveaux : [Rah09]: | 36 |
| III.6 Configuration des circuits de réglage de l'UPFC : | 38 |
| III.6.1 Les circuits de réglage d'un compensateur parallèle : | 39 |
| III.6.2 Les circuits de réglage de compensateur série : | 40 |
| III.7. Conclusion..... | 45 |

CHAPITRE 4: Résultats et simulation

| | |
|--|----|
| IV.1 Introduction | 48 |
| IV.2 Modèle de l'onduleur : | 48 |
| IV.3 La commande MLI sinus triangle | 50 |
| IV.4 Description du système de commande de l' UPFC | 53 |
| IV.4-1 Commande du circuit série..... | 53 |
| IV.4.2 Commande du circuit shunt et de la tension continue | 56 |
| Conclusion Générale | 59 |
| Bibliographie..... | 83 |

La liste des Figures

Chapitre I: Les Types des FACTS

Figure I-1 Compensateur parallèle 7
Figure I -2 Compensateur série 8
Figure I -3 Configuration du système UPFC9
Figure I -4 Schéma simplifié d'un réseau interconnecté.....10

Chapitre II: Onduleur de type MLI

Figure II-1 Schéma bloc d'un onduleur15
Figure II-2 Onduleur monophasé avec Transformateur de sortie à point milieu.....16
Figure II-3 Onduleur monophasé avec diviseur capacitif 16
Figure II-4 Onduleur monophasé en pont..... 17
Figure II-5 Onduleur de tension triphasé 17
Figure II-6 Forme d'onde de : (a) tension simple ;(b) tension composée ; (c) spectre d'harmonique pour une commande 180°.....20
Figure II-7 Principe de la modulation.....21
Figure II-8 Schéma synoptique de la commande en MLI (triphase).....22
Figure II-9 Technique analogique.....24
Figure II-10 Technique Numérique..... 24
Figure II-11 Technique Hybride.....24
Figure II-12 La modulation de largeur d'impulsions multiples.....25
Figure II-13 MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire.....26
Figure II-14 La modulation sinusoïdale modifiée26

Chapitre III: UPFC de la commande PI

| | |
|--|----|
| Figure III.1 : Emplacement de l'UPFC | 29 |
| Figure III.2 : Schéma de principe de l'UPFC | 30 |
| Figure III.3 : Modèle équivalent d'un UPF | 30 |
| Figure III.4 : Diagramme vectoriel correspondant au modèle équivalent | 30 |
| Figure III.5 : Contrôle de base de fonctionnement de l'UPFC | 32 |
| Figure III.6 : circuit équivalent de l'UPFC | 33 |
| Figure III.7-a : Synoptique analogique de la | 36 |
| Figure III.7-b : Formes d'ondes MLI intersective | 36 |
| Figure III.8 : Principe de commande des courants par MLI | 37 |
| Figure III.9 : circuit équivalent de l'UPFC à trois niveaux..... | 37 |
| Figure III.10 : schéma de principe des circuits de réglage complets d'un UPFC..... | 39 |
| Figure III.11: description des couplages..... | 41 |
| Figure III.12 : reconstitutions des tensions X1 et X2..... | 42 |
| Figure III.13 : circuit de réglage de l'UPFC..... | 43 |
| Figure III.14 : boucles de régulation découplées..... | 45 |

Chapitre IV: Résultats et simulation

| | |
|---|----|
| Figure IV.1 : Schéma de principe de l'onduleur à MLI..... | 48 |
| Figure IV.2 : Modèle sous SIMULINK de l'onduleur de tension à deux niveaux...50 | 50 |
| Figure IV.3 : Principe de la commande MLI sinus-triangle..... | 51 |
| Figure IV.4 : Passage dans le référentiel tournant de la composante équilibrée directe..... | 53 |
| Figure IV.5 : Configuration de réglage de l'UPFC..... | 55 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.6 : Circuit de réglage de l'UPFC..... | 57 |
| Figure IV.7: Schéma complet de réglage de l'UPFC implanté dans Simulink..... | 59 |
| Figure IV.8: Variations des références des puissances active (a) et réactive (b).... | 60 |
| Figure IV.9: Réponses des puissances Active (a) et Réactive (b) à la sortie du système comparées aux références..... | 60 |
| Figure IV.10 : Variations du courant i_{ds} | 60 |
| Figure IV.11 : Variations du courant i_{qs} | 61 |
| Figure IV.12 : Réponses des courants de phases i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} | 61 |
| Figure IV.13 : Réponses des tensions de référence pour l'onduleur V_{ca} , V_{cb} et V_{cc} | 62 |
| Figure IV.14 : Variations des tensions de commande fournis par l'onduleur V_{sa} , V_{sb} et V_{sc} | 63 |
| Figure IV.15 : Variations des tensions de commande (axe dq) V_{cd} et V_{cq} | 64 |

La liste des Tableaux

Chapitre I: Les Types des FACTS

Tableau II.1 : tableau des caractéristiques des interrupteurs de puissance.....14

Liste des symboles

| Symbole | Signification | Unité |
|--------------------------|--|----------|
| v_d | Tensions de du réseau (départ) | V |
| v_r | Tensions de du réseau (arrivé) | V |
| V_{cd}, V_{cq} | Tensions continue correspondants au axes référentiels d, q | V |
| r | La résistance de la ligne | Ω |
| L | L'inductance de la ligne | H |
| r_p | Les chutes hormiques du compensateur parallèle | V |
| L_p | L'inductance de fuites du transformateur parallèle. | H |
| C | La capacité du circuit commun | F |
| f_p | La fréquence de la porteuse | H_z |
| v_p | Amplitude de la porteuse. | V |
| f | La fréquence du réseau | H_z |
| P | La puissance active | W |
| Q | La puissance réactive. | VAR |
| P' | La puissance de référence active. | W |
| Q' | La puissance de référence réactive. | VAR |
| i_{dq}, i_{qf} | courants correspondants au Axes référentiels d et q | A |
| ω_N | Pulsation Naturelle | rad/s |
| ζ | Coefficient d'amortissement | |
| k_p | gain proportionnel | |
| k_i | gain intégrateur | |
| i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} | courants de phase | A |
| V_{ca}, V_{cb}, V_{cc} | Tensions de phase | V |
| T_s | Temps de saturation | s |
| K_{pi} | gain proportionnel initial | |
| K_{pf} | gain proportionnel final | |
| K_{if} | gain intégrateur final | |
| n | Nombre d'itération | |

| | |
|----------------|--|
| FACTS :..... | Systèmes de Transmission Flexibles à Courant Alternatif |
| UPFC : | Contrôleur de l'Écoulement de Puissance et de charge Universel |
| MLI : | Modulation de largeur d Impulsion. |
| STATCOM :..... | Compensateur Synchrone Statique. |
| TCSC : | Capacitance Série Commandée par Thyristors |
| SVC : | Compensateur statique de puissance réactive |

Introduction

Générale

Introduction Générale

L'industrie de l'énergie électrique a subi un changement considérable durant les dernières années à cause de la croissance de la population pour la quelle la consommation de l'énergie électrique augmente considérablement.

Pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs..., pour ces raisons il est nécessaire de satisfaire ces nouvelles exigences.

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissances indésirables entre zones interconnectées, subissent des surcharges de ligne, des problèmes de stabilité et de toutes manières un accroissement des pertes. Les moyens classiques de contrôle des réseaux (Transformateurs réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteur, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes.

Il faudra vraisemblablement, dans l'avenir, compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs d'électronique de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternating current Transmission Systems) pour le contrôle des réseaux.

Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (angle de déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les modules des tensions nodales où diminuer les pertes dans les lignes.

L'UPFC (Unified Power Flow Controller) est un récent dispositif des systèmes FACTS, qui est capable de contrôler les différents paramètres de la ligne de transmission. Il n'accomplit pas uniquement les fonctions du STATCOM, TCSC, mais offre aussi une flexibilité additionnelle en combinant certaines fonctions de ces contrôleurs.

Différents réglages sont à prévoir pour ce compensateur : réglage pour le courant triphasé (onduleurs parallèle et série) et un réglage pour la tension continue. Notre

intérêt porte sur le réglage des courants de chacun des deux onduleurs pour pouvoir gérer le flux des puissances active et réactive à travers la ligne de transmission d'un réseau d'énergie.

Le réglage par (PI-Découplé, IP) du système UPFC sera traité pour évaluer les performances dynamiques : le comportement du système, la stabilité et la poursuite des valeurs réels à leurs références. [1].

Ce travail est destiné à évaluer l'aptitude de l'UPFC à contrôler l'écoulement de puissance à travers une ligne de transmission et compenser la puissance réactive. Cette étude est organisée à quatre chapitres :

- ❖ Le premier chapitre est consacré à la définition des systèmes FACTS (constitution, équipement, et leur Types)
- ❖ Le deuxième chapitre est réservé pour l' onduleur de tension triphasé piloté par la technique de modulation de largeur d'impulsion MLI.

On présente dans le troisième chapitre, le système le plus intéressant des dispositifs FACTS : " l'UPFC " ; son fonctionnement et sa mise en équations. ainsi un réglage appliqué à l'UPFC avec des régulateurs classiques (PI-Découplé, IP).

Dans le cadre du quatrième chapitre,des testes de simulation sur le système seront présentés en présence de variations des paramètres nominaux permettent de conclure de la robustesse de la stratégie de commande proposée.

Nous terminons par une conclusion sur l'ensemble de cette étude et nous proposons des de ce travail.

Chapitre I

Les Types des FACTS

Chapitre I**Les Types des FACTS****I.1 Introduction:**

En mettant en œuvre de nouvelles technologies, la qualité de l'énergie peut être améliorée, la capacité de transport peut être augmentée et les réseaux existants peuvent être contrôlés. La société américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a initié un projet d'étude du système FACTS en 1988 pour mieux contrôler la transmission d'énergie sur la ligne électrique. Le concept FACTS améliore le fonctionnement du réseau électrique avec tous les équipements électroniques de puissance. La technologie de ces systèmes (interrupteurs statiques) garantit que leur vitesse et leur fiabilité sont supérieures aux systèmes électromécaniques traditionnels. L'avantage de ces systèmes n'est pas seulement la possibilité de contrôler le flux d'énergie dans le réseau, mais également d'augmenter la capacité de transmission effective jusqu'à la limite maximale de dissipation thermique [2].

I.2 Définition et le rôle d'un dispositif FACTS :

Le concept FACTS « Flexible Alternative Currents Transmission Systems » est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT.....). Ces équipements permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique c'est-à-dire les différents

paramètres du réseau électrique tension, impédance déphasage ...etc. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, ils peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voire en améliorant, la stabilité des réseaux. [3].

I.3 Les différents systèmes FACTS :

Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteurs statiques) leur assure une vitesse et une fiabilité supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. L'intérêt de ces dispositifs est non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance dans les réseaux mais aussi d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en maintenant, voire en améliorant la stabilité des réseaux.

Les différents systèmes FACTS existants, peuvent être classés en trois catégories :

Les compensateurs parallèles

Les compensateurs séries ou compensateurs d'impédance

Les compensateurs série et parallèles.

I.3.1 Les compensateurs parallèles (shunt) 1:

Par le contrôle du flux de puissance réactive dans la ligne, ces compensateurs parallèles appelés aussi compensateurs de puissance réactive, permettent de maintenir la tension du réseau au point de connexion dans une plage bien déterminée pour le bon fonctionnement du réseau.

On peut citer comme exemple :

- ✓ Compensateur statique de puissance réactive SVC (Static Var Compensator)
- ✓ Compensateur synchrone statique STATCOM (Static Compensator)
- ✓ Compensateur statique STATCON (Static Condenser)
- ✓ ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- ✓ Compensation parallèle SVG (Static Var Generator)

Principe de fonctionnement :

La Figure I.1 présente le principe d'un compensateur statique de puissance réactive. Un onduleur parallèle à pulsation est branché par l'intermédiaire du transformateur T_1 à la tension V_s du départ de la ligne de transmission. Il produit trois tensions sinusoïdales à la fréquence fondamentale, avec des amplitudes et des angles de phase réglables. La puissance réactive est variée par l'ajustement de l'amplitude de la tension de sortie du convertisseur.

Afin de garantir un bon fonctionnement de l'onduleur shunt, on doit prévoir plusieurs circuits de réglage. Avec un réglage interne, on contrôle le courant triphasé, les consignes sont fournies par deux circuits de réglage superposés qui fonctionnent en parallèle.

D'une part, il y a un réglage de la tension continue V_{dc} qui est maintenue avec le condensateur C .

Cette tension V_{dc} doit être réglée à une valeur constante, afin de permettre une modulation sinusoïdale de l'onduleur dans toute la plage de fonctionnement. D'autre part, il y a un réglage de la puissance réactive. Puisque l'onduleur à pulsation permet de

travailler dans les quatre quadrants, on peut absorber ou fournir de la puissance réactive au réseau de transmission.

I.3.2 Les compensateurs séries :

L'utilisation de condensateurs en série pour compenser la réactance d'induction à travers une distance très longue de la ligne est la méthode la plus efficace et économique pour améliorer le transfert de puissance.

Les deux raisons principales pour incorporer des condensateurs en série dans les systèmes de transmission sont :

Augmenter la capacité du transfert de la puissance en augmentant la limite de la stabilité transitoire.

Réduire les pertes dans la ligne de transmission en optimisant le partage de puissance active entre lignes parallèles.

Les compensateurs série sont aussi appelés compensateurs d'impédance figure 1.9, car par l'ajustement de l'impédance de la ligne, ce type de compensateur, est capable de contrôler le transit de puissance active dans la ligne. On a comme exemple :

- Compensateur série TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator) .
- Compensateur série synchrone statique SSSC (Static Synchronous Series Compensator) .

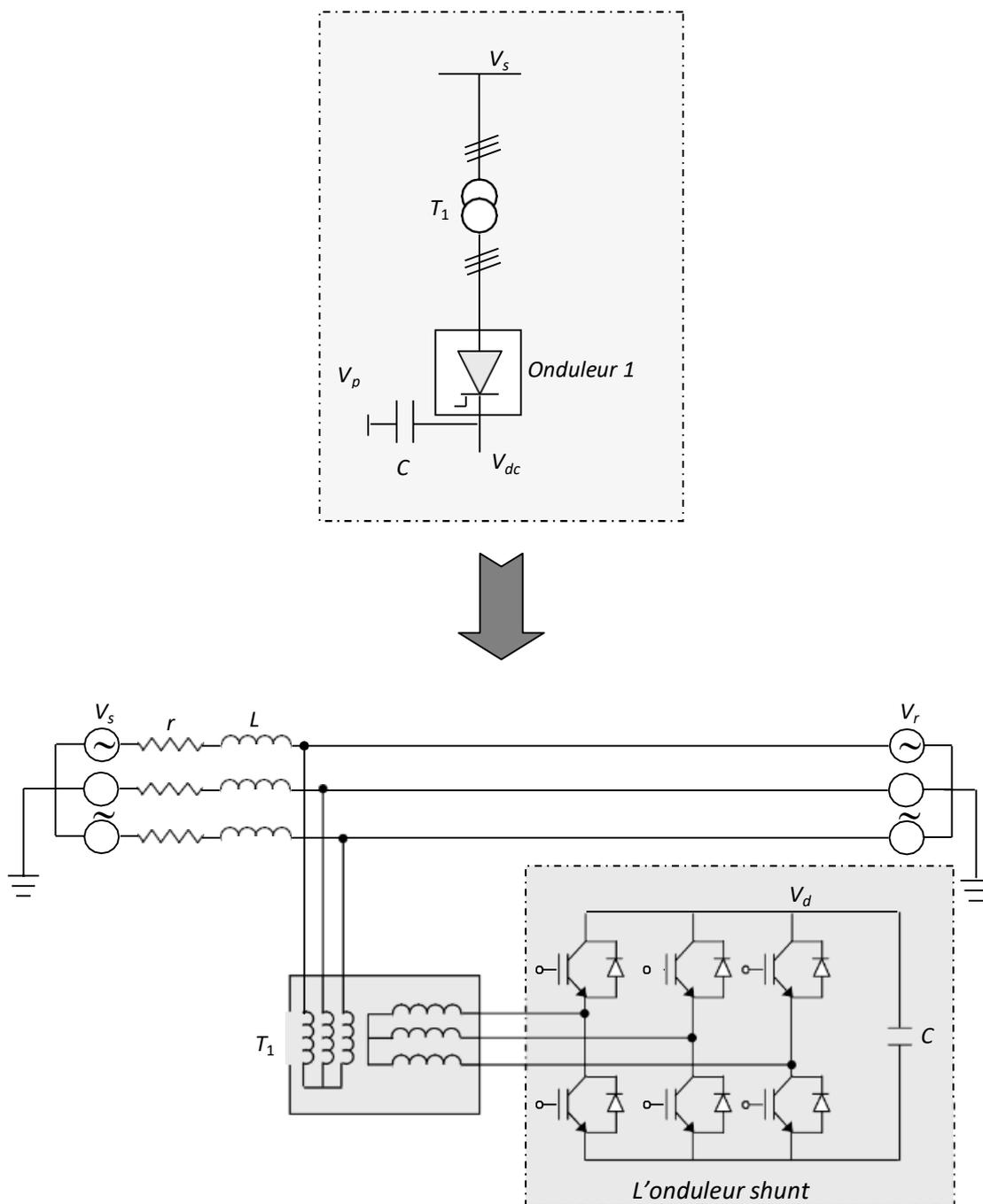


Figure I.1 : Compensateur parallèle

I.3.3 Principe de fonctionnement

L'onduleur série injecte par l'intermédiaire d'un transformateur série T_2 une tension additionnelle V_c entre la tension V_s du départ de la ligne de transmission et la tension V_r de l'arrivée. En variant la tension additionnelle V_c en module, il est possible de varier dans une certaine mesure la tension V_s en module. Ainsi, on peut modifier statiquement les puissances active et réactive transmises par la ligne de transmission.

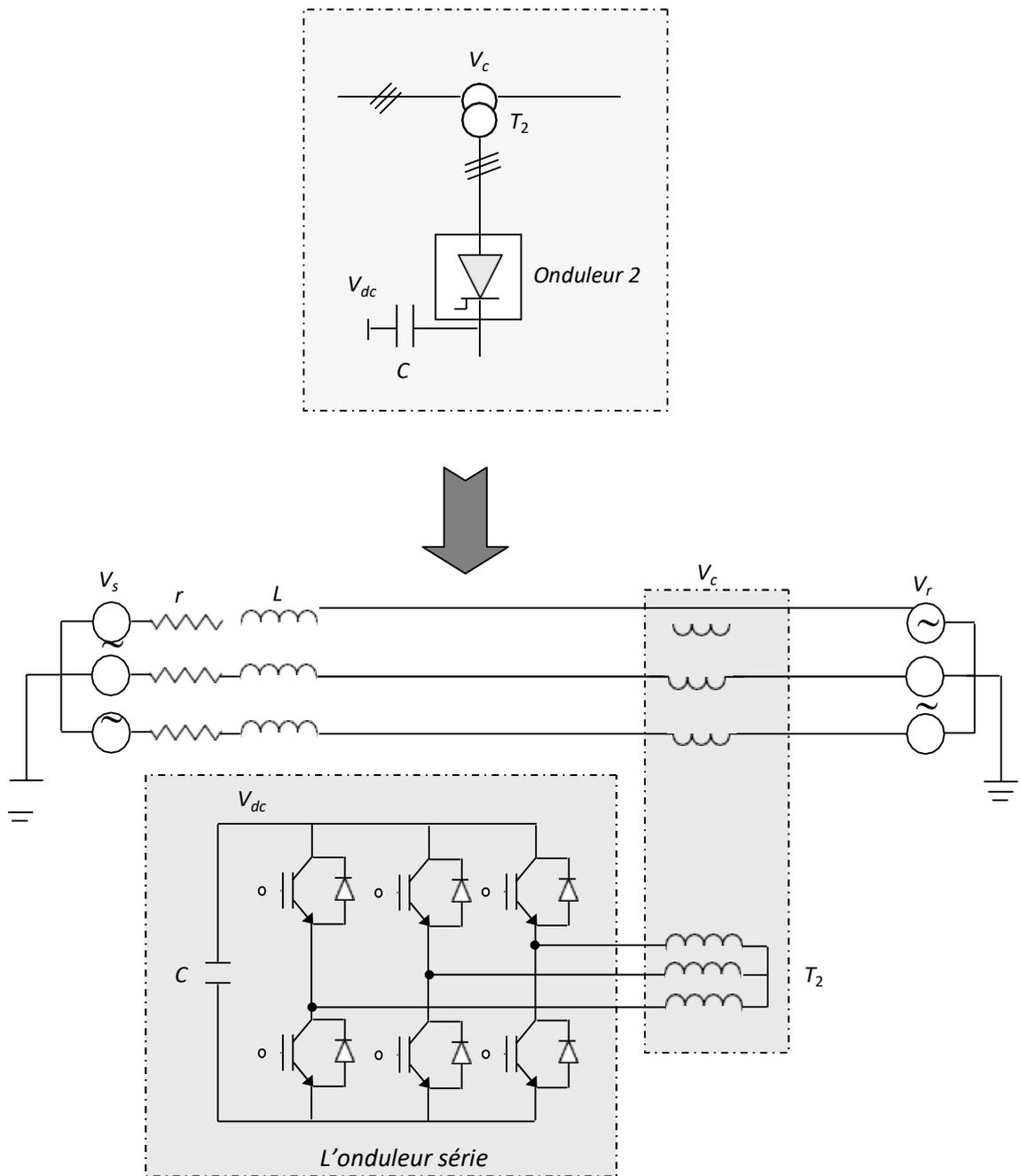


Figure I.2 : Compensateur série

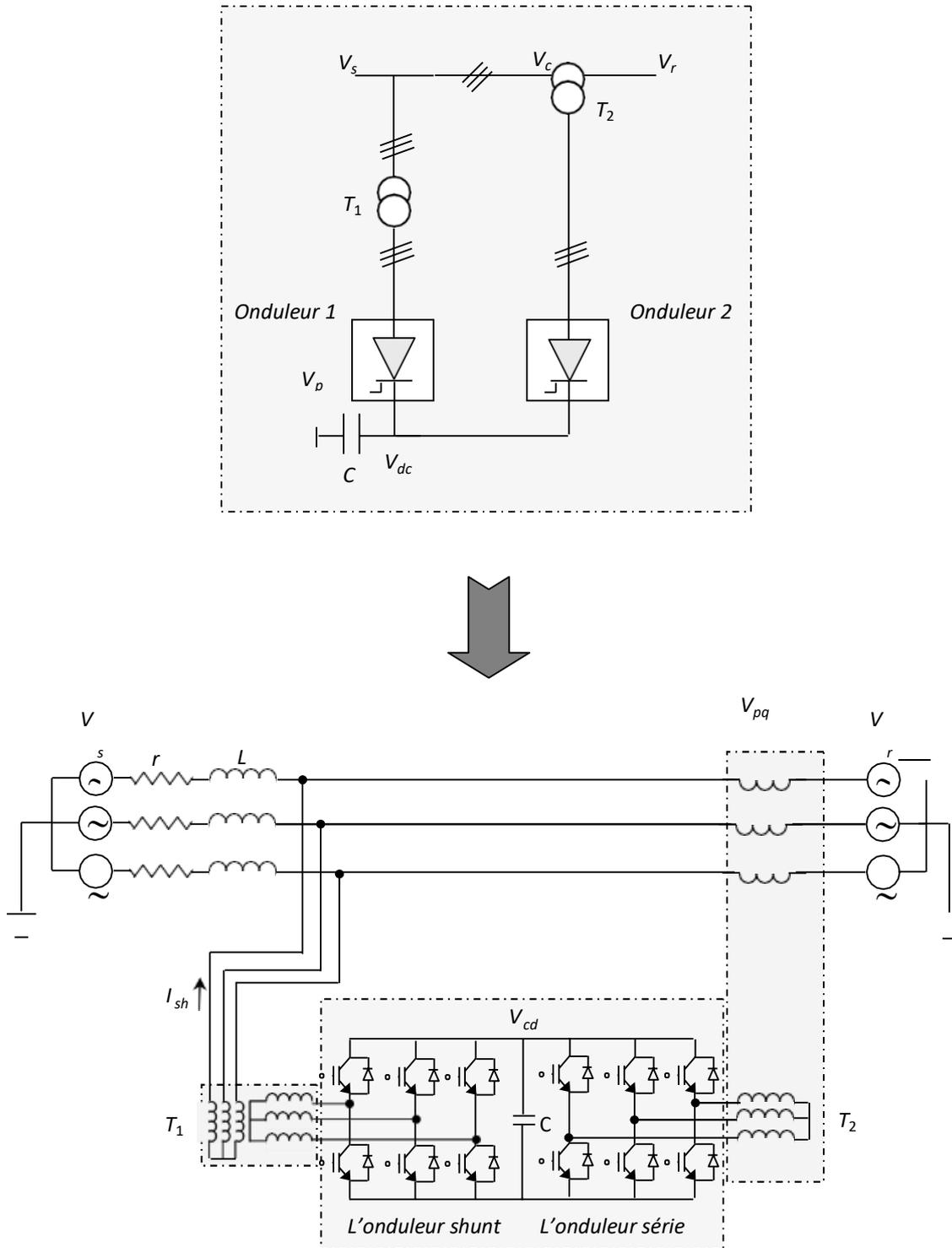


Figure I.3 : Configuration du système UPFC

1.3.3 Les compensateurs séries et parallèles (UPFC) :

Ces compensateurs modifient le flux de puissance, active et réactive sur une ligne en changeant seulement son angle électrique de transport. Les dispositifs les plus courants sont les suivants :

Transformateur déphaseur à thyristor PST (phase –shifting transformer) ; Déphaseur statique.

Il existe un nouveau dispositif des systèmes FACTS, appelé UPFC (Unified Power Flow Controller) ou variateur de charge universel. Ce système combine à la fois la fonctionnalité du compensateur parallèle et du compensateur série. Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive, il peut donc contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport. La configuration de l'UPFC est illustrée par la figure 1.3.

1.4 Besoin des systèmes FACTS au marché:

En raison de la réglementation du marché d'énergie, le besoin des systèmes FACTS comme nouveaux équipements pour conduire le réseau de transport contre les différents problèmes qui peuvent affecter le réseau électrique durant son fonctionnement est devenu plus urgent. Ces systèmes offrent des capacités de contrôle incomparables qui ne peuvent pas être obtenues par l'utilisation d'autres types de contrôle classique (les solutions traditionnelles). Le schéma de la figure I.1, illustre un exemple d'un réseau de transport interconnecté, où l'interconnexion entre la transmission à haute tension et la distribution basse tension est montrée

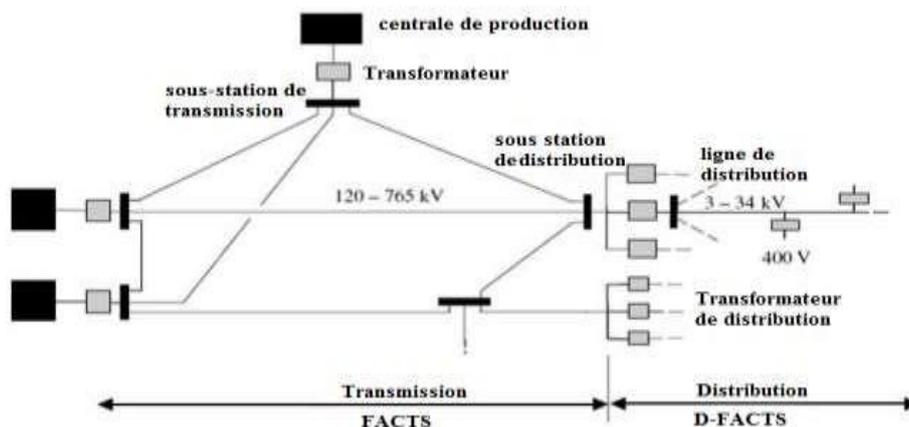


Figure I. 4: Schéma simplifié d'un réseau interconnecté

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques, par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ces dispositifs facilitent le fonctionnement des lignes de transmission le plus proche de leurs limites thermiques maximales [2].

Alors que, dans un réseau électrique, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- Le maintien de la tension au niveau acceptable (fournir la puissance réactive lorsque la charge augmente et la tension diminue, ou absorber la puissance réactive quand la tension augmente).
- Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire les surcharges dans les lignes ou dans les transformateurs et d'éviter les flux en boucle dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.

I.4.1 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS:

Les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir un sinon plusieurs des bénéfices suivants :

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Contrôle des tensions dans les nœuds.
- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique.
- Amélioration de la qualité de l'énergie. [4]

I.5 conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue globale sur les dispositifs FACTS (définition et le rôle, leurs classification et différentes catégories, structure et principe de fonctionnement) avec des schémas qui structurent chaque dispositifs. [5]

Chapitre II

Onduleur de type MLI

Chapitre II

Onduleur de type MLI

II.1 Introduction:

Dans le monde industriel, la demande d'entraînements électriques augmente Vitesse variable, pour cela, l'avancement de la technologie d'électronique de puissance Développez plusieurs méthodes à vitesse variable pour fournir des lecteurs alternatifs. Parmi ces méthodes, veuillez citer un onduleur autonome contrôlé par modulation Largeur d'impulsion (MLI). [6]

II.2 Interrupteur de puissance:

L'utilisation progressive des convertisseurs statiques d'énergie électrique dans les diverses structures est due principalement à l'élément le plus important dans ses structures, a savoir l'interrupteur.

Il existe trois types de d'interrupteurs de puissance :

- Interrupteurs non commandées ni à l'ouverture ni à la fermeture (diode).
- Interrupteurs commandables à la fermeture, mais non commandables à l'ouverture (Thyristors).
- Interrupteur commandables à l'ouverture et à la fermeture (transistors).
-

II.3. Le driver:

Le driver représente le circuit qui doit piloter tout type de transistors de puissance dans tous types de convertisseurs statiques (onduleurs, redresseurs, hacheur, ...). Ce pilotage consiste à provoquer et à contrôler les passages de l'état bloqué à l'état saturé du transistor. Donc, le driver doit assurer plusieurs fonctions :

II.3.1 Pilotage:

Le driver à pour rôle de piloter un transistor donc, de le faire basculer de l'état passant à l'état bloqué, de l'état bloqué à l'état passant en fonction des ordres reçus de la commande globale.

II.3.2 Sécurité :

Le driver doit assurer la sécurité rapprochée du transistor améliorant ainsi sa survie en cas de défaut. En cas de sur- intensité dans le composant de puissance par exemple, le driver doit couper le transistor et envoyer une information d'erreur à la commande globale. Il doit aussi intervenir pour les autres cas de défaut.

II.3.3 Isolation galvanique :

Les transistors sont pilotés à des potentiels assez conséquents allant de 0V à 1500V ce qui représente un danger pour le primaire du driver (la partie connectée au circuit de commande) qui est à des potentiels beaucoup moins élevés que celui du secondaire (la partie connectée au circuit de puissance) d'où la nécessité d'une isolation galvanique séparant les deux parties électriquement.

II.3.4 Récapitulatif :

Le choix d'un composant sera en générale dicté par le mode de commande souhaité, la tension de blocage nécessaire, la fréquence de commutation désirée et dans une moindre proportion du courant à conduire il peut y avoir d'autres critères de choix, tel la vitesse et la robustesse. Le tableau suivant donne les caractéristiques des interrupteurs de puissance.

| Composant | Com- mande | Blocage | Pertes en conduction | Pertes en commuta- tion | f_p maxi- mal |
|-----------|---------------|---------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Diode | non | >10kV | faibles | nulles | élevée |
| Thyristor | on | >10kV | faibles | élevées | <1kHz |
| Bipolaire | on/off | 1.2kV | faibles | élevées | 10kHz |
| MOSFET | on/off | 600V | élevées | faibles | 250kHz |
| IGBT | on/off | 4.5kV | moyennes | moyennes | 50kHz |
| GTO | on/off | >10kV | faibles | élevées | <1kHz |

Tableau (II.1): tableau des caractéristiques des interrupteurs de puissance.

3.1 Classification des onduleurs:

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu- alternatif, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

Une première classification peut être faite en distinguant : onduleurs non autonome et onduleur autonome.

Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge « ou encore onduleur à résonance » [8].

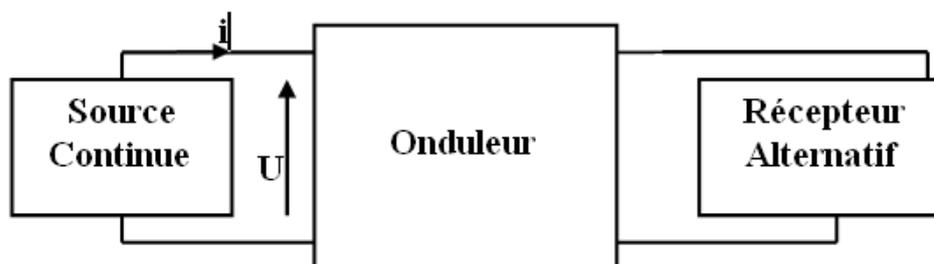


Figure (II .1) : Schéma bloc d'un onduleur

3.1.1 Onduleurs non autonome:

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif [7].

3.1.2 Onduleur autonome:

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu- alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

- Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer :
- les onduleurs de tensions.
- Les onduleurs de courant.

3.1.2.1 Les Onduleurs (autonomes) de tension:

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension « u » n'est pas affecté par les variations du courant « i » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

Le courant à la sortie « i' » et donc le courant à l'entrée « i » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f. e. m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie.

3.1.2.2 Les onduleurs (autonome) de courants:

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu, c'est –à – dire par une source d'inductance interne si grande que le courant « i » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension « u » à ses bornes [5].

3.1.3 Les onduleurs à résonance :

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si celle- ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome [6].

3.2 Types d'onduleurs autonomes de tension:

3.2.1 Les onduleurs monophasés:

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continue, cela correspond à :

l'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur push- pull (Figure II .1).

l'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi-pont. (Figure II.2).

Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont (figure II.3). [5]

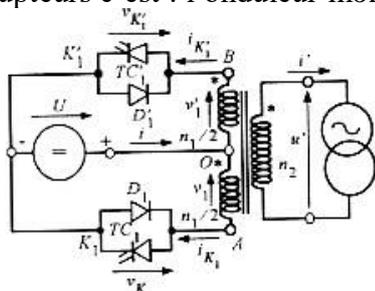


figure II.2 Onduleur monophasé avec Transformateur de sortie à point milieu

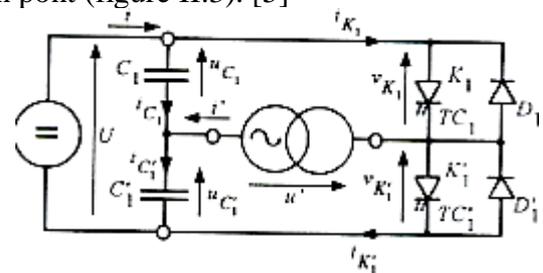


figure II.3 Onduleur monophasé avec diviseur capacitif

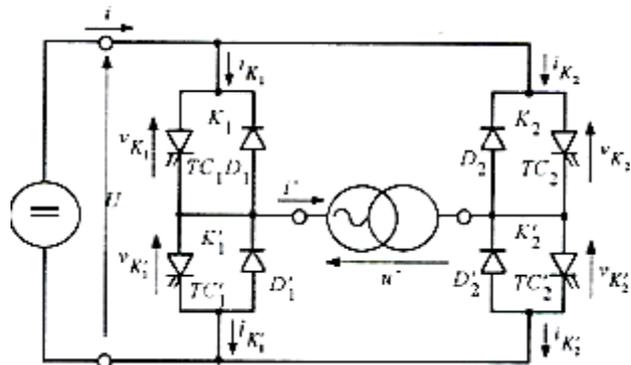


Figure II.4 Onduleur monophasé en pont

3.2.2 Les onduleurs triphasés :

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs (figure II-4).

Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode .la source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur.

Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif ia, ib, ic, les interrupteurs K1, K'1 et K2, K'2, K3 et K'3 doivent être complémentaires deux à deux [5]

On définit $K_i = (T_i, D_i)$.

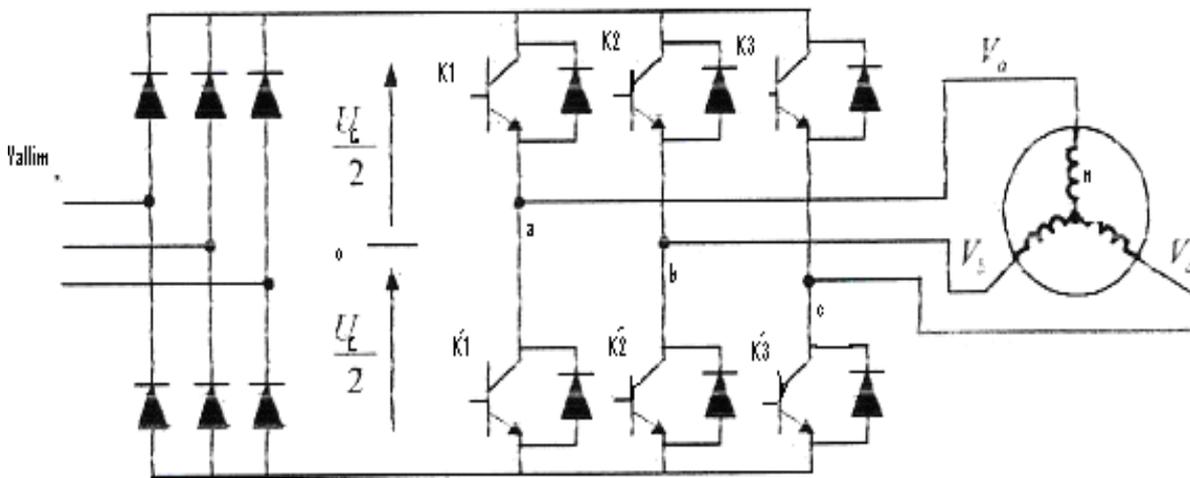


figure II.5 Onduleur de tension triphasé

3.3 Les onduleurs multi niveaux :

Les onduleurs multi niveaux permettent d'augmenter la tension de sortie des convertisseurs statiques au-delà des limites des semi-conducteurs. Pour les réaliser on doit disposer de plusieurs sources de tension continue (obtenue par exemple à partir d'un diviseur capacitif) [5], on peut faire apparaître autant de cellules de commutation élémentaires et les associer en les superposant ou en les mettant en cascade. Cela permet de multiplier le nombre de niveau que l'on peut donner à la tension de sortie. Cette dernière est souvent obtenue par une modulation de largeur d'impulsions (MLI).

Ces onduleurs sont utilisés pour l'entraînement des moteurs asynchrones de grande puissance, d'autres applications sont possibles pour des moteurs qui tournent à vitesse élevée (> 5000 tr/mn).

Pour le cas de notre mémoire, on a mis en évidence un onduleur de tension autonome triphasé.

Les signaux rectangulaires présentés par la figure (II.5) sont riches en harmoniques, ces dernières provoquent des couples pulsatoires dans les machines asynchrone et un échauffement supplémentaire.

La technique de la modulation de largeur d'impulsion est la plus appropriée à la commande des moteurs asynchrone. Car l'atténuation des harmoniques avec cette technique est remarquable [9].

3.4 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé:

La représentation schématique de l'onduleur est fournie par la figure (II.4).

Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif i_a , i_b et i_c , les interrupteur K_1

et K'_1, K_2 et K'_2, K_3 et K'_3 doivent être complémentaire deux à deux, et pour que les tensions de sortie V_a, V_b et V_c soient identiques à un tiers de la période T de leur fondamental près, il faut commander chaque demi pont avec un retard de $T/3$ sur le précédent.

En commande pleine onde on ferme donc :

- K_1 pour $wt = 0$ K'_1 pour $wt = \pi$
- K_2 pour $wt = 2\pi/3$ K'_2 pour $wt = \pi + 2\pi/3$
- K_3 pour $wt = 4\pi/3$ K'_3 pour $wt = \pi + 4\pi/3$

La présence du neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré et tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre.

Si le récepteur triphasé est équilibré (moteur triphasé par exemple) on peut supprimer la liaison entre le point neutre « N » et le point milieu « 0 » de la source. Donc supprimer celui-ci, on obtient alors l'onduleur triphasé proprement dit (figure II.4).

3.5 Types de commandes :

On distingue les stratégies de commande suivante :

- a- commande pleine onde (dite 180°).
- b- Commande décalée.
- c- Commande à Modulation de largeur d'impulsion (MLI).

La tension générée par les stratégies (a, b) à une forme rectangulaire, sa décomposition en série de Fourier à montrer que cette forme d'onde est riche en harmoniques.

- Pour une commande 180° , la décomposition en série de Fourier de la tension composée est donnée par [8] :

$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} \sin \left(n \left(wt + \frac{\pi}{6} \right) \right) \quad \text{II-1}$$

Les tensions V_{bc}, V_{ca} sont décalées par rapport à V_{ab} respectivement de 120° et 240° .

La représentation du spectre d'harmonique fig.(II-6) des tensions simples et composées montre la présence des harmoniques d'ordre $K = 6n \pm 1$, avec k : entier

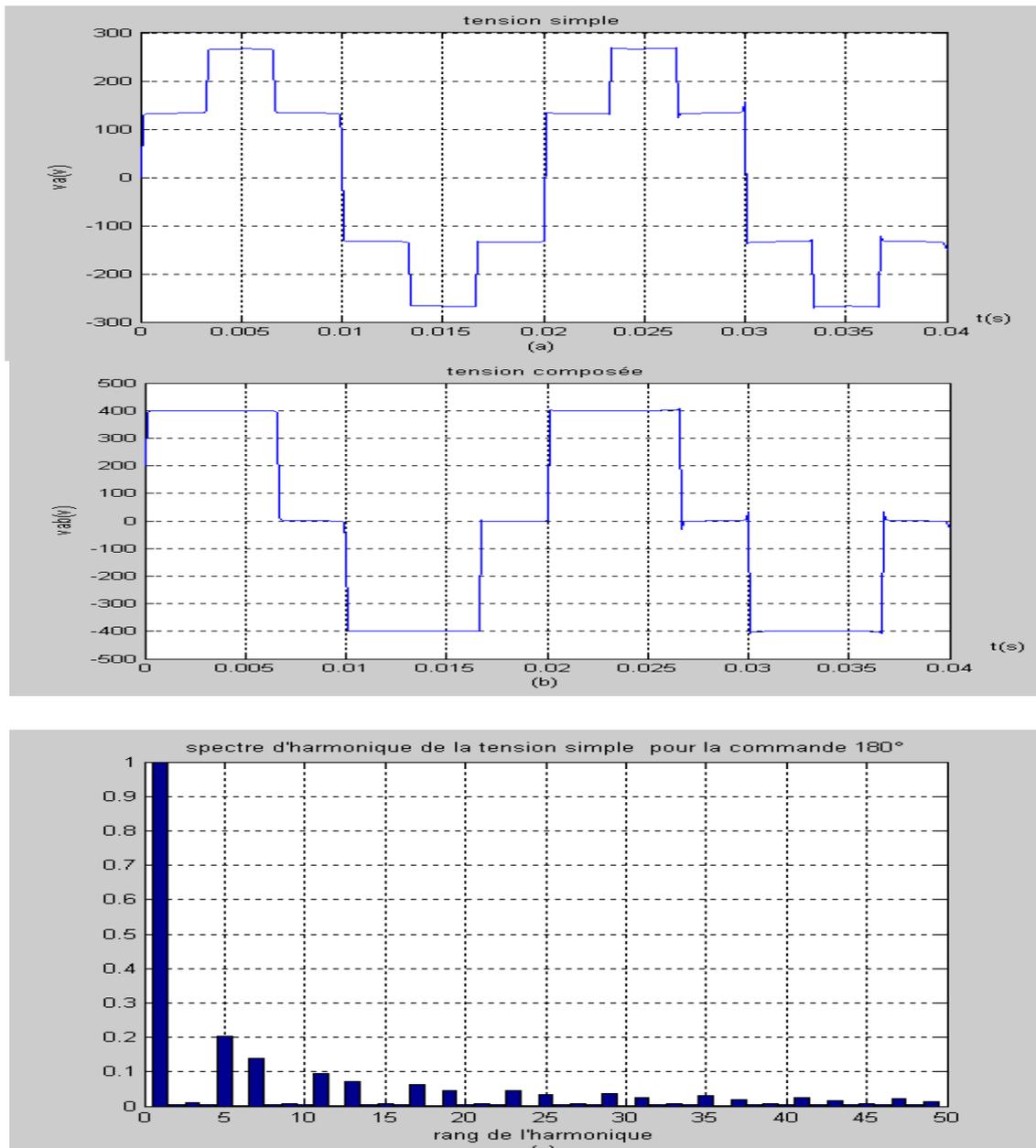


Figure II.6 Forme d'onde de : (a) tension simple ;(b) tension composée ;
(c) spectred'harmonique pour une commande 180°

Cet inconvénient disparaît si l'onduleur est alimenté à tension constante et si le réglage de la tension de sortie se fait par un découpage approprié qui neutralise les harmoniques de rang bien spécifique.

3.6 Principe de la commande en MLI des onduleurs triphasés :

Dans un onduleur à modulation de largeur d'impulsion, au lieu de former chaque alternance d'une tension de sortie avec un seul créneau rectangulaire, on la forme de plusieurs créneaux de largeur convenable. Le schéma de l'onduleur reste le même (figure II.4) c'est la commande des interrupteurs

qui est modifiée.

Les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs sont donnés par les intersections de signal de référence avec la porteuse.

3.7 La Modulation de largeur d'impulsion :

Nous avons dit auparavant (II.6) que les ondes délivrées par les onduleurs à commande pleine onde ou à commande décalée sont riches en harmoniques. Pour atténuer ces harmoniques on peut placer en sortie de l'onduleur un filtre. Le filtrage de la tension ou de courant de sortie d'un onduleur ne délivrant qu'un créneau de tension ou de courant par alternance est difficile et onéreux, car le premier harmonique à éliminer (L'harmonique 3 ou 5) à une fréquence très voisine de celle du fondamental.

La modulation de largeur d'impulsion s'avère être la technique la plus appropriée pour la commande de l'onduleur tout en ayant une bonne neutralisation de l'onde de sortie.

3.7.1 Principe de la modulation de largeur d'impulsion :

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative.

Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI), cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude A_r et de fréquence f , avec un signal appelé porteuse d'amplitude A_p et de fréquence f_p très élevée. (Figure II.6)

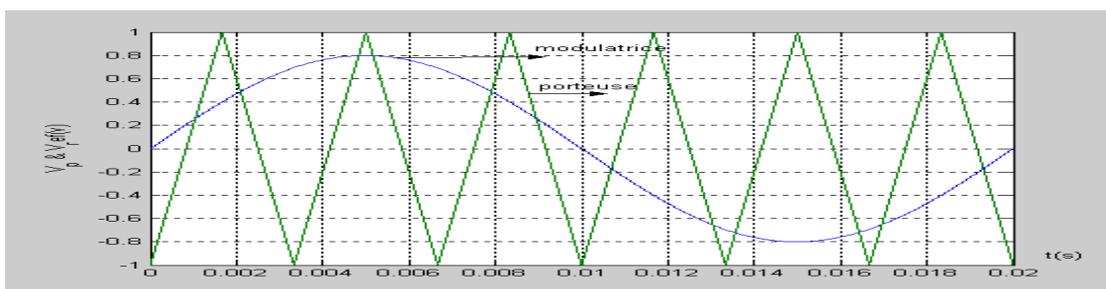


Figure II.7 Principe de la modulation

3.7.2 Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI)

- Les paramètres essentiels de la MLI sont :
- La fréquence du modulation : f_p
- L'indice de modulation : $m = \frac{f_p}{f_r}$ ou f_r est la fréquence de la référence.

- Le coefficient de réglage en tension r :

$$r = \frac{A_r}{A_p}$$

Avec :

A_r : Amplitude de la référence.

A_p : Amplitude de la porteuse.

La modulation montre que plus « m » est grand et plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de r la plus élevée possible [9].

- La modulation est dite synchrone si « m » est un nombre entier cela conduit à une tension de sortie « U' » qui se reproduit identiquement à elle-même tout les $T = \frac{1}{f}$.

- Dans certains cas la modulation est asynchrone, notamment quand à fréquence de modulation f_p donnée, on fait varier de façon continue la fréquence de la référence.

- Pour le choix de « m », on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre. Ces pertes croissent lorsque la fréquence de modulation augmente [9].

- On ne pourra jamais fonctionner avec un rapport de réglage égal a « 1 », car il faut toujours laisser une durée suffisantes aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras.

- Le schéma synoptique de la commande par modulation triangulaire- sinusoïdale triphasé est donnée par la Figure (II.7) .

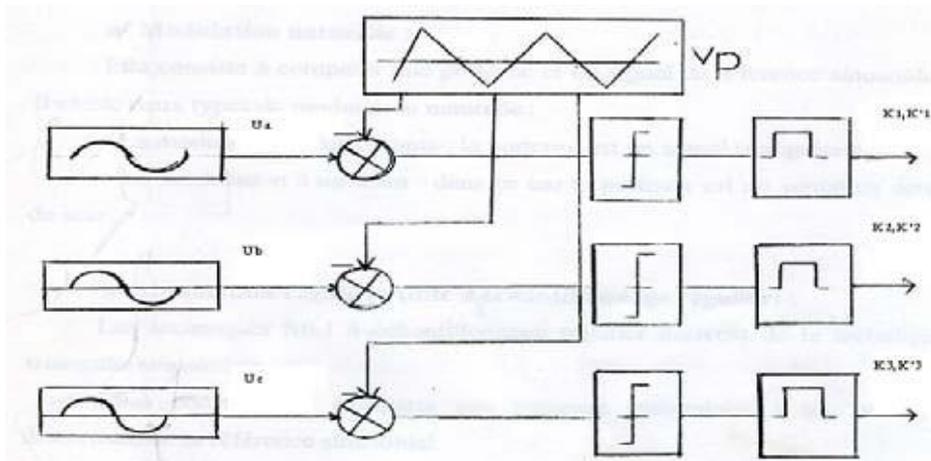


Figure II.8 Schéma synoptique de la commande en MLI (triphasé)

Un générateur d'onde délivre l'onde triangulaire aux trois phases (porteuse commune), par contre la référence est propre à chaque phase, les trois référence étant déphasées de 120°.

3.7.3 Types de Modulation :

Il existe deux types de modulation :

- Modulation naturelle.
- Modulation régulière.

3.7.3.1 Modulation naturelle

Cette technique utilise le principe général de la commande MLI qui consiste à comparer directement le signal de la porteuse avec celui de la référence.

Il est important de noter que la largeur d'impulsion est proportionnelle à l'amplitude du signal modulé à l'instant ou le basculement à lieu, car ce basculement correspond à des intersections des deux ondes (porteuse et modulatrice) instantanées. Ceci à deux conséquences importantes :

- Les centres des impulsions dans le signal MLI résultant ne sont pas équidistants.
- Il n'est pas possible de définir les largeurs d'impulsions en utilisant des expressions analytiques.

3.7.3.2 Modulation Régulière :

Les techniques MLI à échantillonnage régulier dérivent de la technique triangulo-sinusoidale. Elle consiste donc à comparer une porteuse triangulaire à une version discrétisée de la référence.

On distingue :

- 1) Technique à échantillonnage régulier symétrique.
- 2) Technique à échantillonnage régulier asymétrique.
- 3) Technique à échantillonnage régulier modifier.

3.8 Technique de production d'onde MLI :

Plusieurs techniques d'obtention d'onde MLI sont utilisés pour générer le signal de contrôle nécessaire à la commande et au blocage des éléments semi- conducteurs par exemple : impulsions de commande pour thyristors et courant de base pour les transistors. Le plus souvent, on fait appel à la technique analogique, numérique ou en utilisant les deux au même temps.

3.8.1 Technique analogique :

Cette technique est basée sur la comparaison entre une porteuse triangulaire et la référence, la comparaison est réalisée à l'aide d'un amplificateur opérationnel (Figure II.8).

3.8.2 Technique numérique :

Elle est basé sur l'utilisation des microprocesseurs qui assurent la génération des impulsions en se servant d'un programme définissant les angles d'amplitudes calculés au préalable. Cette technique a apporté une grande amélioration significative en matière de simplicité et performance du circuit de commande (Figure II.9).

3.8.3 Technique hybride :

Elle consiste à combiner les deux techniques précédentes analogique et numérique : L'onde de référence est obtenue d'une manière numérique (programmer sa fonction), par Contre l'onde porteuse est obtenue d'une manière analogique, La comparaison entre les deux signaux se fait par un comparateur analogique (Figure II.10).

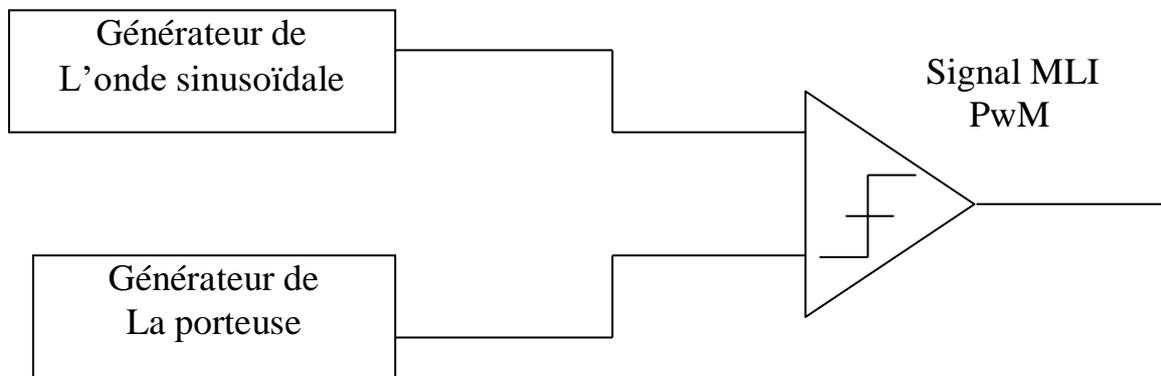


Figure II.9 Technique analogique

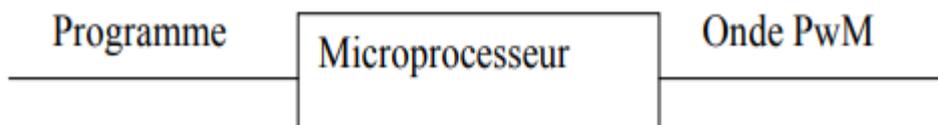


Figure II.10 Technique Numérique

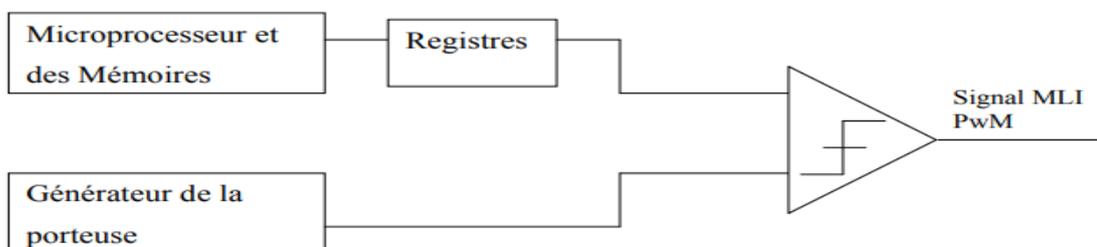


Figure II.11 Technique Hybride

3.9 Différentes techniques de modulation de longueur d'impulsions :

Plusieurs techniques de modulations ont été adoptées afin d'améliorer la qualité de tension à la sortie de l'onduleur, parmi les quelles on peut citer :

3.9.1 La modulation linéaire multiple (UPWM)

Dans cette technique on compare une porteuse triangulaire avec un signal de référence linéaire. L'onde de sortie est sous la forme d'un train d'impulsion en créneaux de largeurs égales (Figure II.11).

Si l'indice de modulation est égal à un, on obtient la modulation singulière, dans laquelle le signal de sortie est formé d'une seule impulsion par demi-période. [11].

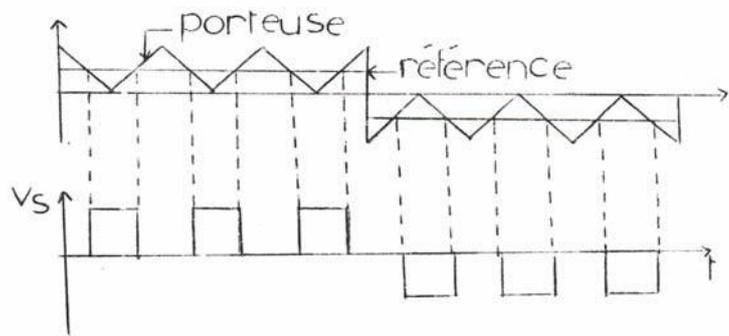


Figure II.12 La modulation de largeur d'impulsions multiples

3.9.2 La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM)

Dans ce cas, le signal de référence est sinusoïdal, on obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable (figure II.12).

Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante.

La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [11][18]. Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles, car elle s'est avérée la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques.

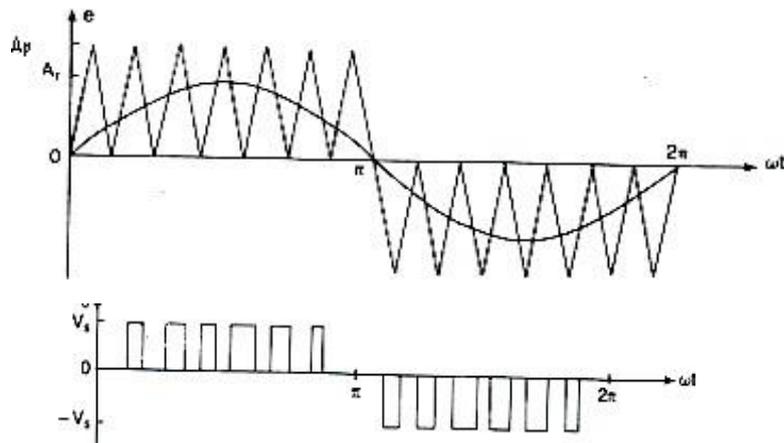


Figure II.13 MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire

3.9.3 La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée) (MSPWM) :

Le signal référence est toujours sinusoïdal, sauf que dans cette technique la porteuse n'est pas appliquée au milieu des alternances de la sinusoïde (Figure II.13).

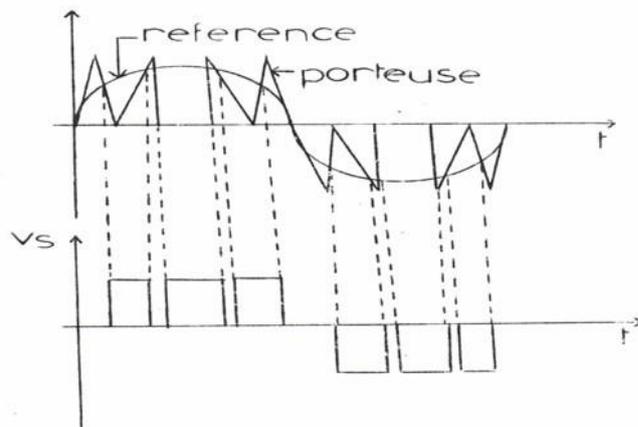


Figure II.14 La modulation sinusoïdale modifiée

3.10 Les avantages de la M.L.I :

La modulation de largeur d'impulsion présente les avantages suivants :

- Une bonne neutralisation d'harmonique par rapport aux onduleurs à onde carrée ou en un seul créneaux.
- Elle permet de repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilité le filtrage.
- De faire varier la valeur du fondamental de tension de sortie.
- La MLI permet aussi l'alimentation de plusieurs ensembles onduleurs,

moteurs asynchrones à partir d'une même source continue.

Nous nous proposons donc de simuler les techniques suivantes :

- La modulation sinusoïdale- triangulaire.
- L'injection de l'harmonique 3 dans la référence.
- La modulation vectorielle.
- La modulation calculée.

et les comparer du point de vue de leurs spectres d'harmoniques.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types d'onduleurs et différents types de commande. La commande MLI est la plus avantageuse pour générer des signaux sinusoïdaux.

Chapitre III

UPFC de la commande PI

Chapitre III

UPFC de la commande PI

III.1 Introduction :

Actuellement l'UPFC (Unified Power Flow Controller) ou variateur de charge universel, représente le dispositif le plus récent qui attire l'attention d'un grand nombre de chercheurs, car il s'avère le seul capable de contrôler simultanément et indépendamment les puissances active et réactive d'un réseau. Union de deux compensateurs, un en série et l'autre en parallèle, il permet de commander les trois paramètres associés au transit des puissances à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport.

III.2 Structure de l'UPFC :

L'UPFC est un quadripôle qui doit être placé sur la ligne de transmission entre la source et le récepteur comme le précise la *Figure (III.1)* [Yia 97], [Sud 02]. Il est constitué de deux onduleurs de tension (VSC) reliés par un circuit continu commun (dc link). Le premier est branché en série et l'autre en parallèle à la ligne (voir *Figure III.2*). Le convertisseur A accomplit la tâche principale de l'UPFC et ce par l'injection d'une tension alternative définie par une amplitude et une phase réglables par le biais du transformateur T_2 . Quant au convertisseur B, son rôle est de fournir ou d'absorber la puissance active demandée par le convertisseur A au circuit continu commun. Il peut aussi produire ou absorber de la puissance réactive [Ben 05].

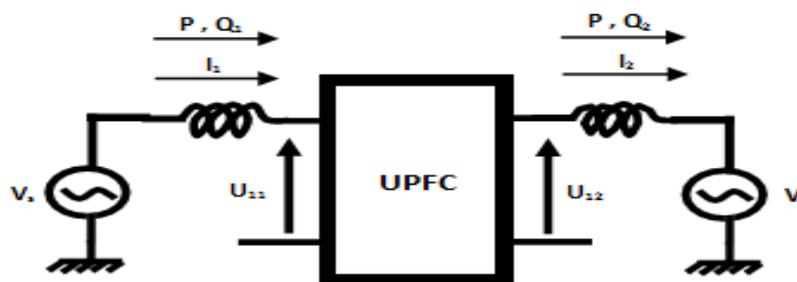


Figure III.1 : Emplacement de l'UPFC

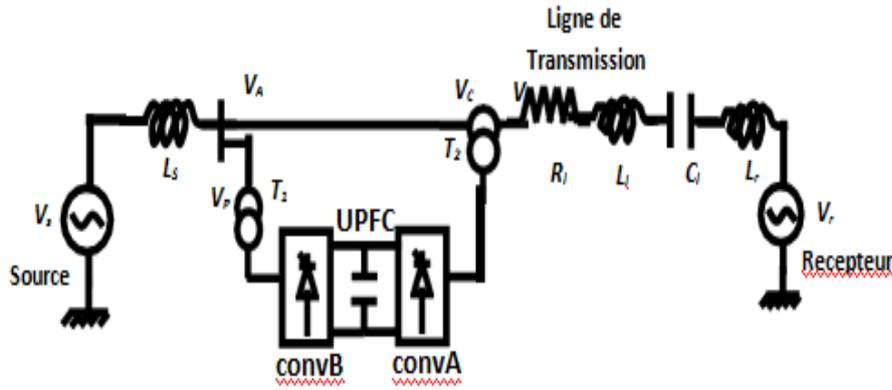


Figure III.2 : Schéma de principe de l'UPFC

III.3 Modélisation et Principe de fonctionnement de l'UPFC:

III.3.1 Modèle simplifié de l'UPFC : [Ben05]:

Dans l'analyse suivante, on peut considérer l'UPFC comme un système simple à deux machines dans le but de rendre la compréhension de son fonctionnement facile. Le principe est assimilable à une source de courant (I_{V1}) et une source de tension (V_{V2}) réglables qui représentent respectivement les sorties des convertisseurs shunt et série. En négligeant la résistance de la ligne de transmission et celle du transformateur, ce système à deux machines peut être simplifié commereprésenté sur la Figure (III.3).

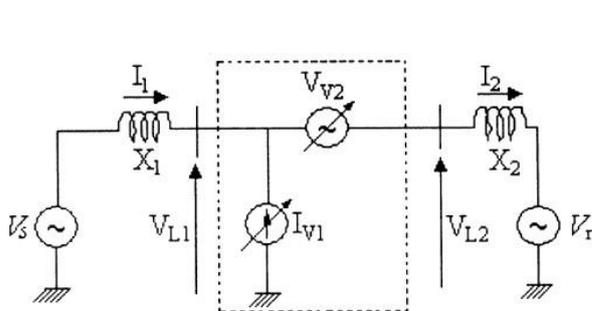


Figure III.3 : Modèle équivalent d'un UPFC

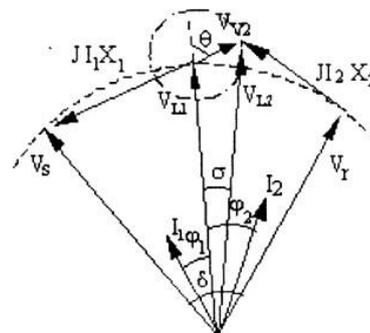


Figure III.4 : Diagramme vectoriel correspondant au modèle équivalent

III.3.2 Principe de fonctionnement de l'UPFC: [All02], [Yia97], [Ben05]:

Comme il a été décrit auparavant, le convertisseur de tension contrôlé de façon appropriée peut générer une tension alternative de sortie au point de raccordement avec une fréquence fondamentale donnée et une amplitude variable (de 0 jusqu'à sa valeur maximale), ainsi qu'un angle de phase variant (de 0 à 360°). Via le transformateur, la tension de sortie du convertisseur est injectée dans la ligne, ce qui change la chute de tension effective à travers l'impédance de la ligne et par la suite le courant dans la ligne. Par conséquent,

l'écoulement des puissances active et réactive dans la ligne de transmission peut être contrôlé indépendamment par l'ajustement de l'angle de phase et de l'amplitude de la tension série injectée.

Un certain échange de puissances active et réactive prend place entre le système alternatif et le convertisseur série. La puissance active absorbée ou générée sera renvoyée ou fournie par le système alternatif à travers le convertisseur shunt. Ainsi, le convertisseur parallèle permet par voie directe de fournir la puissance réelle demandée par le convertisseur série. La puissance active absorbée ou générée par le convertisseur série provient de la circulation de l'énergie dans les trois phases.

L'UPFC peut assurer plusieurs fonctions lorsque la tension injectée V_c prend plusieurs valeurs d'amplitude et de phase. Il peut fonctionner comme un régulateur de tension lorsque la tension introduite en série, est en phase avec la tension V_A (voir *Figure III.5 (a)*). Il fonctionne

comme un compensateur série lorsque la tension injectée est perpendiculaire au courant de la ligne (*Figure III.5 (b)*). Il est aussi possible que l'UPFC puisse fonctionner comme un régulateur d'angle de phase lorsque la tension V_c possède un angle variable et une amplitude constante ou

comme une combinaison de la régulation de l'angle de phase et du contrôle de la tension comme illustré sur la *Figure III.5 (c)* et (d). L'UPFC assure non seulement les fonctions multiples de contrôle, mais aussi une grande flexibilité d'agir qui se manifeste par une capacité dans l'accomplissement de trois fonctions incluant la régulation de l'angle de phase, la compensation série et la régulation de la tension de la ligne simultanément et aussi bien une transition douce d'une régulation à une autre.

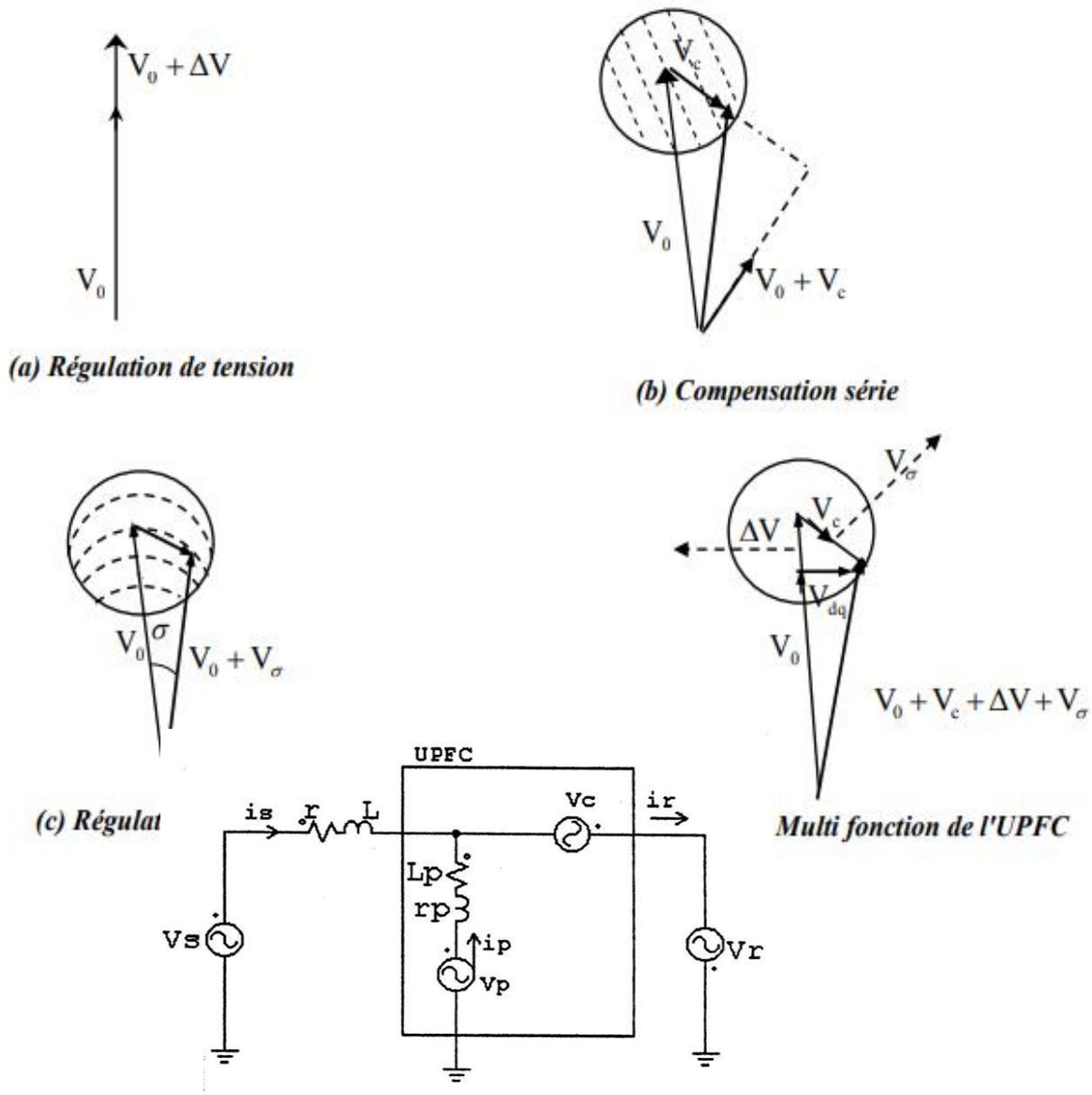


Figure III.6 : circuit équivalent de l'UPFC.

$r_a = r_b = r_c = r$: La résistance de la ligne ($r = r_0 \cdot l$ avec r_0 : la résistance linéique).

$L_a = L_b = L_c = L$: L'inductance de la ligne ($L = L_0 \cdot l$ avec L_0 : l'inductance linéique).

$r_{pa} = r_{pb} = r_{pc} = r_p$: La résistance de la ligne parallèle.

$L_{pa} = L_{pb} = L_{pc} = L_p$: L'inductance de la ligne parallèle.

On distingue deux mailles :

❖ Equations dynamiques du compensateur série :

L'application des lois de Kirchhoff aux mailles du circuit de la *Figure (III.6)* nous donne:

$$\begin{cases} V_{sa} = r_{sa} + L \frac{di_{sa}}{dt} + V_{ca} + V_{ra} \\ V_{sb} = r_{sb} + L \frac{di_{sb}}{dt} + V_{cb} + V_{rb} \\ V_{sc} = r_{sc} + L \frac{di_{sc}}{dt} + V_{cc} + V_{rc} \end{cases} \hat{U} \begin{cases} L \frac{di_{sa}}{dt} = -r_{sa} + V_{sa} - V_{ca} - V_{ra} \\ L \frac{di_{sb}}{dt} = -r_{sb} + V_{sb} - V_{cb} - V_{rb} \\ L \frac{di_{sc}}{dt} = -r_{sc} + V_{sc} - V_{cc} - V_{rc} \end{cases} \quad (III.1)$$

❖ Equations dynamiques du compensateur parallèle :

$$\begin{cases} V_{pa} = r_p i_{pa} + L_p \frac{di_{pa}}{dt} + V_{ca} + V_{ra} \\ V_{pb} = r_p i_{pb} + L_p \frac{di_{pb}}{dt} + V_{cb} + V_{rb} \\ V_{pc} = r_p i_{pc} + L_p \frac{di_{pc}}{dt} + V_{cc} + V_{rc} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} L_p \frac{di_{pa}}{dt} = -r_p i_{pa} + V_{pa} - V_{ca} - V_{ra} \\ L_p \frac{di_{pb}}{dt} = -r_p i_{pb} + V_{pb} - V_{cb} - V_{rb} \\ L_p \frac{di_{pc}}{dt} = -r_p i_{pc} + V_{pc} - V_{cc} - V_{rc} \end{cases} \quad (III.2)$$

Dans le repère de Park : « voir annexe B »

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & w \\ -w & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sd} & -V_{cd} & -V_{rd} \\ V_{sq} & -V_{cq} & -V_{rq} \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_p}{L_p} & w \\ -w & -\frac{r_p}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} V_{pd} & -V_{cd} & -V_{rd} \\ V_{pq} & -V_{cq} & -V_{rq} \end{bmatrix} \quad (III.4)$$

❖ Equations dynamiques du circuit continu:

Dans le circuit continu on a :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2CV_{dc}} \left(V_{cd} i_{rd} + V_{cq} i_{rq} - V_{pd} i_{pd} - V_{pq} i_{pq} \right) \quad (III.5)$$

$$\begin{aligned} i_{rd} &= i_{sd} + i_{pd} \\ i_{rq} &= i_{sq} + i_{pq} \end{aligned} \quad (III.6)$$

❖ **Calcul des puissances active et réactive instantanées de l'UPFC :**

Le calcul des puissances active et réactive instantanées générées et absorbées s'obtient au moyen de la formule classique [Rah09]:

- Les puissances active et réactive au côté de source :

$$p_s = \frac{3}{2} (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) \quad (III.7)$$

$$q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq}) \quad (III.8)$$

- Les puissances active et réactive au côté de récepteur :

$$p_r = \frac{3}{2} (V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq}) \quad (III.9)$$

$$q_r = \frac{3}{2} (V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq}) \quad (III.10)$$

III.4.1 Technique de la modulation de largeur d'impulsion d'un onduleur simple:

- **Commande sinus triangle**

La commande par Modulation de Largeur d'Impulsion consiste à découper la tension de sortie générée par le convertisseur en une série de motifs élémentaires de période très faible, et de rapport cyclique variable dans le temps. L'évolution temporelle du rapport cyclique est alors déterminée par un signal modulant que l'on choisit en général sinusoïdal. Les ordres de commande de chaque cellule sont générés par l'intersection entre une porteuse triangulaire et le signal modulant.

Pour réaliser un onduleur de tension à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) intersective, il faut comparer une **onde de modulation triangulaire** V_m de fréquence f' et d'amplitude maximale A à des **ondes de références sinusoïdales** V_{ref} de fréquence f et décalées dans le temps de 120 degrés et d'amplitude maximale V_0 . La commande des interrupteurs de chaque bras est complémentaire.

Cette MLI sera caractérisée par les termes suivants :

- Indice de modulation $m = f'/f$, rapport des fréquences de modulation et de référence
 La commande est synchrone, si m est entier, optimal et impair.
- **Coefficient de réglage en tension** $r = V_0/A \leq 1$, rapport des amplitudes de l'onde de référence (V_{ref}) et de l'onde de modulation (V_m).
- **Fréquence de référence** $f = f_1$ (**fréquence fondamentale**). Les harmoniques de la tension de sortie et par conséquent du courant de charge se regroupent en familles :
 - La première famille est centrée sur la fréquence $m.f$ autour de l'intervalle: $[(m-2)f, (m+2)f], [(m-4)f, (m+4)f], \dots$
 - deuxième famille est centrée sur la fréquence $2.m.f$ autour de l'intervalle: $[(2m-1)f, (2m+1)f], [(2m-3)f, (2m+3)f], \dots$
 - La troisième famille est centrée sur la fréquence $3.m.f$ autour de l'intervalle: $[(3m-2)f, (3m+2)f], [(3m-4)f, (3m+4)f], \dots$

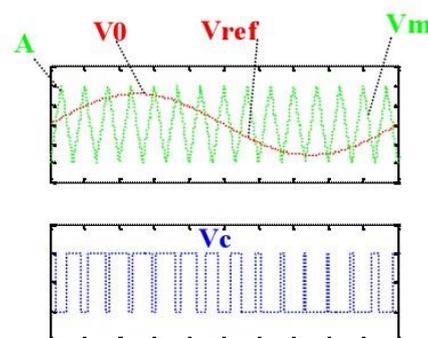
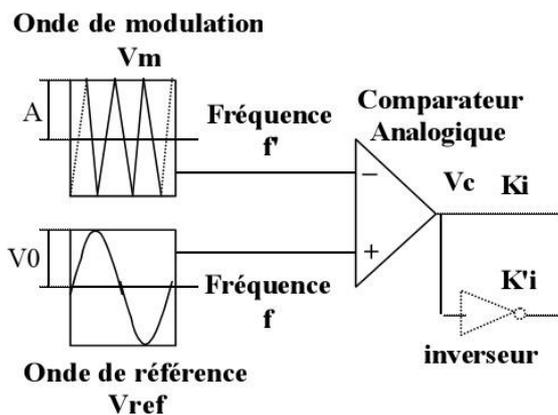


Figure III.7-a : Synoptique analogique de la

Figure III.7-b : Formes d'ondes

MLI intersective

En modulation synchrone, on adopte une valeur de l'indice de modulation multiple de 3 pour que les trois tensions V_a, V_b et V_c soient identiques à un tiers de période près et

éliminer

les harmoniques de rang 3 et multiples de trois. Si l'indice de modulation (m) est multiple de 3 et impair, les harmoniques multiples de trois et pairs n'apparaissent pas dans les tensions de charge, les autres impairs se répartissent par familles autour de :

$$\begin{cases} mf : [(m - 2)f, (m + 2)f], [(m - 4)f, (m + 4)f], \\ 2mf : [(2m - 1)f, (2m + 1)f], [(2m - 3)f, (2m + 3)f], \\ 3mf : [(3m - 2)f, (3m + 2)f], [(3m - 4)f, (3m + 4)f]. \end{cases}$$

La commande à MLI intersective est largement utilisée dans les applications à fréquence fixe, pour la variation de la vitesse d'une machine électrique, la commande à MLI (intersective) est généralement associée à une commande vectorielle. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la figure suivante :

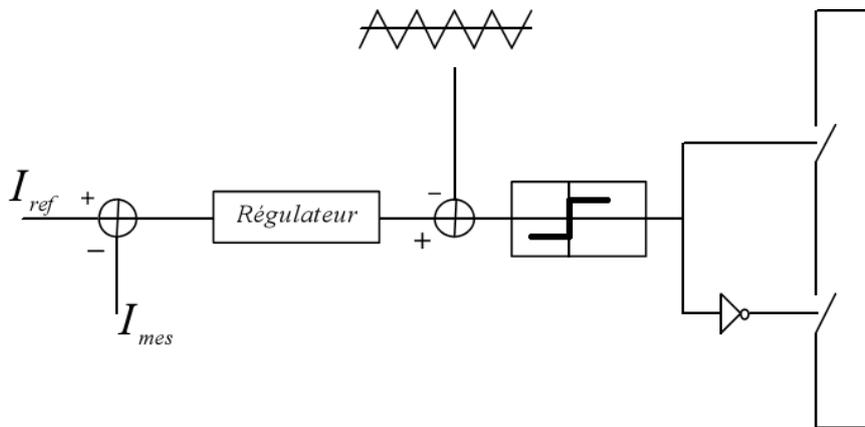


Figure III.8 : Principe de commande des courants par MLI

Ils existent également dans la littérature comme la MLI pré calculé et la MLI vectorielle.

La stratégie de la génération de la commande MLI d'un onduleur a trois niveaux «voir annexe B»

III.5 Modélisation de l'UPFC à trois niveaux : [Rah09]:

Le circuit simplifié de l'UPFC à trois niveaux est représenté sur la Figure (III.9). La modélisation de ce circuit est basée sur les mêmes hypothèses précédentes.

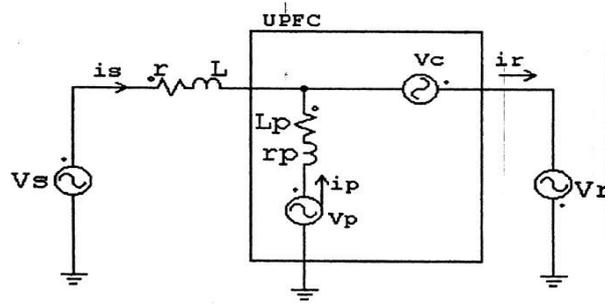


Figure III.9 : circuit équivalent de l'UPFC à trois niveaux.

❖ Equations dynamiques du compensateur série

$$\begin{cases} L \frac{di_{sa}}{dt} + r i_{sa} = V_{sa} - V_{ca} - V_{ra} \\ L \frac{di_{sb}}{dt} + r i_{sb} = V_{sb} - V_{cb} - V_{rb} \\ L \frac{di_{sc}}{dt} + r i_{sc} = V_{sc} - V_{cc} - V_{rc} \end{cases} \quad (III.11)$$

❖ Equations dynamiques du compensateur parallèle

$$\begin{cases} L_p \frac{di_{pa}}{dt} + r_p i_{pa} = V_{pa} - V_{ca} - V_{ra} \\ L_p \frac{di_{pb}}{dt} + r_p i_{pb} = V_{pb} - V_{cb} - V_{rb} \\ L_p \frac{di_{pc}}{dt} + r_p i_{pc} = V_{pc} - V_{cc} - V_{rc} \end{cases} \quad (III.12)$$

Etant donné que les deux compensateurs sont des onduleurs à trois niveaux, les trois sources de tension $V_{ca}, V_{cb}, V_{cc}, V_{pa}, V_{pb}$ et V_{pc} peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{pa} \\ V_{pb} \\ V_{pc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} S_{1A} & S_{2A} \\ S_{1B} & S_{2B} \\ S_{1C} & S_{2C} \end{bmatrix} V_{dc1} - \begin{bmatrix} S_{3A} & S_{4A} \\ S_{3B} & S_{4B} \\ S_{3C} & S_{4C} \end{bmatrix} V_{dc2} \right\} \quad (III.13)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} S_{1A} & S_{2A} \\ S_{1B} & S_{2B} \\ S_{1C} & S_{2C} \end{bmatrix} V_{dc1} - \begin{bmatrix} S_{3A} & S_{4A} \\ S_{3B} & S_{4B} \\ S_{3C} & S_{4C} \end{bmatrix} V_{dc2} \right\} \quad (III.14)$$

Où V_{dc1} et V_{dc2} sont les deux tensions continues de l'onduleur à trois niveaux. En utilisant la transformation de park, les trois systèmes (III-11), (III-12), et (III-5) peuvent être réécrit sous la forme suivante ;

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & w \\ -w & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sd} & -V_{cd} & -V_{rd} \\ V_{sq} & -V_{cq} & -V_{rq} \end{bmatrix} \quad (III.15)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_p}{L_p} & w \\ -w & -\frac{r_p}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} V_{pd} & -V_{cd} & -V_{rd} \\ V_{pq} & -V_{cq} & -V_{rq} \end{bmatrix}$$

$$(III.16)$$

Ou $(V_{sd}, V_{sq}), (V_{rd}, v_{rq}), (V_{cd}, V_{cq})$ sont respectivement les deux composantes *d et q* des tensions V_s, V_r, V_c et V_p .

❖ **Equations dynamiques du circuit continu:**

L'équation dynamique du circuit continu s'écrit :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2CV_{dc}} (V_{cd}i_{rd} + V_{cq}i_{rq} - V_{pd}i_{pd} - V_{pq}i_{pq}) \quad (III.17)$$

$$\begin{aligned} i_{rd} &= i_{sd} + i_{pd} \\ i_{rq} &= i_{sq} + i_{pq} \\ V_{dc} &= V_{dc1} + V_{dc2} \end{aligned} \quad (III.18)$$

❖ **Calcul des puissances active et réactive instantanées de l'UPFC**

- les puissances active et réactive générées :

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq}) \quad (III.19)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{sq}i_{sd} - V_{sd}i_{sq}) \quad (III.20)$$

- puissance active et reactive absorbées :

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{rd}i_{rd} + V_{rq}i_{rq}) \quad (III.21)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{rq}i_{rd} - V_{rd}i_{rq}) \quad (III.22)$$

III.6 Configuration des circuits de réglage de l'UPFC :

Dans la configuration des circuits de réglage d'un UPFC on distingue deux parties :

- les circuits de réglage d'un compensateur parallèle.
- les circuits de réglage d'un compensateur série.

La Figure (III.10) montre le schéma de principe des circuits de réglage complets :

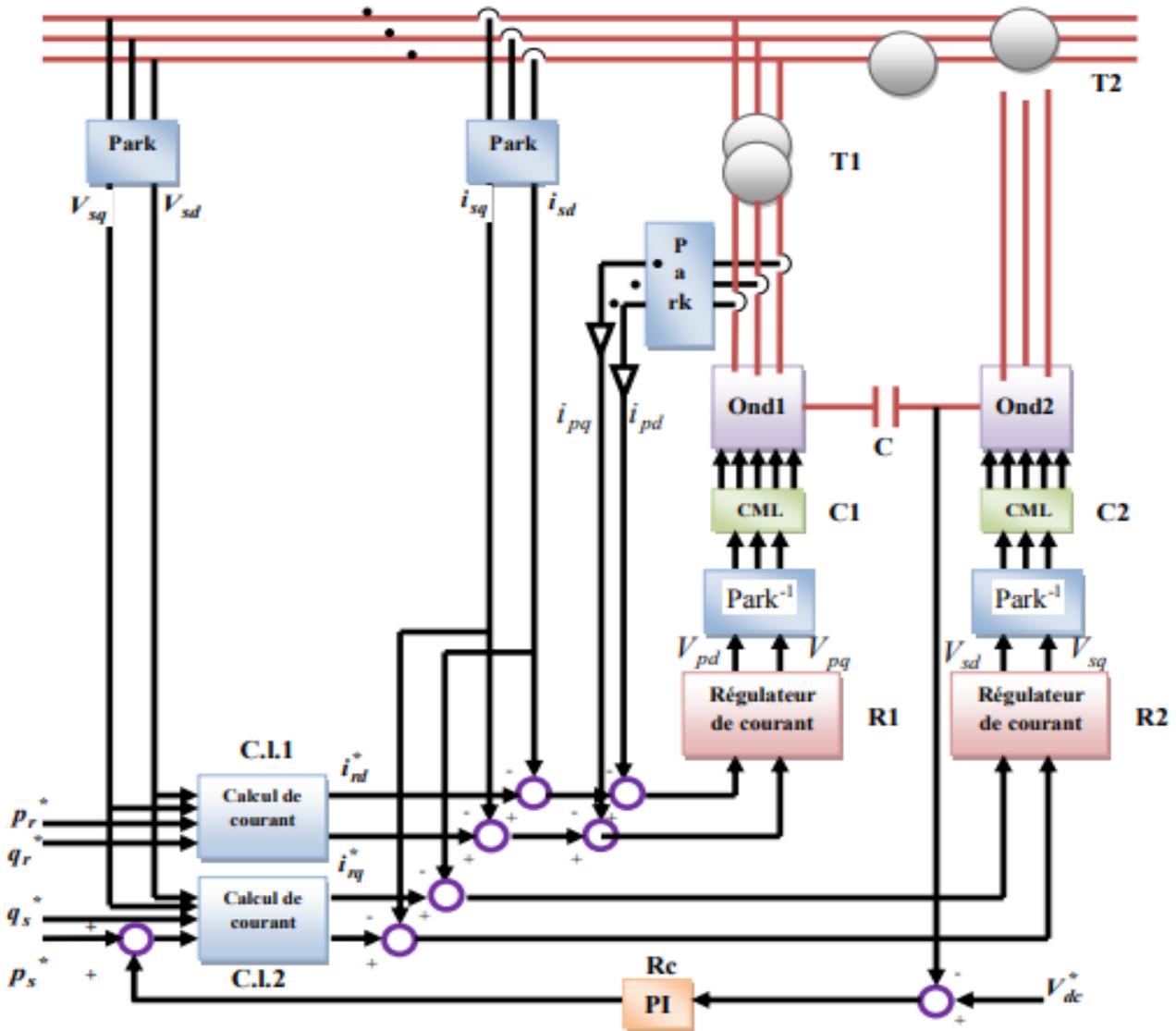


Figure III.10 : schéma de principe des circuits de réglage complets d'un UPFC.

III.6.1 Les circuits de réglage d'un compensateur parallèle :

A la Figure (III.10), on y trouve l'onduleur à pulsation (ond1) et le condensateur-tampon (C). L'onduleur à pulsation est commandé par le dispositif (C1) à l'aide de trois signaux de commande V_{pa}^* , V_{pb}^* et V_{pc}^* fournis par l'intermédiaire de la transformation de Park et par le régulateur de courant (R1).

Superposés, on trouve le régulateur de la tension continue (Rc) et le bloc de calcul des courants de référence i_{sd}^* et i_{sq}^* .

On a :

$$\begin{cases} i_{sq} = \left(\frac{2}{3} p_s - V_{sd} i_{sd} \right) / V_{sq} \\ i_{sd} = \left(\frac{2}{3} q_s + V_{sd} i_{sq} \right) / V_{sq} \end{cases} \quad (III.23)$$

III.6.2 Les circuits de réglage de compensateur série :

A la Figure (III-10), on y trouve à pulsation (ω) qui est branché aux enroulements basse tension du transformateur (T2), les enroulements haute tension de ce dernier sont connectés en série avec la ligne de transmission triphasée, l'onduleur à pulsation doit être dimensionné selon la tension à injecter est commandé par le dispositif (C2) à l'aide de trois signaux de commande V_{sa}^* , V_{sb}^* et V_{sc}^* .

Il y a un réglage de la puissance à l'aide du bloc de calcul des courants de référence i_{rd}^* et i_{rq}^*

$$i_{rq} = \left(\frac{2}{3} p_r - V_{rd} i_{rd} \right) / V_{rq} \tag{III.24}$$

$$i_{rd} = \left(\frac{2}{3} q_r + V_{rd} i_{rq} \right) / V_{sq} \tag{III.25}$$

$$i_{pd} = i_{rd} - i_{sd}$$

$$i_{pq} = i_{rq} - i_{sq}$$

Réglage de l'UPFC par PI analogique :

La régulation classique type PI est la technique la plus répandue à l'échelle industrielle, cela est dû évidemment à la simplicité de sa mise en œuvre, de ses performances acceptables, et de son coût réduit par rapport à celles utilisées dans les techniques avancées.

Les performances des régulateurs PI sont obtenues par un choix judicieux de ses paramètres « K_p, K_i », qui représentent respectivement le gain proportionnel et le gain de l'action intégrale [All02], [Bel05].

➤ **Le couplage entre les courants par interaction des tensions:**

On a montré que dans un repère d, q :

$$d \frac{i_{sd}}{dt} = -\frac{r}{L} i_{sd} + \omega i_{sq} + \frac{1}{L} (V_{sd} - V_{cd} - V_{rd})$$

$$d \frac{i_{sq}}{dt} = -\frac{r}{L} i_{sq} - \omega i_{sd} + \frac{1}{L} (V_{sq} - V_{cq} - V_{rq}) \tag{III.26}$$

On pose :

$$X_1 = \frac{1}{L} (V_{sd} - V_{cd} - V_{rd})$$

$$X_2 = \frac{1}{L} (V_{sq} - V_{cq} - V_{rq}) \tag{III.27}$$

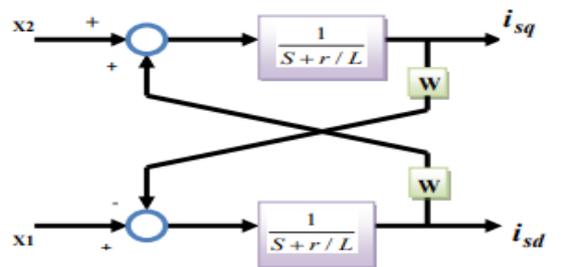
On obtient :

$$\begin{aligned} d \frac{i_{sd}}{dt} &= -\frac{r}{L} i_{sd} + \omega i_{sq} + X1 & (III.28) \\ d \frac{i_{sq}}{dt} &= -\frac{r}{L} i_{sq} - \omega i_{sd} + X2 \end{aligned}$$

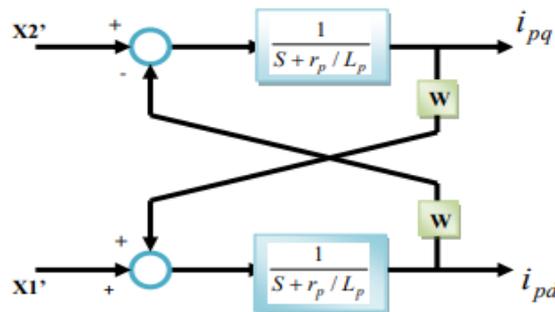
Avec :

$$\begin{aligned} X1 &= \left(s + \frac{r}{L} \right) i_{sd} - \omega i_{sq} \\ X2 &= \left(s + \frac{r}{L} \right) i_{sq} + \omega i_{sd} \end{aligned} \quad (III.29)$$

Ces équations mettent en évidence le couplage entre les actions sur les axes d et q.



a). compensateur série.



b). Compensateur parallèle.

Figure III.11: description des couplages.

➤ **Découplage par compensation :**

Définissons deux nouvelles variables de commande V_1 et

V_2 : Soit :

$$\begin{aligned} X1 &= V1 - \omega i_{sq} \\ X2 &= V2 - \omega i_{sd} \end{aligned} \quad (III.30)$$

Avec :

$$\begin{aligned} V1 &= \left(s + \frac{r}{L} \right) i_{sd} \\ V2 &= \left(s + \frac{r}{L} \right) i_{sq} \end{aligned} \quad (III.31)$$

Les tensions $X1$ et $X2$ sont alors reconstituées à partir des tensions $V1$ et $V2$

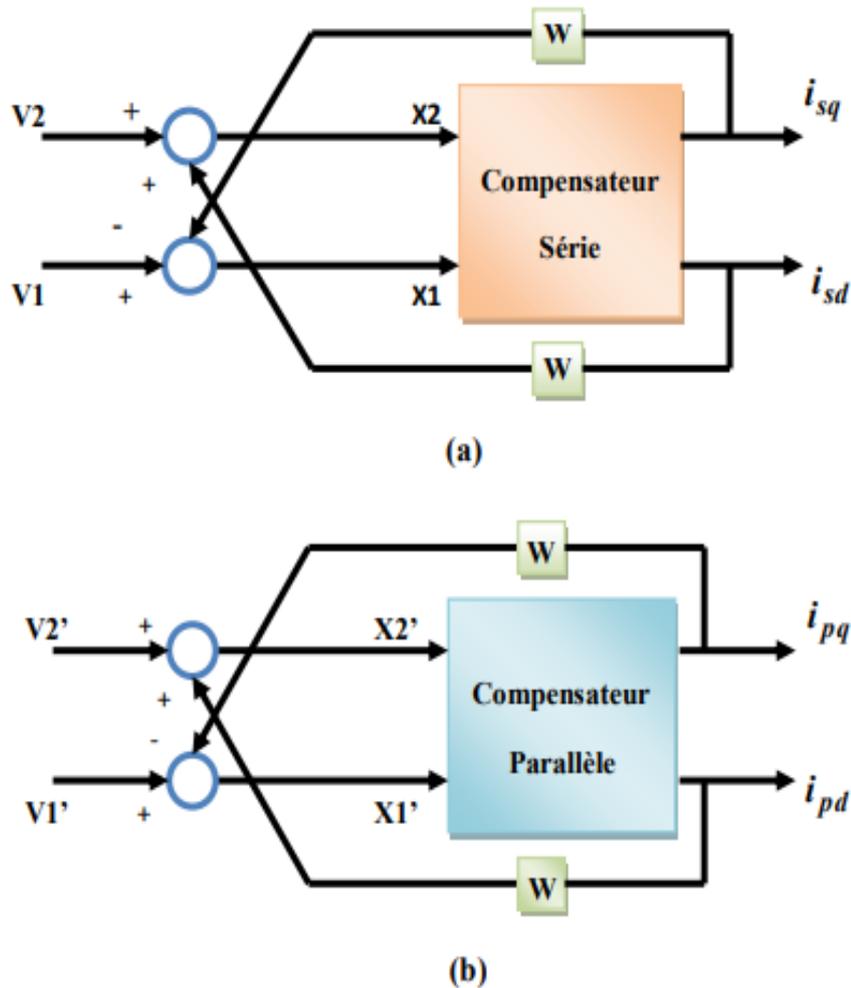


Figure III.12 : reconstitutions des tensions $X1$ et $X2$.

La synthèse des régulateurs porte sur des systèmes linéaires « du premier ordre sur notre système ». Mais une erreur provoque une réapparition du couplage et de la non stationnarité du système et parfois même sa déstabilisation, il faut donc utiliser des régulateurs robustes.

On réalise finalement la commande suivante :

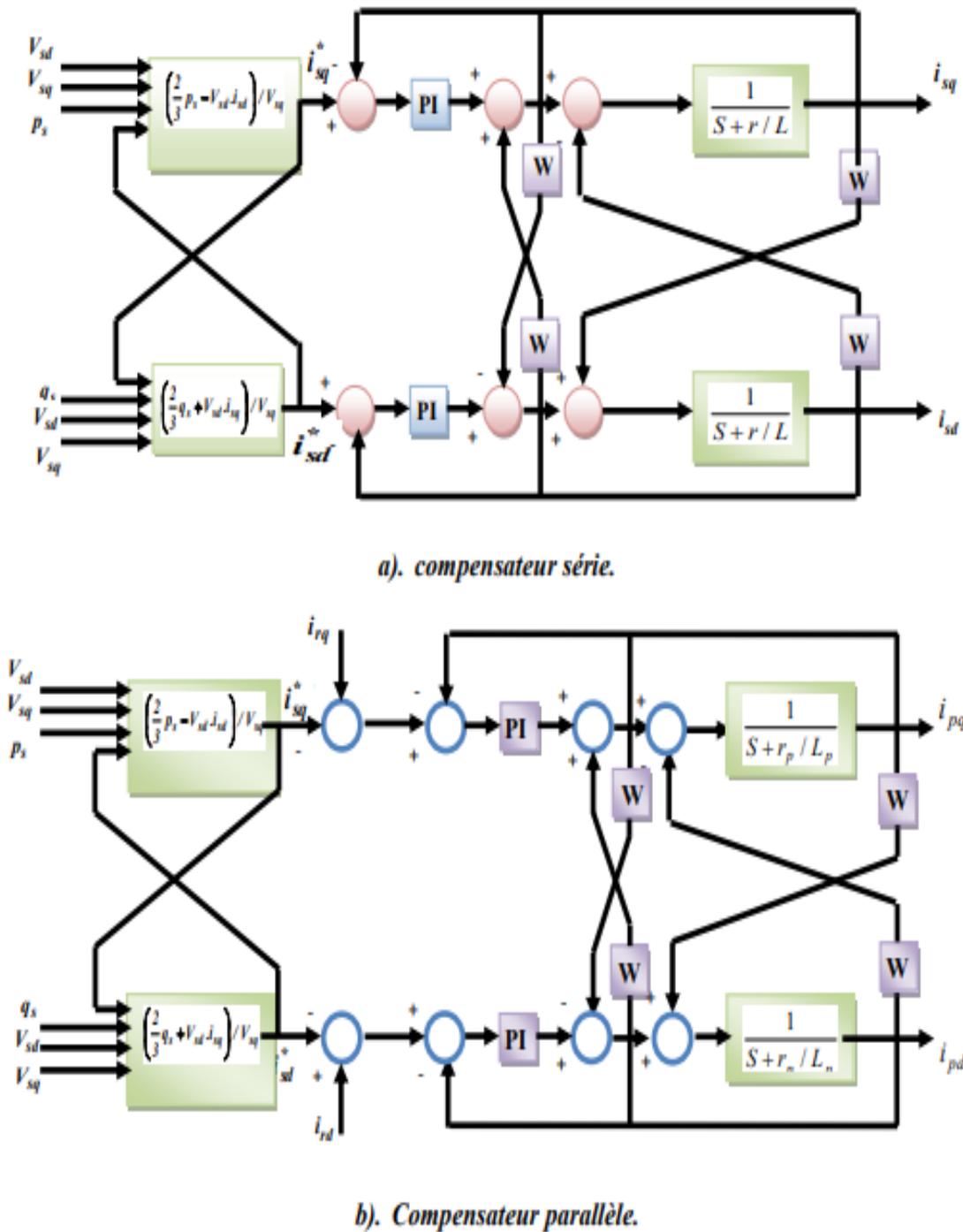


Figure III.13 : circuit de réglage de l'UPFC.

Le principe du découplage et la transformation directe de Park permettent de générer les trois tensions de références destinées à commander l'onduleur de tension à travers la commande rapprochée, cette dernière gère les diverses contraintes liées au fonctionnement de l'onduleur

« temps morts, protections, commande des interrupteurs statiques » et génère les commandes des six interrupteurs. L'onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion « MLI » fonctionne à fréquence fixe et rapport cyclique variable.

Nota : En ce qui concerne d'étude détaillée des structures de puissance et des stratégies de MLI, on pourra se reporter aux nombreux ouvrages spécialisés existants.

Quelle que soit la structure des interrupteurs et la « MLI ». Adoptée « régulière, intersective », on néglige les retards intrinsèques dus à l'onduleur. Dans ces conditions les tensions V_{pa} , V_{pb} et V_{pc} « par exemple, l'onduleur parallèle. », correspondent à un facteur G_o près aux consignes $V_{pa\ ref}$, $V_{pb\ ref}$ et $V_{pc\ ref}$ générées par l'asservissement. G_o est le gain statique de l'onduleur associé à sa commande rapprochée.

$$V_{pi} = G_o V_{piref} \text{ avec } i = a, b, c .$$

Par application de la transformation de Park, on obtient alors :

$$\begin{bmatrix} V_{pd} \\ V_{pq} \end{bmatrix} = G_o \begin{bmatrix} V_{pdref} \\ V_{pqref} \end{bmatrix}$$

➤ *Remarque :*

Si l'on tient compte du retard statique pour introduire l'onduleur, la fonction de transfert de l'ensemble onduleur commande rapprochée devient

$$G_o e^{-\frac{\tau}{2}s} = \frac{G_o}{1 + \frac{\tau}{2}s} \tag{III.32}$$

$\tau = f^{-1}$, f étant la fréquence de fonctionnement de l'onduleur.

➤ **Calcul des régulateurs :**

Le schéma bloc et l'équation de compensateur « parallèle ou série » régulée en courant, associée à l'onduleur MLI, avec découplage se mettent sous la forme de deux boucles séparées si le découplage est parfait.

Notre système à régler avec l'organe de commande ne possède qu'une petite constante de temps.

L'approche la plus classique consiste à contrôler la puissance par un régulateur PI qui peut aisément être déterminé à partir de modèle découplé du compensateur [Bel05]

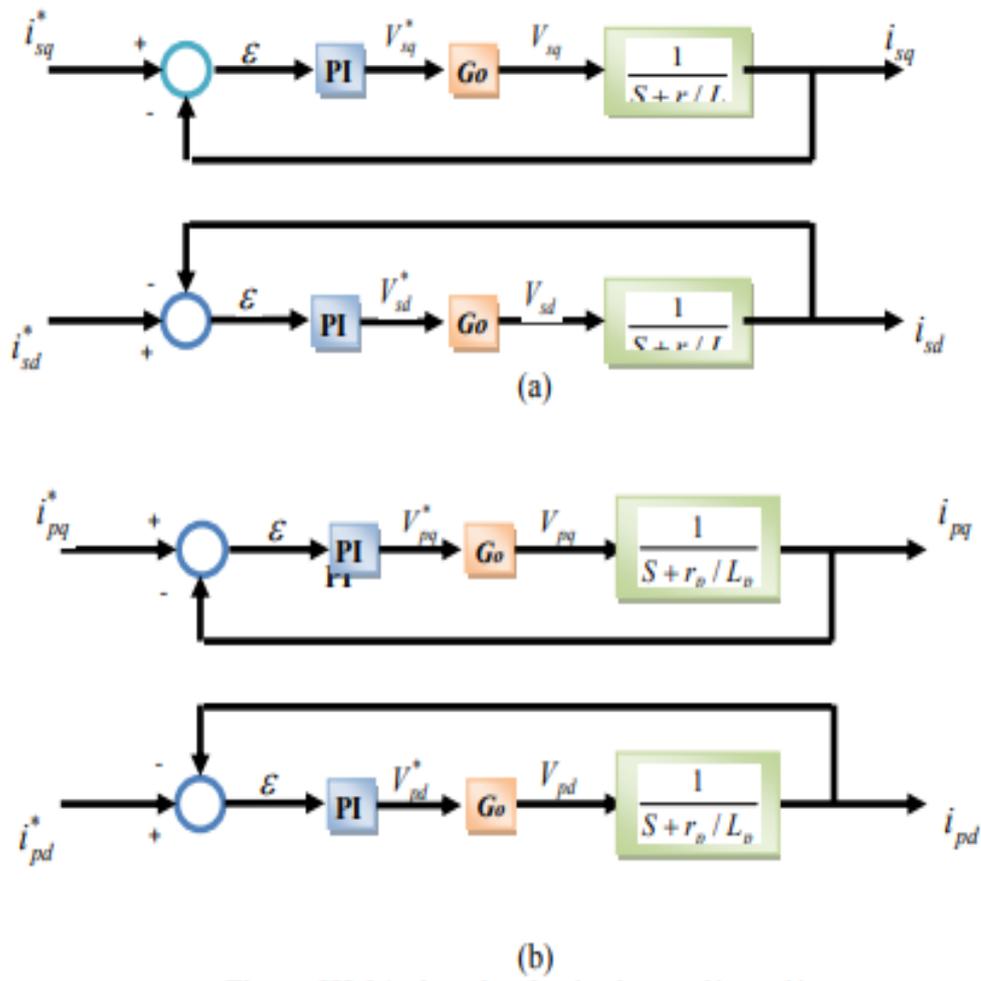


Figure III.14 : boucles de régulation découplées.

La fonction de transfert du régulateur PI est donnée par :

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{k_p s + k_i}{s} \tag{III.33}$$

III.7. Conclusion

Une étude comparative entre l'UPFC à deux niveaux et à trois niveaux avec le régulateur PI a été faite, ce qui nous permet de conclure que la nouvelle structure est plus avantageuse que la structure classique surtout pour les applications de grandes puissances. La structure à deux niveaux donne naissance à une large bande de fortes oscillations au niveau des puissances ainsi que les composantes i_{sd} et i_{sq} , ce qui traduit

Chapitre IV

Résultats et simulation

IV.1 Introduction

Comme il a été déjà mentionné l'UPFC peut contrôler indépendamment ou séparément tous les paramètres affectant le flux de puissance sur une ligne de transmission.

L'UPFC peut avoir différents modes de fonctionnement quant la tension injectée en série a différentes amplitudes et angle de phase car il s'avère le seul capable de contrôler simultanément et indépendamment les puissances active et réactive d'un réseau.

IV.2 Modèle de l'onduleur :

L'onduleur est un assemblage de trois ponts monophasés formés chacun de deux interrupteurs en série

(K_1 et K'_1, K_2 et K'_2, K_3 et K'_3).

Les interrupteurs d'un même demi- pont doivent être complémentaires pour que la source de tension ne soit jamais en

court-circuit, et pour que les circuits des courants i_a, i_b, i_c ne sont jamais ouverts.

Pour que les six interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quels que soient les courant i_a, i_b, i_c . Il faut que ces interrupteurs soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et fermeture commandées.

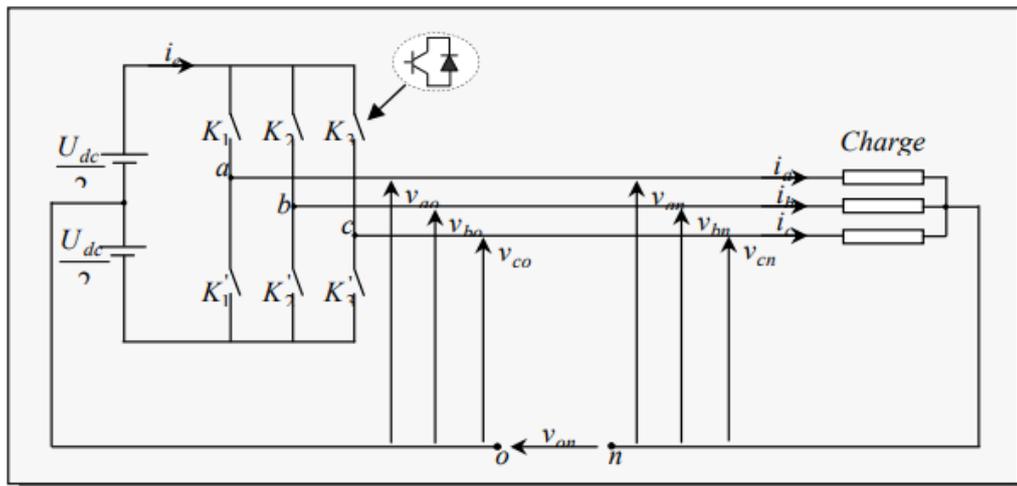


Figure IV.1 : Schéma de principe de l'onduleur à MLI

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, nous pouvons écrire,

(selon la Figure 3.1) :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \quad (3.1)$$

En faisant la somme des équations du système (3.1), on obtient :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \quad (3.2)$$

D'où :
$$v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on} \quad (3.3)$$

Donc :
$$v_{on} = -\frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (3.4)$$

En substituant l'équation (3.4) dans le système (3.1), il vient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Les deux interrupteurs de chaque branche de l'onduleur sont commandés de manière complémentaire, en appliquant une modulation de largeur d'impulsion.

À partir du schéma de l'onduleur, les tensions fournies par les demi-ponts sont:

$$v_i - v_o = \begin{cases} +\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } K_i : \text{fermé} \\ -\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } K'_i : \text{fermé} \end{cases} \quad \text{avec : } i = a, b, c \quad (3.6)$$

Les tensions délivrées sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Avec S_i est l'état de l'interrupteur K_i , supposé parfait, tel que pour le $i^{\text{ème}}$ bras de l'onduleur ($i = a, b, c$) :

- $S_i = 1$ si l'interrupteur en haut est fermé et l'interrupteur en bas est ouvert ;
- $S_i = 0$ si l'interrupteur en haut est ouvert et l'interrupteur en bas est fermé ;

Le courant d'entrée de l'onduleur est donné par:

$$i_e = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (3.8)$$

La Figure IV.2 représente le modèle simulink de l'onduleur de tension à deux niveaux.

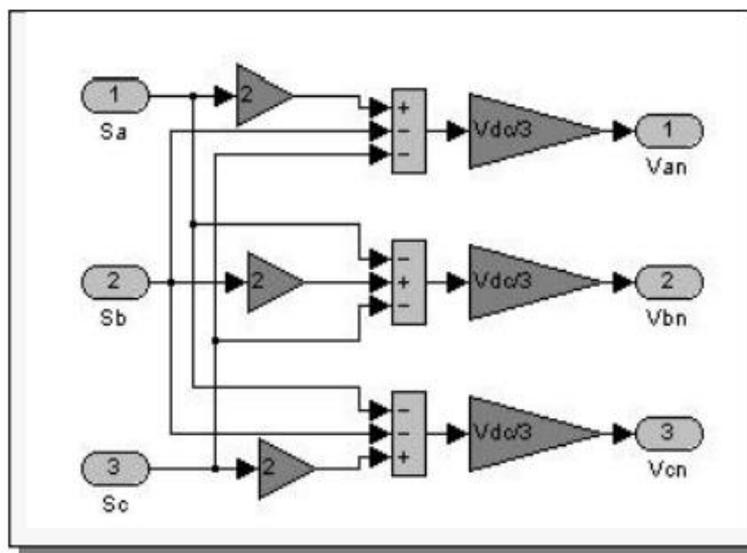


Figure IV.2 : Modèle sous SIMULINK de l'onduleur de tension à deux niveaux

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur.

IV.3 La commande MLI sinus triangle

Le bloc de commande du convertisseur reçoit les tensions de référence pour les trois phases. Ces tensions sont comparées avec un signal triangulaire, et en fonction du signal d'erreur, on commande les semi-conducteurs de l'onduleur; le mode de fonctionnement est très simple :

- Si $v_{ref} > v_p$: l'interrupteur supérieur du bras de pont conduit ;
- Si $v_{ref} < v_p$: l'interrupteur inférieur du bras de pont conduit ;

Où v_{ref} représente une des trois tensions de référence, et v_p représente le signal triangulaire ou l'onde porteuse.

Ce type de commande est appelé *commande par modulation de largeur d'impulsion* ou *commande MLI* (*PWM* en anglais). Cette technique exige une commande séparée pour chaque phase de l'onduleur. La détermination des instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs est réalisée en temps réel, par une électronique de commande analogique ou numérique ou parfois hybride. La Figure 3.3 illustre le principe de base de cette technique.

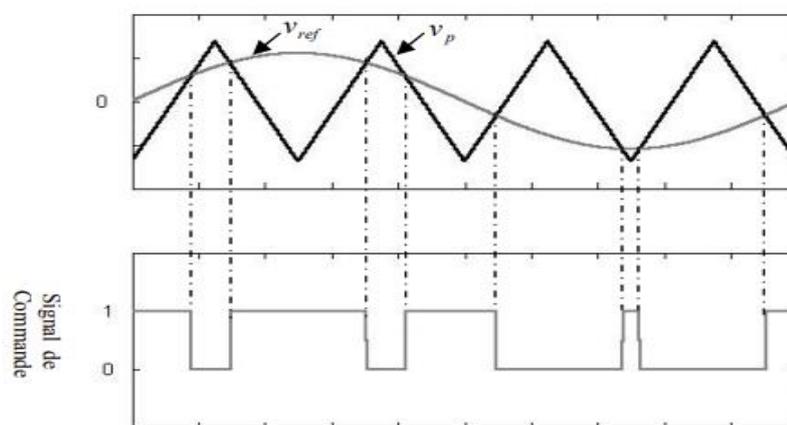


Figure IV.3 : Principe de la commande MLI sinus-triangle

- Caractéristiques de la MLI sinus triangle

Si la tension de référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande : l'indice de modulation m et le taux de modulation r .

- Indice de modulation

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (3.9)$$

Où f_r est la fréquence de la tension de référence et f_p est celle de la porteuse.

- Taux de modulation

$$r_m = \frac{V_r}{V_p} \quad (3.10)$$

Où V_r est l'amplitude de la tension de référence et V_p est celle de la porteuse.

- Modélisation de la commande MLI sinus triangle

- *Équation de la porteuse*

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence f_p et sa valeur de crête V_p . On définit l'équation de la porteuse dans sa période $[0, T_p]$ par :

$$\begin{cases} v_p = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[0, \frac{T_p}{2} \right] \\ v_p = V_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases} \quad (3.11)$$

- *Équations des tensions de référence*

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_r et de fréquence f_r .

En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par :

$$\begin{cases} v_{ref_a} = V_r \sin(2\pi f_r t) \\ v_{ref_b} = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{ref_c} = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.12)$$

- *Équations des états des interrupteurs*

La commande à MLI sinus triangle utilise la comparaison avec les trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_a , S_b et S_c des interrupteurs de l'onduleur. Ceux-ci sont donnés par l'équation 2.32 suivante :

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{ref_i} - v_p) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{ref_i} - v_p) < 0 \end{cases} \quad \text{avec } i = a, b, c \quad (3.13)$$

IV.4 Description du système de commande de l' UPFC

IV-4-1 Commande du circuit série

La transformation de Park peut être décomposée en deux phases équilibrées comme il est montré sur la figure ci-dessous. La première consiste à passer d'un système triphasé à un système diphasé ; on utilise alors la transformation de Clarke (C) :

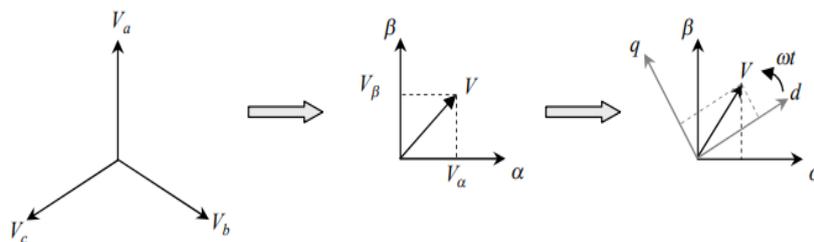


Figure IV.4 : Passage dans le référentiel tournant de la composante équilibrée directe

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

La seconde phase permet de passer par une rotation de $-\theta = \omega t$ du système diphasé dans le repère de Clark au système diphasé tournant de Park au moyen de la matrice de rotation R.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Le calcul de la puissance active s'obtient au moyen de la formule classique :

$$\begin{aligned}
 P &= V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c = [V][I]^t \\
 &= \left[C_{32} R(\theta) \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} \right]' \left[C_{32} R(\theta) \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \right] \\
 &= \left[\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix}' R(-\theta). C_{32}' \right] \left[C_{32} R(\theta) \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \right] \\
 &= \frac{3}{2} [V_d i_d + V_q i_q]
 \end{aligned}$$

Et pour la puissance réactive

$$\begin{aligned}
 Q &= i_1 \left(\frac{V_3 - V_2}{\sqrt{3}} \right) + i_2 \left(\frac{V_1 - V_3}{\sqrt{3}} \right) + i_3 \left(\frac{V_2 - V_1}{\sqrt{3}} \right) = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \\
 &= \left[C_{32} R(\theta) \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \right]' \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \left[C_{32} R(\theta) \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} \right] \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix}' R(-\theta). C_{32}' \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} C_{32} R(\theta) \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} \\
 Q &= \frac{3}{2} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix}' R(-\theta) R\left(\frac{\pi}{2}\right) R(\theta) \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} \\
 Q &= \frac{3}{2} [V_d i_d - V_q i_q]
 \end{aligned}$$

Alors les puissances active et réactive (P et Q) sont données par les équations suivantes :

$$P = \frac{3}{2}(V_{rd} \cdot i_{rd} + V_{rq} \cdot i_{rq}) \quad (4.3)$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_{rd} \cdot i_{rq} - V_{rq} \cdot i_{rd}) \quad (4.4)$$

Où :

$$i_{rd} = i_{sd} + i_{pd}$$

$$i_{rq} = i_{sq} + i_{pq}$$

Pour l'application au contrôle, les puissances de référence active et réactive (P^* et Q^*) sont injectées (utilisées comme entrées au système de commande de l'UPFC) afin d'obtenir les puissance réelles désirées P et Q . A partir des équations (4.3) et (4.4) les courants de référence i_{sd}^* et i_{sq}^* peuvent être calculés comme suit :

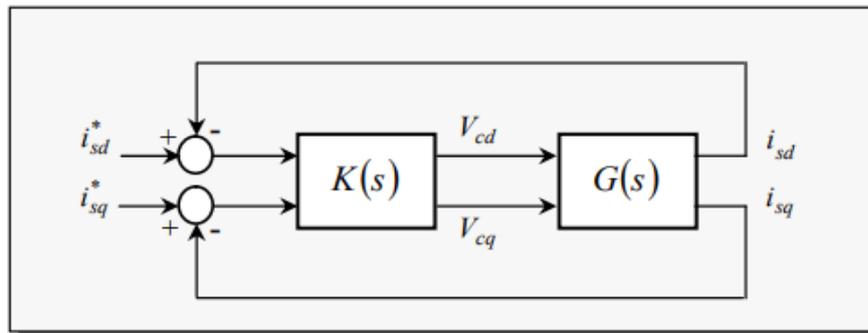


Figure IV.5 : Configuration de réglage de l'UPFC

$$i_{sd}^* = \frac{2}{3} \left(\frac{P^* \cdot V_{sd} - Q^* \cdot V_{sq}}{\Delta} \right) \quad (4.5)$$

$$i_{sq}^* = \frac{2}{3} \left(\frac{P^* \cdot V_{sq} + Q^* \cdot V_{sd}}{\Delta} \right) \quad (4.6)$$

Où : $\Delta = V_{rd}^2 + V_{rq}^2$

Si les courants réels désirés i_{sd} et i_{sq} de la ligne de transmission sont maintenus à leurs valeurs de référence, les valeurs des puissances active et réactive à l'arrivée de cette dernière seront exactement les mêmes que P^* et Q^* .

D'après les équations (4.1 et 3.4), et en utilisant les valeurs de consignes des puissances active et réactive (P^* et Q^*), ainsi que les tensions mesurées, les courants de référence à l'arrivée (receiving end) i_s^* et i_{sq}^* se déterminent des expressions (4.5 et 3.6).

IV.4.2 Commande du circuit shunt et de la tension continue

Comme on l'a montré à la figure (2.9), l'onduleur shunt et l'onduleur série sont liés au circuit intermédiaire à tension continue, ils travaillent donc avec la même tension continue V_{cd} . On rappelle que cette dernière est réglée par intermédiaire de l'onduleur shunt.

L'onduleur shunt est capable de fournir aussi bien de la puissance active à l'onduleur série que de la puissance active au système d'alimentation. La figure (4.3) illustre le schéma de ce dernier.

Le principe de ce dernier, est que la puissance active à la fin de la ligne de transmission (receiving end) doit être fournie par le début de celle-ci (sending end) comme le montre la figure (4.3), le contrôle de la tension continue V_{cd} est réalisé en utilisant un régulateur PI ou la tension continue référence V_{cd}^* .

À la sortie du régulateur PI, les pertes de puissance P_{loss} sont ensuite ajoutées à la puissance de référence de (receiving end) P_s^* , et avec la puissance réactive shunt de référence Q_p^* les courants de référence shunt i_p^* de sending et receiving end sont déterminés.

Les tensions de contrôle (commande) des régulateurs série et parallèle génèrent les tensions de référence des onduleur à MLI série et shunt.

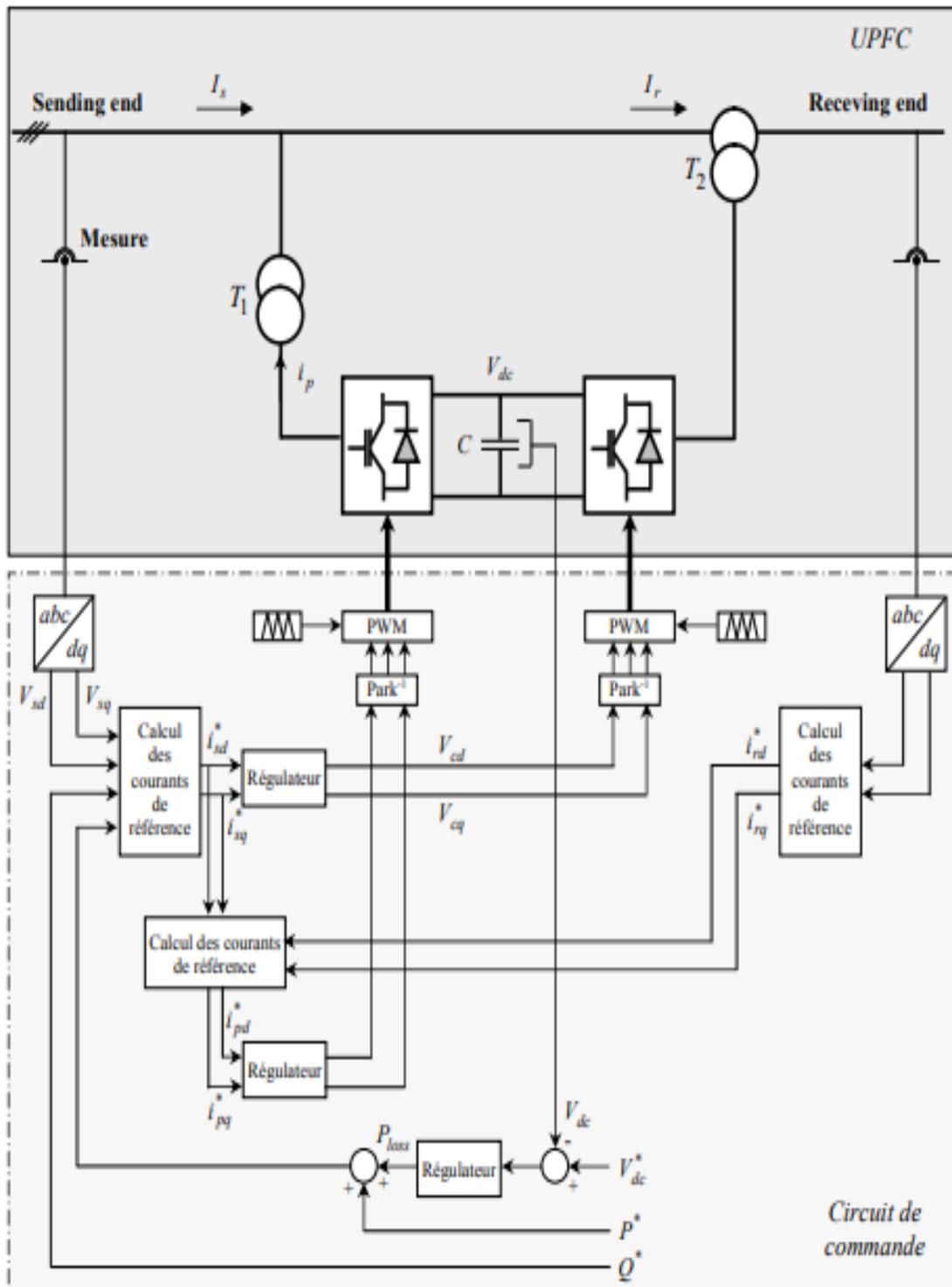
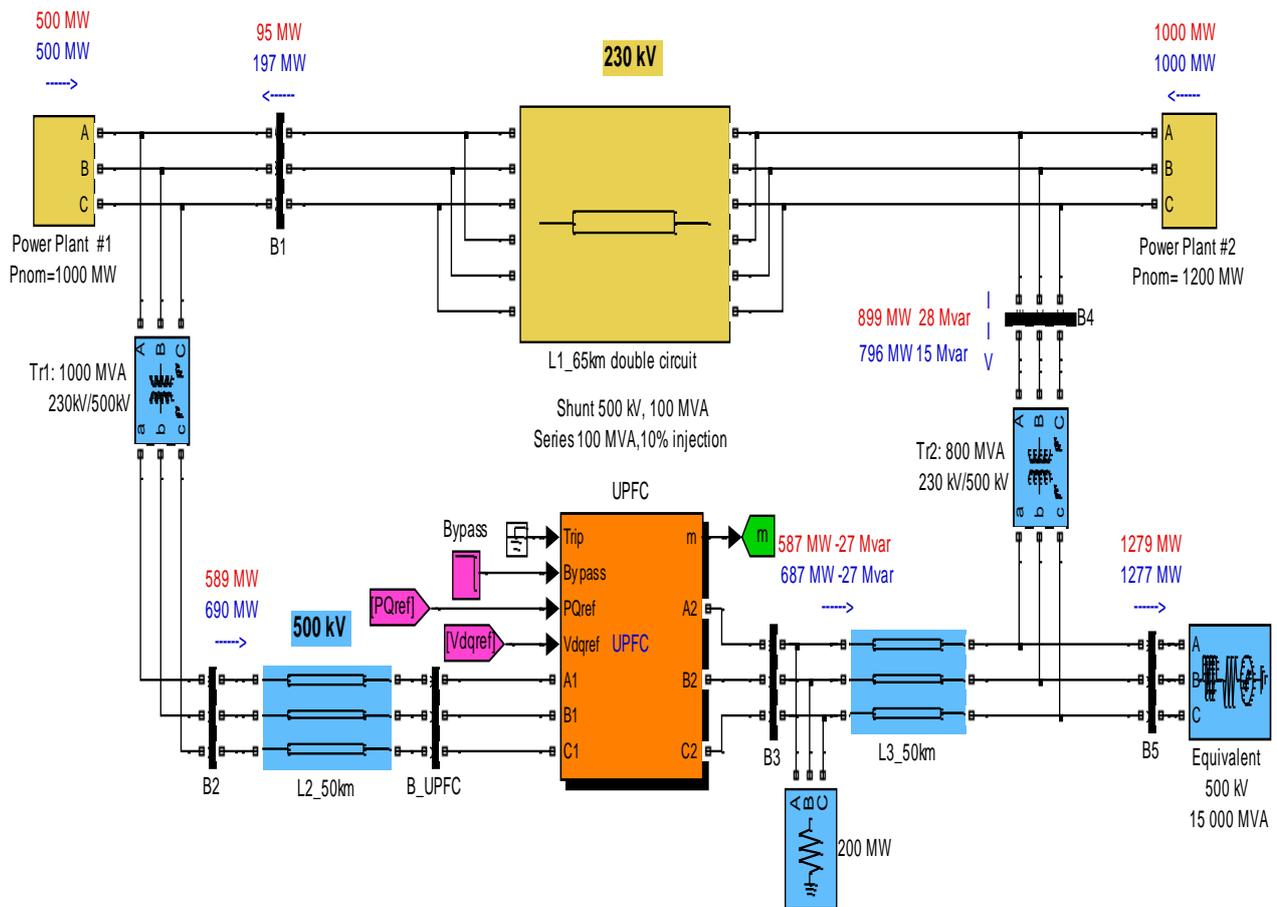
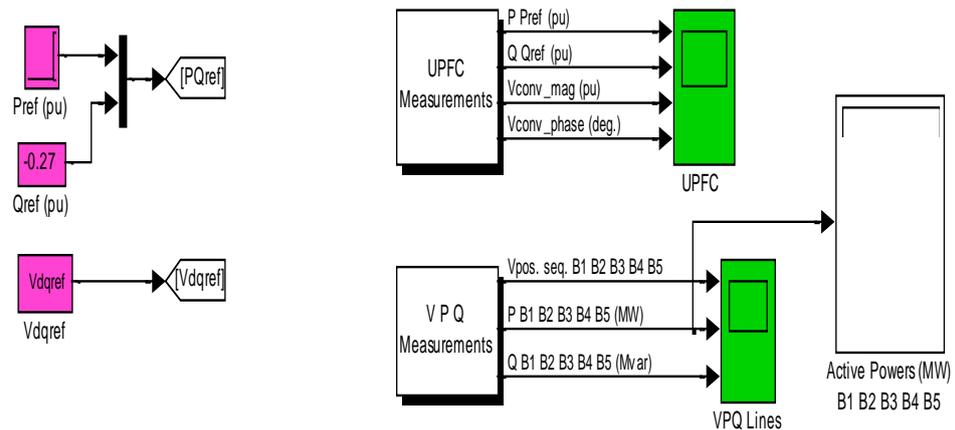


Figure IV.6 : Circuit de réglage de l'UPFC



Natural power flows
(Bypass breaker closed)
are shown in red notes.

Power flows with UPFC
(Pref=687MW, Qref=-27 Mvar)
are shown in blue notes.



Phasors
powergui

Double click to plot
UPFC
Controllable Region

UPFC (Phasor Model) Control of Power Flow using a Unified Power Flow Controller (UPFC)

?

info

Figure IV.7: Schéma complet de réglage de l'UPFC implanté dans Simulink

IV.4.3 Résultats de simulations

Le modèle de la Figure 4.3 a été implanté sur le logiciel Matlab/Simulink pour mettre en évidence le système de réglage de l'UPFC par des régulateurs classiques (PI-D). Le premier schéma de simulation est donné par la Figure 4.8 et les résultats de simulation sont donnés dans le paragraphe suivant.

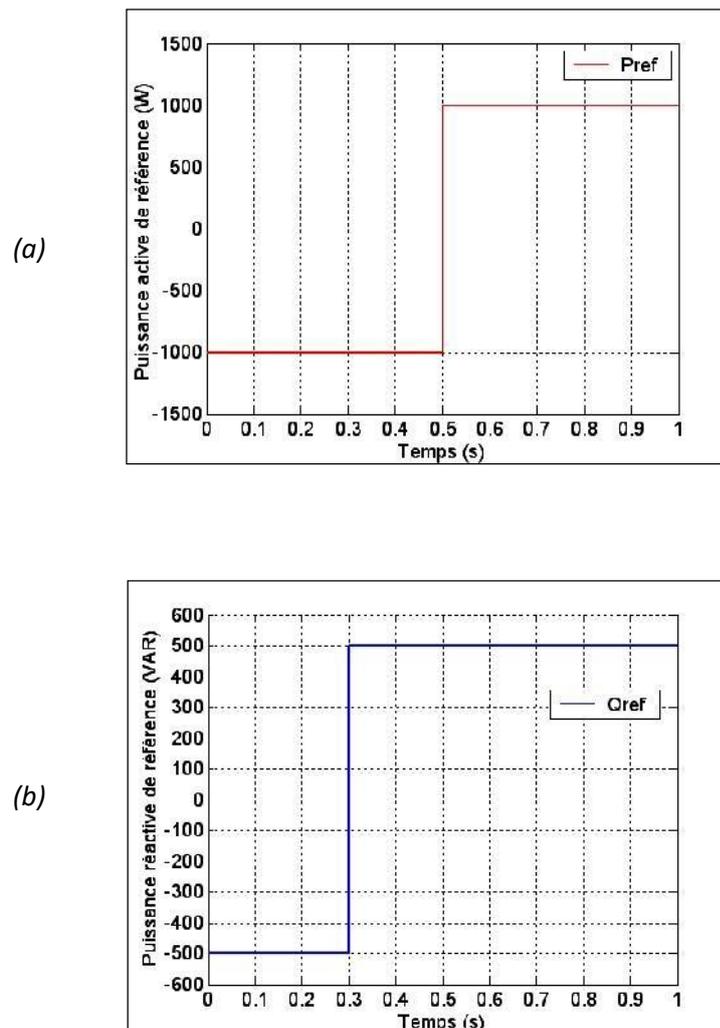


Figure IV.8: Variations des références des puissances active (a) et réactive (b)

Comme références du système on a injecté des échelons représentant les puissances de consigne, un signal échelon variant de -1000 W à +1000 W à l'instant 0,5s pour la puissance active. Et un autre variant de (-500 VAR à +500 VAR) à l'instant 0,3s pour la puissance réactive.

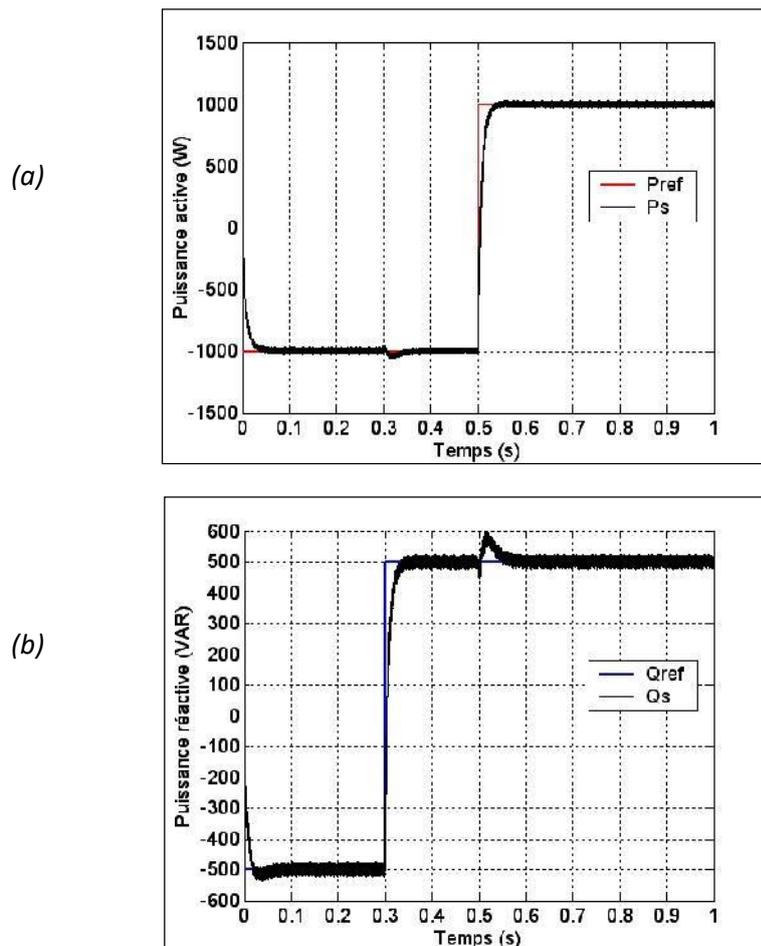


Figure IV.9: Réponses des puissances Active (a) et Réactive (b) à la sortie du système comparées aux références

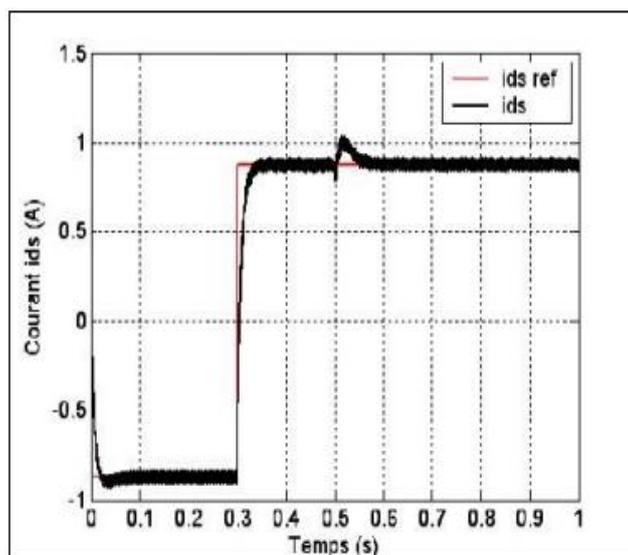


Figure IV.10: Variations du courant i_{ds}

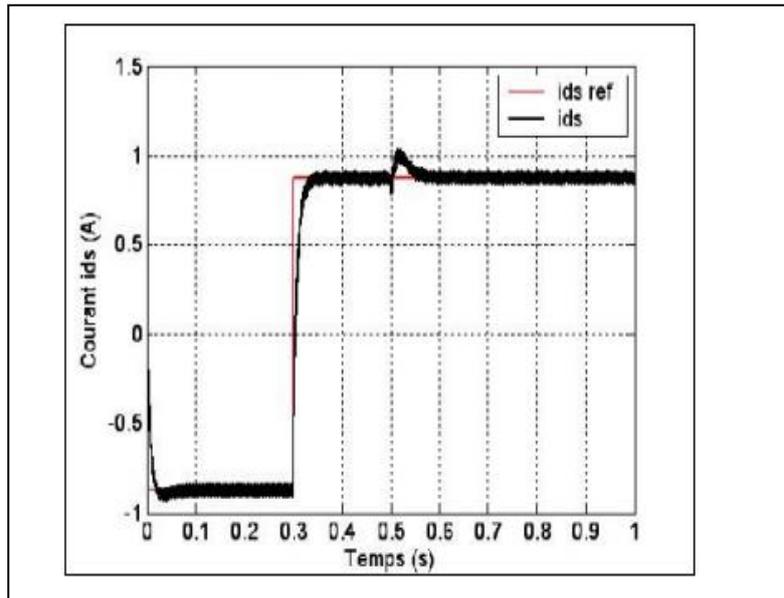


Figure IV.11 : Variations du courant i_{qs}

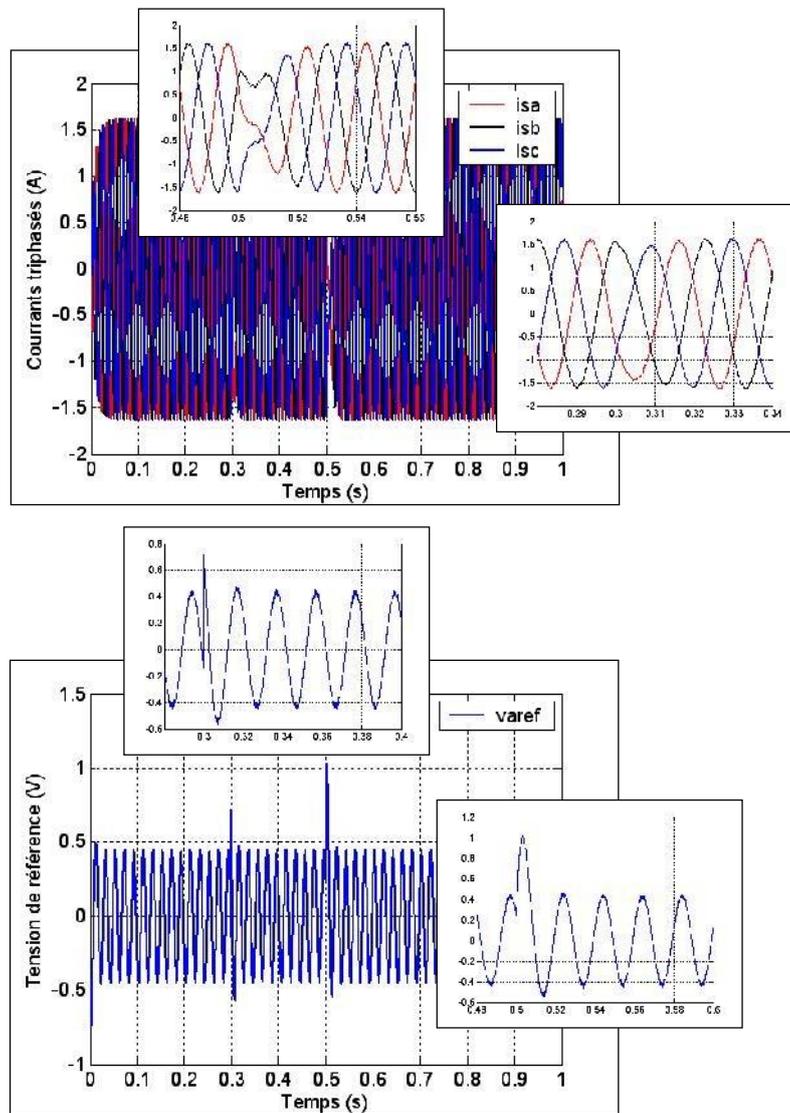


Figure IV.12 : Réponses des courants de phases i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}

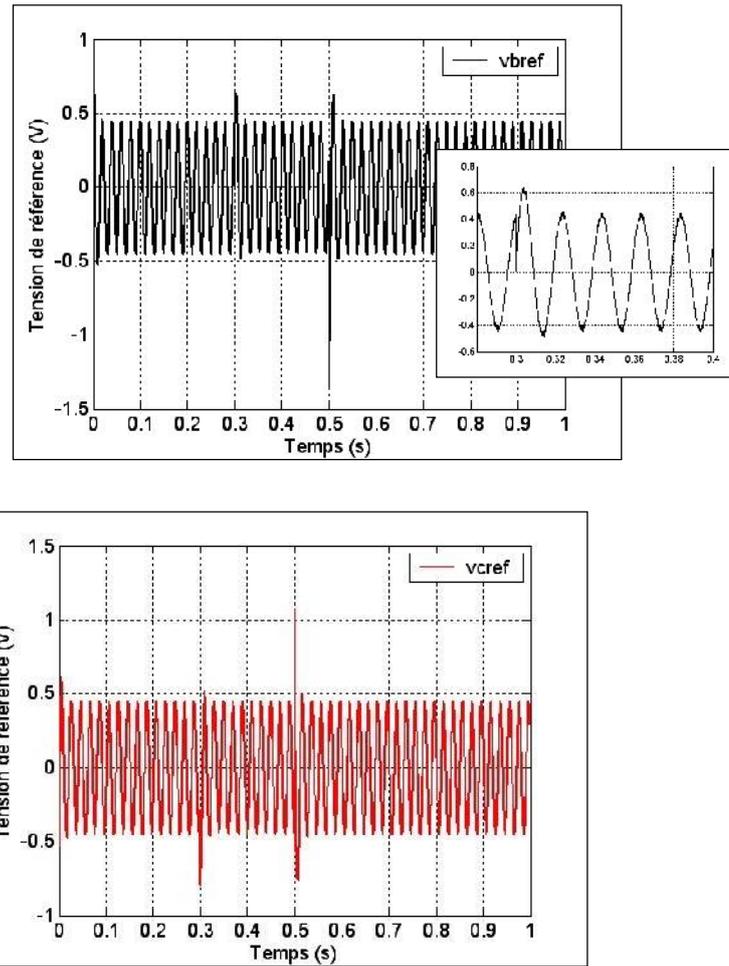


Figure IV.13 : Réponses des tensions de référence pour l'onduleur V_{ca} , V_{cb} et V_{cc}

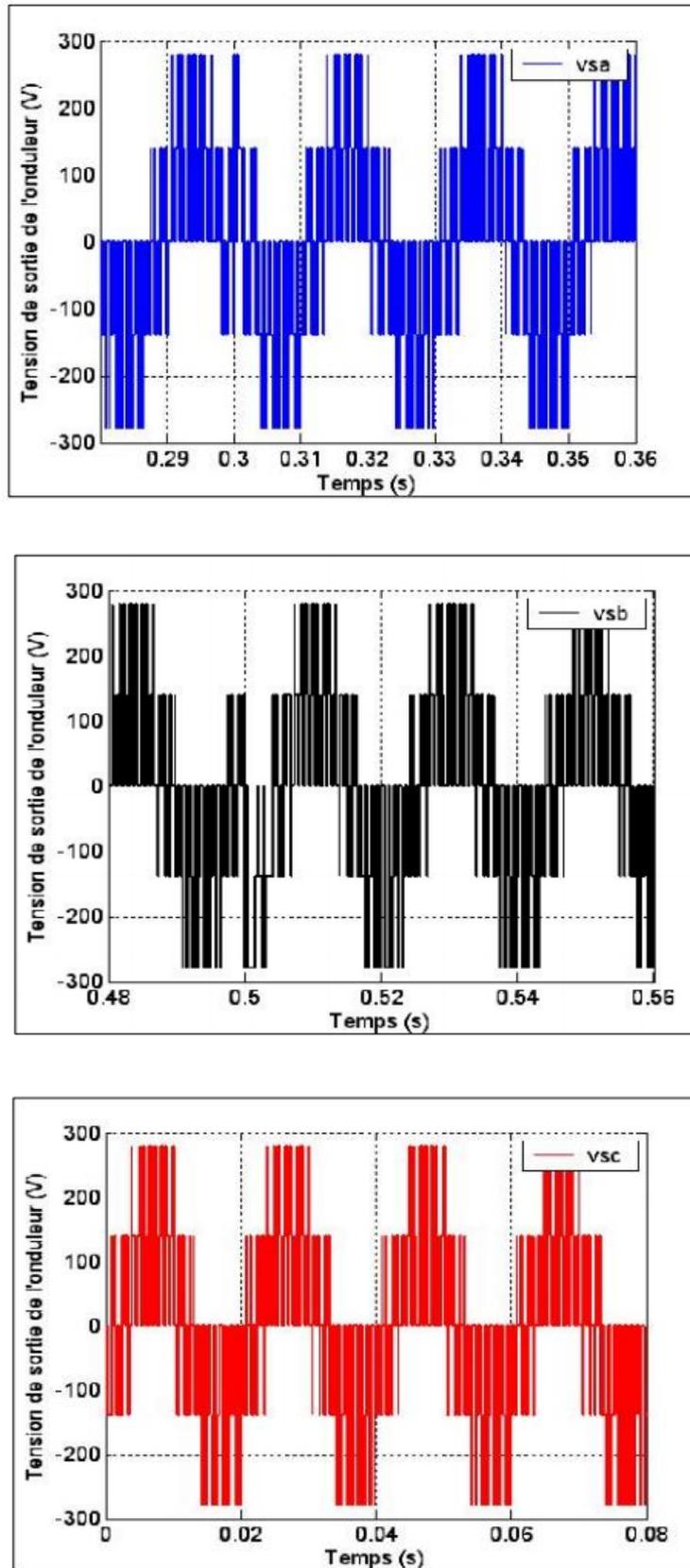


Figure IV.14 : Variations des tensions de commande fournis par l'onduleur V_{sa} , V_{sb} et V_{sc}

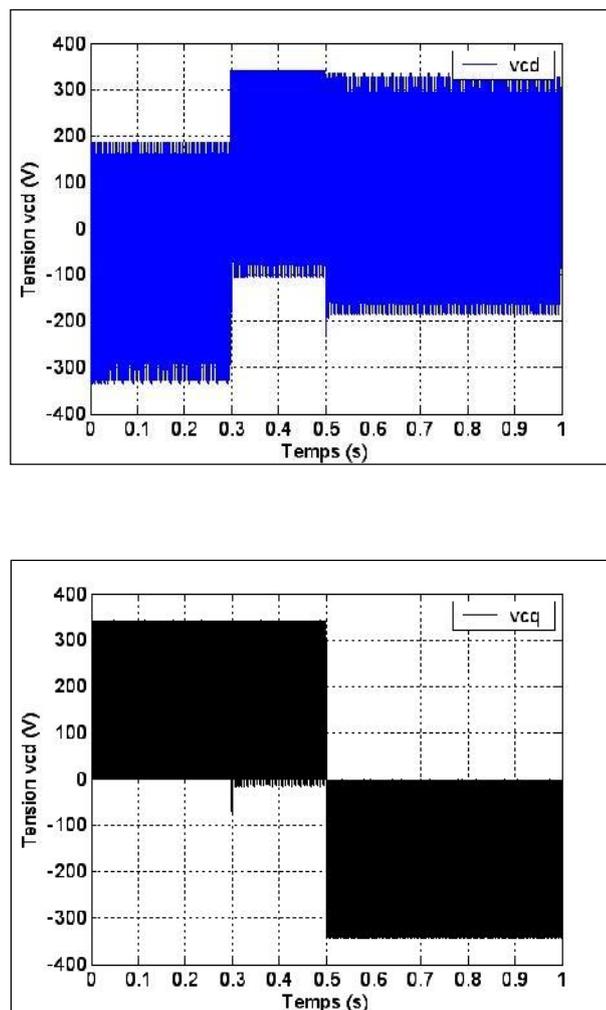


Figure IV.15 : Variations des tensions de commande (axe dq) V_{cd} et V_{cq}

- Stabilité et poursuite

Les figures IV.7 et IV.8 montrent que les deux composantes du courant i_s ont une parfaite poursuite aux changements des références (la variation de la puissance active provoque la variation de la composante i_{qs} , et le changement de la puissance réactive fait varier aussi la composante i_{ds}).

D'où on peut constater que la puissance active peut être contrôlée par une composante du courant, le découplage de l'axe d sur l'axe q et réalisé (mais peu affecté), et de même la puissance réactive peut être contrôlée par l'autre composante .

Un courant direct contrôle la puissance réactive et un courant inverse contrôle la puissance active indépendamment.

Des figures IV.9 et IV.10 : on remarque que les courants de phases i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} subissent de légères perturbations qui ne déforment pas le signal à l'instant de changement des consignes (0.3s, 0.5s) du à l'effet de couplage (presque sinusoïdales).

La Figure IV.12 représente le changement des tensions de référence de l'onduleur (V_c) d'où on remarque de petites variations lors du changement des consignes (0.3s, 0.5s).

Les variations des tensions de commande délivrées par l'onduleur commandé en MLI (V_{ca}, V_{cb} et V_{cc}) sont illustrées par la Figure IV.11.

On présente sur la Figure IV.11 les réponses des puissances active et réactive à la sortie du système. On constate une variation de la puissance active au moment du changement de la référence de la puissance réactive, et de même la puissance réactive subit une perturbation lors du changement de la référence de la puissance active (le découplage est peu affecté).

Généralement on peut conclure qu'il y a une poursuite totale des réponses à leurs références et l'erreur n'a pas d'influence car le signal atteint rapidement le régime dynamique.

Alors on peut dire que le régulateur PI peut réaliser un contrôle (compensation) des puissances à l'aide des courants avec une stabilité remarquable et des poursuites presque parfaites pour le système donné.

IV.5 Conclusion

Le réglage par (PI-Découplé, IP) du système UPFC a donné de bonnes performances dynamiques : le comportement du système, la stabilité et la poursuite des valeurs réels à leurs références.

Sur un autre plan ces régulateurs restent incapables à surmonter totalement les variations des paramètres du système (problèmes et perturbations dans le réseau) ce qui dégrade les performances du système d'où la solution reste à prévoir de nouvelles techniques de commandes avancées qui peuvent définir n'importe quel changement du modèle sur le contrôleur.

Conclusion
Générale

Conclusion Générale

Dans le but d'évaluer les performances d'un UPFC dans un système électrique et d'examiner son apport au contrôle de flux de charges/de l'écoulement de puissances à travers une ligne de transmission, une stratégie de contrôle pour l'UPFC a été conçue dans ce mémoire.

Dans la première partie on a donné un aperçu sur les systèmes FACTS. Parmi ces derniers on cite le contrôleur électronique de flux de puissance unifié (UPFC) qui combine à la fois la compensation série et la compensation parallèle. C'est le système FACTS le plus puissant dans la mesure où il permet de contrôler les trois paramètres caractérisés une ligne électrique.

On a après procédé à les modèles mathématiques du système UPFC, ceux de l'onduleur à deux niveaux de tensions avec les commandes MLI sinus triangle.

Ensuite on a présenté plusieurs régulateurs efficaces pour le réglage des courants. Ces régulateurs, qui ont été conçus à partir de modifications intelligentes du régulateur PI classique, semblent être de loin plus robustes que le régulateur PI classique et permettent le maintien d'une dynamique de hautes performances du système UPFC même en cas de dérèglement de l'opération de découplage.

Dans la troisième étape, nous avons présenté le modèle d'un UPFC connecté à un réseau électrique. Afin d'analyser l'influence de l'UPFC sur le réseau, nous avons montré les relations entre différentes variables du réseau en fonction des paramètres de contrôle de l'UPFC. Ensuite nous avons pris la méthode basée sur la MLI pour le contrôle des deux onduleurs de l'UPFC, en choisissant le régulateur PI avec compensation de pôles pour la partie shunt et pour la partie série.

en fin Dans ce dernier chapitre présente la modélisation transitoire de l'UPFC, ainsi que la simulation de l'UPFC. Les résultats de la simulation indiquent que l'UPFC a une forte capacité de contrôle.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]. [3]. KAID Boumediene – Hadj Daoud Hicham, AMELIORATION DES PERFORMANCES DE REGLAGE D'UN SYSTEME UPFC APPLIQUE AU CONTROLE DES PUISSANCES DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES, Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme de Master (LMD), Spécialité : TECHNIQUE DE CONTROLE ET DE PROTECTION DES RESEAUX ELECTRIQUES , Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, Promotion 2014-2015.
- [2]. [4] .[5] BOUNAB Houria, AMELIORATION DU TRANSIT DE PUISSANCE D'UN RESEAU ELECTRIQUE PAR L'UTILISATION DES SYSTEMES FACTS (STATCOM), Memoire De Fin D'etudes en vue de l'obtention du diplome de master , Spécialité : ENERGIE ET RESEAUX ELECTRIQUES, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI, 2016/2017.
- [6].BERREZZEK FARID, Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone, MEMOIRE Présenté en vue d'obtention du diplôme de MAGISTER, Département d'Electrotechnique, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA, 2006.
- [All 02] T. Allaoui ,,"Réglage Robuste de l'UPFC Pour Optimiser l'Ecoulement des Puissances Dans Un Réseau Electrique"", Thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Avril 2002.
- [Bel 05] BELHACEL Kheira,""Modélisation et simulation d'un UPFC pour des études de la stabilité transitoire des systèmes électro-énergétique"", thèse magister, Université Mohamed Boudiaf, Faculté de Génie Electrique département d'électrotechnique, Juin 2005.
- [Ben 05] BENYAMINA Mâamar ,""Commande multi-variable d'un UPFC pour la compensation dans un réseau multi-machines ,,"",thèse magister, Université Mohamed Boudiaf, Faculté de Génie Electrique département d'électrotechnique, Mai 2005
- [Rah 09] RAHMOUNI Naima, ,,"Amélioration des la stabilité d'un réseau électrique à l'aide d'un UPFC à basse d'un onduleur trois niveaux ,,"", thèse magister, Université Hassiba Ben Bouali Chlef, Faculté génie électrique, Département électrotechnique, Juin 2009.

Bibliographie

[Sud 02] Ch.Sudhakara Babu « Control of a Unified power flow controller (UPFC).a simulation study using matlab/ Simulink” Department of Electrical Engineering Regional , engineering College. Calcut- 673601, Kerala2002.

[Yia 97] Yian Jing.”Active and Reactive power Control for Transmission Systems with voltage Source Converter”. Ph.D.Thesis Department of Elitric power Engeneering Stockholm.Sweden.1997.

Résumé:

La demande d'électricité continue de croître et l'objectif principal des sociétés de production d'électricité est de répondre à la croissance du marché et à la demande des consommateurs en assurant un approvisionnement normal et ininterrompu. Systèmes de contrôle de réseaux rapides utilisant les ressources fournies par l'électronique de puissance et la microélectronique de contrôle. Ces systèmes sont désignés par l'acronyme commun FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) et ont prouvé leur fiabilité pour la transmission à longue distance depuis des décennies. Ils permettent un meilleur contrôle et gestion du flux de puissance des lignes proches de la limite de leur capacité. Enfin, ils devraient pouvoir améliorer la stabilité du réseau, quelles que soient les pannes majeures.

Le contrôleur de flux de puissance unifié (UPFC) est un nouveau contrôleur de transmission de puissance. L'UPFC fournit un contrôle dynamique complet des paramètres de transmission, de la tension, de l'impédance de ligne et de l'angle de phase. Cet article présente un outil utile pour les ingénieurs des services publics d'électricité pour évaluer l'application de l'UPFC, son impact sur leur système d'alimentation et quelles seraient les valeurs nominales de shunt et de série. Cet article donne des ensembles d'équations pour un système incluant l'UPFC et un réseau d'alimentation équivalent à deux bus. Une méthode numérique testée avec Matlab a été validée avec succès avec un modèle analogique. Le code Matlab donné dans l'article permet de réaliser des études paramétriques rapides pour l'application de l'UPFC.

يستمر الطلب على الكهرباء في النمو ، والهدف الرئيسي لشركات توليد الطاقة هو تلبية الطلب المتزايد في السوق والمستهلكين من خلال ضمان إمداد طبيعي وغير منقطع. أنظمة التحكم السريع في الشبكة باستخدام الموارد التي توفرها إلكترونيات الطاقة والإلكترونيات الدقيقة للتحكم. تم تحديد هذه الأنظمة بالاختصار الشائع) FACTS نظام نقل التيار المتناوب المرن) وقد أثبتت موثوقيتها في النقل لمسافات طويلة لعقود من الزمن ، فهي تتيح تحكماً وإدارة أفضل في تدفق الطاقة للخطوط القريبة من الحد الأقصى لحرارتها. أخيراً ، يجب أن يكونوا قادرين على تحسين استقرار الشبكة ، بغض النظر عن الانقطاعات الكبيرة.

وحدة التحكم في تدفق الطاقة الموحدة (UPFC) هي وحدة تحكم جديدة في نقل الطاقة. يوفر UPFC تحكماً ديناميكياً كاملاً في معلمات النقل والجهد ومقاومة الخط وزاوية المرحلة. تقدم هذه المقالة أداة مفيدة لمهندسي المرافق الكهربائية لتقييم تطبيق UPFC ، وتأثيره على نظام الطاقة الخاص بهم ، وماهية التحويلة وتقييمات السلسلة. تقدم هذه المقالة مجموعات من المعادلات لنظام بما في ذلك UPFC وشبكة إمداد طاقة مكافئة ثنائية الحافلة. تم التحقق من صحة طريقة رقمية تم اختبارها باستخدام Matlab بنجاح باستخدام نموذج تمثيلي. يتيح كود Matlab الوارد في المقالة إجراء دراسات بارامترية سريعة لتطبيق .

UPFC