

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Batna -2-
Faculté de Technologie
Département d'Électronique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT en SCIENCES
Spécialité: **Électrotechnique**
Option: **Réseaux Electriques**

Par

BERRAHAL Khoukha

Thème

**Application d'un onduleur multi-niveaux à la compensation
de la puissance réactive**

Soutenue le 06/10/2018
Devant le jury:

Dr. B. AZOUI	Professeur	Université de Batna 2	Président
BENSALEM Ahmed	Professeur	Université de Batna 2	Rapporteur
Dr. Dj. LABED	Professeur	Université de Constantine 1	Examineur
Dr. L. BENALIA	MCA	Université de Batna 2	Examineur
Dr. Y. SOUFI	MCA	Université de Tebessa	Examineur
Dr. B. MEHDAD	MCA	Université de Biskra	Examineur

Je remercie tout d'abord **ALLAH** le tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la volonté pour mener à terme ce travail.

C'est un agréable plaisir pour moi d'exprimer mes remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur **BENSALEM Ahmed**, professeur au département d'Electrotechnique de l'université de Batna 2, pour ses qualités humaines en premier lieu, son attention et ses précieux conseils qui m'ont été très utiles pour mener a bout de cette thèse. Je tiens à lui exprimer ma plus profonde reconnaissance d'avoir dirige mon travail.

Je remercie très vivement les membres de jury pour avoir accepter de juger ce travail.

Je remercie sincèrement Monsieur **Boubaker AZOUI**, Professeur à l'université de Batna 2 de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Mes sincères remerciements vont à :

Monsieur **Djamel LABED** (Professeur à l'Université de Constantine),

Monsieur **Youcef SOUFI** (Maître de Conférences à l'Université de Tebessa),

Je tiens à remercier profondément monsieur **B MEHDAD** (Maître de Conférences à l'Université de Biskra) et M^{me} **Leila BENALIA** (Maître de Conférences à l'Université de Batna 2), qui m'ont fait un grand honneur en acceptant d'évaluer cette thèse.

Je remercie également très vivement tous mes *Enseignants* au département d'Electrotechnique à l'université de Batna et mes collègues au Centre de Recherche en Technologies Industrielle CRTI.

Je ne peux oublier les personnes qui m'ont aidé dans les moments difficiles, mes amis et ma famille.

Table des matières

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

Sources de la puissance réactive et systèmes de compensation

I.1 Introduction.....	5
I.2 La puissance réactive.....	5
I.3 Eléments du réseau induisant de la puissance réactive.....	6
I.4 Principe de la compensation.....	7
I.5 Compensation du réactif et régulation de la tension.....	8
I.6 Principe de la compensation série et parallèle de la puissance réactive.....	9
I.6.1 Compensation série de la puissance réactive	11
I.6.2 Compensation parallèle de la puissance réactive	13
I.7 Systèmes de compensation shunt de la puissance réactive.....	15
I.7.1 Compensateur synchrone.....	15
I.7.2 Batterie de condensateur.....	16
I.7.3 Les dispositifs FACTS.....	16
I.7.4 Compensateur Statique de puissance réactive SVC.....	17
I.7.5 Constitution du dispositif SVC.....	17
I.7.5.1 Condensateur fixe (FC).....	18
I.7.5.2 Reactance commandée par thyristor (Thyristor Controlled Reactor)...	18
I.7.5.3 Condensateur Commandé par Thyristor (Thyristor Switched Capacitor).....	19
I.8 Différentes configurations du SVC.....	20
I.8.1 Réactance Contrôlé par Thyristor combinée avec une Capacité Commuté par Thyristor (TCR / TSC).....	20
I.8.2 Réacteur Contrôlé par Thyristor avec Condensateur Fixe (TCR/FC).....	21
I.8.3 TSC/TSR TSC/TSR Capacité commutée par thyristor/ Réactance	

Commutée par Thyristor	21
I.9 Caractéristique V-I d'un SVC.....	22
I.10 Compensateur Statique STATCOM.....	23
I.11 Modes de fonctionnement du STATCOM.....	23
I.11.1 Contrôle du flux de puissance.....	23
I.11.2 Compensation de la puissance réactive	24
I.12 Comparaison entre le SVC et le STATCOM.....	26
I.13 Conclusion.....	27

Chapitre II

Les onduleurs multi-niveaux : Classification et Techniques de commande

II.1 Introduction.....	29
II.2 Onduleurs multi-niveaux à diode de bouclage.....	30
II.3 Dérivées de la topologie NPC.....	31
II.4 Les Onduleurs multi-niveaux FCMC (Flaying Capacitor Multilevel Converters).....	32
II.5 Onduleur en pont H en Cascade.....	33
II.6 Onduleur à structure multicellulaire.....	35
II.7 Comparaison entre différents type d'onduleurs multi-niveaux.....	36
II.8 Techniques de commande des onduleurs multi-niveaux.....	37
II.9 Modulation de largeur d'impulsion.....	37
II.9.1 Caractéristiques de la modulation de largeur d'impulsion.....	38
II.9.2 Modulation sinusoïdale multi-porteuse.....	39
II.9.2.1 Phase Disposition PWM (PDPWM).....	39
II.9.2.2 Disposition à Opposition de Phase Alternative (APOD).....	40
II.9.2.3 Disposition en Opposition de Phase (POD).....	40
II.9.2.4 MLI à décalage de phase (PSPWM).....	40
II.9.3 La modulation vectorielle (SVM).....	42
II.9.4 Etapes de réalisation de la SVM.....	43

II.10	Conclusion.....	45
-------	-----------------	----

Chapitre III

Onduleur multi-niveaux de type NPC

III.1	Introduction.....	47
III.2	Définition et structure générale.....	47
III.3	Expression des tensions de sortie	48
III.4	Les onduleurs à niveaux multiples.....	49
III.5	Onduleur de tension à trois niveaux de type NPC.....	50
III.5	Structure et principe de fonctionnement de l'onduleur NPC à trois niveaux...	50
III.6	Modélisation d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	51
III.6.1	Séquences de conduction d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux....	52
III.6.2	Commande complémentaire des onduleurs à trois niveaux.....	54
III.6.3	Modèle de connaissance.....	54
III.6.3	Commande MLI de l'onduleur à trois niveaux.....	55
III.7	Onduleur à cinq niveaux de type NPC.....	57
III.7.1	Modélisation de l'onduleur NPC à cinq niveaux.....	58
III.7.2	Fonction de connexion des interrupteurs.....	61
III.7.3	Fonction de connexion du demi-bras.....	62
III.8	Commande de l'onduleur multi-niveaux.....	63
III.9	Conclusion	65

Chapitre IV

Implantation de l'onduleur multi-niveau à la compensation shunt de la puissance réactive

IV.1	Introduction.....	68
IV.2	Définition et constitution du (STATCOM).....	68
IV.3	Principe de Fonctionnement du STATCOM.....	69
IV.4	Modélisation du STATCOM.....	70
IV.5	Modèle Mathématique du Circuit DC	74
IV.6	Contrôle du STATCOM	74
IV.7	Commande découplée du STATCOM.....	75
IV.7.1	Boucle de régulation des courants.....	76
IV.7.2	Régulation de la tension continue U_{dc}	77
IV.8	Résultats de simulation.....	79
IV.8.1	Implémentation de l'onduleur à trois niveaux dans le STATCOM.....	79
IV.8.2	Implémentation de l'onduleur à cinq niveaux dans le STATCOM.....	83
IV.8.3	Fonctionnement du STATCOM dans le cas d'une charge purement réactive.....	83
IV.8.4	Fonctionnement du STATCOM pour différents modes de charge.....	86
IV.8.5	Interprétation des résultats de simulation.....	89
IV.9	Conclusion.....	90
Conclusion Générale.....		91
Bibliographie.....		92
Annexes.....		100

Liste des figures

Fig.1.1	Source de tension connectée à une charge réactive et le diagramme de Fresnel des tensions correspondant à ce système.....	7
Fig.1.2	principe de compensation d'une charge réactive.....	7
Fig.1.3	Modèle d'une ligne de transmission et son diagramme vectoriel simplifié.....	9
Fig.1.4	Variation de la puissance active transmise et la puissance réactive absorbée en fonction de δ	10
Fig.1.5	Variation de la tension de la ligne en fonction de la puissance transmise et du facteur de puissance de la charge $V(P)$	11
Fig.1.6	Compensation série d'une ligne et le diagramme vectoriel des grandeurs du système.....	12
Fig.1.7	Evolution des puissances active et réactive en fonction de X_c/X de la source V_s	11
Fig.1.8	la puissance réactive fournie par la capacité en fonction de X_c/X	13
Fig.1.9	Compensation shunt d'une ligne et le diagramme vectoriel des grandeurs du système.....	13
Fig.1.10	Evolution des puissances d'une ligne compensée en shunt.....	15
Fig.1.11	Schéma unifilaire d'un compensateur synchrone.....	16
Fig.1.12	Schéma constitutionnel d'un SVC.....	18
Fig.1.13	Schéma d'un TCR.....	19
Fig.1.14	Schéma du condensateur commuté par thyristor TSC.....	19
Fig.1.15	Schéma d'un SVC version TCR/TSC.....	20
Fig.1.16	Compensateur Statique SVC de type TCR/FC	21
Fig.1.17	Compensateur Statique SVC de type TSR/TSC	22
Fig.1.18	Caractéristique V-I d'un SVC.....	22
Fig.1.19	Schéma de principe d'un compensateur STATCOM.....	23
Fig.1.20	Contrôle de la puissance active par le STATCOM.....	24
Fig.1.21	Compensation de la puissance réactive par le STATCOM.....	25
Fig.1.22	Caractéristique V-I du STATCOM.....	26

Fig.2.1	Bras d'un onduleur NPC multi niveaux.	31
Fig.2.2	Onduleur ANPC quatre niveaux (dérivée de la topologie NPC).....	32
Fig.2.3	Bras d'un onduleur multi-niveaux à condensateur flottant.....	33
Fig.2.4	Onduleur multi-niveaux en pont en H.....	34
Fig.2.5	Onduleur multi niveaux multicellulaire à condensateur flottant.....	36
Fig.2.6	Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale.....	39
Fig.2.7-a	MLI à disposition en phase.....	41
Fig.2.7-b	Disposition à Opposition de Phase Alternative.....	41
Fig.2.7-c	Disposition en Opposition de Phase.....	42
Fig.2.7-d	MLI à décalage de phase.....	42
Fig.2.7	Différentes stratégies LS-PWM.....	42
F.2.8	Secteurs de commutation par MLI vectorielle et état de commutation de l'onduleur de tension.....	43
Fig.2.9	Signaux de commande des interrupteurs pour chaque phase par la technique SVM.....	44
Fig.2 .10	Secteurs de commutation par SVM.....	45
Fig. 3.1	Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.....	48
Fig.3.2	Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux.....	51
Fig. 3.3	Bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.....	52
Fig.3.4	Séquences de fonctionnement d'un bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.....	53
Fig.3.5	MLI à deux porteuses à décalage de phase.....	56
Fig.3.6	Tension d'une phase de l'onduleur à trois niveaux.....	57
Fig.3.7	Schéma d'un onduleur ANPC à cinq niveaux.....	58
Fig.3.8	Bras d'un onduleur ANPC à cinq niveaux.....	59
Fig3.9	Séquences de fonctionnement d'un bras d'un onduleur ANPC à cinq niveaux.....	60
Fig.3.10	Commande MLI à quatre porteuses de l'onduleur ANPC à cinq niveaux	64
Fig.3.11	Tension entre phases de l'onduleur ANPC à cinq niveaux.....	64
Fig.3.12	Tension simple d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux.....	65
Fig.3.13	Les tensions triphasées générées par l'onduleur ANPC à cinq niveaux..	65

Fig.4.1	Circuit du STATCOM.....	69
Fig.4.2	Schéma équivalent du STATCOM.....	69
Fig.4.3	Schéma équivalent du STATCOM connecté au milieu d'une ligne électrique.....	72
Fig.4.4	Reconstitution des courants I_d et I_q	73
Fig.4.5	Fonction de transfert du STATCOM.....	76
Fig.4.6	Régulation en PI du courant.....	77
Fig.4.7	Boucle de régulation du circuit continu.....	78
Fig.4.8	Schéma global de commande par la méthode Watt-Var Découplé du STATCOM.....	78
Fig.4.9	Tension de phase de l'onduleur à trois niveaux du STATCOM.....	80
Fig.4.10	Courant triphasé de l'onduleur à trois niveaux du STATCOM.....	80
Fig.4.11	Courant I_q de l'onduleur à trois niveaux du STATCOM.....	80
Fig.4.12	Courant I_d de l'onduleur à trois niveaux du STATCOM.....	81
Fig.4.13	Courant de phase du STATCOM envers la tension de phase du réseau.....	81
Fig.4.14	Courant de référence $I_{a\text{ref}}$	81
Fig.4.15	Puissance réactive du STATCOM.....	82
Fig.4.16	Puissance active du STATCOM.....	82
Fig.4.17	Tension de phase de l'onduleur à cinq niveaux du STATCOM.....	83
Fig.4.18	Tension entre phase de l'onduleur à cinq niveaux du STATCOM.....	84
Fig.4.19	Courant I_d de l'onduleur du STATCOM.....	84
Fig.4.20	Courant I_q de l'onduleur du STATCOM.....	84
Fig.4.21	Courant de phase du STATCOM envers la tension de phase du réseau.....	85
Fig.4.22	Courant de référence $I_{a\text{ref}}$	85
Fig.4.23	Puissance réactive du STATCOM.....	85
Fig.4.24	Puissance active du STATCOM.....	86
Fig.4.25	Tension V_a de l'onduleur à cinq niveaux du STATCOM.....	86
Fig.4.26	Tension entre phase de l'onduleur à cinq niveaux du STATCOM.....	87
Fig.4.27	Courant I_d de l'onduleur du STATCOM.....	87
Fig.4.28	Courant I_q de l'onduleur du STATCOM.....	87

Fig.4.29	Courant de phase du STATCOM envers la tension de phase du réseau.....	88
Fig.4.30	Courant de référence $I_{a\text{ref}}$	88
Fig.4.31	Puissance réactive du STATCOM.....	88
Fig.4.32	Puissance active du STATCOM.....	89

Liste des tableaux

Tableau II-1	Nombre d'éléments des onduleurs NPC multi-niveaux.....	36
Tableau III-1	Obtention des deux niveaux de tension en fonction des états des interrupteurs.....	48
Tableau III-2	Table d'excitation des interrupteurs pour chaque état de tension possible.....	49
Tableau III-3	Grandeurs électriques caractérisant chacune des configurations.	53
Tableau III-4	Table d'excitation des interrupteurs d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.....	54
Tableau III-5	Grandeurs électriques caractérisant chaque configuration de l'onduleur à cinq niveaux.....	61
tableau III-6	Table d'excitation des interrupteurs de l'onduleur à cinq niveaux à structure ANPC	62

Liste des symboles et abréviations

SVC	statique Var Compensator (Compensateur statique d'énergie réactive).
FACTS	Flexible Alternative Current Transmission Systems
TSC	Thyristor Switched Capacitor
FC	Fixed Capacitor
TCR	Thyristor-Controlled Reactor (Réactances Commandées par Thyristors).
TSC	<i>Thyristor-Switched Capacitor</i> (Condensateurs Commandés par Thyristors).
STATCOM	Static synchronous compensator (Compensateur statique synchrone).
DSTATCOM	distribution static synchronous compensator (Compensateur Statique Synchrone de Distribution.
VSC	Voltage Source Converter
HVDC	high voltage direct current
GTO	Gate Turn-Off thyristors
V_A, V_B, V_C	Tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge
IGBT	Insulated Gate Bipolar Thyristor
V_{AO}, V_{BO}, V_{CO}	Tensions de chaque phase de l'onduleur par rapport au point milieu « O » de l'alimentation continue de l'onduleur
V_{NO}	Tension entre le point neutre de la charge et le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur (point O)
F_{ks}	La fonction de connexion des chaque interrupteurs
R_L	Résistance du transformateur shunt
X_L	Réactance du transformateur shunt
V_S	Tension de départ (source)
V_R	Tension d'arrivée
ω	Fréquence synchrone du système en (rd/sec)
V_{sh}	Tension de sortie du convertisseur shunt
d	Axes direct et en quadrature
q	Axes en quadrature
V_{dc}	Tension du circuit continu
A_r	Amplitude de la référence
A_p	Amplitude de la porteuse
F_p	Fréquence de la porteuse

Introduction générale

Introduction Générale

Des changements majeurs dans la structure des réseaux électriques ont été effectués pour élever leur efficacité et améliorer la qualité d'énergie fournie aux différents types des charges. En particulier les réseaux de transport, leur adaptation peut exiger la construction ou la modification des interconnexions entre centre de productions et consommateurs de l'énergie électrique. De plus l'adaptation de nouvelles stations de production nécessite aussi des changements et a besoin d'augmenter la flexibilité et disponibilité du réseau de transport.

La croissante demande en énergie pousse les stations de production à fournir plus d'énergie, améliorer la fiabilité et améliorer la qualité d'énergie.

L'industrie de l'énergie électrique a répondu à ce défi par la technologie des FACTS (Systèmes de Transmission à Courant Flexible) [1, 2, 3], basée sur l'électronique de puissance. Ce terme regroupe plusieurs contrôleurs de l'électronique de puissance, certain d'entre eux on atteint la maturité dans l'industrie, tandis que d'autres sont encore au stade de la conception.

En général les FACTS sont classés selon leurs modes de connexion en trois catégories :

- Contrôleurs séries,
- Contrôleurs shunts,
- Contrôleurs combinés série-shunt.

Parmi les contrôleurs FACTS, les contrôleurs shunt ont montrés faisabilité en termes d'efficacité financière dans une large gamme d'application en transport et distribution [3, 4, 5, 6, 7].

Pour des décennies, il est reconnu que la puissance transmise à travers une ligne de transport peut être élevé, et le profil de tension le long de la ligne contrôler par une quantité appropriée de la puissance ou courant réactive compensée [7, 8, 9, 10]. De plus le contrôleur shunt peut améliorer la stabilité transitoire et peut affaiblir les oscillations de puissance après des défauts de fonctionnement [11, 12]. Utilisant un convertisseur de puissance très rapide, le contrôleur shunt peut encore alléger ou éliminer le problème de fluctuation produit par les charges réactives [3, 13, 14].

Généralement les contrôleurs shunts introduisent des valeurs supplémentaires du courant au point de leurs raccordements au réseau, à l'aide de l'impédance du contrôleur shunt on provoque un flux de courant variable, qui présente donc une injection du courant à la ligne. Le

compensateur fournit ou absorbe la puissance réactive, quant le courant est en quadrature avec tension de la ligne [1, 15, 16].

L'objectif fondamentale d'appliquer la compensation shunt de la puissance réactive dans le réseau électrique est d'augmenter la capacité de la puissance transmissible des stations de production au charges. Cette puissance est nécessaire pour améliorer la caractéristique de transmission et aussi la stabilité du réseau.

L'objectif de ce travail est d'appliquer un onduleur multi-niveaux au compensateur de puissance réactive de type shunt, nous avons choisi le STATCOM comme compensateur.

Cette thèse est organisé en quatre chapitres, dans le premier chapitre une étude théorique sur le transfert de la puissance réactive sur le réseau électrique, l'effet de la transition de la puissance réactive, les technique de sa compensation et les différents compensateurs de la puissance réactive.

Le deuxième chapitre nous donnons un aperçu sur les convertisseurs statique multi-niveaux leurs applications dans le domaine de la compensation de l'énergie réactive.

Dans le troisième chapitre, le principe de fonctionnement modélisation et commande onduleurs multi-niveaux de topologie NPC est donné. Nous présentons aussi un modèle mathématique d'un onduleur à trois et cinq niveaux et technique MLI pour la commande de l'onduleur, une comparaison entre la forme d'onde résultante.

Le quatrième chapitre est consacré en première partie à la description du STATCOM sa constitution son principe de fonctionnement et sont rôle dans le réseau électrique.

Dans la deuxième partie de ce chapitre sera consacré à la modélisation du STATCOM et nous proposons la technique des puissances découplés pour la commande des courants actif et réactif. Et enfin l'implantation de l'onduleur à trois cinq niveaux pour le STATCOM et validation par simulation du modèle développé dans les parties précédentes, discussion des résultats obtenus est présenté.

Chapitre 1

Sources de la puissance réactive et systèmes de compensation

Chapitre I : Sources de la puissance réactive et systèmes de compensation

I.1	Introduction.....	5
I.2	La puissance réactive.....	5
I.3	Éléments du réseau induisant de la puissance réactive.....	6
I.4	Principe de la compensation.....	7
I.5	Compensation du réactif et régulation de la tension.....	8
I.6	Principe de la compensation série et parallèle de la puissance réactive.....	9
I.6.1	Compensation série de la puissance réactive	11
I.6.2	Compensation parallèle de la puissance réactive	13
I.7	Systèmes de compensation shunt de la puissance réactive.....	15
I.7.1	Compensateur synchrone.....	15
I.7.2	Batterie de condensateur.....	16
I.7.3	Les dispositifs FACTS.....	16
I.7.4	Compensateur Statique de puissance réactive SVC.....	17
I.7.5	Constitution du dispositif SVC.....	17
I.7.5.1	Condensateur fixe (FC).....	18
I.7.5.2	Reactance commandée par thyristor (Thyristor Controlled Reactor)...	18
I.7.5.3	Condensateur Commandé par Thyristor (Thyristor Switched Capacitor).....	19
I.8	Différentes configurations du SVC.....	20
I.8.1	Réactance Contrôlé par Thyristor combinée avec une Capacité Commuté par Thyristor (TCR / TSC).....	20
I.8.2	Réacteur Contrôlé par Thyristor avec Condensateur Fixe (TCR/FC).....	21
I.8.3	TSC/TSR TSC/TSR Capacité commutée par thyristor/ Réactance Commutée par Thyristor	21
I.9	Caractéristique V-I d'un SVC.....	22
I.10	Compensateur Statique STATCOM.....	23
I.11	Modes de fonctionnement du STATCOM.....	23
I.11.1	Contrôle du flux de puissance.....	23
I.11.2	Compensation de la puissance réactive	24

I.12	Comparaison entre le SVC et le STATCOM.....	26
I.13	Conclusion.....	27

I.1 Introduction

Les réseaux électriques sont des infrastructures vitales qui ont un rôle stratégiques dans le développement économique et social de tout pays. Cependant l'un des problèmes intervenant sur ces systèmes énergétiques est la puissance réactive, cette dernière a un impact sur d'autres aspects de fonctionnement et de stabilité des réseaux électriques.

Pour un fonctionnement efficace et rentable de ces réseaux électriques, il doit y avoir un compromis entre la production et la consommation de la puissance, en assurant une tension et une fréquence constante pour les différents centres de consommation en tout temps [9, 19].

Certaines charges consomment de la puissance réactive pour leur fonctionnement tel que: four à arc, moteurs électriques, unités de soudage.....etc, mais son apparition cause des pertes d'énergie et des chutes de tension donc il faut la compenser là ou elle est consommée. La Compensation de la puissance réactive permet d'assurer leur stabilité et sécurité de fonctionnement et augmente la capacité de transmission en puissance active [2, 8, 17].

D'ou l'intérêt de développer de nouvelles méthodes et nouveaux équipements de compensation de la puissance réactive permettant de garantir un bon fonctionnement des réseaux électriques et rendre leur exploitation plus flexible. La revue que nous allons parcourir dans ce chapitre vise à présenter les divers concepts liés à la problématique d'équilibre entre la consommation et la compensation de la puissance réactive. Pour ce faire, nous allons passer en revue les différents dispositifs de compensation (conventionnelle). Ensuite, nous introduisons les équipements FACTS (Flexible Altemating Current Transmission Systems) et leur rôle comme nouvelle alternative pour la compensation et le contrôle du flux de puissance.

I.2 La puissance réactive

Un réseau électrique a pour fonction de transporter la puissance (où l'énergie) depuis une source de production vers un centre de consommation appelé charge où récepteur. La charge est caractérisée par sa tension, son courant, son impédance et son facteur de puissance [1, 2, 7].

Toute charge fonctionnant sous tension alternative consomme de l'énergie sous deux formes : l'énergie active et l'énergie réactive, la puissance réactive est l'énergie emmagasinée temporairement dans les éléments réactive; c'est le produit de la tension et la composante du courant en quadrature avec la tension passant par une branche du réseau elle est exprimée en

(VAR). L'énergie réactive consommée sert à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques [15, 18].

La puissance active est le produit de la tension et la composante du courant qui est en phase avec la tension d'une branche du réseau exprimé en (Watt). Elle se transforme intégralement en puissance mécanique (travail) et en chaleur (pertes) [15, 18].

I.3 Eléments du réseau induisant de la puissance réactive

Les lignes composant les réseaux de transport d'électricité, les câbles et les charges qui y sont connectées sont majoritairement des consommateurs de puissance réactive et ont besoin d'une certaine quantité de la puissance réactive pour leur magnétisation à savoir les transformateurs les moyens de compensation [5, 9, 18].

- Les Charges et les consommateurs industriels

Les charges sont les consommateurs de puissance active. Leur comportement réactif dépend de leur nature, néanmoins la plupart des charges présentent un caractère inductif, on distingue :

- Les charges passives comprenant les transformateurs, les inductances et condensateurs. On peut leur associer comme modèle des impédances complexes ou des admittances complexes. Par exemple, les filtres réseau font partie des charges passives.
- Les charges actives comprenant les moteurs, les générateurs, les convertisseurs, les redresseurs, les fours à arc, etc. Ce sont des charges qui peuvent être considérées comme non linéaires. Elles sont dépendantes d'un ou plusieurs paramètres tels que le temps, le point de fonctionnement, la tension, la fréquence, la phase, etc.

- Câbles souterrains

Les câbles transitent des puissances inférieures à leur puissance caractéristique (câble moyenne tension de faible et de moyenne section), ils sont considérés comme des producteurs de puissance réactive.

- Les lignes aériennes :

Les lignes aériennes produisent de la puissance réactive et dans le cas de surcharge, celles-ci absorbent la puissance réactive. En pleine charge on ne doit pas prélever une puissance réactive

importante du réseau de transport car lui même est consommateur au contraire à faible charge il est nécessaire de prélever une certaine puissance réactive sur le réseau car il la produit.

I.4 Principe de la compensation

Pour résumer en premier temps les phénomènes qui réagissent l'échange de puissance entre une charge et une source de tension, nous considérons le circuit équivalent d'une ligne de transmission, son impédance jX et une charge d'impédance Z , la tension fournie par la source est V_s , et la tension reçue par la charge est V_r Fig.1.1.

Pour une charge de nature inductive, le courant qui la traverse sera en arrière de phase par rapport à la tension V_r aux bornes de la charge. Ce courant comprend deux composantes : la composante active I_a en phase avec la tension de la charge et la composante réactive I_r en quadrature avec la tension de la charge Fig.1.1 [1, 2, 7, 18].

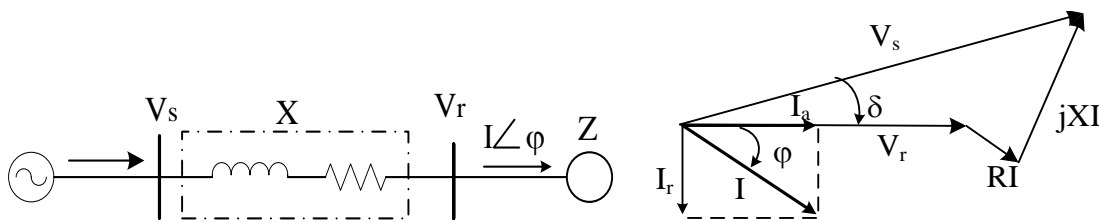


Fig.1.1: Source de tension connectée à une charge réactive et le diagramme de Fresnel des tensions correspondant à ce système.

La composante active du courant est porteuse de la puissance active et la composante réactive est porteuse de la puissance réactive.

Pour restituer l'effet de la puissance réactive il suffit de brancher une impédance réactive de nature opposée à celle de la charge (inductive ou capacitive) Fig.1.2.

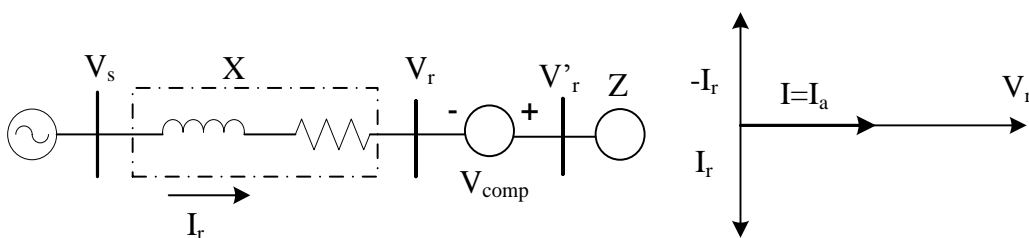


Fig.1.2: Principe de compensation d'une charge réactive.

I.5 Compensation du réactif et régulation de la tension

Considérant le diagramme vectorielle des tensions de la Fig.1.1 représentant une source de tension liée à une charge par l'intermédiaire d'une ligne de transmission, la chute de tension totale dans la ligne est alors exprimé en fonction des puissances active et réactive par [7, 15]:

$$\Delta \bar{V} = \bar{V}_s - \bar{V}_r = \frac{RP_t + XQ_t}{\bar{V}_s} + j \frac{XP_t - RQ_t}{\bar{V}_s} \quad (1-1)$$

La chute de tension est liée au transit des puissances active et réactive.

Comme : $\Delta V = V_s - V_r$

Alors : $V_s = V_r + \Delta V$ et en considérant de V_s : $|V_s|^2 = (V_r + \Delta V)^2 + (\Delta VX)^2$

$|V_s|^2 = (V_r + \frac{RP_t + XQ_t}{V_r})^2 + (\frac{XP_t - RQ_t}{V_s})^2$ comme: $\Delta VX < (V_r + \Delta VR)$ on peut approximer

$$V_s + V_r = \frac{RP_t + XQ_t}{V_r} \quad (1-2)$$

Puisque la réactance X est le paramètre prédominant dans les impédances du réseau ($R \ll X$), on peut écrire que:

$$\Delta V = V_s - V_r \approx \frac{XQ_t}{V_r} \quad (1-3)$$

Donc, un lien direct entre la tension et la puissance réactive permet de contrôler la tension à un niveau désiré par le contrôle de la puissance réactive.

Le contrôle de la tension se fait en fournissant les sources nécessaires de la puissance réactive (équation 1-7). D'autre coté, le contrôle de la puissance réactive se fait par la régulation de la tension sur chaque nœud du réseau [8].

Avec :

V_s : la tension aux bornes de la source,

V_r : la tension reçue par la charge,

X : est la réactance de la ligne de transport reliant la source à la charge,

δ : est le déphasage entre les tensions V_s et V_r .

P : la puissance active transité dans la ligne.

Q : la puissance réactive transité par la ligne.

La compensation réactive représente l'application de tous les dispositifs de puissance réactive dans un réseau électrique pour:

- maintenir le profil du plan de la tension pour les différents niveaux des puissances transportées.
- Pour améliorer la stabilité du système par augmentation de la puissance maximale transmissible.
- Et/ou pour couvrir le besoin en puissance réactive sur la majorité des plans économiques.

Idéalement la compensation réactive doit modifier l'impédance de charge en agissant sur la capacité et/ou l'inductance de la ligne pour obtenir une impédance de charge virtuelle s'adaptant aux valeurs de la puissance actuelle transportée par la ligne [2, 3, 7, 9].

I.6 Principe de la compensation série et parallèle de la puissance réactive

Considérons le modèle simplifié d'une ligne non-compensée comportant deux sources de tension reliées par une ligne de transmission de réactance X et sans perte, les tensions V_s et V_r au point de départ et d'arrivée de la ligne sont supposées constantes et égales, V_m est la tension au point milieu de la ligne Fig.1.3.

A- Cas 1 système sans compensation

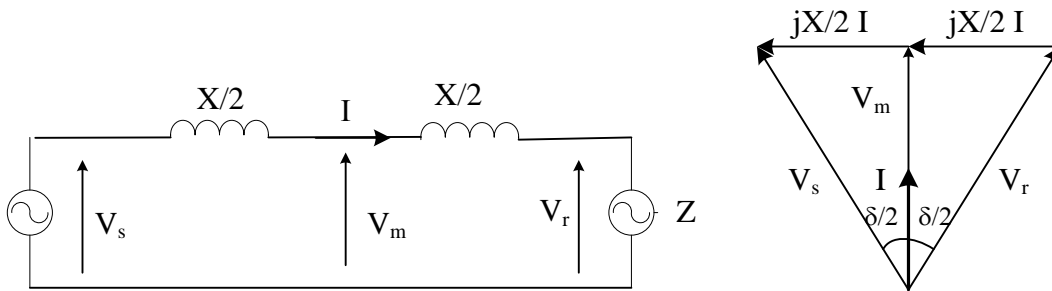


Fig.1.3: Modèle d'une ligne de transmission et son diagramme vectoriel simplifié.

Les relations entre la tension fournie par la source et celle reçue par la charge sont données par [1, 2, 12, 20]:

$$V_s = V e^{-\frac{j\delta}{2}}, \quad V_r = V e^{-\frac{j\delta}{2}}, \quad V_m = V \cos \frac{\delta}{2} \quad (1-4)$$

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{\frac{X}{2} I}{V_s} = \frac{X I}{2 V_s} \quad (1-5)$$

Pour $V_s = V_r = V_m = V$, la valeur du courant est:

$$I = 2 \frac{V}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (1-6)$$

La puissance réactive absorbée par la ligne en fonction du courant est [15]:

$$Q = I^2 X = 4 \frac{V^2}{X^2} X \sin^2 \frac{\delta}{2} = 2 \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta) \quad (1-7)$$

Avec:

V_s : la tension aux bornes de la source,

V_r : la tension reçue par la charge,

V_m : la tension au milieu de la ligne,

X : est la réactance de la ligne de transport reliant la source à la charge,

δ : est le déphasage entre les tensions V_s et V_r .

P : la puissance active transité dans la ligne.

La puissance active transmise par la ligne est [1, 2, 7]:

$$P = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (1-8)$$

Les valeurs des puissances active et réactive dépendent du déphasage entre les deux tensions Fig.1.4 [1, 2, 13, 15, 16]. Le signe et la valeur de ce déphasage détermine le sens et la quantité des puissances transférée entre ces deux sources. La puissance active est maximale pour $\delta = \pi/2$.

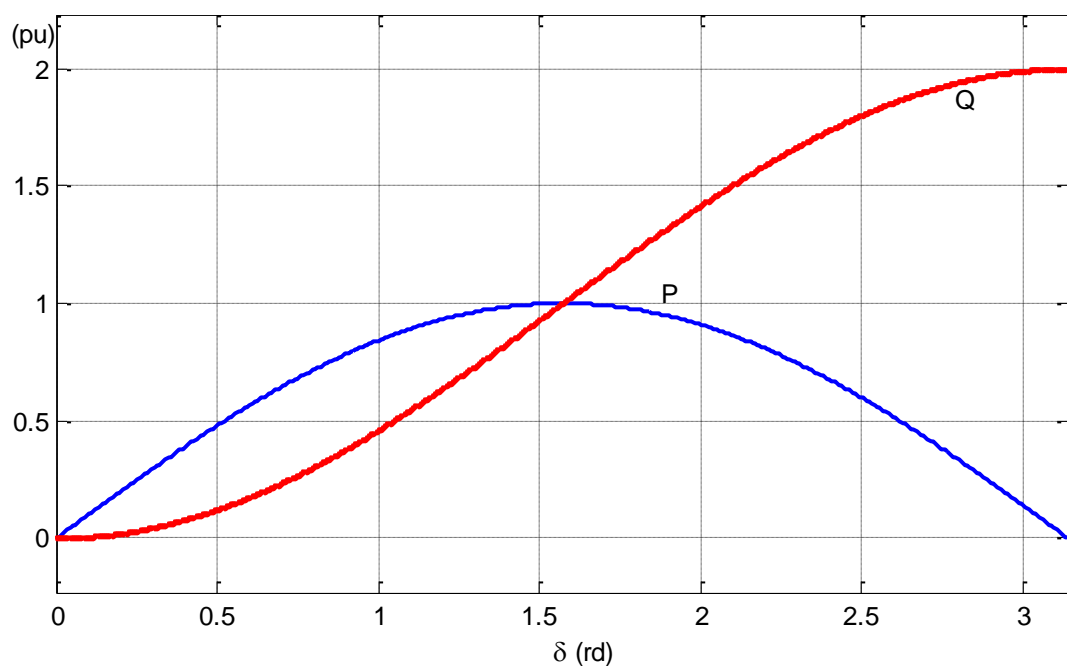


Fig.1.4: Variation de la puissance active transmise et la puissance réactive absorbée en fonction de δ .

La Fig.1.5 représente la variation du profil de la tension en fonction de la puissance active transmise à la charge. Il est évident que pour un facteur de puissance capacitif (le courant est en avance de phase par rapport à la tension), il est possible d'atteindre des niveaux de tensions supérieurs à ceux d'un facteur de puissance inductive [8, 17].

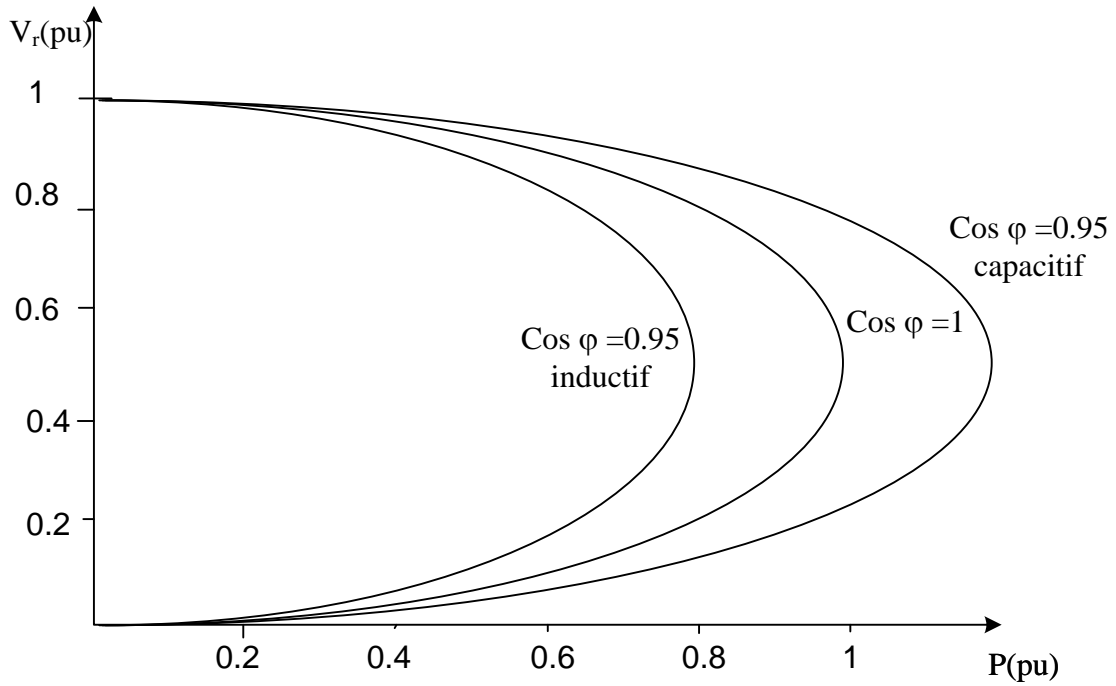


Fig.1.5: Variation de la tension de la ligne en fonction de la puissance transmise et du facteur de puissance de la charge $V(P)$.

1.6.1 Compensation série de la puissance réactive

Le principe de la compensation série est d'influencer l'impédance de la ligne par l'insertion d'une impédance capacitive variable pour réduire la valeur de l'impédance inductive de la ligne Fig.1.6. L'impédance de la ligne peut être aussi modifiée par une source de courant ou de tension connectée en série à la ligne, [1, 7, 10, 12]. La puissance active fournie par les deux sources après réduction de l'impédance inductive de la ligne selon l'équation (1-8) est :

$$P = \frac{V^2}{X-X_c} \sin \delta \quad (1-9)$$

Et la puissance réactive absorbée est exprimé par:

$$Q = \frac{V^2}{X-X_c} (1 - \cos \delta) \quad (1-10)$$

La puissance réactive fournie par la capacité série est égal à: $Q_c = I^2 X_c$;

D'autre part, à partir du diagramme vectoriel de la Fig.1.6: $\sin \frac{\delta}{2} = \frac{IX/2 - IX_c/2}{V}$ alors :

$$I = \frac{2V \sin \frac{\delta}{2}}{X-X_c} \quad (1-11)$$

Et enfin la puissance réactive fournie par la capacité est égale à :

$$Q_c = \frac{4V^2 \sin^2 \frac{\delta}{2}}{(X-X_c)^2} X_c = \frac{2V^2}{(X-X_c)^2} X_c (1 - \cos \delta) \quad (1-12)$$

Prenons $s = X_c/X$, les puissances active et réactive transmise par la ligne ainsi que la puissance réactive fournie par la capacité de compensation sont présentées sur les figures 1.7 et 1.8.

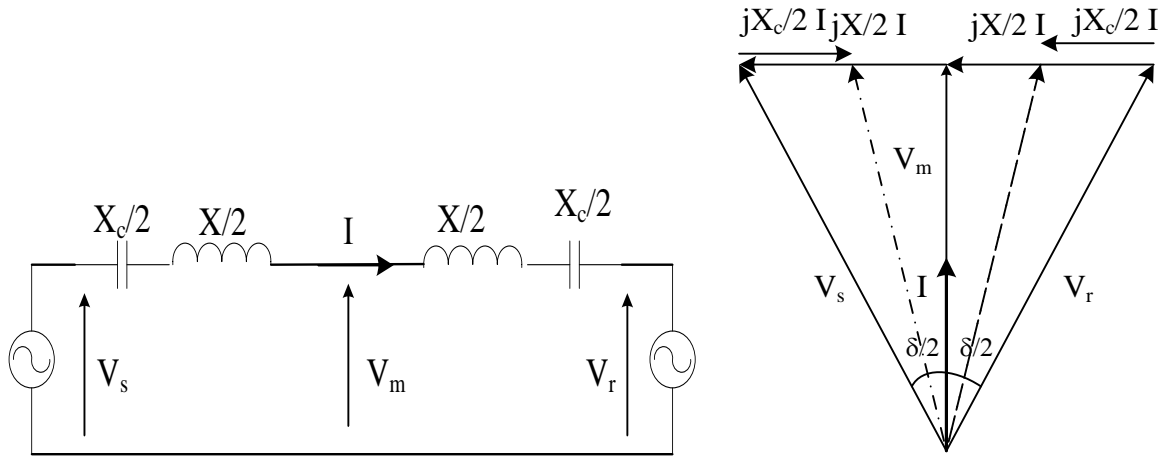


Fig.1.6: Compensation série d'une ligne et le diagramme vectoriel des grandeurs du système.

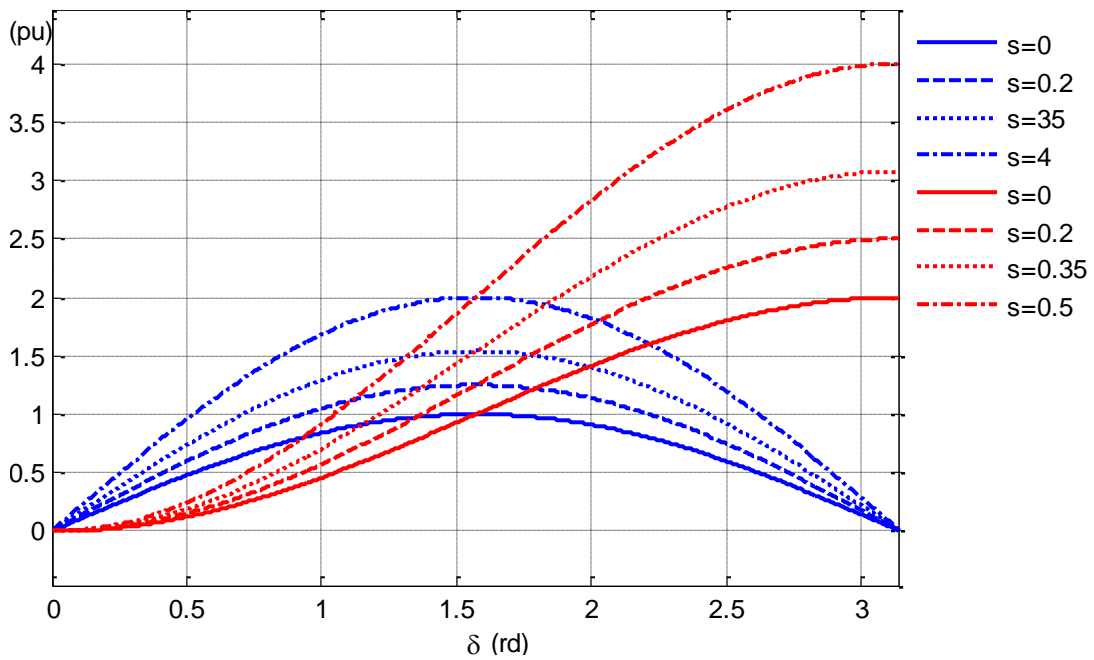


Fig.1.7: Evolution des puissances active et réactive en fonction de X_c/X de la source V_s pour $X=1$ (pu).

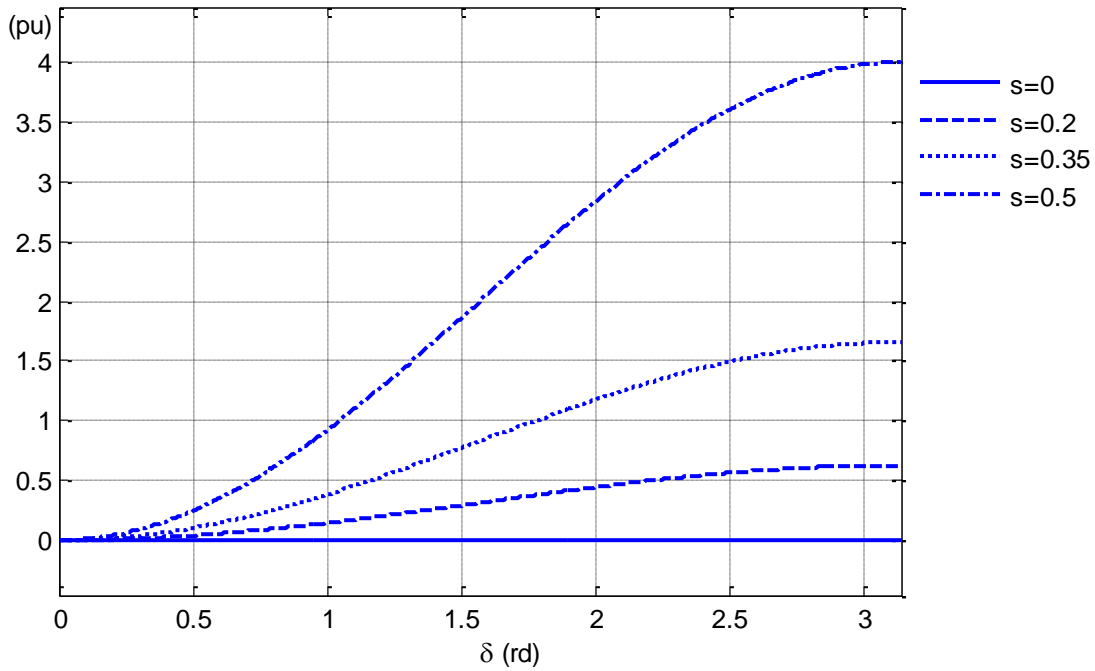


Fig.1.8: La puissance réactive fournie par la capacité en fonction de X_c/X pour $X=1(\text{pu})$.

Il est facile d'observer à partir des courbes des figures 1.7 et 1.8 que la compensation série peut augmenter significativement la capacité de transfert de la puissance à travers une ligne électrique.

1.6.2 Compensation parallèle de la puissance réactive

Un compensateur shunt de la puissance réactive est un système qui fournit de la puissance réactive au point de son branchement pour garder la tension constante en tout point de la ligne, la meilleure approche c'est de compenser la ligne à son milieu [1, 2, 7, 21, 22, 23]. La Fig.1.9 représente une ligne compensée par un compensateur shunt, ce compensateur ne consomme pas la puissance active car son courant I_m est en quadrature avec sa tension V_m . Il est clair que la puissance active transférée par la source V_s est égale à la puissance active au milieu de la ligne et égale à la puissance fournie par la source V_r . Elle est égale à [1, 21]:

$$p = \frac{V^2 \sin^2 \frac{\delta}{2}}{X/2} = 2 \frac{V^2}{X} \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (1-13)$$

La puissance réactive fournie par chaque source de tension est exprimée par l'équation suivante:

$$Q = \frac{2V^2}{X} (1 - \cos \delta/2) \quad (1-14)$$

La puissance réactive fournie par le compensateur en fonction de sa tension et son courant est égale à:

$$Q_{comp} = V_m I_m = V I_m \quad (1-15)$$

A partir du diagramme vectoriel des tensions de la Fig.1.9, le courant du compensateur est égal à :

$$I_m = 2I_1 \sin \delta/4 \quad (1-16)$$

Remplaçant I_1 dans l'équation (1-8), on arrive à la valeur de la puissance réactive fournie par le compensateur shunt.

$$Q_{comp} = V I_m = 2I_1 V \sin \frac{\delta}{4} = 2 \frac{2V \sin \delta/4}{X/4} V \sin \delta/4 \text{ et enfin}$$

$$Q_{comp} = \frac{4V^2}{X} 2 \sin^2 \delta/4 = \frac{4V^2}{X} (1 - \cos \delta/4) \quad (1-17)$$

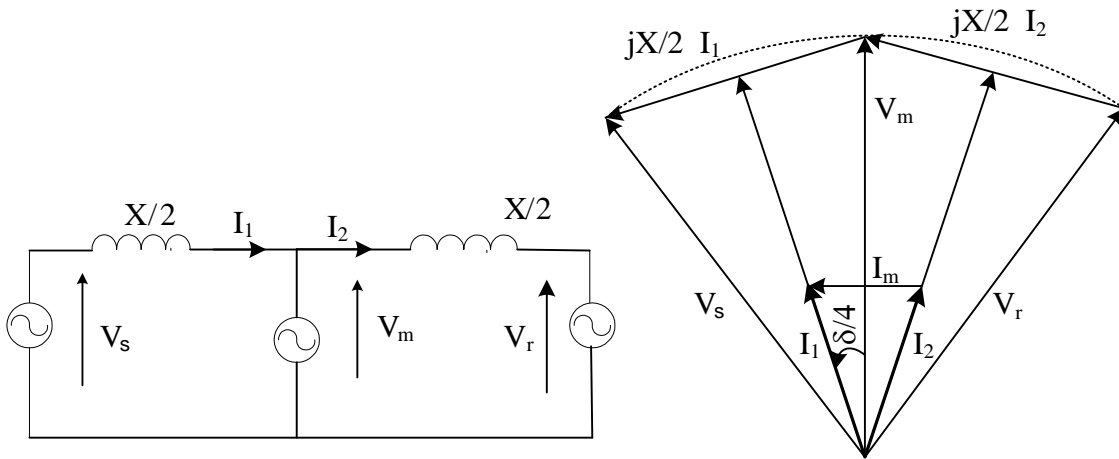


Fig.1.9: Compensation shunt d'une ligne et le diagramme vectoriel des grandeurs du système.

L'évolution des puissances active et réactive échangées entre la source de tension et la charge en fonction de l'angle δ est montrée à la Fig.1.10. Q_{comp} représente la puissance réactive fournie par le compensateur. Il est théoriquement possible de doubler l'échange de puissance active entre deux points du réseau en effectuant une compensation shunt de la puissance réactive consommée par la charge.

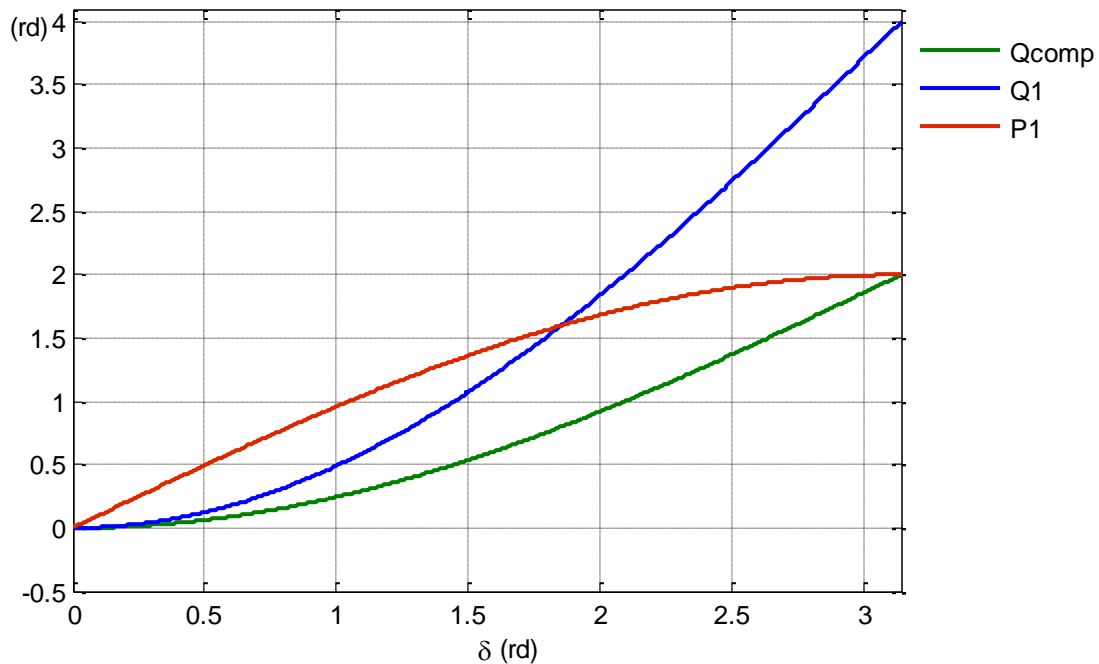


Fig.1.10: Evolution des puissances d'une ligne compensée en shunt.

I.7 Systèmes de compensation shunt de la puissance réactive

Il existe plusieurs types de dispositifs de production de la puissance réactive: les compensateurs synchrones, les bancs de condensateurs, les compensateurs statiques de puissance réactive à réactance saturable les compensateurs à réacteur commuté par thyristor et compensateur à convertisseur de tension VSC (Voltage Source Converter) [1, 2, 7, 9, 12, 21].

I.7.1 Compensateur synchrone

Une des méthodes traditionnelles consiste à utiliser le compensateur synchrone. En effet, ce compensateur synchrone a joué un rôle majeur dans le contrôle de tension et de puissance réactive pour plus d'un demi-siècle. Le compensateur synchrone est une machine synchrone tournant à vide dont la seule fonction est de consommer ou de fournir de la puissance réactive au réseau. C'est en ajustant le courant d'excitation qu'il est possible de fournir de l'énergie (machine surexcitée) ou d'en consommer (machine sous excitée). Ce genre de machine permet de fournir de l'énergie réactive lorsque le réseau est chargé, et d'absorber l'énergie réactive générée par les lignes lorsque la consommation est faible. Les compensateurs synchrones sont utilisés pour maintenir la tension du réseau de distribution et de transmission dans un intervalle désiré sous charges et conditions variables. Cependant, les compensateurs synchrones demandent une quantité d'énergie significative de démarrage et un équipement de protection. Ils contribuent aussi au courant de court circuit, et ils ne peuvent pas être contrôlés de façon rapide pour pouvoir s'adapter aux variations rapides des charges. En outre, leurs

perdes et leur prix sont plus élevés comparativement aux compensateurs statiques [26].

La Fig.1.11 montre le schéma unifilaire d'un condensateur synchrone.

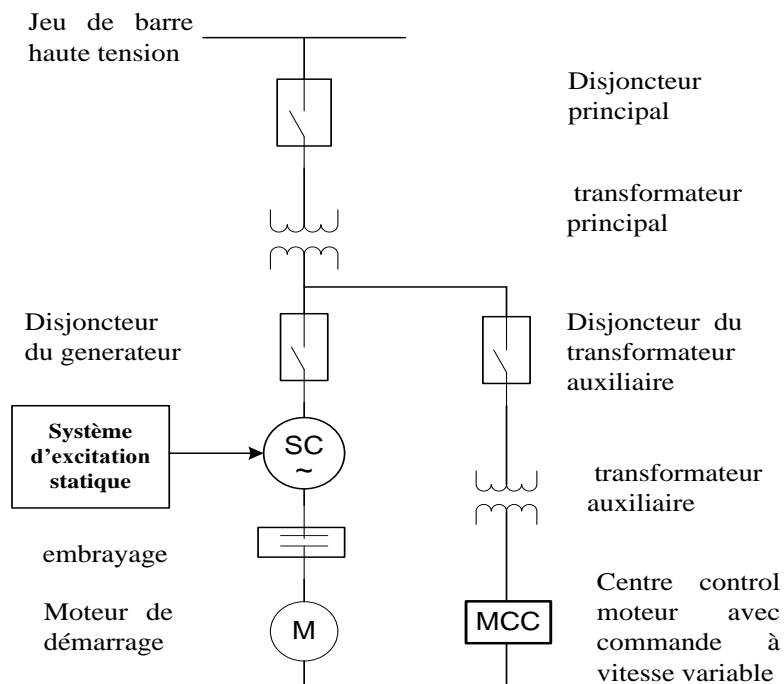


Fig.1.11: Schéma unifilaire d'un condensateur synchrone.

I.7.2 Batterie de condensateur

Les bancs de condensateurs sont des dispositifs statiques de compensation de puissance réactive. Leur connexion sur le réseau permet d'injecter une puissance réactive fixe, ils sont connectés au réseau mécaniquement et comportent un contrôle pour l'ouverture du disjoncteur qui les relie au transformateur [9, 26].

Ils ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges dans le réseau. On distingue deux types:

- Des batteries de condensateurs HT, raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT.
- Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport.

I.7.3 Les dispositifs FACTS

Les FACTS sont des dispositifs à base de l'électronique de puissance utilisés pour la

compensation de la puissance réactive et le contrôle du flux de puissance active en courant alternatif et continue (HVDC). Ils sont constitués de transformateurs de raccordement, éléments de stockage (inductances et capacités), des interrupteurs de commutation à base de thyristors ou transistor. Ces dispositifs sont employés pour la compensation série, shunt et combinée [1, 2, 3, 6, 7].

I.7.4 Compensateur Statique de puissance réactive SVC

Un SVC est un dispositif de compensation de type shunt du groupe de dispositifs FACTS constitué à base d'éléments statiques condensateurs, inductances réglable commutés par thyristors. L' SVC a été utilisé pour la compensation de la puissance réactive, au début pour les fours à arc, compensation des fluctuations, puis pour la compensation des lignes de transmission [1, 2, 5, 6, 24, 25].

Les objectifs visés de l'emploi du SVC sont [1, 2, 21]:

En régime permanent:

- Augmenter la capacité de Transfer de puissance pour les lignes de longue distance [1, 25].
- Réduire les pertes (en évitant de transporter du réactif),
- Contrôle dynamique des surtensions,
- Régler le profil de tension, en absorbant ou produisant de la puissance réactive.

En régime dynamique:

- Participer à la restauration du système de puissance après un défaut,
- Amortir les oscillations de puissance,
- Améliorer les marges de stabilité,
- Réduire les oscillations de (flicker).

I.7.5 Constitution du dispositif SVC

La Fig.1.12 présente les composantes typique d'un SVC [1, 2, 7, 23]. Il est constitué principalement d'un condensateur fixe « F_c » connecté à un jeu de barre basse tension BT. Les branches F_c (Fixed Capacitor) sont typiquement raccordées à des réactances séries pour le filtrage des harmoniques. Le condensateur commuté par thyristors TSC (*Thyristor-Switched Capacitor*). Une réactance commandée par thyristors TCR (*Thyristor-Controlled Reactor*). Ces branches sont connectés au jeu de barre haute tension HT par un transformateur abaisseur HT-BT. Le transformateur adapte la tension à un niveau admissible au fonctionnement des

thyristors.

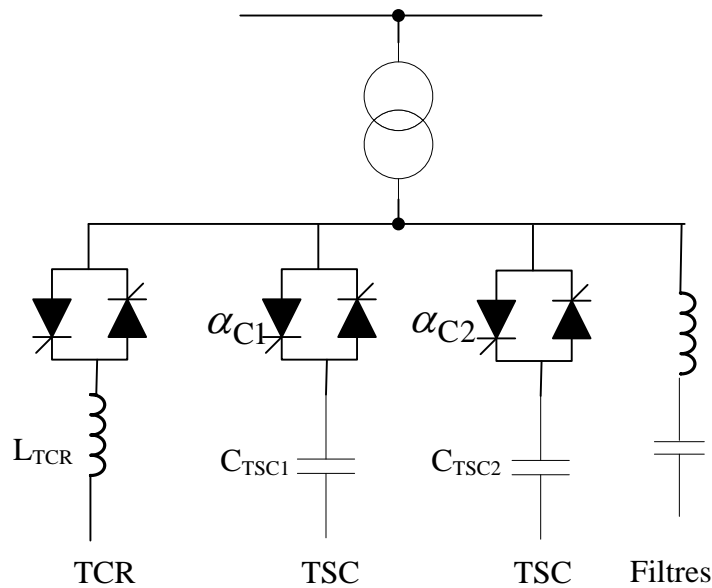


Fig.1.12: Schéma constitutionnel d'un SVC.

I.7.5.1 Condensateur fixe (FC)

Le condensateur fixe fournit au jeu de barre une puissance réactive fixe, il est connecté au réseau mécaniquement et comporte un contrôle pour l'ouverture du disjoncteur qui le relie au jeu de barre [2, 18].

I.7.5.2 Réactance commandée par thyristor (Thyristor Controlled Reactor)

La réactance commandée par thyristors TCR (Thyristor-Controlled Reactor) possède une bobine d'inductance fixe L branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle montré sur la Fig.1.13. La réactance contrôlée par thyristors permet un contrôle plus fin de la puissance réactive car elle permet un contrôle continu du courant de compensation. Les thyristors sont enclenchés avec un certain angle d'amorçage α et conduisent alternativement sur une demi-période [1, 2, 7, 18]. Les thyristors sont amorcés de façon symétrique toutes les demi-périodes. Le courant à fréquence du fondamental est réglé par la commande de la valve à thyristors. En pleine conduction ($\alpha = 90^\circ$), le courant est essentiellement réactif et sinusoïdal, et lorsque $\alpha = 180^\circ$, on est en conduction nulle [1, 2, 7].

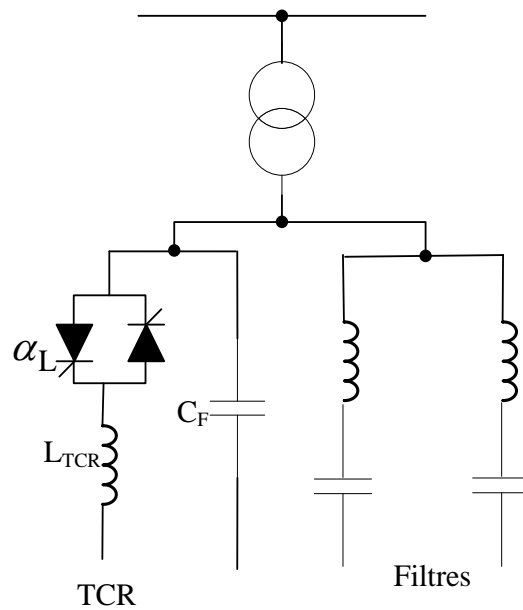


Fig.1.13: Schéma d'un TCR.

I.7.5.3 Condensateur Commandé par Thyristor (Thyristor Switched Capacitor)

Le condensateur commuté par thyristors TSC (*Thyristor-Switched Capacitor*) est composé d'un condensateur fixe C branché en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle en courant et une inductance d'atténuation L Fig.1.14. L'inductance d'atténuation sert à limiter le courant en cas de fonctionnement anormal et à éviter la résonance avec le réseau à des fréquences particulières [1, 2, 18]. Pour avoir un minimum de perturbations transitoires, les instants de commutation sont choisis de façon à ce que la tension aux bornes des thyristors soit minimale.

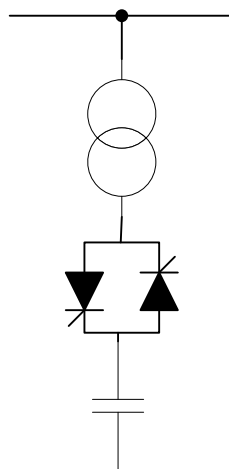


Fig.1.14: Schéma du condensateur commuté par thyristor TSC.

I.8 Différentes configurations du SVC

Les trois niveaux du fonctionnement de SVC utilisés pour le contrôle de la tension (la puissance réactive) [2, 17, 18].

- Un niveau où seules les capacités sont connectées au réseau,
- Un niveau de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des TCR et des TSC.
- Un niveau de réglage où le TCR donne son énergie maximale (butée de réglage), les condensateurs sont déconnectés.

I.8.1 Réactance Contrôlé par Thyristor combinée avec une Capacité Commuté par Thyristor (TCR / TSC)

Ce système est une combinaison de condensateurs et d'inductances enclenchés par thyristors et contient un filtre d'harmoniques. Cette combinaison permet d'ajuster n'importe quel point de fonctionnement, dans une plage définie de puissance réactive (avec un temps de réponse faible), comprise entre des limites capacitatives et inductives [2, 18]. Ce genre de compensateur est apparu pour faire face aux problèmes rencontrés dans l'industrie telle que la stabilisation de la tension quant elle était rendue fortement variable du fait des charges très fluctuantes.

Le principe général consiste à compenser le plus exactement possible les variations de puissance réactive de la charge par une puissance réactive variable dans un sens opposé, par une bobine d'inductance dont le courant est réglé par gradateur [1, 2, 7, 18]. Un banc de condensateurs complète le dispositif et permet d'ajuster la puissance réactive absorbée par l'ensemble charge plus compensateur.

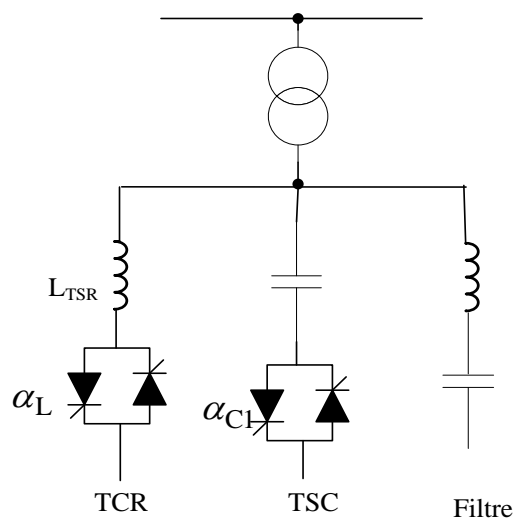


Fig.1.15: Schéma d'un SVC version TCR/TSC.

I.8.2 Réacteur Contrôlé par Thyristor avec Condensateur Fixe (TCR/FC)

Dans cette version de SVC, le dispositif est principalement constitué d'une batterie de condensateurs et d'un absorbeur réactif Fig.1.16. La batterie de condensateurs fournit une puissance réactive fixe Q_c dont le rôle est de relever le facteur de puissance de l'installation à la valeur désirée. L'absorbeur réactif comprend une inductance alimentée à travers un gradateur constitué de deux thyristors montés en tête bêche, il prélève une puissance réactive variable " Q_L " qui permet de compenser les perturbations causées par la charge " Q_{ch} " [2, 18].

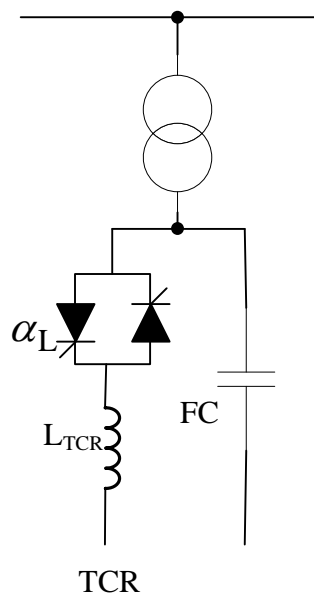


Fig. 1.16: Compensateur Statique SVC de type TCR/FC.

I.8.3 TSC/TSR Capacité commutée par thyristor/ Réactance Commutée par Thyristor

C'est un système avec condensateur et inductance enclenchés par thyristors. Les dispositifs avec condensateur enclenché par thyristor TSC sert normalement à bloquer immédiatement le compensateur en cas d'apparition d'effondrement brusque de tension, leur application dans les réseaux à haute tension exige un transformateur abaisseur pour l'adaptation aux caractéristiques électriques optimisées des thyristors. Généralement l'installation sur les réseaux de transport s'effectue par le biais de tertiaire d'un transformateur [2, 18].

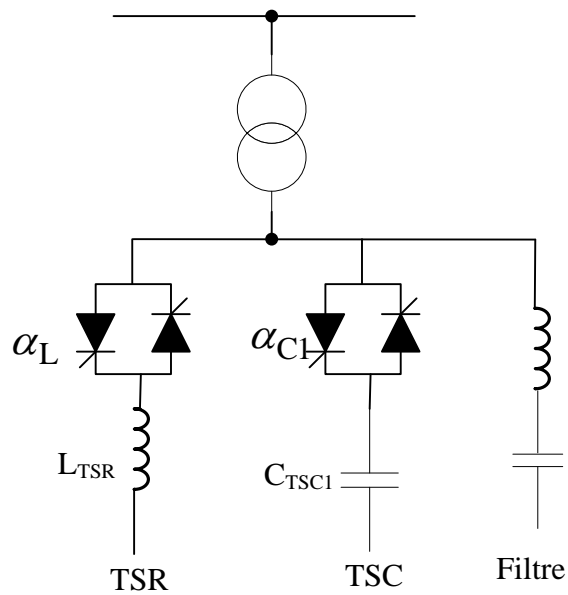


Fig.1.17: Compensateur Statique SVC de type TSR/TSC.

I.9 Caractéristique V-I d'un SVC

La caractéristique dynamique d'un SVC représente la dépendance de la tension en fonction du courant comme il est montré à la Fig.1.18. La tension V_{ref} est la tension au borne du SVC quand il n'absorbe ni génère aucune puissance réactive [7, 21]. La pente de la caractéristique V-I sur la partie linéaire est le rapport de la variation dans l'amplitude de tension et du courant de la ligne [1, 7, 23].

Elle est exprimée par : $K = \frac{\Delta V}{\Delta I}$

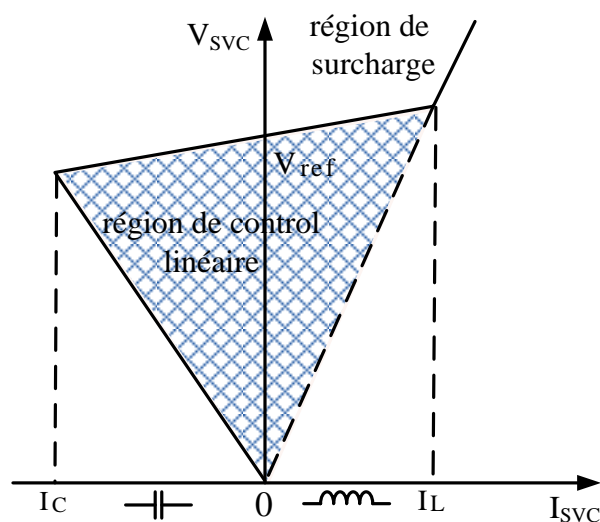


Fig.1.18: Caractéristique V-I d'un SVC.

I.10 Compensateur Statique STATCOM

Le compensateur shunt STATCOM est un dispositif du groupe FACTS, c'est la nouvelle version du SVC, il est constitué d'un convertisseur de tension couplé au réseau électrique (ou à une charge industrielle), par un transformateur abaisseur et un banc de condensateur qui sert à stocker temporairement de puissance électrique [1, 7, 10, 17, 19, 21, 22]. Le convertisseur de tension est constitué des interrupteurs bidirectionnels en courant. La Fig.1.19 représente les principaux composants d'un STATCOM.

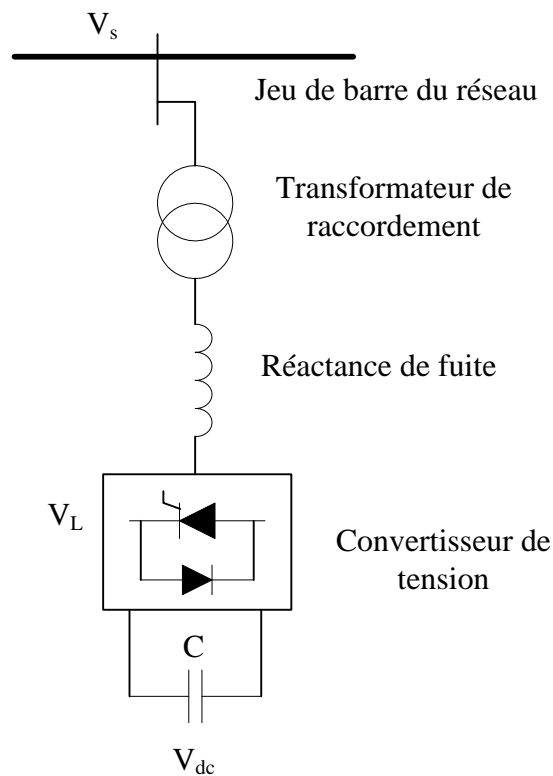


Fig1.19: Schéma de principe d'un compensateur STATCOM.

I.11 Modes de fonctionnement du STATCOM

Le rôle du STATCOM est d'échanger d'énergie électrique avec le réseau. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance triphasée, celui-ci est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage.

I.11.1 Contrôle du flux de puissance

Le STATCOM fonctionne en mode de contrôle du flux de puissance si la tension de sortie du convertisseur et celle du point de son raccordement au réseau V_s sont égaux en module et sont

déphasés de l'angle δ . Le courant de la ligne résultant produit un flux de puissance vers le circuit du convertisseur pour charger la capacité du circuit continu.

La Fig.1.20-a montre le cas où le déphasage entre les tensions V_s et V_L est positif, le STATCOM absorbe de la puissance active dans, ce cas la capacité du convertisseur de tension se charge par le courant I_L . La Fig.1.20-b montre le cas où le déphasage entre les tensions V_s et V_L est négative, le STATCOM fournit de la puissance active au réseau [1, 3, 18].

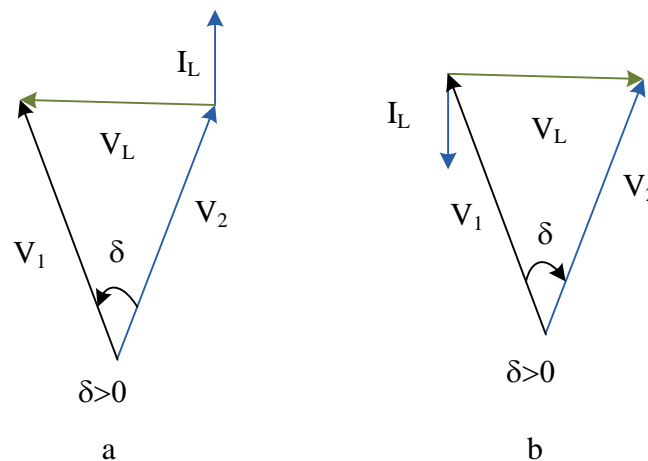


Fig.1.20: Contrôle de la puissance active par le STATCOM.

I.11.2 Compensation de la puissance réactive

Considérant le STATCOM de la Fig.1.19, l'échange d'énergie réactive se fait dans le cas où la tension de sortie du convertisseur de tension V_L est en phase avec la tension du point de raccordement du STATCOM V_s (Fig.1.21.a). Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante [1, 3]:

- Si la tension V_L est inférieure à V_s , et le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension V_s ce qui donne un courant inductif (Fig. 1.21-a).
- Si la tension V_L est supérieure à V_s , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $+\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension V_s ce qui donne un courant capacitif (Fig. 1.21-b).
- Si la tension V_L est égale à V_s , le courant circulant dans l'inductance est nul et par conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie réactive (Fig1.21-c).

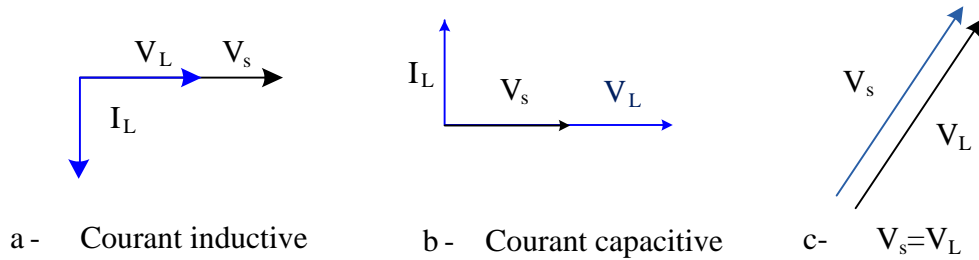


Fig1.21: Compensation de la puissance réactive par le STATCOM.

Dans ce cas de fonctionnement où V_s et V_L sont en phase et égaux, il n'y a pas de transfert ni de puissance active ni réactive par le STATCOM.

Le courant dans la ligne est:

$$I = \frac{|V_s| - |V_L|}{X} \quad (1-18)$$

La puissance réactive correspondante est :

$$Q = \frac{1 - \frac{|V_L|}{|V_s|}}{X} (|V_s|)^2 \quad (1-19)$$

L'avantage de ce dispositif réside dans le pouvoir d'échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance. Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau.

La caractéristique statique de ce convertisseur $V=f(I)$ est donnée par la Fig.1.22. Ce dispositif a l'avantage, contrairement au SVC, de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension V_s diminue [1, 7, 17, 21].

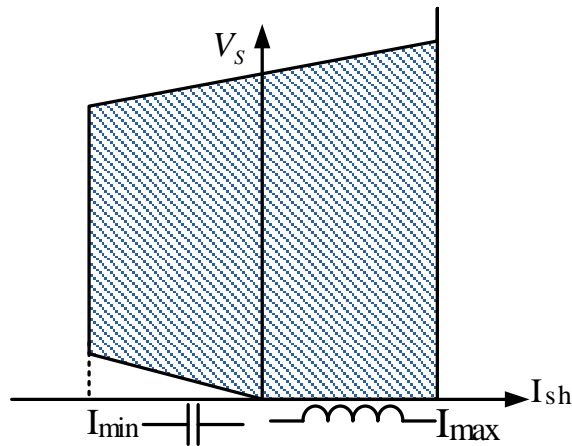


Fig.1.22: Caractéristique V-I du STATCOM.

I.12 Comparaison entre le SVC et le STATCOM

La différence principale entre un SVC et un STATCOM est la façon dont ils fonctionnent:

Un STATCOM fonctionne comme une source de tension contrôlable alors qu'un SVC fonctionne comme une réactance commutée par thyristor. Les figures 1.18 et 1.22 représentent les caractéristiques V-I du STATCOM envers celle du SVC. Le STATCOM peut fonctionner sur toute sa plage du courant de sortie, même à très faibles valeurs de tension, c-à-d le courant de sortie maximal capacitif ou inductif du STATCOM peut être maintenu indépendamment de la tension AC du réseau, le maximum génération ou absorption des VARs varie linéairement avec la tension AC [1, 7, 17, 18, 22].

En revanche, pour un SVC il y a une dépendance quadratique de la puissance réactive avec la tension au point de raccordement qui signifie que pour injecter la même puissance réactive il est nécessaire d'installer un SVC d'une capacité nominale supérieure à celle d'un STATCOM.

En ce qui concerne le courant capacitif transitoire maximal, il est observé que dans un SVC le courant capacitif est limité par la taille du condensateur et par l'amplitude de la tension AC.

Dans le cas d'un STATCOM, le maximum courant capacitif qui peut être injecté est limité par la capacité de courant maximale des semi-conducteurs utilisés et est indépendant du niveau de tension au point de raccordement au réseau.

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une étude théorique des systèmes de compensation de la puissance réactive shunt. En général, le problème de la compensation de la puissance réactive est vu par deux aspects: compensation des charges et régulation de la tension. Pour la compensation des charges l'objectif est d'améliorer le facteur de puissance, de conserver l'équilibre entre la puissance consommée et celle fournie par le réseau, et d'éliminer les fluctuations dans la tension causées par les charges non-linéaires. Pour la régulation de la tension, la compensation de la puissance réactive est utilisée pour réduire les fluctuations de tension pour certaines charges. La compensation de la puissance réactive aide pour améliorer la stabilité de fonctionnement du réseau en renforçant la puissance active transmise.

Chapitre 2

**Les onduleurs multi-niveaux : Classification et Techniques
de commande**

Chapitre II : Les onduleurs multi-niveaux : Classification et Techniques de commande

II.1	Introduction.....	29
II.2	Onduleurs multi-niveaux à diode de bouclage.....	30
II.3	Dérivées de la topologie NPC.....	31
II.4	Les Onduleurs multi-niveaux FCMC (Flying Capacitor Multilevel Converters).....	32
II.5	Onduleur en pont H en Cascade.....	33
II.6	Onduleur à structure multicellulaire.....	35
II.7	Comparaison entre différents types d'onduleurs multi-niveaux.....	36
II.8	Techniques de commande des onduleurs multi-niveaux.....	37
II.9	Modulation de largeur d'impulsion.....	37
II.9.1	Caractéristiques de la modulation de largeur d'impulsion.....	38
II.9.2	Modulation sinusoïdale multi-porteuse.....	39
II.9.2.1	Phase Disposition PWM (PDPWM).....	39
II.9.2.2	Disposition à Opposition de Phase Alternative (APOD).....	40
II.9.2.3	Disposition en Opposition de Phase (POD).....	40
II.9.2.4	MLI à décalage de phase (PSPWM).....	40
II.9.3	La modulation vectorielle (SVM).....	42
II.9.4	Etapes de réalisation de la SVM.....	43
II.10	Conclusion.....	45

II.1 Introduction

Les onduleurs de tension multi-niveaux sont de plus en plus exploités dans des applications de forte puissance, associés à une technique de modulation permettant d'obtenir une tension alternative en sortie, d'amplitude et de fréquence réglables [3, 28, 29, 30]. Les applications auxquelles sont destinés ces convertisseurs de tension sont divers, on peut citer: l'alimentation des machines électriques (propulsion marine, traction ferroviaire, automobile, compresseurs et pompes, etc), la conversion d'énergie (photovoltaïque, éolien) et les applications réseau électriques (filtrage actif, dispositifs FACTS et HVDC) [3, 28].

Les onduleurs multi-niveaux sont technologiquement éprouvés et sont présents dans la plupart des applications industrielles, ils présentent des avantages énergétiques parmi lesquels on peut citer [28, 31, 32]:

- Générer des tensions proches de la sinusoïde,
- Une bonne qualité en courant en raison de diminution des harmoniques,
- Diminution des courants aux bornes des interrupteurs statiques,
- Les nombreuses stratégies de modulations permettent d'optimiser l'utilisation de ces convertisseurs et offrent une certaine souplesse de la partie contrôle/commande,
- La fréquence de commutation peut-être élevée à faible puissance et peut atteindre plusieurs dizaines de kHz pour les applications nécessitant un contrôle rapide du courant.

Et présentent les inconvénients suivants:

- L'amplitude du niveau de tension en sortie dépend de la tenue en tension des composants utilisés,
- Pour un niveau de tension élevé, la mise en série de composants est inévitable,
- La complexité de la commande, la nécessité d'équilibrer des tensions aux bornes des condensateurs du côté continu.
- La fréquence de commutation est très vite limitée pour les convertisseurs de forte puissance à cause des pertes engendrées dans les composants. Elle est de l'ordre du kHz.

Dans ce chapitre une brève synthèse des principales topologies des différentes structures d'onduleurs multi-niveaux est d'abord faite. Pour chacune des structures, le principe de fonctionnement y est expliqué, ainsi que quelques avantages et inconvénients.

Ensuite une brève synthèse des stratégies de commande de ces convertisseurs est présentée, ainsi que la convention terminologique adoptée.

II.2 Onduleurs multi-niveaux à diode de bouclage

La topologie NPC (Neutral Point Clamped Diode), est l'une des premières topologies des convertisseurs de tension multi-niveaux proposés [28, 33, 34]. Le premier onduleur NPC été de trois niveaux, cette topologie permet d'obtenir une tension de N niveaux à la sortie en reliant (N-1) condensateurs en série, la Fig.2.1 montre la topologie de ce type d'onduleur. ces onduleurs offrent à leurs sortie des niveaux de tensions de valeurs: $E/(N-1)$, $2E/(N-1)$,..... $E(N-2)/(N-1)$, ces niveaux de tension sont obtenus en commutant les interrupteurs en paires. Une seule configuration possible du bras pour l'obtention de chaque niveau de tension. Les diodes de bouclage permettent de limiter la tension aux bornes des interrupteurs [35, 37].

Un des avantages de la structure NPC est l'équilibrage naturel des potentiels des points milieu du bus continu pour un onduleur NPC à trois bras, quel que soit le nombre de niveaux de la tension de sortie. Ceci se traduit par plus de degrés de liberté dans la commande, qui permet d'optimiser le fonctionnement du convertisseur à travers une meilleure gestion du compromis entre la réduction des pertes de commutation et la réduction du THD des tensions de sortie [39].

Un autre ennui de la topologie NPC réside dans le fait que les diodes de clamp sont exposées à une tension supérieure à $E/(N-1)$. Ceci implique une mise en série de plusieurs diodes pour parvenir à supporter une grande valeur de tension. Un onduleur NPC à N niveaux est alimenté par (N-1) condensateurs nécessaires pour la création des points milieux capacitifs. Chaque condensateur doit être dimensionné à l'échelle de la fréquence de modulation pour une tension égale à $E/(N-1)$ et pour un courant égal au courant maximal de la charge. Le convertisseur de tension NPC à N niveaux comporte par phase [35, 36, 37, 38]:

- $2.(N-1)$ interrupteurs de puissance.
- $2.(N-2)$ diodes de clamp.
- Toutes les phases partagent le même bus continu.
- N'utilise pas des transformateurs.

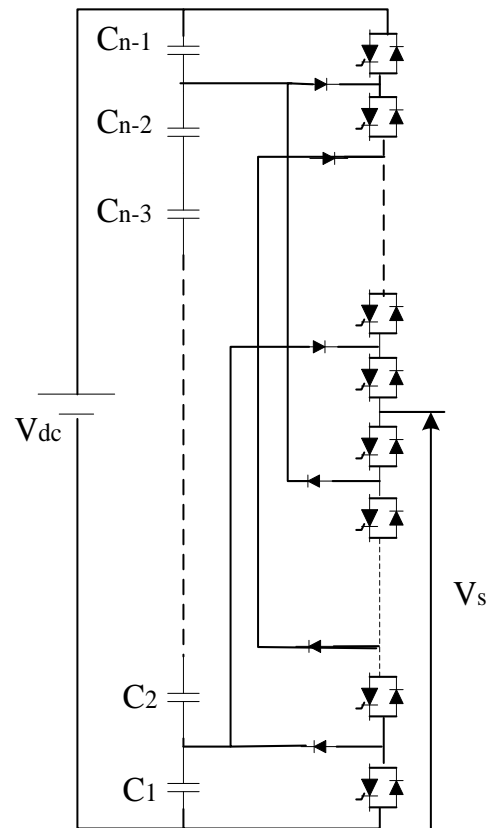


Fig.2.1: Bras d'un onduleur NPC multi niveaux.

II.3 Dérivées de la topologie NPC

Il existe plusieurs variantes des onduleurs multi-niveaux dont la configuration est une modification de la topologie NPC de base. Ces variantes permettent par exemple de repousser certaines limitations de la structure de base, comme l'inégalité des tensions inverses supportées par les diodes, supprimé toutes les diodes de bouclage et utilisé des interrupteurs bidirectionnels. La Fig.2.2 montre un onduleur quartes niveaux ANPC; un interrupteur additionnel en antiparallèle avec les interrupteurs du bras, qui remplace les diodes de clamp de la topologie NPC conventionnelle [32, 33, 34, 37, 39, 40].

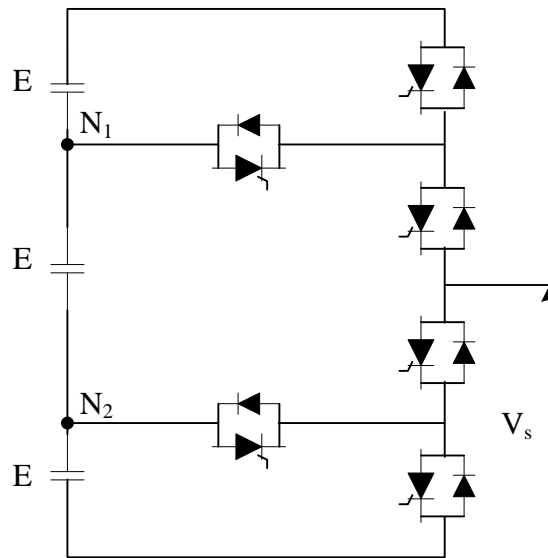


Fig.2.2: Onduleur ANPC quatre niveaux (dérivée de la topologie NPC).

II.4 Les Onduleurs multi-niveaux FCMC (Flying Capacitor Multilevel Converters)

Cette architecture a été introduite par Meynard et Foch (1992) [41, 42]. Dans cette topologie les diodes de calage du convertisseur NPC ont été remplacées par des capacités, d'où le nom de convertisseur à capacités flottantes. Les combinaisons de fonctionnement sont les mêmes que pour la topologie NPC.

Pour un convertisseur à capacité flottantes de N niveaux, chaque bras doit contenir $(2^N - 2)$ interrupteurs et $(N - 2)$ capacités. Cette topologie élimine quelques inconvénients de la NPC comme l'équilibre des tensions supportées par les interrupteurs [43, 44].

Cette topologie présente les avantages suivants :

- Elle élimine le problème des diodes de blocage dans la topologie NPC.
- La tension de blocage des interrupteurs est partout la même.
- Puisqu'elle est modulaire l'existence pour un nombre de niveaux élevé est facile.
- Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus.

Cependant, la contrainte de ces convertisseurs est la nécessité d'un grand nombre de condensateurs, notamment pour une configuration triphasée ce qui augmente le volume de l'onduleur.

- Le contrôle de la charge du condensateur ajoute la complexité au contrôle du circuit entier.
- Peut exiger plus de condensateurs que la topologie de l'onduleur NPC.
- La présence d'un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés.

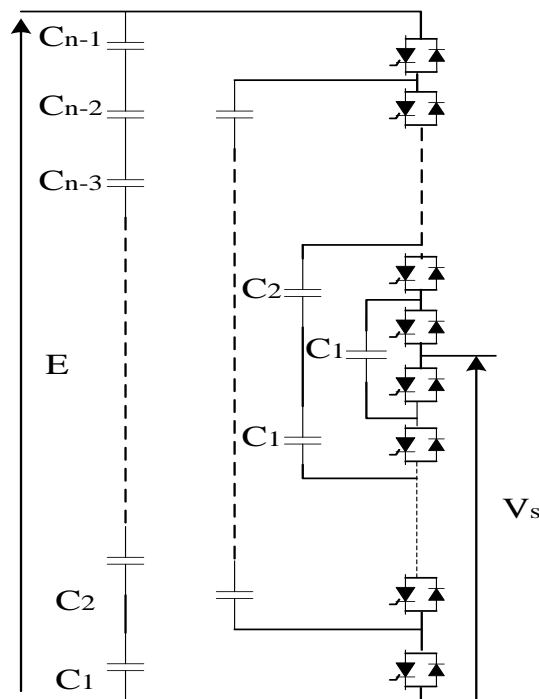


Fig.2.3: Bras d'un onduleur multi-niveaux à condensateur flottant.

II.5 Onduleur en pont H en Cascade

Cette topologie consiste à mettre en cascade plusieurs onduleurs en pont H (CHB) monophasés de trois niveaux [35, 45, 46]. Chaque pont est alimenté par une source de tension continue distincte. Ce qui fait que pour N onduleurs en cascade, la tension de sortie peut être constituée de $(2^N + 1)$ niveaux. Cette topologie nécessite, pour chaque paire de niveaux additionnelle une source de tension supplémentaire, ce qui représente un inconvénient majeur pour cette topologie Fig.2.4.

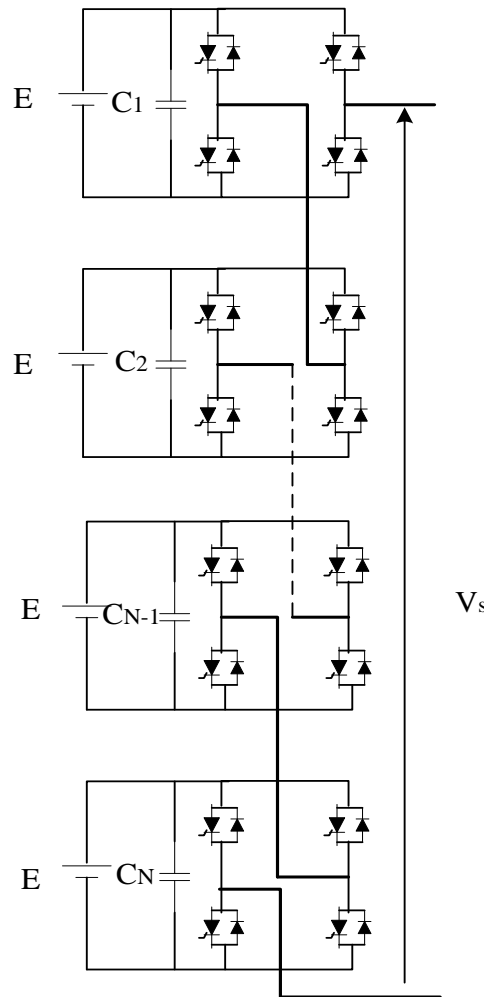


Fig.2.4: Onduleur multi-niveaux en pont en H.

Cette topologie est caractérisée par [45]:

- La construction de ce type de topologie est modulaire vue qu'elle est formée de circuits redondants ce qui permet d'atteindre des niveaux de tension très élevés.
- Ils ont besoin d'un nombre de composants moins important que les autres topologies multi niveaux pour fournir le même nombre de niveaux. Ils n'utilisent ni diodes de bouclage ni condensateurs flottants.
- Les interrupteurs supportent la même tension de blocage.
- Il devient possible d'alimenter une charge en haute ou moyenne tensions à partir de plusieurs alimentations basse tension.

Les limitations de ce type d'onduleur :

- Les sources continues présentes dans le circuit de cette topologie sont obtenues par l'utilisation d'un transformateur à plusieurs secondaires comme première solution, ou

bien plusieurs transformateurs distincts. Mais dans tous les cas on se trouve obligé de prévoir un système de correction du facteur de puissance pour remédier aux effets de pollution du réseau électrique causée par les redresseurs.

- Les sources continues nécessaires, limitant ainsi leur utilisation dans certains domaines d'application.

II.6 Onduleur à structure multicellulaires

Le convertisseur multicellulaire basé sur la connexion de P cellules de commutation en pont en H séparés les unes des autres par $(P-1)$ sources de tensions flottantes pour obtenir $(P+1)$ niveaux de tension de sortie, les interrupteurs de chaque cellule sont commandés d'une manière complémentaire Fig.2.5. Ceci est obtenu grâce au contrôle des deux interrupteurs avec des signaux quasi-opposés en intégrant des temps morts à chaque commutation. Pour cette raison, chaque paire constitue une cellule de commutation [28, 42, 43].

Le principe de cette topologie est de fractionner la tension du bus continu en P sources de tension élémentaires. Le fonctionnement de chaque cellule de commutation est similaire à celui d'un onduleur à deux niveaux classique avec une source de tension égale à E/P et une source de courant I_{dc} . Chaque interrupteur bloqué doit maintenir à ses bornes une tension maximum égale à E/P .

Cette topologie présente plusieurs avantages, parmi lesquels [42, 43, 47] :

- La modularité de sa structure permet facilement son extension à un nombre élevé de cellules sur chaque phase, sans complexité supplémentaire ;
- L'équilibrage naturel des tensions est réalisé, si bien que la commande des interrupteurs en devient aisée ;
- Les interrupteurs supportent la même tension de blocage ;
- Il est possible d'alimenter une charge en haute ou moyenne tension à partir d'une ou plusieurs alimentations basse tension (par exemple dans le cas d'une énergie photovoltaïque).

Et aussi des difficultés :

- Il exige des sources de tension continue galvaniquement isolées pour chaque pont H , qui limite les possibilités d'application [42, 43, 47] ;

- Pour un système triphasé, ce type d'onduleur exige plus d'interrupteurs de puissance qu'un onduleur traditionnel (et par conséquent l'augmentation du coût).

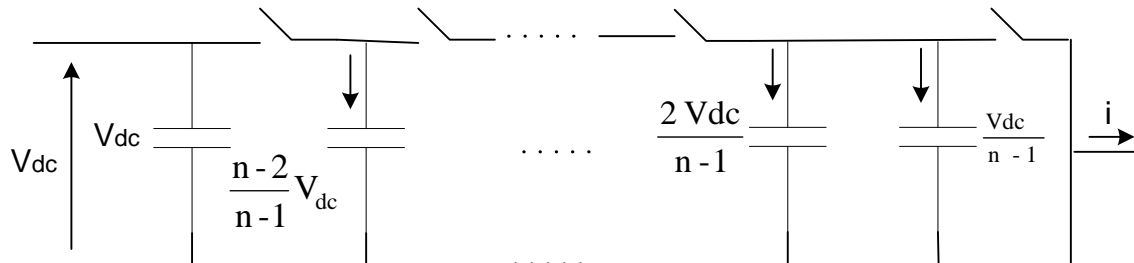


Fig.2.5: Onduleur multi niveaux multicellulaire à condensateur flottant.

II.7 Comparaison entre différents type d'onduleurs multi-niveaux

Le nombre d'éléments de commutation principales est le même pour toutes les structures pour générer le même niveau de tension. La structure NPC est plus simple, ce qui conduit à un plus faible encombrement. Elle est plus adaptée à la conversion réversible de puissance, alors que la topologie CHB nécessite des circuits auxiliaires pour cela [28, 31, 35, 38].

Tableau II-1: Nombre d'éléments des onduleurs multi-niveaux.

Composants Type d'onduleur	Interrupteurs de commutation	Diodes	Condensateurs	Diodes de blocage	Capacités de bouclage
NPC	$2(N-1)$	$2(N-1)$	$(N-1)$	$(N-1)$ $(N-2)$	0
Cascade	$2(N-1)$	$2(N-1)$	$(N-1)$	0	0
Condensateurs flottants	$2(N-1)$	$2(N-1)$	$(N-1)/2$	0	$(N-1)(N-2)/2$

A travers le tableau de comparaison II-1, pour le nombre de composants nécessaires selon les topologies, nous pouvons très clairement dégager deux choix technologiques en multi-niveaux: soit une structure avec un nombre limité de niveaux avec l'utilisation de composants de forte tenue en tension, ou bien une autre structure avec un grand nombre de niveaux et des composants de tenue en tension relativement faible. Toutefois, cette comparaison ne donne pas d'avantage absolu à une certaine topologie, elle permet surtout de montrer que, en fonction des conditions de fonctionnement [28, 31, 35].

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation: la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique. Au contraire, les structures telles que les onduleurs à cellules en série élèvent leur tension d'alimentation : la tension de sortie maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation, elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation. Contrairement aux autres topologies, les alimentations des cellules ne peuvent pas être obtenues à partir d'une alimentation continue unique sans mettre en place des convertisseurs additionnels. Dans la plupart des cas, il faut recourir à des transformateurs pour obtenir les alimentations nécessaires. Le couplage parallèle des transformateurs du «côté alimentation» et l'addition des tensions «côté charge» conduit à une élévation de la tension [28, 35].

Les structures multicellulaires sont intéressantes pour les applications triphasées, elles permettent en général une conversion directe et sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active, lorsqu'une isolation galvanique n'est pas nécessaire entre les sources échangeant de la puissance. Les structures modulaires sont très avantageuses pour les applications monophasées sans apport de puissance active, et elles conviennent même pour les applications à forte tension et forte puissance, des capacités flottantes ou inductances de liaison.

II.8 Techniques de commande des onduleurs multi-niveaux

De nombreuses techniques de commande ont été développées pour les onduleurs multi-niveaux comprenant l'élimination sélective des harmoniques (SHE Selective Harmonic Elimination), MLI sinusoïdal (modulation de largeur d'impulsion) (SPWM Pulse Width Modulation), et la modulation vectorielle (Space Vector Modulation SVM), sont considérées comme les trois principales commandes [28, 30, 43, 47, 48].

II.9 Modulation de largeur d'impulsion

La modulation de largeur d'impulsion consiste à comparer un signal de référence avec un ensemble de porteuses (signal triangulaire ou en dents de scie) Fig.2.6, c'est la méthode la plus utilisée pour la commande des onduleurs à deux niveaux, c'est aussi la méthode la plus utilisée pour les onduleurs multi-niveaux [28, 29, 30, 38].

Le nombre de porteuses est inférieur d'une unité par rapport au nombre de niveaux souhaités. La comparaison permet de produire un signal modulé qui servira à déterminer les signaux de

gâchettes des interrupteurs. En effet chaque niveau du signal modulé correspond à un niveau de tension de sortie et sera obtenu avec un chemin de courant bien précis découlant de l'état des interrupteurs du convertisseur.

II.9.1 Caractéristiques de la modulation de largeur d'impulsion

Les signaux MLI issus de la modulation sinusoïdale sont obtenus par comparaison entre une porteuse triangulaire de fréquence F_p , et une modulante de fréquence F inférieure à F_p Fig.2.6. L'onde modulante est en fait représentative du fondamental de la tension de sortie désirée et est utilisée comme référence [43, 44]. Le taux de modulation est défini comme le rapport entre l'amplitude V du fondamental de la tension de sortie, et la tension constante d'alimentation de l'onduleur et s'écrit comme suit :

$$Q = \frac{V}{V_{dc}} \quad (2-1)$$

On appelle coefficient de réglage en tension r la relation entre l'amplitude de la modulante et l'amplitude de la porteuse permettant d'ajuster l'amplitude du fondamental de la tension. Dans le cas de la modulation sinusoïdale bipolaire on le définit comme suit :

$$r = \frac{A_r}{A_p} \quad (2-2)$$

Avec:

A_r : Amplitude de la référence.

A_p : Amplitude de la porteuse.

On définit également l'indice de modulation m comme le rapport entre les fréquences de la porteuse et de la modulante il s'écrit comme suit :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (2-3)$$

F_p fréquence de la porteuse triangulaire.

F_r : fréquence de la tension de référence.

Si m est entier la modulation est dite synchrone, et si m est non entier elle est dite asynchrone.

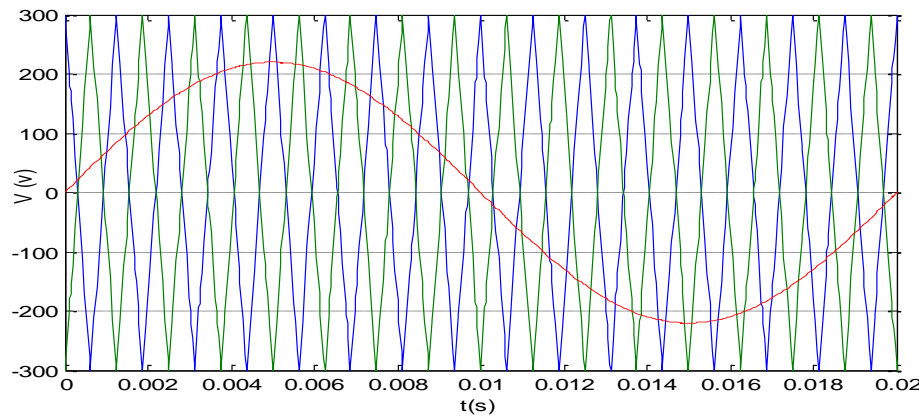


Fig.2.6 : Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale.

II.9.2 Modulation sinusoïdale multi-porteuse

La méthode de modulation sinusoïdale à deux niveaux peut être étendue à la commande des onduleurs multi-niveaux. Pour commander un convertisseur à N niveaux de tension, $(N - 1)$ porteuses triangulaires sont générées. Les méthodes de modulation MLI peuvent être classées selon le type d'arrangement des porteuses : techniques de PWM à décalage de niveau (LS-PWM) et PWM à décalage de phase (PS-PWM). Les porteuses en MLI à décalage de niveau (LSPWM) sont soit en disposition de phase (PD), Disposition d'opposition de Phase (POD) ou Disposition alternative d'opposition de phase (APOD) [28, 29, 38, 47, 48]. Dans l'indice de modulation d'amplitude (m_a) générale est définie comme le rapport de l'amplitude de l'onde sinusoïdale de référence (A_r) à l'amplitude de l'onde porteuse (A_p).

II.9.2.1 Disposition de Phase PWM (PDPWM)

Dans cette méthode, $(N - 1)$ porteuses triangulaires sont générées, toutes les porteuses au-dessus et au-dessous de la ligne de zéro sont dans la même phase. La méthode est connue sous le nom de la méthode disposition en phase (PD), comme indiqué sur la Figure (2.7-a).

La PDPWM est la stratégie largement utilisée pour convertisseurs modulaire multi-niveaux car elle fournit une tension et un courant de charge avec distorsion harmonique inférieure.

Prenant l'exemple d'un onduleur à cinq niveaux, le convertisseur est commuté sur $+V_{dc}/2$ lorsque l'onde sinusoïdale est supérieure aux deux porteuses supérieures, le convertisseur passe à $+V_{dc}/4$ lorsque l'onde sinusoïdale est inférieure à la forme d'onde supérieure des porteuses, et supérieure à toutes les autres porteuses, le convertisseur est commuté à zéro lorsque l'onde sinusoïdale est inférieure à la forme d'onde supérieure mais supérieure à la plus basse porteuse, le convertisseur passe à $-V_{dc}/4$ lorsque l'onde sinusoïdale est supérieure à la forme

d'onde de support la plus basse et moins que tous les autres porteuses et le convertisseur est commuté sur $-V_{dc}/2$ lorsque l'onde sinusoïdale est inférieure à toutes les porteuses.

II.9.2.2 Disposition à Opposition de Phase Alternative (APOD)

Dans cette méthode, toutes les porteuses ont la même fréquence et l'amplitude réglable (différente ou inégale Amplitudes) Fig.2.7-b. Tous les porteurs sont déphase entre eux de 180° . Le convertisseur passe à $V_{dc}/2$ lorsque l'onde de référence est supérieure à toutes les ondes porteuses convertisseur passe à $+V_{dc}/4$ lorsque l'onde sinusoïdale est inférieure que la forme d'onde supérieure des porteuses et supérieure à l'autre support, le convertisseur passe à zéro lorsque l'onde sinusoïdale est inférieure aux porteuses supérieures et supérieure aux deux ondes inférieure, le convertisseur passe à $-V_{dc}/4$ lorsque l'onde sinusoïdale est supérieure à la plus basse onde porteuse et moindre que toutes les autres porteuses, et les commutateurs de convertisseur passe à $-V_{dc}/2$ lorsque l'onde sinusoïdale est inférieure à l'ensemble des porteuses.

II.9.2.3 Disposition en Opposition de Phase (POD)

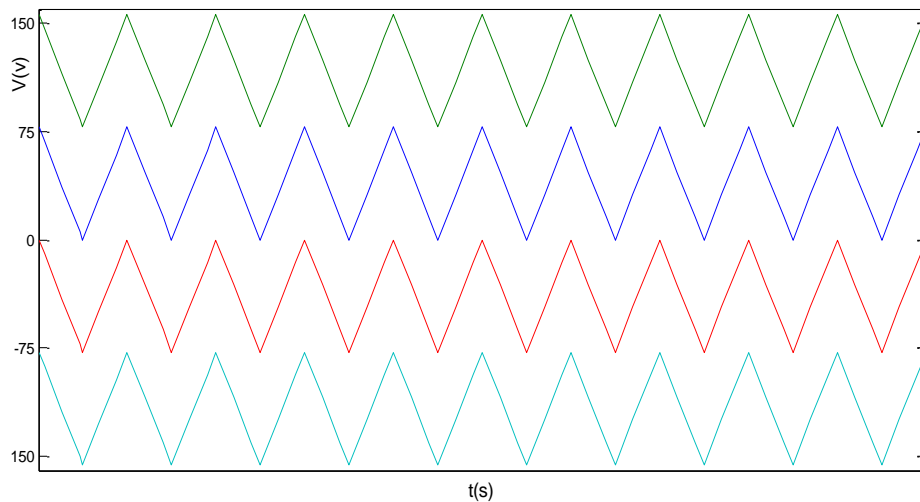
Dans cette méthode, toutes les porteuses ont la même fréquence et l'amplitude réglable (différente ou inégale Amplitudes). Mais toutes les porteuses au-dessus du zéro sont en phase parmi eux mais en opposition (180° degrés déphasés) avec ceux au-dessous du zéro.

Les dispositions des porteuse et de l'onde de référence sont telles que représentées sur la Fig.2.7-c, le convertisseur est commuté sur $+V_{dc}/2$ lorsque l'onde sinusoïdale est supérieur au deux porteuses supérieures, le convertisseur passe à $+V_{dc}/4$ lorsque l'onde sinusoïdale est inférieure à la porteuse supérieure et supérieure aux autres porteuses inférieures, le convertisseur est commuté à zéro lorsque l'onde sinusoïdale est supérieure à la porteuse inférieure et inférieure porteuses supérieures, le convertisseur passe à $-V_{dc}/4$ lorsque l'onde sinusoïdale est supérieure à la poeteuse la plus basse et inférieure à tous les autres, et le convertisseur est commuté sur $-V_{dc}/2$ lorsque l'onde sinusoïdale est inférieure aux deux porteuses inférieures.

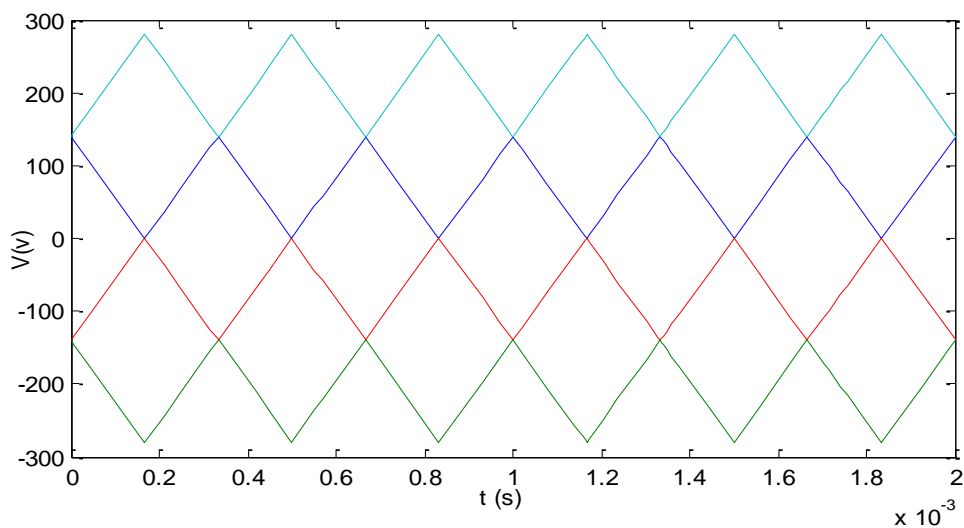
II.9.2.4 MLI à décalage de phase (PSPWM)

Dans la technique PSPWM à déplacement de phase (PSC), les porteuses sont décalées en phases et ont la même fréquence et amplitude Fig.2.7-d. Comparée à d'autres techniques, cette technique a trouvé plus d'intérêt pour la recherche dans la modulation de convertisseurs multi niveaux en raison de sa symétrie.

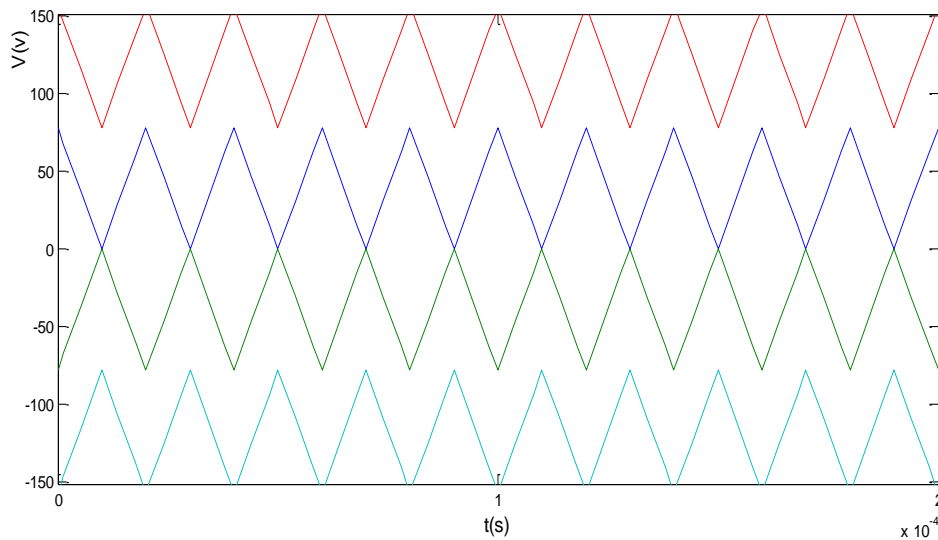
Le changement de phase entre les porteuses est de $360^\circ/N$. Contrairement au PWM à décalage de niveau, les commutateurs peuvent contribuer dans toutes les parties du signal de référence, car toutes les porteuses peuvent traverser le signal de référence en tout point. Par conséquent, la MLI déphasée donne une meilleure distribution de commutation par rapport à la MLI à décalage de niveau, améliorant les performances d'équilibrage individuelles des tensions.



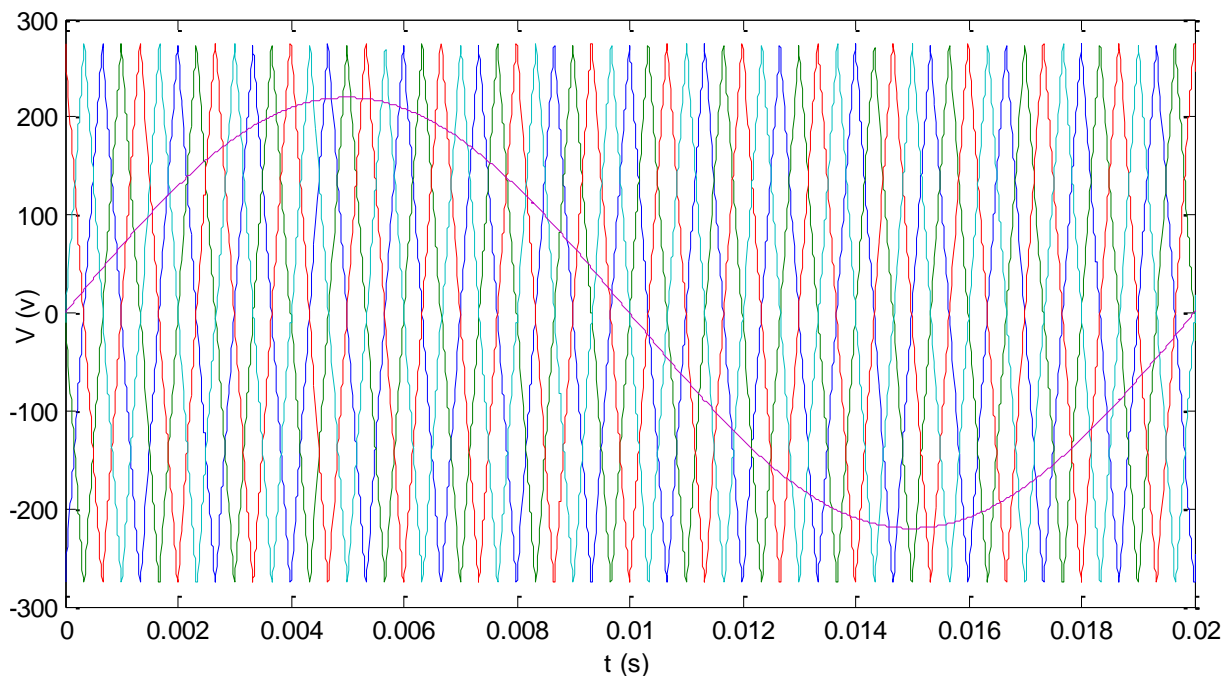
- a : MLI à disposition en phase.



- b : Disposition à Opposition de Phase Alternative.



- C : Disposition en opposition de phase.



- d : MLI à décalage de phase.

Fig.2.7 : Différentes stratégies LS-PWM.

II.9.3 La modulation vectorielle (SVM)

La modulation vectorielle est une variante de la MLI (Modulation de largeur d'impulsion), elle a été introduite en Allemagne par Baschle en 1971 [47, 49, 51].

Le principe de la MLI vectorielle consiste à la représentation des trois tensions sinusoïdales désirées à la sortie de l'onduleur par un seul vecteur dans le référentiel 2D (α, β) . Chacun de ces vecteurs correspond à une combinaison des états des interrupteurs de l'onduleur de tension triphasé, cette méthode de MLI peut désormais être implantée dans des circuits

intégrés numériques. Elle nécessite toute fois des calculs numériques rapides et précis. De ce fait, la fonction MLI est séparée des fonctions de "commande algorithmique" et implantée dans un circuit intégré spécifique.

La SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) se distingue de la MLI inter sélective par le fait de ne pas utiliser trois modulateurs séparés pour les trois bras d'un onduleur mais un seul vecteur global qui représente les états des trois bras en même temps.

Pour un onduleur à six interrupteurs, il y a 8 séquences de commutation possibles. Chaque séquence est représentée par un vecteur référence, 6 vecteurs parmi 8 sont actifs et 2 sont des vecteurs nuls [47]. La Fig.2.8 représente les 6 secteurs ainsi que la configuration de l'onduleur correspondante.

Les huit vecteurs de tension sont représentés, six vecteurs sont égaux en module, dont les extrémités forment un hexagonale régulier, chaque deux vecteurs successifs forment entre eux un angle de $\pi/3$. Les deux autres vecteurs sont nuls.

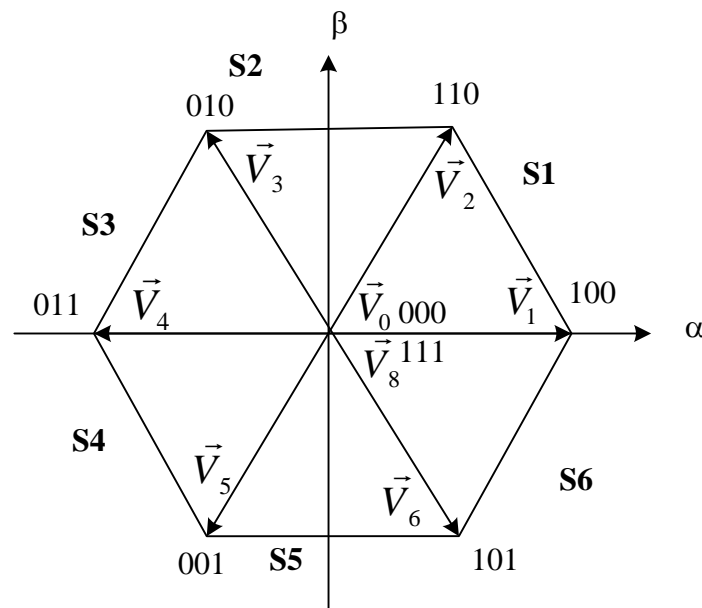


Fig.2.8: Secteurs de commutation par MLI vectorielle et état de commutation de l'onduleur de tension [23, 24].

II.9.4 Etapes de réalisation de la SVM

Le fonctionnement de la MLI vectorielle se résume par les séquences de traitement suivantes [49, 52].

- Détermination du vecteur référence V_{ref} .

- Calcul de la phase entre $V_{ref\alpha}$ et $V_{ref\beta}$.
- Détermination du secteur de commutation.
- Calcul des termes X, Y et Z et déduction des séquences de commutation pour chaque phase.

Les allures des séquences et des temps de commutation de la commande MLI vectorielle pour générer les signaux de commande des gâchettes des six interrupteurs de l'onduleur triphasé à deux niveaux sont présentées aux figures 2.9 et 2.10. Cette méthode peut être généralisée pour définir les états de commutation dans les onduleurs à N niveaux.

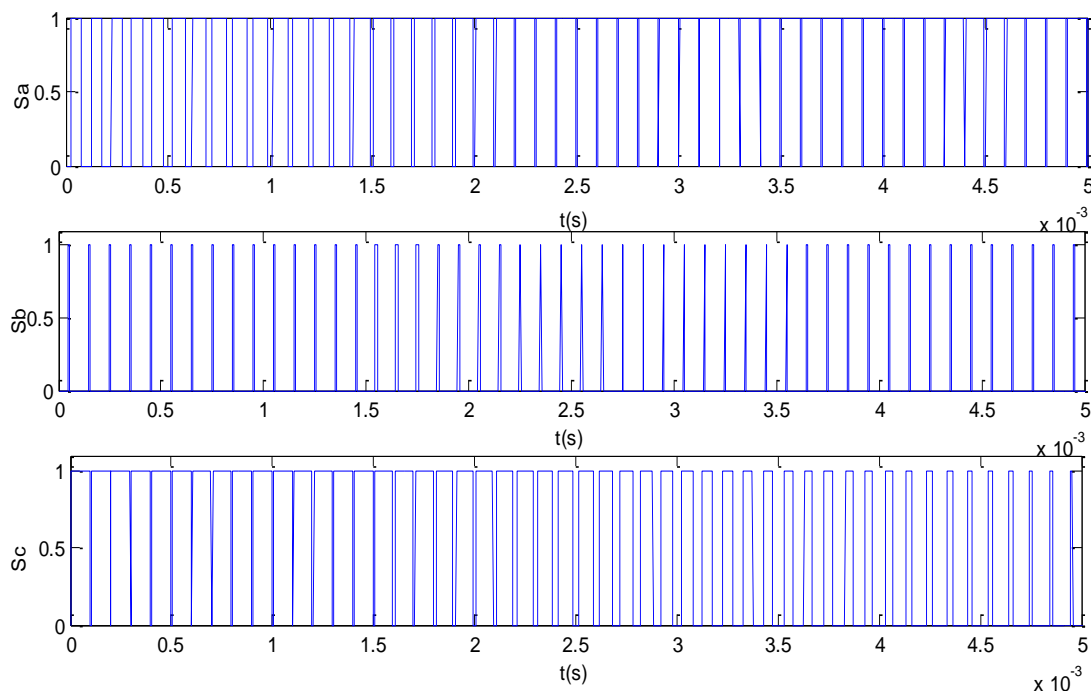


Fig.2.9 Signaux de commande des interrupteurs pour chaque phase par la technique SVM.

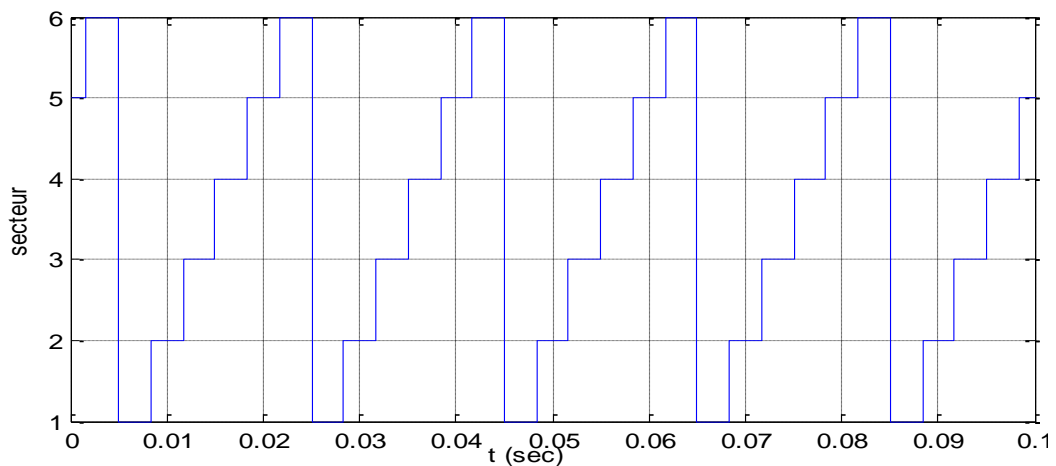


Fig. 2.10: Secteurs de commutation.

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, différents types de convertisseurs multi-niveaux ainsi que leurs caractéristiques principales ont été présentées. Il existe plusieurs topologies d'onduleurs multi-niveaux, dont chacune convient à un type d'application déterminé permettant d'atteindre les performances recherchées. Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. L'énergie stockée à l'étage intermédiaire peut être réduite. Les structures permettant une conversion directe (NPC et cellules imbriquées) sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active. Les onduleurs à cellules en cascade sont très avantageux pour les applications monophasées sans apport de puissance active. Ils conviennent même pour les très grandes tensions.

Chapitre 3

Onduleur multi-niveaux de type NPC

Chapitre III : Onduleur multi-niveaux de type NPC

III.1	Introduction.....	47
III.2	Définition et structure générale d'un onduleur de tension.....	47
III.3	Expression des tensions de sortie	48
III.4	Les onduleurs à niveaux multiples.....	50
III.5	Structure et principe de fonctionnement de l'onduleur NPC à trois niveaux...	50
III.6	Modélisation d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	51
III.6.1	Séquences de conduction d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux....	52
III.6.2	Commande complémentaire des onduleurs à trois niveaux.....	54
III.6.3	Modèle de connaissance.....	54
III.6.4	Commande MLI de l'onduleur à trois niveaux.....	56
III.7	Onduleur à cinq niveaux de type ANPC.....	57
III.7.1	Modélisation de l'onduleur NPC à cinq niveaux.....	58
III.7.2	Fonction de connexion des interrupteurs.....	61
III.7.3	Fonction de connexion du demi-bras.....	62
III.8	Commande de l'onduleur multi-niveaux.....	63
III.9	Conclusion	65

III.1 Introduction

Un convertisseur à niveaux multiples ou convertisseur multi-niveaux peut commuter chaque entrée ou sortie au moins entre trois niveaux de tension ou de courant [37, 53, 54]. Dans les dernières années, on a vécu l'apparition et le perfectionnement de nouveaux composants de puissance commandables à l'ouverture et à la fermeture, qui ont permis la conception de nouveaux convertisseurs fiables, rapides et puissants. Parmi ces convertisseurs on distingue les convertisseurs multi-niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping Diode).

Dans toutes les topologies de convertisseurs multi-niveaux existant, plus le nombre de niveaux est élevé, plus compliquée devient la structure du convertisseur, son coût et la complexité de sa commande s'en trouvent augmentés, et sa fiabilité s'en trouve réduite [38].

Dans ce chapitre on présentera une dérivée de la structure d'onduleurs NPC à trois et à cinq niveaux qu'on va associer au compensateur de puissance réactive STATCOM, commandé par la stratégie de modulation de largeur d'impulsion à plusieurs porteuses.

III.2 Définition et structure générale d'un onduleur de tension

L'ondeur de tension est un convertisseur statique constitué de cellule de commutation à thyristor ou à transistor et qui transforme une tension continue en une tension alternative. Le principe de fonctionnement s'exprime dans le séquençage imposé aux interrupteurs statiques qui réalisent la modulation de largeur d'impulsion [53, 54, 55].

En cas de présence d'un point milieu la structure générale d'un onduleur de tension à deux niveaux est présentée par la Fig.3.1. L'ondeur triphasé à deux niveaux est constitué par six interrupteurs, ces derniers ont la particularité d'être bidirectionnels en courant et entièrement commandable en ouverture et à la fermeture pour assurer la circulation du courant dans les deux sens, le thyristor ou le transistor doit être placé en anti parallèle avec une diode.

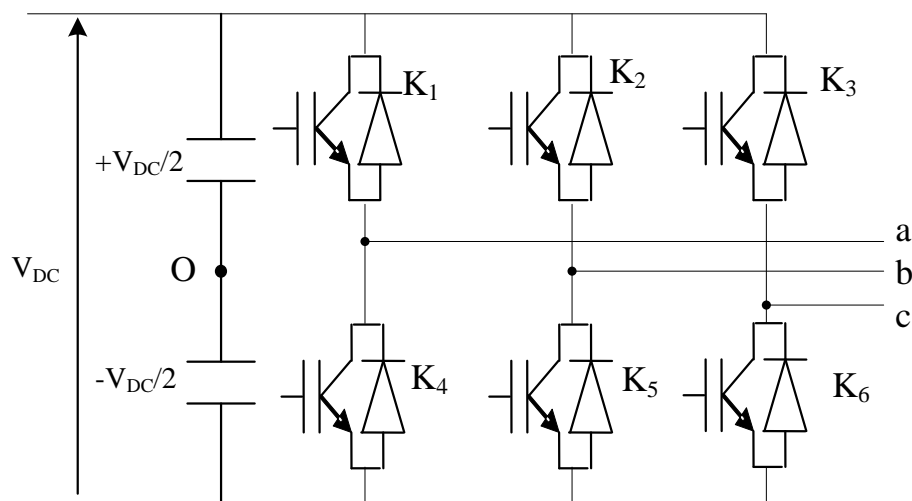


Fig. 3.1 : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

III.3 Expression des tensions de sortie

L'onduleur de tension à deux niveaux délivre en sortie deux niveaux de tensions $-V_{dc}/2$ et $+V_{dc}/2$ en fonction des états des interrupteurs comme montré au tableau III-1.

Tableau III-1 : Obtention des deux niveaux de tension en fonction des états des interrupteurs.

C_i	S_i	S_i	V_{io}
-1	0	1	$-V_{dc}/2$
1	1	0	$+V_{dc}/2$

Avec :

i : indice de phase tel que $i = a, b, c$.

C_i : est la variable d'état de l'interrupteur prenant la valeur -1 ou 1.

V_{io} : est la tension prise entre phase et point milieu O.

La tension V_{io} est obtenue en appliquant la formule suivante :

$$V_{io} = c_i V_{dc}/2 \quad (3-1)$$

Si on considère tous les interrupteurs, toutes les phases (3), et tous les états possibles (2), on obtient 2^3 combinaisons les quelles sont présentées dans le tableau (III-2).

Les tensions entre phases sont donnés par :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (3-2)$$

Si le système est équilibré, on a une somme nulle des tensions phase neutre :

$$V_{ao} + V_{bo} + V_{co} = 0 \quad (3-3)$$

Les tensions de phase sont déterminés en fonction des tensions entre phase par :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(V_{ab} - V_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(V_{bc} - V_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{ca} - V_{bc}) \end{cases} \quad (3-4)$$

De (3-2) et (3-4) les tensions de phase en fonction des tensions point milieu " O " sont défini par :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

En remplaçant les tensions V_{io} par leurs valeurs définies dans l'équation (3-1) on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_a \\ c_b \\ c_c \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{2} \quad (3-6)$$

Le tableau III-2 définit les tensions de sortie de l'onduleur par chaque dans de commutation des interrupteurs.

Tableau III-2: Table d'excitation des interrupteurs pour chaque état de tension possible.

N°	Etat des interrupteurs						Tensions de sortie		
	S _a	S _a '	S _b	S _b '	S _c	S _c '	V _{ao}	V _{bo}	V _{co}
1	0	1	0	1	0	1	-V _{dc} /2	-V _{dc} /2	-V _{dc} /2
2	0	1	0	1	1	0	-V _{dc} /2	-V _{dc} /2	V _{dc} /2
3	0	1	1	0	0	1	-V _{dc} /2	V _{dc} /2	-V _{dc} /2
4	0	1	1	0	1	0	-V _{dc} /2	V _{dc} /2	V _{dc} /2
5	1	0	0	1	0	1	V _{dc} /2	-V _{dc} /2	-V _{dc} /2
6	1	0	0	1	1	0	V _{dc} /2	-V _{dc} /2	V _{dc} /2
7	1	0	1	0	0	1	V _{dc} /2	V _{dc} /2	-V _{dc} /2
8	1	0	1	0	1	0	V _{dc} /2	V _{dc} /2	V _{dc} /2

III.4 Les onduleurs à niveaux multiples

Ce sont une nouvelle génération de convertisseurs qui prend place dans le domaine haute tension [53, 56, 57, 58, 59]. Les motivations principales qui sont à l'origine des convertisseurs multi-niveaux sont d'une part l'augmentation de puissance par le biais de la génération de tensions plus élevées, au-delà de celles compatibles avec les tensions de blocage des dispositifs à semi-conducteurs de puissance. D'autre part, on cherche à obtenir des grandeurs de sortie ayant une meilleure définition, c'est-à-dire qui présentent un contenu harmonique réduit [29, 30, 43, 44].

Ainsi, l'intérêt d'utiliser des convertisseurs à niveaux multiples réside dans leur capacité à générer des formes d'ondes de très bonne qualité, une baisse de la fréquence de commutation, la réduction des pertes d'énergie et une diminution de l'effort des composants statiques. Aussi, l'utilisation d'un SVC multi-niveaux diminue la taille des batteries [53, 54].

Parmi les topologies d'onduleurs multi-niveaux, on distingue l'onduleur multi-niveaux à potentiels distribués NPC (Neutral Point Clamped) représentées sur la Fig.3.2. Pour l'onduleur NPC multi-niveaux, le nombre de niveaux N est donné par $N = m/2 + 1$, avec m le nombre d'interrupteurs par phase [50, 51, 55, 57].

III.5 Structure et principe de fonctionnement de l'onduleur NPC à trois niveaux

L'onduleur NPC à trois niveaux est représenté à la Fig.3.2. Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C_1 et C_2), formant un point milieu noté "O" qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux [50, 51, 54, 56, 57, 58]. La tension totale du bus continu vaut E ; dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension $E/2$ à leurs bornes.

Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (K_1, K_2, K_3 et K_4 pour le bras a), et deux diodes de maintien connectées au point milieu du bus continu Fig.3.3. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant: il s'agit d'association d'un transistor et d'une diode en antiparallèle.

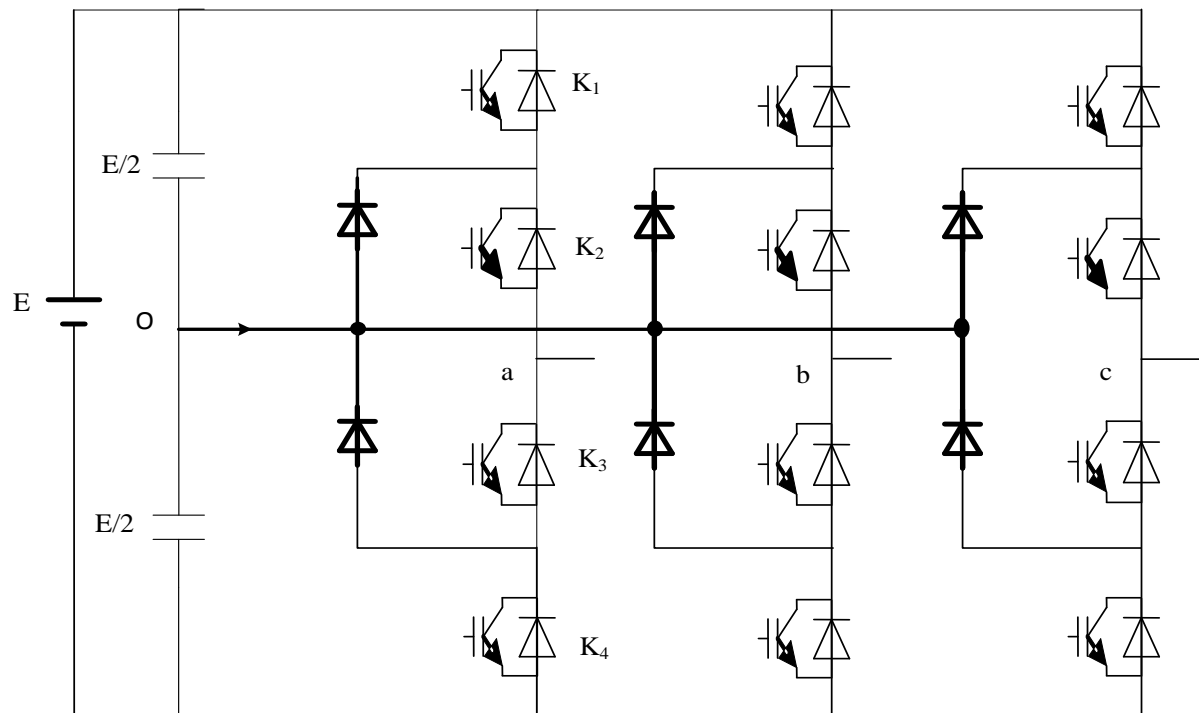


Fig.3.2: Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux.

III.6 Modélisation d'un bras d'onduleur à trois niveaux

L'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension V_{ao} pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conceptions des interrupteurs.

Le sens positif ou négatif des courants I_{d0} , I_{d1} et I_{d2} fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant.

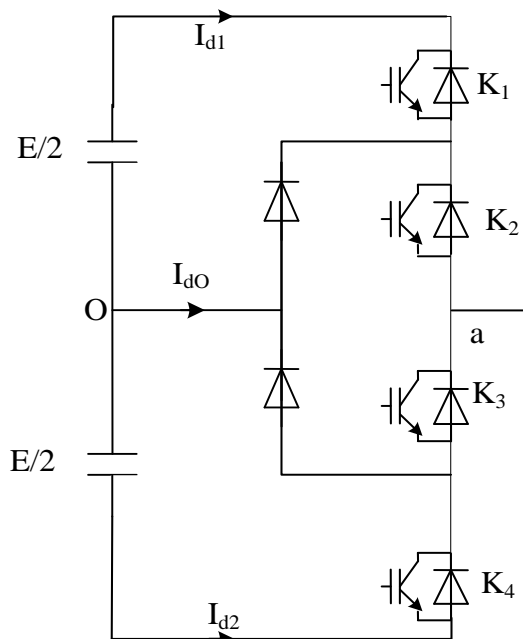


Fig. 3.3: Bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.

III .6.1 Séquences de conduction d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux

Les séquences de fonctionnement, les états des interrupteurs sont représentés sur la Fig.3.4

La tension simple V_{AO} est totalement définie par l'état des quatre interrupteurs du bras. L'analyse topologique d'un bras de l'onduleur de la Fig.3.3, montre qu'il existe cinq configurations possibles, ces configurations sont présentées sur la Fig.3.4.

Avec:

V_A, V_B, V_C : Tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge.

V_{AO}, V_{BO}, V_{CO} : Tensions de chaque phase de l'onduleur par rapport au point milieu "O" de l'alimentation continue de l'onduleur.

V_{NO} : Tension entre le point neutre de la charge (point N) et le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur (point O).

On prend ($V_{C1}=V_{C2}=E/2$) tension au borne de chaque capacité.

• Séquences E_1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs K_1, K_2 sont passants et K_3, K_4 sont bloqués comme le montre la Fig. 3.4, et la tension de sortie V_{aO} est: $V_{aO}=+E/2$.

La tension inverse appliquée au interrupteurs K_3, K_4 vaut : $V_{k3}=V_{k4}=+E/2$.

- Séquences E_2 : Génération du niveau intermédiaire

Les interrupteurs K_2 , K_3 sont passants et K_1 , K_4 sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point "O" à travers l'une des diodes de clamp (D_1 , D_2), comme le montre la Fig.3.4, et la tension de sortie V_{ao} est donc nulle, $V_{ao} = 0$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1 , K_2 vaut: $V_{K1} = V_{K2} = +E/2$.

- Séquences E_3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs K_1 , K_2 sont bloqués et K_3 , K_4 sont passants comme le montre la Fig.3.4, et la tension de sortie V_{ao} est: $V_{ao} = -E/2$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1 , K_2 vaut: $V_{K1} = V_{K2} = +E/2$.

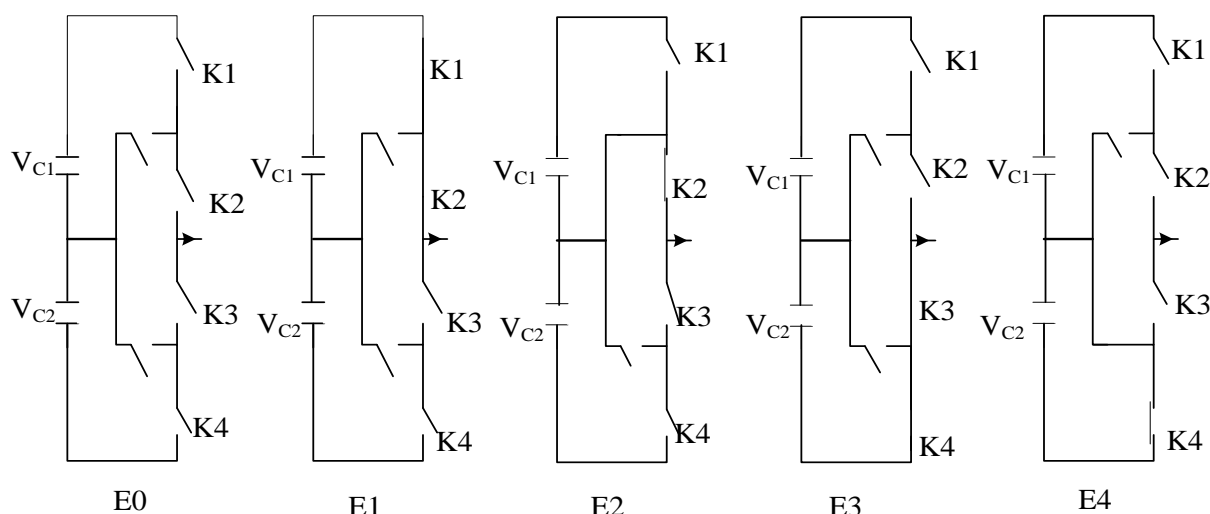


Fig.3.4: Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux.

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont résumées dans le Tableau III-3, la tension à bloquer par les interrupteurs est égale à $E/2$.

Tableau III-3 : Grandeurs électriques caractérisant chacune des configurations.

séquence	Tension de sortie
E_0	$I_k=0$
E_1	$V_k=+V_{C1}=E/2$
E_2	$V_k=0$
E_3	$V_k=-V_{C2}=-E/2$
E_4	$V_k=0$

III.6.2 Commande complémentaire des onduleurs à trois niveaux

Pour un onduleur à trois niveaux, on définit la commande complémentaire suivante :

B_{ks} : La commande de base de transistor T_{ks} du bras k .

k : Le numéro du bras ($k=1, 2, 3$).

III.6.3 Modèle de connaissance

On définit le modèle de connaissance des onduleurs à trois niveaux en utilisant la notion de fonction de connexion des interrupteurs et demi bras [55, 57].

La commande complémentaire s'exprime en utilisant ces fonctions de connexion comme suit :

(F_{ks}) : La fonction de connexion de chaque interrupteur qui décrit son état fermé ou ouvert.

Cette fonction est définie comme suit :

$$F_{ks} = \begin{cases} 1 & \text{si TD}_{KS} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si TD}_{KS} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (3-$$

7)

On définira la fonction de connexion du demi-bras F_{km} comme suit :

$m=1$ Le demi-bras du haut

$m=0$ Le demi-bras du bas

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment, en fonction de celles des interrupteurs comme suit :

Avec F_{k1}^b et F_{k0}^b respectivement pour le demi-bras du haut et, celui du bas.

F_{km} vaut "1" dans le cas où les interrupteurs du demi-bras sont tous fermés, et nulle dans tous les autres cas.

Le tableau (III-4) présente la table d'excitation des interrupteurs d'un bras d'onduleur à trois niveaux.

Tableau III-4: Table d'excitation des interrupteurs d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.

Etat des interrupteurs				Tension bloquée
F_{K1}	F_{K2}	F_{K3}	F_{K4}	V_k
1	1	0	0	$E/2$
0	1	0	1	0

0	0	1	0	-E/2
0	0	1	1	0

Les tensions entre phase et le point milieu du circuit continu sont données comme suit :

$$\begin{cases} V_{Ao} = V_A - V_o \\ V_{Bo} = V_B - V_o \\ V_{Co} = V_C - V_o \end{cases} \quad (3-8)$$

Les tensions composées aussi sont données comme suit :

$$\begin{cases} U_{BA} = V_{Ao} - V_{Bo} \\ U_{CB} = V_{Bo} - V_{Co} \\ U_{AC} = V_{Co} - V_{Ao} \end{cases} \quad (3-9)$$

Les tensions simples en fonction des tensions composées sont données par le système suivant :

$$\begin{cases} V_{AN} = \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ V_{BN} = \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ V_{CN} = \frac{U_{CA} - U_{BC}}{3} \end{cases} \quad (3-10)$$

La tension à la borne du neutre de la charge et le point milieu du circuit continu s'exprime par:

$$V_{No} = \frac{V_{Ao} + V_{Bo} + V_{Co}}{3} \quad (3-11)$$

Les tensions de sortie de l'onduleur triphasé à trois niveaux par rapport au point milieu "O" en fonction de l'état des interrupteurs s'exprime comme suit : (on suppose $V_{c1} = V_{c2} = E/2$).

$$\begin{cases} V_{Ao} = F_{11}F_{12}V_{c1} - F_{13}F_{14}V_{c2} = (F_{11}F_{12} - F_{13}F_{14})E/2 \\ V_{Bo} = F_{21}F_{22}V_{c1} - F_{23}F_{24}V_{c2} = (F_{21}F_{22} - F_{23}F_{24})E/2 \\ V_{Co} = F_{31}F_{32}V_{c1} - F_{33}F_{34}V_{c2} = (F_{31}F_{32} - F_{33}F_{34})E/2 \end{cases} \quad (3-$$

12)

En introduisant les fonctions de connexion du demi-bras le système (3-12) devient :

$$\begin{cases} V_{Ao} = F_{11}^b V_{c1} - F_{10}^b V_{c2} = (F_{11}^b - F_{10}^b)E/2 \\ V_{Bo} = F_{21}^b V_{c1} - F_{20}^b V_{c2} = (F_{21}^b - F_{20}^b)E/2 \\ V_{Co} = F_{31}^b V_{c1} - F_{30}^b V_{c2} = (F_{31}^b - F_{30}^b)E/2 \end{cases} \quad (3-13)$$

Rappelons que les sommes respectives des tensions simples et composées du récepteur sont nulles. En fonction de ces potentiels, les relations des tensions du récepteur s'écrivent :

Les tensions de phase sont:

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

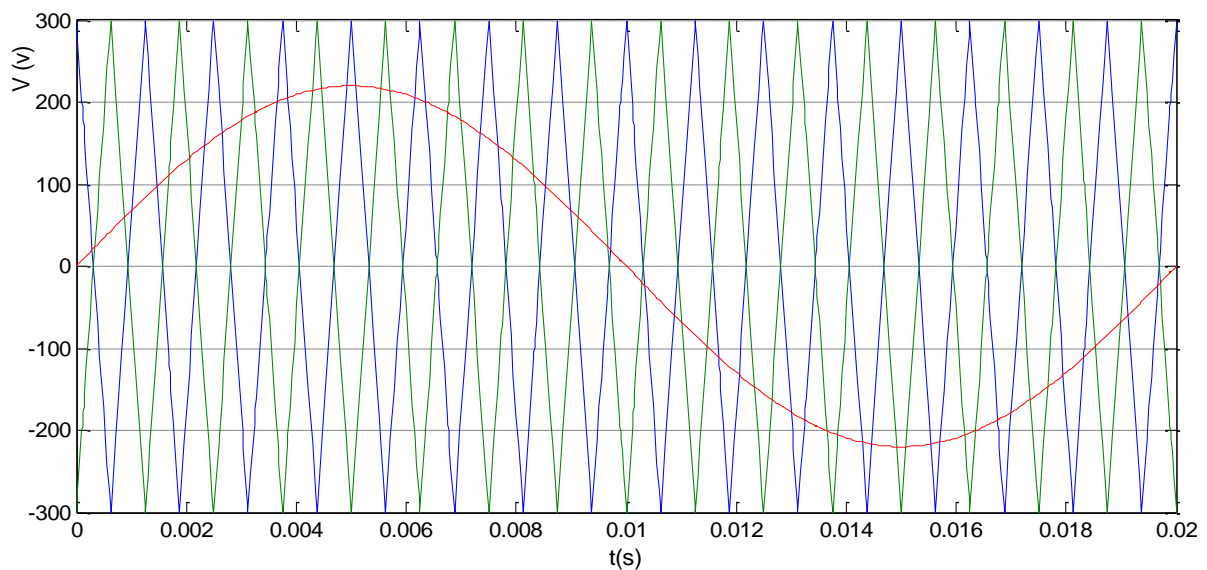
Les tensions entre phases sont:

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{cA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

III.6.4 Commande MLI de l'onduleur à trois niveaux

La méthode utilisée pour la commande des interrupteurs est celle à MLI à plusieurs porteuses triangulaire (SPWM) qui utilise la technique du décalage de phase pour réduire les harmoniques de la tension de charge [50, 54, 55].

Le signal de référence est comparé à deux porteuses triangulaires comme le montre la Fig.3.5, quant la valeur instantanée du signal triangulaire est inférieure à celui du signal sinusoïdal, la valeur du signal de sortie est "1", sinon elle prend la valeur "0". La Fig.3.6 montre la tension de sortie d'une phase d'un onduleur à trois niveaux.



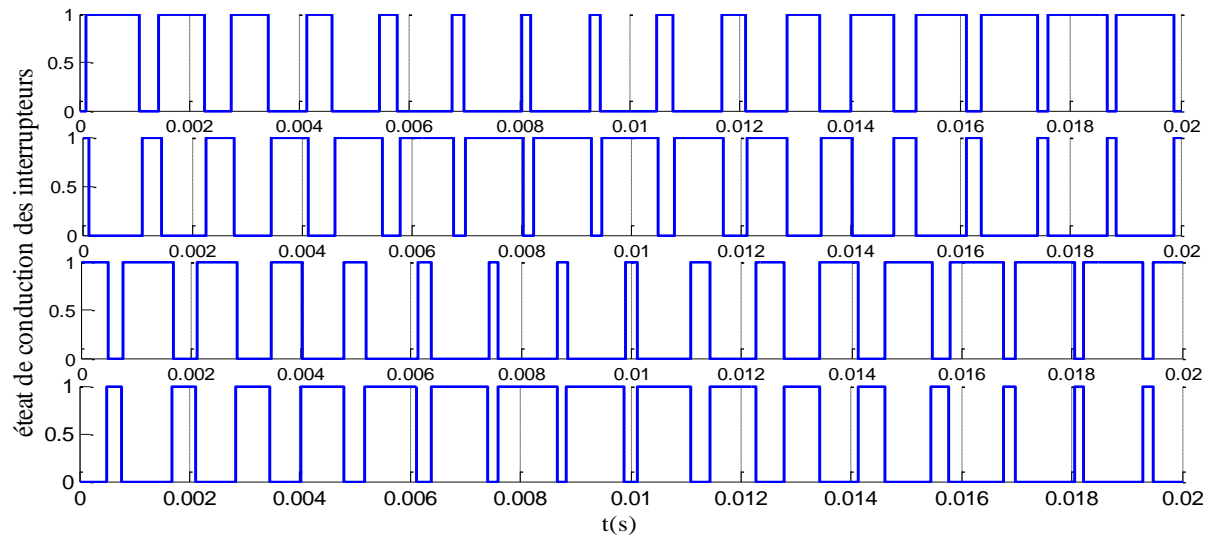


Fig.3.5: MLI à deux porteuses à décalage de phase.

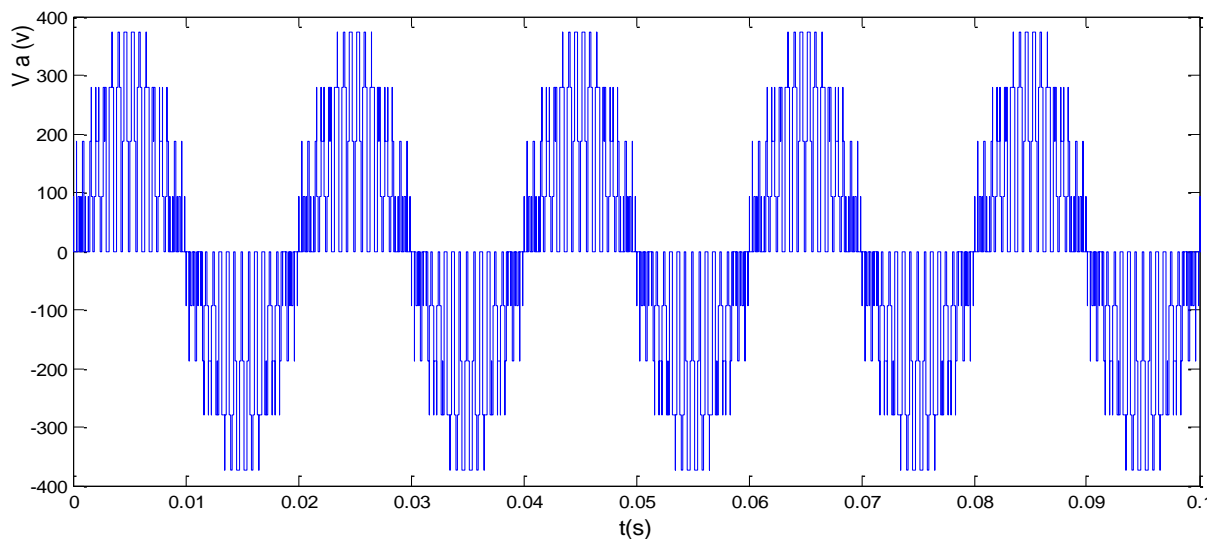


Fig.3.6: Tension d'une phase de l'onduleur à trois niveaux.

III. 7 Onduleur à cinq niveaux de type ANPC

L'onduleur à cinq niveaux de type ANPC est constitué par huit interrupteurs bidirectionnels en courant placés en série par bras, deux interrupteurs en parallèle et deux diodes de bouclage. Les interrupteurs en parallèle ont pour rôle de remplacer les diodes en série dans la structure conventionnelle. L'onduleur est alimenté par une source continue E , que quatre condensateurs de valeurs égales se partagent pour donner quatre sources distinctes de tension $E/4$ [55, 59]. La structure triphasée de l'onduleur ANPC à cinq niveaux de tensions est présentée sur la Fig.3.7.

III 7.1 Modélisation de l'onduleur ANPC à cinq niveaux

L'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension de phase V_{aO} pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs. Nous limitons l'étude à un bras d'onduleur ANPC de cinq niveaux vue sa symétrie, Fig.3.8.

Le tableau III-5 représente les grandeurs électriques caractérisant chaque configuration de l'onduleur à cinq niveaux, ces configurations sont résumées sur la fig.3.9.

Tableau III-5 : Grandeurs électriques caractérisant chaque configuration de l'onduleur à cinq niveaux.

séquence	Tension de sortie
E_0	$I_k=0$
E_1	$V_k=+V_{c1}+ V_{c2}= E/2$
E_2	$V_k=+V_{c1}=E/4$
E_3	$V_k=0$
E_4	$V_k=-V_{c3}= -E/4$
E_5	$V_k=+V_{c3}+ V_{c4}= -E/2$
E_6	$V_k=0$

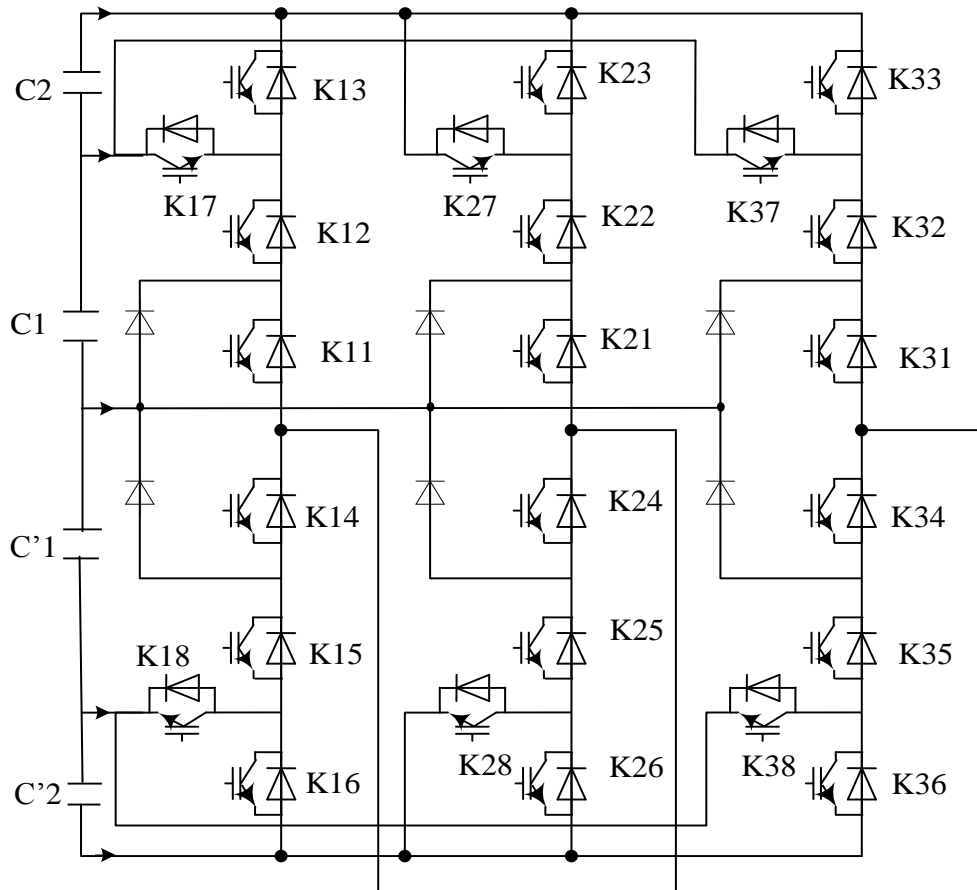


Fig.3.7: Schéma d'un onduleur ANPC à cinq niveaux.

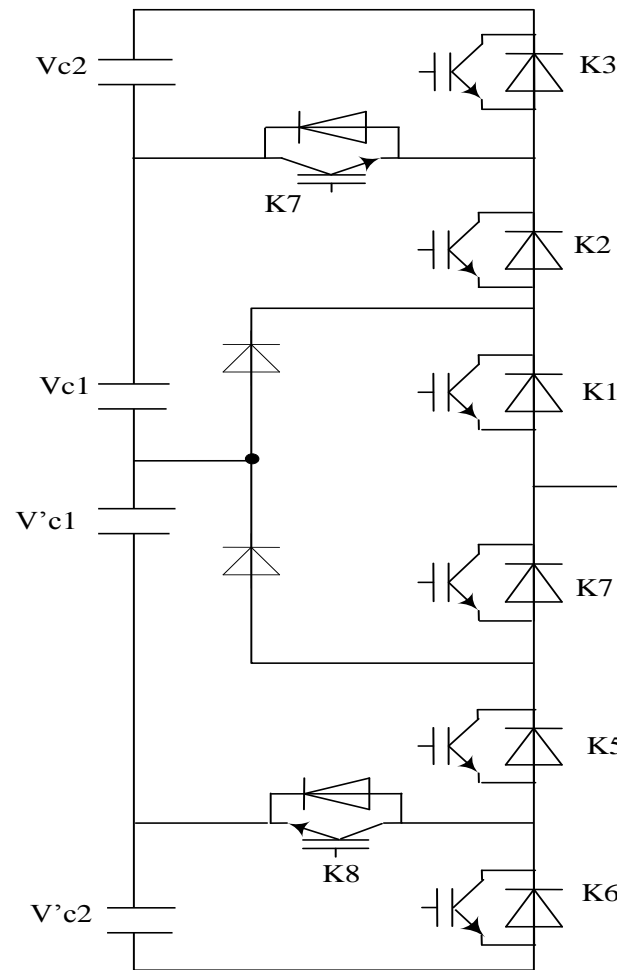


Fig.3.8: Bras d'un onduleur ANPC à cinq niveaux.

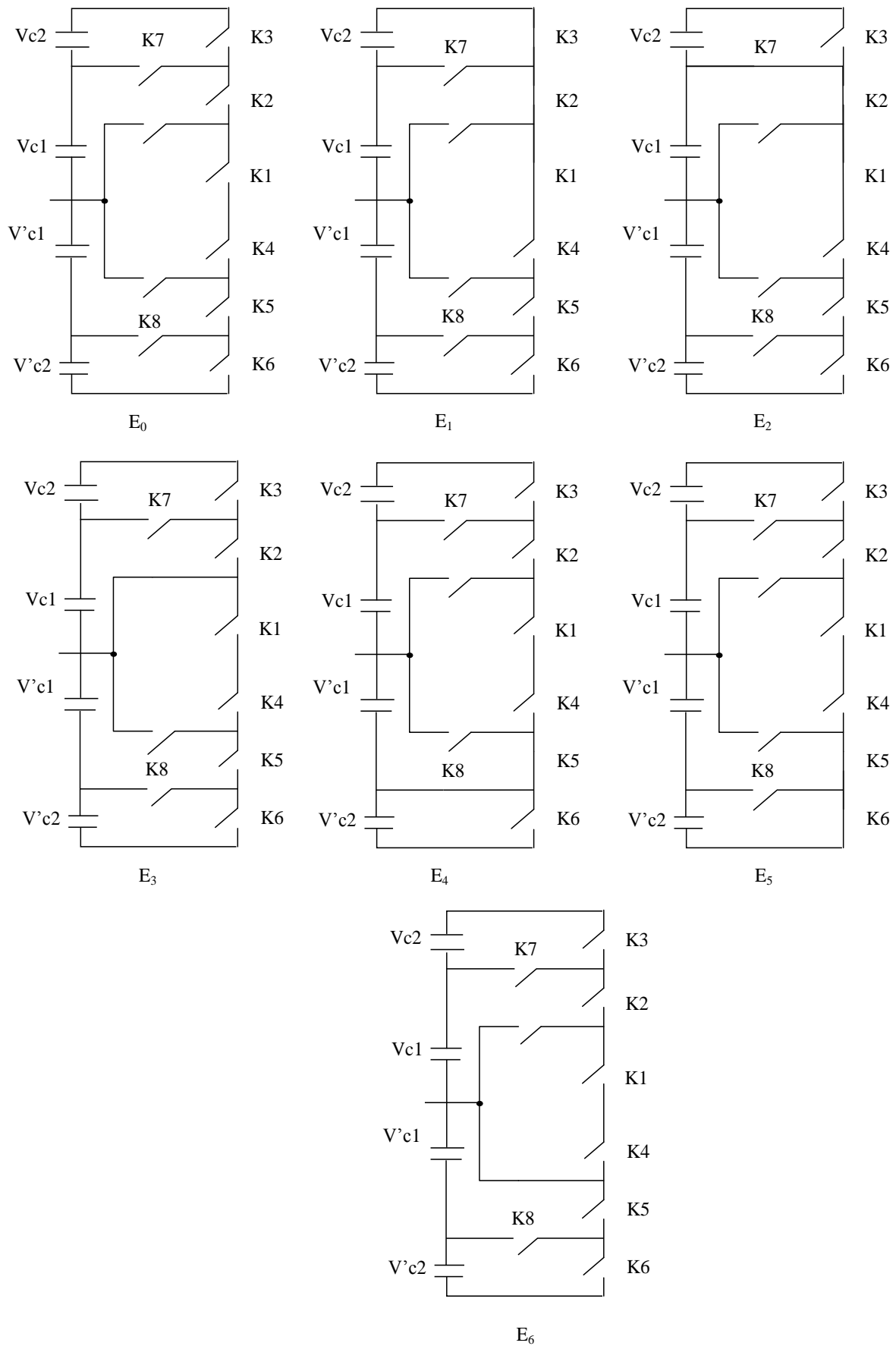


Fig.3.9: Séquences de fonctionnement d'un bras d'un onduleur ANPC à cinq niveaux.

III 7.2 Fonction de connexion des interrupteurs

Cette fonction est associée à chaque interrupteur K_{iS} , et décrit son état ouvert ou fermé. Cette fonction vaut "1" si l'interrupteur est fermé et "0" dans le cas contraire. Pour éviter la conduction simultanée des six interrupteurs d'un seul bras qui peut engendrer leur destruction par croissance du courant lors du court-circuit, ou à une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit la commande complémentaire suivante [55, 57]:

$$\begin{aligned} B_{K4} &= \overline{B_{K2}} \\ B_{K5} &= \overline{B_{K1}} \\ B_{K6} &= \overline{B_{K3}} \end{aligned} \quad (3-17)$$

Avec cette commande complémentaire, les fonctions de connexion des interrupteurs du bras K sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} F_{K4} &= 1 - F_{K2} \\ F_{K5} &= 1 - F_{K1} \\ F_{K6} &= 1 - F_{K3} \end{aligned} \quad (3-18)$$

Le tableau (III-6) représente la table d'excitation des interrupteurs de l'onduleur à cinq niveaux:

Tableau III-6: Table d'excitation des interrupteurs de l'onduleur à cinq niveaux à structure ANPC.

F_{K1}	F_{K2}	F_{K3}	F_{K4}	F_{K5}	F_{K6}	F_{K7}	F_{K8}	V_k
1	1	1	0	0	0	0	0	E/2
1	1	0	1	0	0	1	0	E/4
1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	1	1	0	1	E/4
0	0	0	0	1	1	1	0	E/2
0	0	0	0	1	0	0	0	0

D'après le tableau ci-dessus, on remarque que cette commande complémentaire permet d'avoir un fonctionnement en cinq niveaux.

III 7.3 Fonction de connexion du demi-bras

On définit pour l'onduleur une fonction de connexion des demi-bras qu'on notera F_{Km}^b tel que :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1}F_{K2}F_{K3} \\ F_{K0}^b = F_{K4}F_{K5}F_{K6} \end{cases} \quad (3-19)$$

Le système d'équations précédent montre que la fonction F_{Km}^b vaut « 1 » dans le cas où les trois interrupteurs du demi-bras sont tous fermés et nulles dans tous les autres cas.

Les fonctions de connexion des deux interrupteurs parallèles du bras K sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{K7} = F_{K1}F_{K2}(1-F_{K3}) \\ F_{K8} = F_{K4}F_{K5}(1-F_{K6}) \end{cases} \quad (3-20)$$

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

$$\begin{cases} V_{Ao} = F_{11}F_{12}(1-F_{13})V_{c1} - F_{11}F_{12}F_{13}(V_{c1} + V_{c2}) - F_{14}F_{15}(1-F_{16})V'_{c1} - F_{14}F_{15}F_{16}(V'_{c1} + V'_{c2}) \\ V_{Bo} = F_{21}F_{22}(1-F_{23})V_{c1} - F_{21}F_{22}F_{23}(V_{c1} + V_{c2}) - F_{24}F_{25}(1-F_{26})V'_{c1} - F_{24}F_{25}F_{26}(V'_{c1} + V'_{c2}) \\ V_{Co} = F_{31}F_{32}(1-F_{33})V_{c1} - F_{31}F_{32}F_{33}(V_{c1} + V_{c2}) - F_{34}F_{35}(1-F_{36})V'_{c1} - F_{34}F_{35}F_{36}(V'_{c1} + V'_{c2}) \end{cases} \quad (3-21)$$

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

$$\begin{aligned} F_{17} &= F_{11}F_{12}(1-F_{13}) & F_{27} &= F_{21}F_{22}(1-F_{23}) & F_{37} &= F_{31}F_{32}(1-F_{33}) \\ F_{18} &= F_{14}F_{15}(1-F_{16}) & F_{28} &= F_{24}F_{25}(1-F_{26}) & F_{38} &= F_{34}F_{35}(1-F_{36}) \end{aligned} \quad (3-22)$$

En introduisant les équations (3-19) et (3-21) dans le système (3-21), on aboutit au système suivant :

$$\begin{aligned} V_{Ao} &= (F_{17} + F_{11}^b)V_{c1} + F_{11}^bV_{c2} - (F_{18} - F_{10}^b)V_{c2} - F_{10}^bV_{c2} \\ V_{Bo} &= (F_{27} + F_{21}^b)V_{c1} + F_{21}^bV_{c2} - (F_{28} - F_{20}^b)V_{c2} - F_{20}^bV_{c2} \\ V_{Co} &= (F_{37} + F_{31}^b)V_{c1} + F_{31}^bV_{c2} - (F_{38} - F_{30}^b)V_{c2} - F_{30}^bV_{c2} \end{aligned} \quad (3-23)$$

Dans le cas où $V_{c1}=V_{c2}=V_{c3}=V_{c4}=V_C$, la relation (3-8) se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{17} + F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} V_C \quad (3-24)$$

Les équations des mailles du système source - onduleur - charge donnent :

$$V_{Ao} + V_{Bo} + V_{Co} = V_A + V_B + V_C = 3V_{No} \quad (3-25)$$

Avec, V_{No} tension entre le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur et le point neutre de la charge donnée comme suit :

$$V_{No} = \frac{1}{3}(V_{Ao} + V_{Bo} + V_{Co}) \quad (3-26)$$

Les tensions simples à la sortie de l'onduleur sont

$$\begin{aligned} V_A &= V_{Ao} - \frac{1}{3}(V_{Ao} + V_{Bo} + V_{Co}) = \frac{1}{3}(2V_{Ao} - V_{Bo} - V_{Co}) \\ V_B &= V_{Bo} - \frac{1}{3}(V_{Ao} + V_{Bo} + V_{Co}) = \frac{1}{3}(-V_{Ao} + 2V_{Bo} - V_{Co}) \\ V_C &= V_{Co} - \frac{1}{3}(V_{Ao} + V_{Bo} + V_{Co}) = \frac{1}{3}(-V_{Ao} - V_{Bo} + 2V_{Co}) \end{aligned} \quad (3-27)$$

A partir des relations (3-23) et (3-24), on obtient le système matriciel donnant les expressions des tensions simples à la sortie de l'onduleur dans le cas où $V_{C1}=V_{C2}=V_{C3}=V_{C4}=V_C$, la relation (3-14) se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} V_C \quad (3-28)$$

III.8 Commande MLI de l'onduleur cinq niveaux

La méthode de modulation utilisée pour la commande des interrupteurs est la modulation pleine onde (ou LS-PWM), où quatre porteuses triangulaires de même fréquence disposées les unes au-dessus des autres et comparées à la même tension de référence. Chaque porteuse est assignée à un niveau de tension et l'intersection avec la modulante provoque la génération des ordres de commande des interrupteurs du niveau correspondant [50, 54, 59].

Les figures suivantes présentent la technique de commande MLI ainsi que les tensions fournies par l'onduleur ANPC à cinq niveaux.

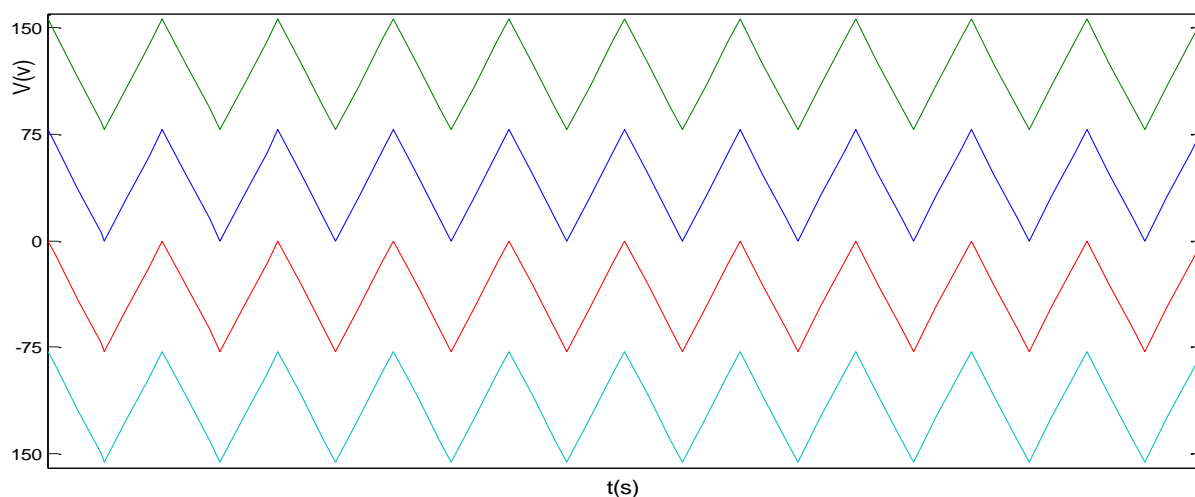


Fig.3.10: Commande MLI à quatre porteuses de l'onduleur ANPC à cinq niveaux.

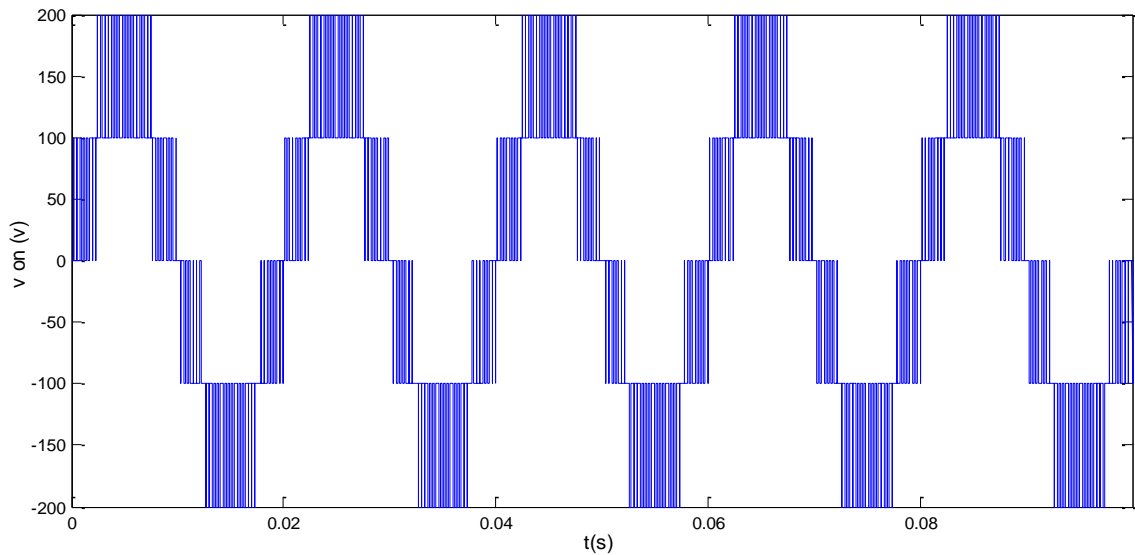


Fig.3.11: Tension entre phases de l'onduleur ANPC à cinq niveaux.

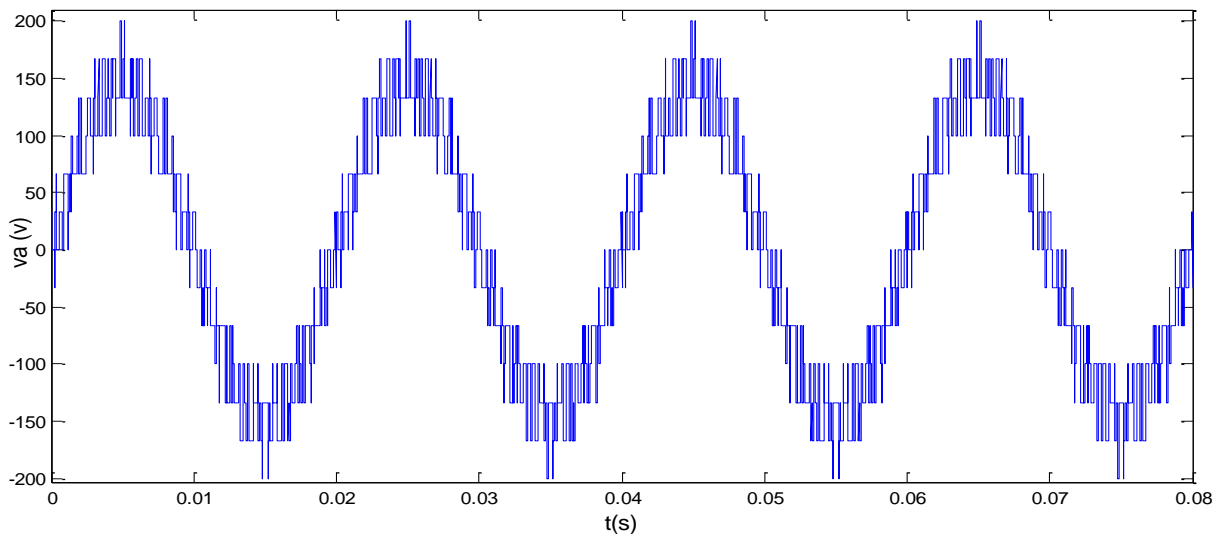


Fig.3.12: Tension simple d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux.

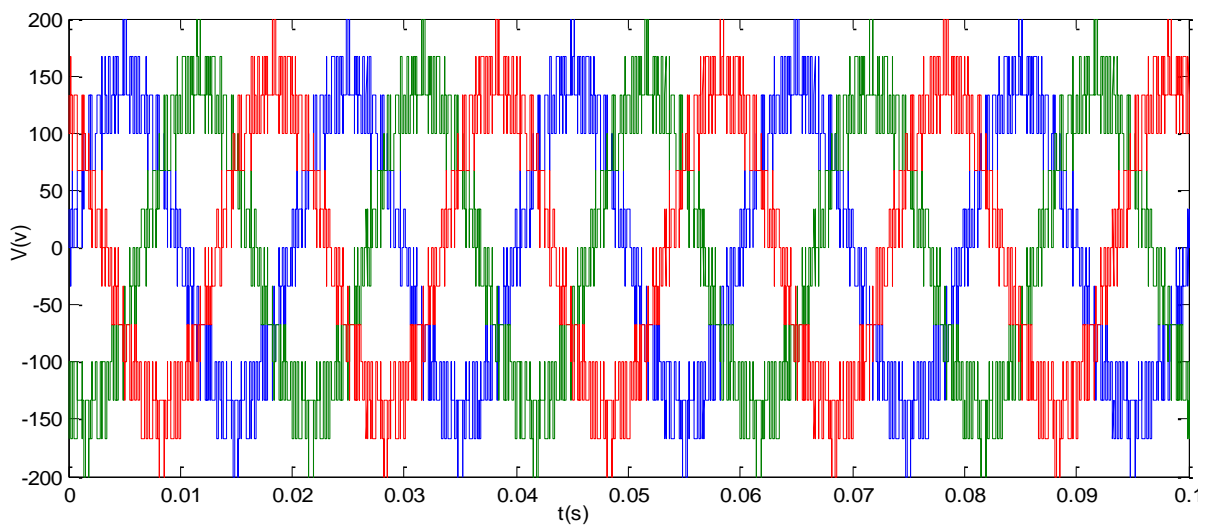


Fig.3.13: Les tensions triphasées générées par l'onduleur ANPC à cinq niveaux.

III.9 Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre, l'onduleur multi-niveaux de type ANPC à trois et cinq niveaux de tension, commandé par la technique de modulation à plusieurs porteuses. Cette stratégie est d'une manière générale une extension de celles des onduleurs à deux niveaux.

Nous avons aussi présenté les résultats de simulation de ces onduleurs multi-niveaux à structure ANPC. L'onduleur à deux niveaux conventionnel a la limitation de la tension continue disponible à son entrée. Par conséquent, la mise en série des dispositifs de commutation a été employée pour réaliser des systèmes de forte puissance. Il y a eu de grands intérêts dans l'onduleur à trois niveaux, qui peuvent surmonter les problèmes de la mise en série des interrupteurs à semi-conducteurs, d'autre part son interprétation physique en facilite l'analyse des stratégies de commande.

L'avantage qui découle de la structure de l'onduleur à cinq niveaux consiste à une meilleure maîtrise des contraintes en tension sur les composants, l'amplitude de la tension aux bornes est limitée à la demi-tension de la source majorée de la surtension due à la commutation des interrupteurs. Cette topologie est en mesure de générer une tension simple à cinq niveaux.

Chapitre 4

Implantation de l'onduleur multi-niveau à la compensation shunt de la puissance réactive

Chapitre IV : Implantation de l'onduleur multi-niveau à la compensation shunt de la puissance réactive

IV.1	Introduction.....	67
IV.2	Définition et constitution du (STATCOM).....	67
IV.3	Principe de Fonctionnement du STATCOM.....	68
IV.4	Modélisation du STATCOM.....	69
IV.5	Modèle Mathématique du Circuit DC	73
IV.6	Contrôle du STATCOM	73
IV.7	Commande découplée du STATCOM.....	74
IV.7.1	Boucle de régulation des courants.....	75
IV.7.2	Régulation de la tension continue U_{dc}	76
IV.8	Résultats de simulation.....	78
IV.8.1	Implantation de l'onduleur à trois niveaux dans le STATCOM.....	78
IV.8.2	Implantation de l'onduleur à cinq niveaux dans le STATCOM.....	82
IV.8.3	Fonctionnement du STATCOM dans le cas d'une charge purement réactive.....	82
IV.8.4	Fonctionnement du STATCOM pour différents modes de charge.....	85
IV.9	Conclusion.....	90

IV.1 Introduction

La compensation de la puissance réactive est une activité vitale pour garantir la fiabilité et la sécurité des réseaux électriques surtout ceux de transport, et doit être actif en permanence. La puissance réactive ne peut être transmise efficacement à travers de longues distances, car elle conduit à des pertes de puissance active et réactive supplémentaires. La puissance réactive produite et consommée sont toujours équilibrée. Par conséquent, un niveau réactif inapproprié de la production ou la consommation des éléments réactifs du réseau électrique se traduira par un profil de tension inappropriée. Un lien direct entre la tension et la puissance réactive permet de contrôler la tension aux valeurs désirées par le contrôle de la puissance réactive.

Dans ce chapitre nous présentons le principe de fonctionnement du STATCOM: compensateur de puissance réactive de type shunt qui appartient au groupe de dispositifs basés sur les convertisseurs de tension FACTS. Ce dispositif est la version développée des SVC (Static Var Compensator) [1, 3, 18], à base des convertisseurs de tensions à semi-conducteur de haute technologie (IGBT, GTO) associé à une source de tension continue.

IV.2 Définition et constitution du (STATCOM)

Le STATCOM est un compensateur de puissance réactive connecté en parallèle au réseau de transport ou de distribution (D-STATCOM), ce dispositif est capable de générer ou stocker la puissance réactive. La tension de sortie du STATCOM est contrôlable pour la régulation du facteur de puissance, régulation de la tension, contrôle du flux de puissance et améliorer la stabilité de fonctionnement du réseau [60, 61, 77, 78]. Le convertisseur de tension est le noyau du STATCOM [1, 3, 77], il génère à sa sortie une tension réglable en amplitude et en phase pour forcer l'échange de la puissance réactive désiré à la compensation. La Fig.4.1 représente le schéma de base du STATCOM. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles en courant, formées de GTO et de diode en antiparallèle. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage [60, 61, 62, 79, 81].

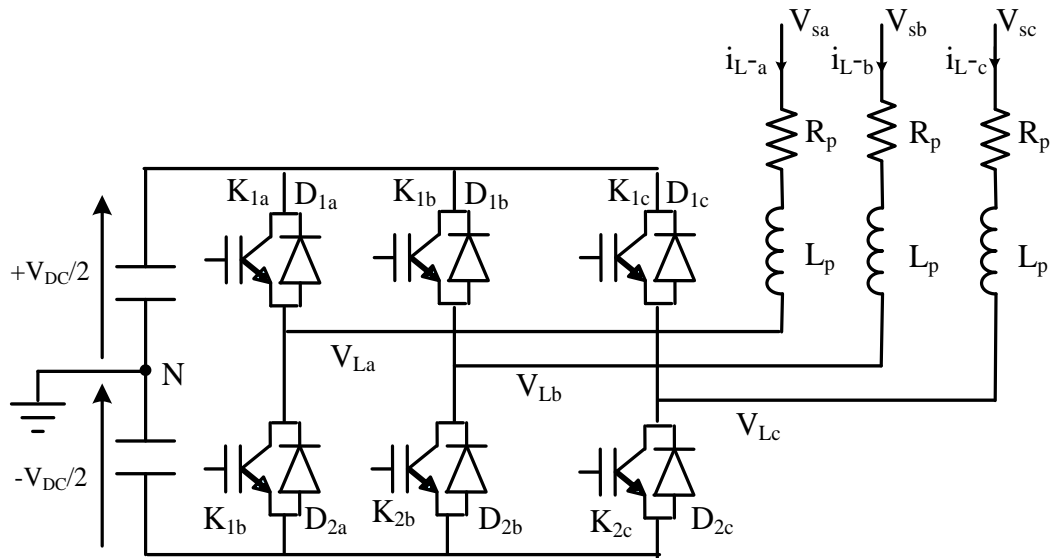


Fig.4.1: Circuit du STATCOM.

IV.3 Principe de Fonctionnement du STATCOM

La compensation de la puissance réactive par le STATCOM est réalisée par le contrôle de sa tension de sortie (la tension fournie par le convertisseur de tension). La Fig.4.2 montre le schéma simplifié d'un convertisseur de tension relié à un point du réseau par l'intermédiaire d'un transformateur de couplage,

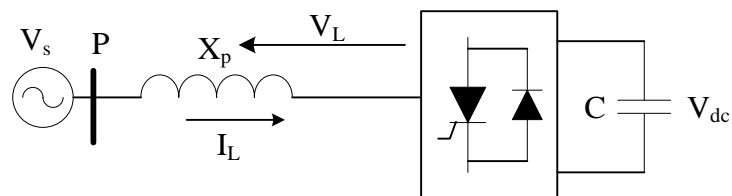


Fig.4.2: Schéma équivalent du STATCOM.

Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{V}_L - \bar{V}_s}{jX_p} \quad (4-1)$$

Avec :

V_s : la tension du point où le STATCOM est connecté dans le réseau ;

V_L : la tension fournie par le STATCOM ;

X_p : la réactance de fuite du transformateur de couplage.

La puissance apparente au point de raccordement du STATCOM est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{S} = \bar{V}_s \cdot \bar{I}_L = \frac{\bar{V}_s(\overline{V_L^*} - \overline{V_s^*})}{-jX_p} = \frac{\overline{V_s \cdot V_L^*} - V_s^2}{-jX_p} \quad (4-2)$$

D'où on abouti aux puissances active et réactive transféré entre le STATCOM et le réseau au point de couplage exprimées par les formules qui suivent:

$$P_{comp} = [V_s V_L \sin(\theta_s - \theta_L)]/X_p \quad (4-3)$$

$$Q_{comp} = [V_s(V_L \cos(\theta_s - \theta_L) - V_s)]/X_p \quad (4-4)$$

Dans le cas de fonctionnement en mode de compensation de puissance réactive, le STATCOM doit satisfaire la contrainte de ne pas échanger de la puissance active avec le réseau (paragraphe I.10).

$$\text{Donc : } P_{comp} = [V_s V_L \sin(\theta_s - \theta_L)]/X_p = 0 \quad (4-5)$$

D'où la condition $\theta_s - \theta_L = 0 \Rightarrow \theta_s = \theta_L$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM V_L doit être en phase avec la tension au point de couplement [1, 61].

D'où la puissance réactive générée par le STATCOM est :

$$Q_{comp} = V_L \cdot I_L = \frac{V_L^2}{X_p} \left(1 - \frac{V_s}{V_L}\right) \quad (4-6)$$

Avec :

V_s : la tension de la ligne.

V_L : la tension de sortie du convertisseur de tension.

I_L : le courant passant dans la branche shunt.

X_p : Réactance de fuite du transformateur.

P_{comp} : puissance active du STACOM.

Q_{comp} : puissance réactive du STACOM.

IV.4 Modélisation du STATCOM

Comme nous l'avons vu au premier chapitre, le STATCOM est composé principalement d'un convertisseur statique de tension couplé au réseau par un transformateur de puissance. Les modèles mathématiques des convertisseurs de tension pour les différentes connexions dans un

réseau électriques, sont très utiles pour analyser leurs fonctionnements et déterminer des lois de commande des dispositifs (FACTS) à base de ces convertisseurs.

La description mathématique est basée sur la transformation du système triphasé à un système biphasé orthogonal stationnaire ou tournant au synchronisme par la transformation de PARK afin d'aboutir à un système d'équations différentielles d'état dans le plan (d,q) (Annexe A). Pour cette modélisation nous avons admis les hypothèses suivantes:

- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- Tous les interrupteurs sont supposés idéals.
- Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligées et on ne considère que le fondamentale.
- L'inductance de fuite du transformateur parallèle de couplage du STATCOM est représentée par l'inductance L_p .
- Le schéma équivalent de ce dispositif donc est une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance de fuite L_p du transformateur de couplage; le circuit contient aussi une résistance en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur Fig.4.3

Le courant circulant dans le STATCOM dépend de la différence d'amplitude entre la tension du système V_s (tension point de raccordement) et la tension réglable du convertisseur de tension du STATCOM V_L [64, 65].

Les équations triphasées du système sont données par :

$$\begin{aligned} V_{sa} - V_{La} &= R_p I_{La}(t) + L_p \frac{d}{dt} I_{La}(t) \\ V_{sb} - V_{Lb} &= R_p I_{Lb}(t) + L_p \frac{d}{dt} I_{Lb}(t) \\ V_{sc} - V_{Lc} &= R_p I_{Lc}(t) + L_p \frac{d}{dt} I_{Lc}(t) \end{aligned} \quad (4-7)$$

Ou sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_p}{L_p} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_p}{L_p} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_p}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} V_{sa} - V_{La} \\ V_{sb} - V_{Lb} \\ V_{sc} - V_{Lc} \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

Avec:

V_s : la tension de la ligne.

V_L : la tension d'arrivée.

V_L : la tension de sortie du convertisseur de tension.

I_L : le courant passant dans la branche shunt.

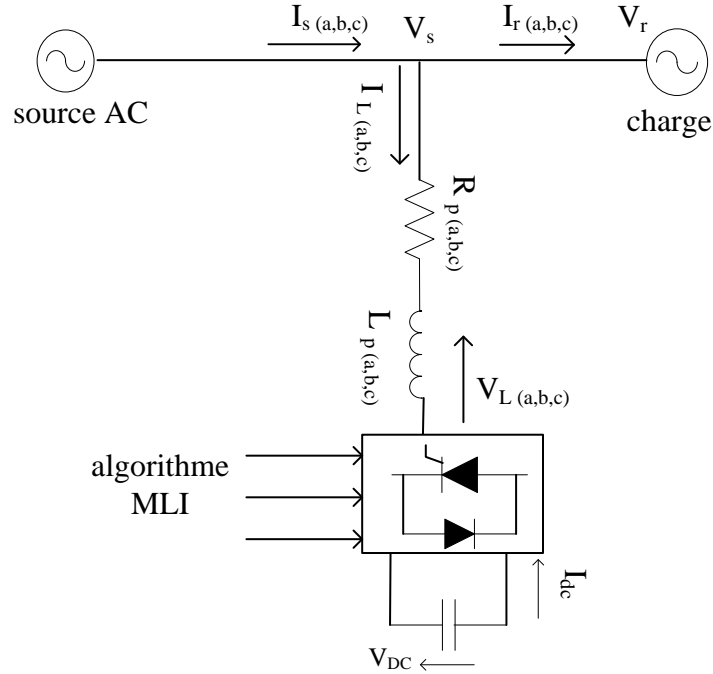


Fig.4.3: Schéma équivalent du STATCOM connecté au milieu d'une ligne électrique.

Dans un référentiel d-q, l'axe d du repère confonde avec l'origine du phasor de la tension du réseau. Dans ce référentiel chacun des composants a une signification physique claire: la composante d du courant représente la puissance active instantanée, tandis que la composante q du courant décrit la puissance réactive [66, 67].

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} I_{Ld} &= \frac{-R_p}{L_p} I_{Ld} + \omega I_{Lq} + \frac{1}{L_p} (V_{sd} - V_{Ld}) \\ \frac{d}{dt} I_{Lq} &= \frac{-R_p}{L_p} I_{Lq} - \omega I_{Ld} + \frac{1}{L_p} (V_{sq} - V_{Lq}) \end{aligned} \quad (4-9)$$

avec: le vecteur $\begin{bmatrix} V_{sd} - V_{Ld} \\ V_{sq} - V_{Lq} \end{bmatrix}$ représente le vecteur de commande.

Les puissances active et réactive délivrées par l'onduleur sont donnée dans le référentiel d-q sont données par les équations suivantes [65, 68]:

$$P_p = \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Ld} + V_{Lq} I_{Lq}) \quad (4-10)$$

$$Q_p = \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Lq} - V_{Lq} I_{Ld}) \quad (4-11)$$

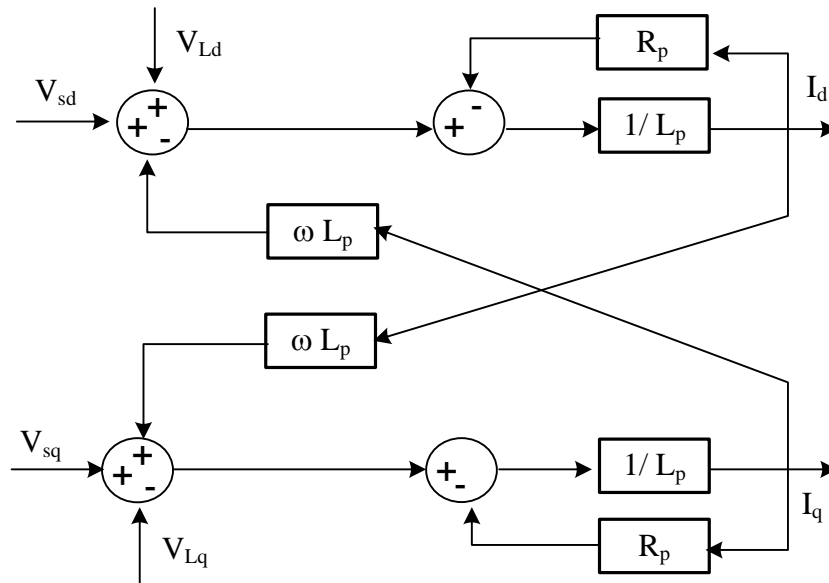


Fig.4.4: Reconstitution des courants I_d et I_q .

Pour le STATCOM, on cherche à compenser la puissance réactive du réseau; il est intéressant de pouvoir découpler les grandeurs actives et réactives du dispositif. En choisissant la phase θ de la transformation de PARK égale à zéro, on peut séparer les grandeurs actives et réactives du dispositif [64, 65, 69, 70].

Toutes les grandeurs sont référencées par rapport à la première phase de la tension du point de couplage du STATCOM à la ligne.

Avec ce choix la matrice de PARK est :

$$k = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

La puissance active du STATCOM est:

$$P_p = \frac{3}{2}(V_{Ld} I_{Ld} + V_{Lq} I_{Lq}) = P_p = \frac{3}{2} V_{Ld} I_{Ld} \quad (4-12)$$

La puissance réactive produite par le STATCOM est:

$$Q_p = \frac{3}{2}(V_{Ld} I_{Ld} - V_{Lq} I_{Lq}) = Q_p = -\frac{3}{2} V_{Lq} I_{Lq} \quad (4-13)$$

Le courant I_q est l'image du courant réactive circulant dans le STATCOM.

IV.5 Modèle Mathématique du Circuit DC

Le circuit continu sert à emmagasiner temporairement la puissance électrique, sa puissance active est exprimée par :

$$P = V_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Ld} + V_{Lq} I_{Lq}) \quad (4-14)$$

Pendant les périodes transitoire le condensateur partage de l'énergie avec le réseau, et par conséquent sa tension dépend du courant qui le traverse est exprimé par :

$$I_{dc} = C \frac{d}{dt} V_{dc} \quad (4-15)$$

Avec:

I_{dc} : le courant fournie par le convertisseur statique au condensateur

C: est la capacité du condensateur.

Alors la puissance active du circuit continu est :

$$P = V_{dc} C \frac{d}{dt} V_{dc} \quad (4-16)$$

La puissance du coté alternative du circuit continu est égale à la puissance délivrée par le convertisseur :

$$P_{AC} = \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Ld} + V_{Lq} I_{Lq}) \quad (4-17)$$

L'équation du circuit continu est formée sous le principe de l'équivalence des puissances sur les deux cotés AC et DC du circuit continu :

À partir de (4-16) et (4-17) nous trouvons:

$$P = V_{dc} C \frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Ld} + V_{Lq} I_{Lq}) \quad (4-18)$$

A partir des équations (4-14) et (4-18) l'équation exprime la dynamique du circuit continu est définie par :

$$\frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{1}{C V_{dc}} \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Ld} + V_{Lq} I_{Lq}) \quad (4-19)$$

IV.6 Contrôle du STATCOM

Le STATCOM est un contrôleur utilisé pour la compensation de la puissance réactive dans le but de maintenir la tension dans des niveaux nominaux au point de son raccordement au réseau.

Cet objectif est atteint en générant des courants de référence I_{Ld}^* et I_{Lq}^* , ces courants calculés à partir des puissances actives et réactives à imposer.

Ces puissances qui sont l'images des courants I_{Ld}^* , I_{Lq}^* active et réactive qu'on déterminer depuis le système d'équation suivant écrit dans le référentiel tournant au synchronisme (d, q) [71, 72, 73]:

$$\begin{bmatrix} I_{Ld}^* \\ I_{Lq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_{sd}^2 + V_{sq}^2} \begin{bmatrix} V_{sd} & -V_{Lq} \\ V_{sq} & V_{Ld} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_p^* \\ Q_p^* \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

Avec :

V_{sd} et V_{sq} : sont les tensions du point de raccordement du STATCOM..

I_{Ld}^* , I_{Lq}^* : sont les courant de référencedésirés.

IV.7 Commande découplée du STATCOM

Considérant le modèle simplifié représenté par le système d'équation (4-9) précédent on peut le mettre sous la forme d'état $\frac{d}{dx} = Ax + BU$:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{Ld} \\ I_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_p}{L_p} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_p}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ld} \\ I_{Lq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{Ld} \\ V_{sq} - V_{Lq} \end{bmatrix} \quad (4-21)$$

Avec: $\frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{Ld} \\ V_{sq} - V_{Lq} \end{bmatrix}$ est le vecteur de commande.

Les variables du courant sont couplés par les termes ωI_{Lq} et $-\omega I_{Ld}$, un découplage entre les deux variables est nécessaire pour une commande performante.

La commande à appliquer à la tension de sortie de l'onduleur pour découpler les grandeurs des courants des axes d et q est définie par :

$$\begin{aligned} V_{Ld} &= V_{sd} + \omega I_{Lq} - U_d \\ V_{Lq} &= V_{sq} + \omega I_{Ld} - U_q \end{aligned} \quad (4-22)$$

En substituant dans le système (4-21) nous arrivons à :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{Ld} \\ I_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_p}{L_p} & 0 \\ 0 & -\frac{R_p}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ld} \\ I_{Lq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

Deux régulateurs PI sont utilisés pour réaliser un contrôle découplé des puissances active et réactive.

U_d et U_q sont les sorties des régulateurs PI des courants I_{Ld} et I_{Lq} respectivement.

$$U_d = (K_{pd} + \frac{K_i}{s})(I_{Ld}^* - I_{Ld}) \quad (4-24)$$

$$U_q = (K_{pq} + \frac{K_i}{s})(I_{Lq}^* - I_{Lq}) \quad (4-25)$$

I_{Ld}^* et I_{Lq}^* présentent les courants de référence actif et vréactif respectivement.

A partir des équations (4-23) on tire les fonctions de transfert :

$$\frac{I_{Ld}}{U_d} = \frac{I_{Lq}}{U_q} = \frac{\frac{1}{L_p}}{s + \frac{R_p}{L_p}} = \frac{1}{sL_p + R_p} \quad (4-26)$$

C'est la fonction de transfert du système découplé.

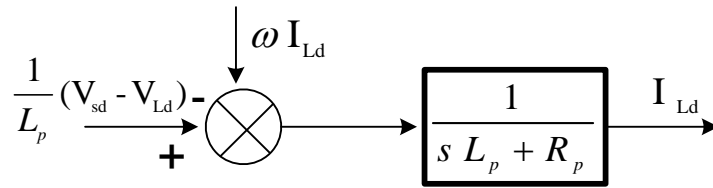


Fig.4.5: Fonction de transfère du STATCOM.

IV.7.1 Boucle de régulation des courants

D'une manière générale, la partie commande du compensateur est constitué de deux boucles internes et une boucle externe.

L'objectif des boucles internes est de réguler les courants du réseau afin de minimiser leur contenu harmonique et d'échanger avec le réseau une certaine puissance réactive, tandis que la boucle externe à pour objectif de régler la tension de sortie du compensateur. Les Fig 4.6 et 4.7, présentent les boucles de régulation du compensateur STATCOM [71, 75].

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$F(s)_{Bo} = (K_{pd} + \frac{K_{id}}{s}) \frac{1}{sL_p + R_p} = K_{pd} \left(\frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \right) \left(\frac{\frac{1}{R_p}}{s + \frac{R_p}{L_p}} \right) \quad (4-27)$$

$$F(s)_{Bo} = K_{pd} \left(1 + \frac{1}{s T_{Bo}} \right) \left(\frac{\frac{1}{R_p}}{s \frac{R_p}{L_p} + 1} \right) \quad (4-28)$$

T_{Bo} : est la constante du temps en boucle ouverte.

Prenons:

$$\begin{cases} \frac{1}{T_{Bo}} = \frac{R_p}{L_p} = \frac{K_i}{K_p} \\ K_p = K \end{cases} \quad (4-29)$$

On aura :

$$F(s)_{Bo} = \frac{K_p d}{s L_p} = \frac{K}{s L_p} \quad (4-30)$$

La fonction de transfert en boucle fermée après compensation des pôles est :

$$F_{BF}(s) = \frac{F(s)_{Bo}}{1+F(s)_{Bo}} = \frac{\frac{K}{s L_p}}{1+\frac{K}{s L_p}} = \frac{1}{1+\frac{K_p}{s L_p}} = \frac{1}{1+s T_{BF}} \quad (4-31)$$

$T_{BF} = \frac{L_p}{K_p}$ Constante du temps en boucle fermé.

D'où les paramètres du regulateur PI sont :

$$\begin{cases} K_p = K \\ K_i = \frac{K R_p}{L_p} \end{cases} \quad (4-32)$$

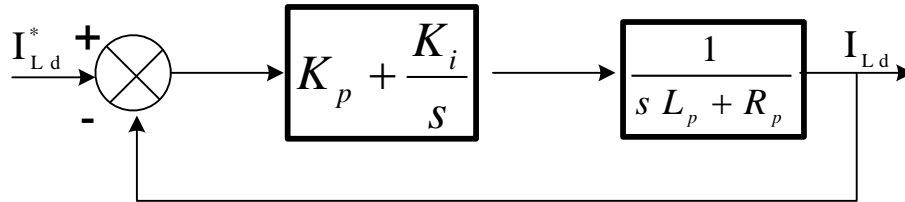


Fig.4.6: Régulation en PI du courant.

IV.7.2 Régulation de la tension continue U_{dc}

La tension continue aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par l'adjonction d'un courant actif au courant de référence du STATCOM qui traduira l'absorption ou la fourniture d'une puissance active sur le réseau. La puissance instantanée échangée avec le condensateur peut être exprimée par l'équation suivante [65, 66, 75] :

$$P_{dc} = \frac{1}{2} c \frac{d}{dt} V_{dc}^2 \Rightarrow \frac{d}{dt} V_{dc}^2 = \frac{2}{c} P_{dc} \quad (4-33)$$

Introduisant la transformation de LPLACE à cette formule nous aurons :

$$\frac{V_{dc}^2}{P_{dc}} = \frac{2}{c s} \quad (4-34)$$

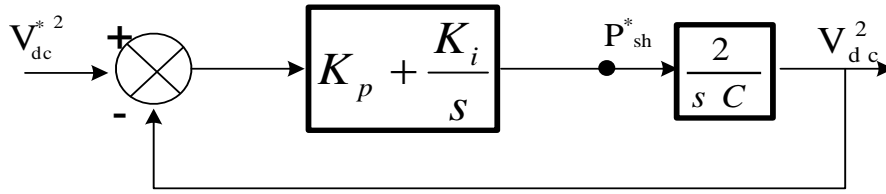


Fig.4.7: Boucle de régulation du circuit continu.

La fonction de transfert en boucle ouverte de ce système est :

$$F(s)_{bo} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{2}{sC} = \frac{2K_p}{Cs} + \frac{2K_i}{Cs^2} \quad (4-35)$$

La constante du temps en boucle ouverte est :

$$\tau_o = C \quad (4-36)$$

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système est :

$$F(s) = \frac{V_{dc}^2}{V_{dc\ ref}^2} = \frac{\frac{2K_p s + 2K_i}{c}}{s^2 + \frac{2K_p}{c}s + \frac{2K_i}{c}} \quad (4-37)$$

D'où on tire :

$$\omega_n^2 = 2 \frac{K_i}{c} \text{ et } \zeta = K_p \sqrt{\frac{1}{2CK_i}} \quad (4-38)$$

La Fig.4.8 présente le système de contrôle global par la méthode des puissances découplées.

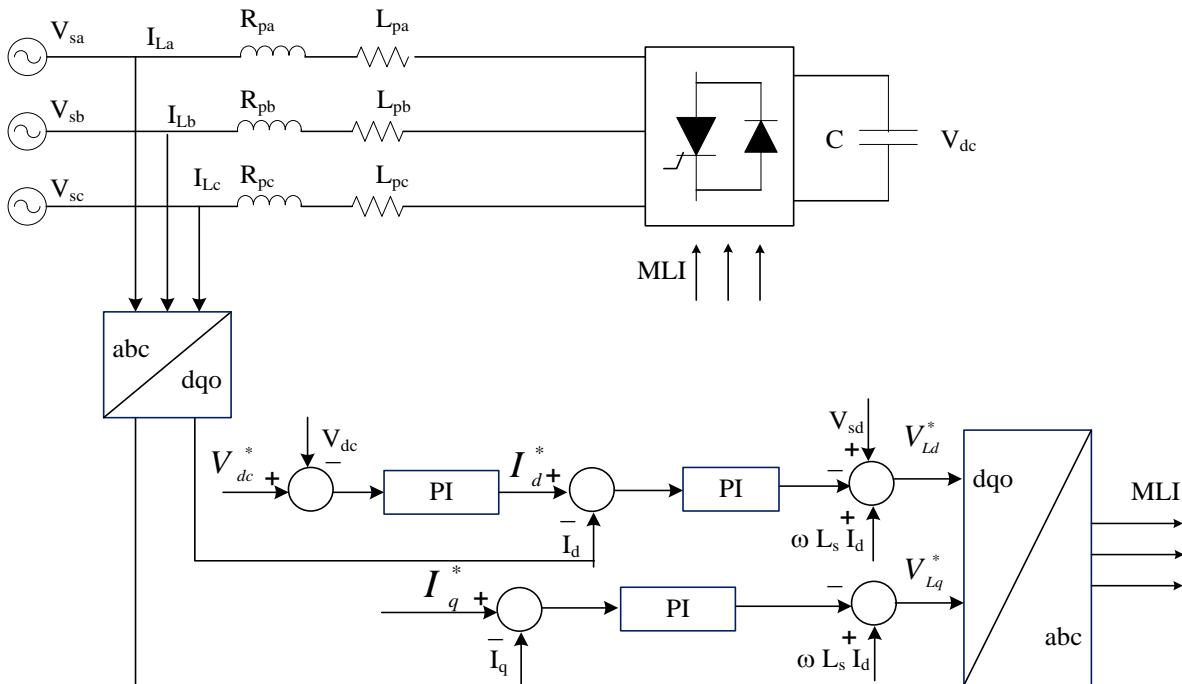


Fig.4.8: Schéma global de commande par la méthode Watt-Var Découplé du STATCOM.

IV.8 Résultats de simulation

Le modèle mathématique du STATCOM développé dans les parties précédentes est implanté sur le logiciel Matlab/simulink, le convertisseur du STATCOM est constitué en premier lieu d'un onduleur de tension à trois puis à cinq niveaux de type ANPC. La technique MLI multi porteuses est utilisée pour la commande des interrupteurs, afin d'améliorer l'onde de tension à la sortie du convertisseur et offrir une meilleure qualité de puissance au système global.

Pour le contrôle global du système la méthode des Watt-Var découplé est adoptée. Le système de contrôle découplé désigné dans les parties précédentes, est utilisé pour contrôler la puissance réactive fournie par le convertisseur de tension continue. Les signaux de commande des tensions V_{Ld} et V_{Lq} générées par le système de contrôle doivent être convertis en signaux prêts à l'exploitation par le STATCOM. Dans le cas d'un contrôle basé sur la technique MLI, un signal de référence sinusoïdal est comparé à plusieurs signaux triangulaires pour générer les instants convenables à la commutation des interrupteurs du convertisseur du STATCOM [76, 77].

IV.8.1 Implémentation de l'onduleur à trois niveaux dans le STATCOM

Afin d'analyser les performances de la commande du compensateur, nous allons effectuer un certain nombre de simulations pour différents modes de fonctionnement de la charge: à $t=0s$ la référence de la puissance active est égale à 0watt et celle de la puissance réactive est égale à -1600VAR, à $t=0.15s$ la référence de la puissance réactive devienne 0VAR, puis à $t=0.25s$ la puissance active est de 1000Watt, enfin à $t=0.35s$ la référence de la puissance réactive est égale à 1600VAR.

En prenant pour paramètres [83]:

Réseau : $V_s = 220 V, f = 50 HZ$

$R_s = 0.4\Omega, L_s = 3mH$

Côté continu : $C = 8800 \mu F$

Les figures suivantes représentent les différents paramètres du système avec l'utilisation d'un onduleur ANPC à trois niveaux.

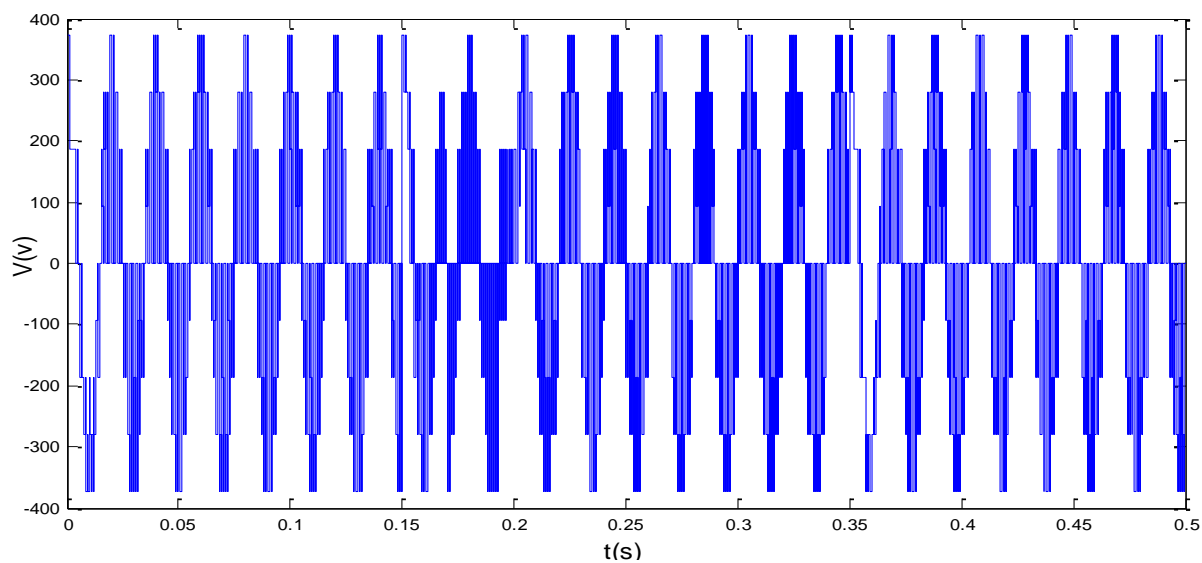


Fig.4.9: Tension de phase de l'onduleur à trois niveaux du STATCOM.

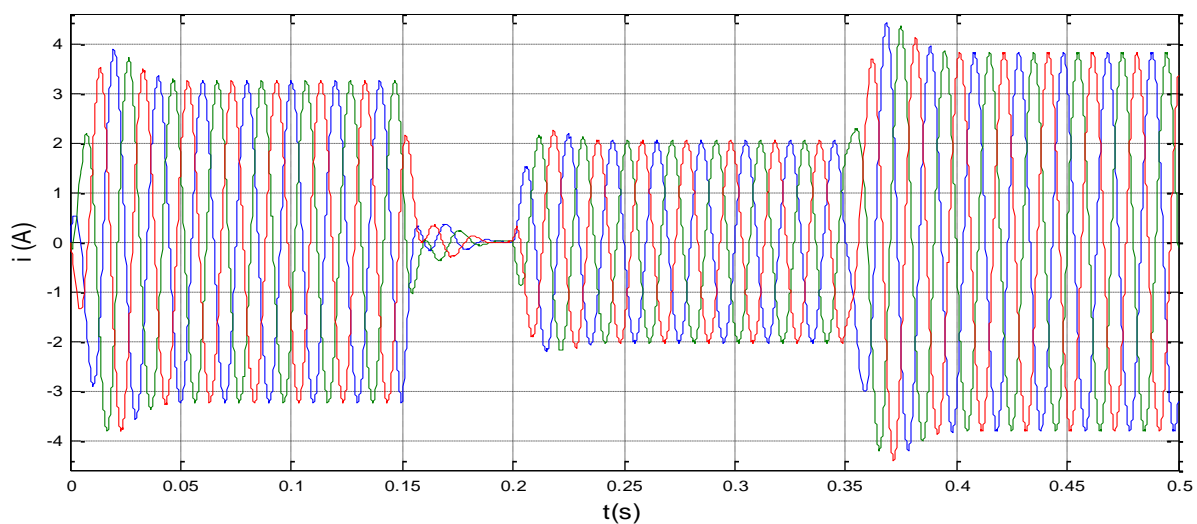


Fig.4.10: Courant triphasé de l'onduleur à trois niveaux du STATCOM.

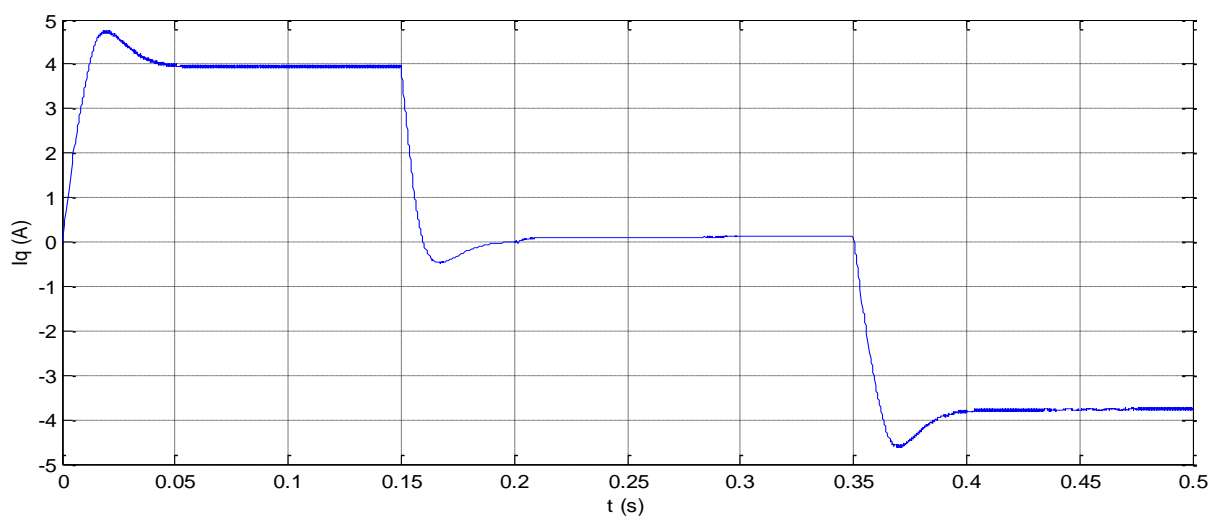


Fig.4.11: Courant I_q de l'onduleur à trois niveaux du STATCOM.

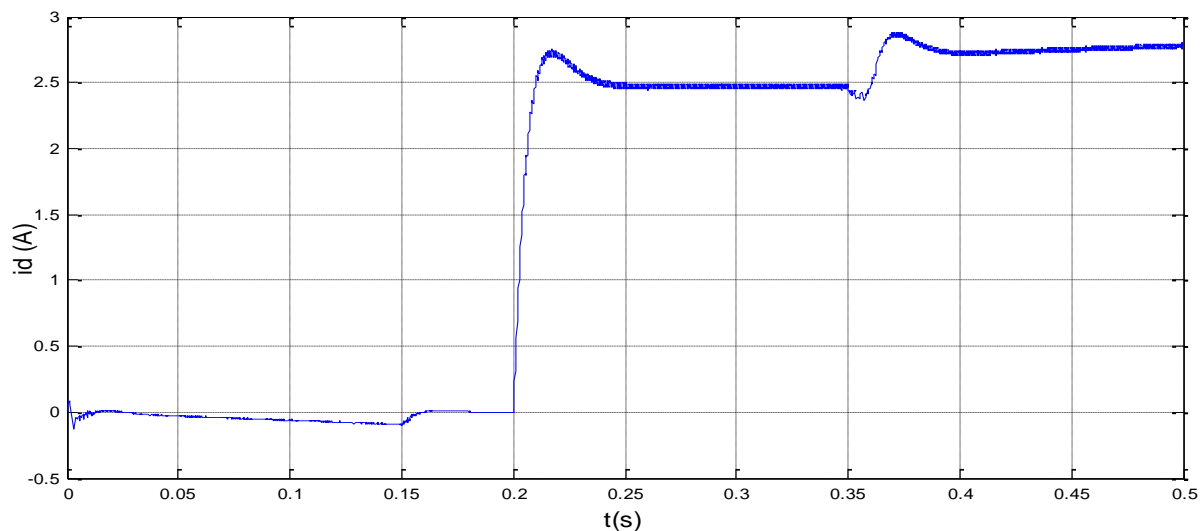


Fig.4.12: Courant I_d de l'onduleur à trois niveaux du STATCOM.

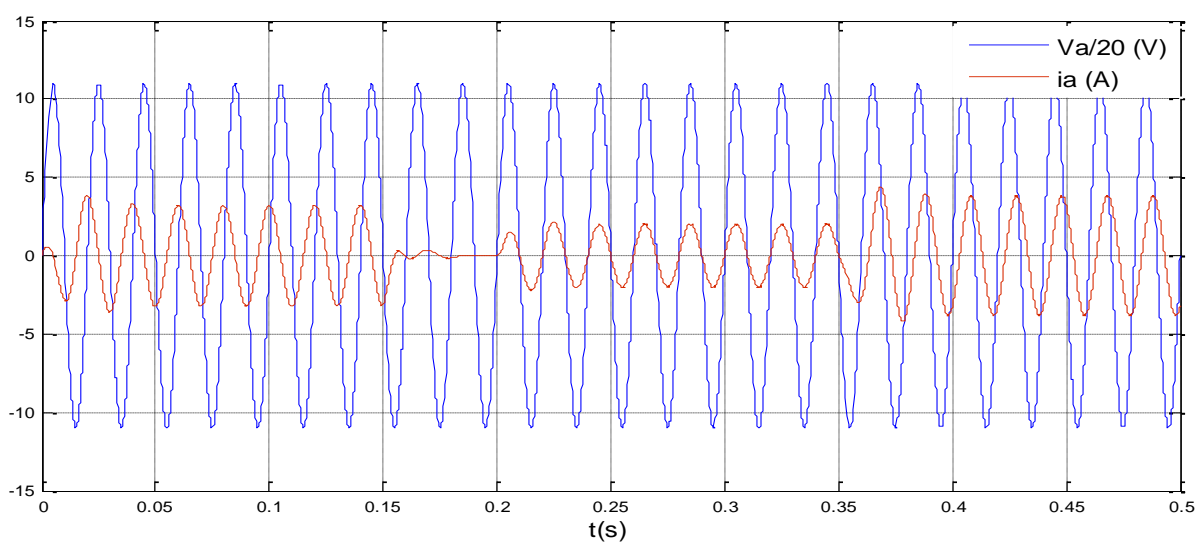


Fig.4.13: Courant de phase du STATCOM envers la tension de phase du réseau.

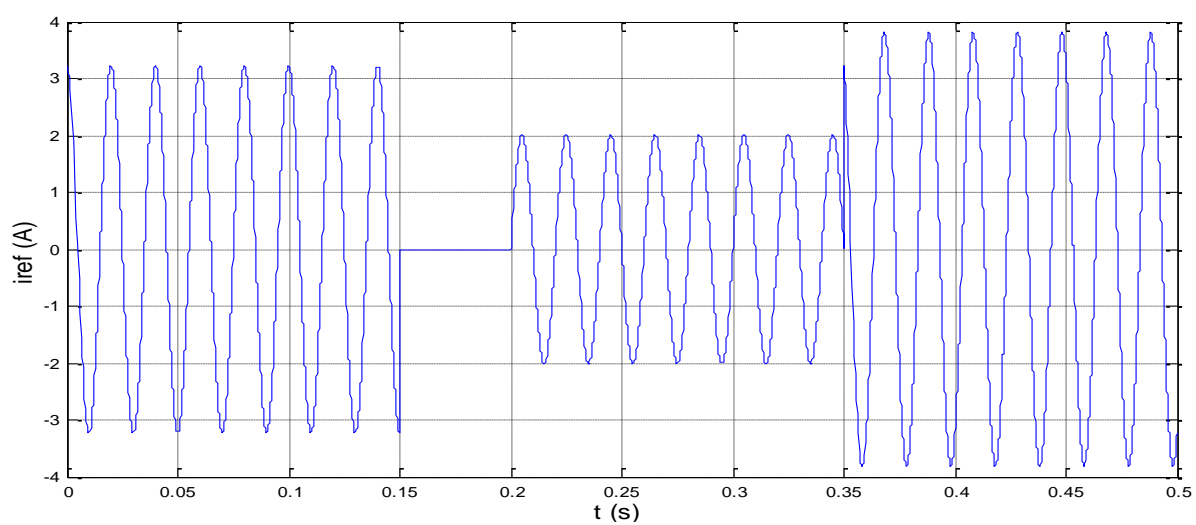


Fig.4.14: Courant de référence $I_{a,ref}$.

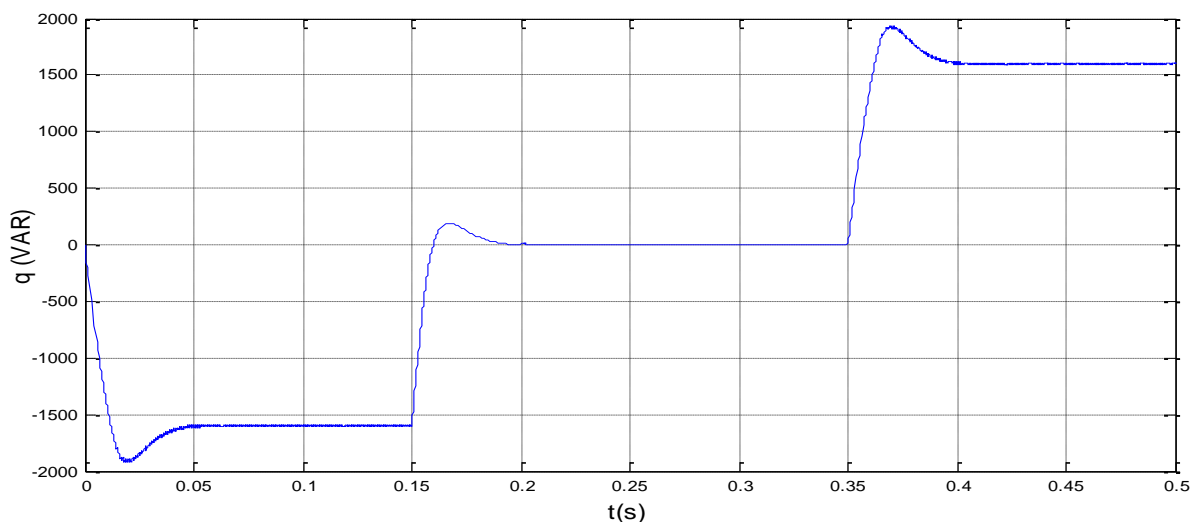


Fig.4.15: Puissance réactive du STATCOM.

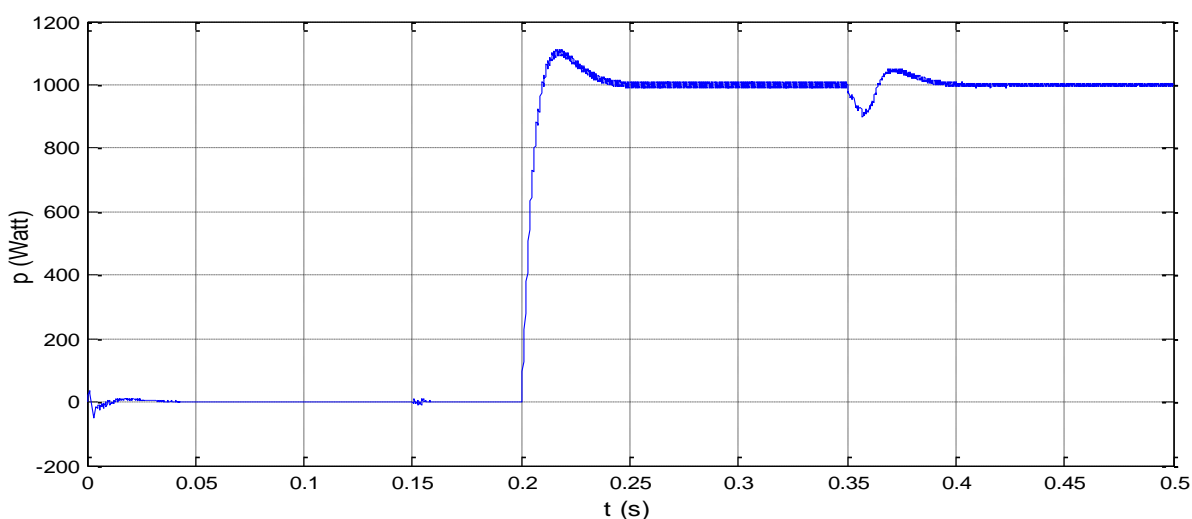


Fig.4.16: Puissance active du STATCOM.

La Fig.4.9 montre la forme d'onde de la tension de l'onduleur à trois niveaux formée de plusieurs niveaux élémentaires de tension.

La Fig.4.10 montre la forme des trois courants fournis par le STATCOM.

La Fig.4.11 montre la réponse du courant réactif I_{Lq} , le courant réactif suit la consigne avec une bonne précision et un temps de réponse court.

La Fig.4.12 montre la réponse dynamique du courant actif I_{Ld} , il est maintenu constant à chaque variation des puissances active et réactive, ce qui permet de maintenir le niveau de la tension continue.

La Fig.4.13 montre la forme d'onde du courant du STATCOM envers la tension du réseau. Le courant est en avance de phase lorsque le mode de fonctionnement est inductif, puis nul lorsque les puissances active et réactive sont nulles, puis en phase avec la tension quand la puissance réactive est nulle, et enfin en retard de phase lorsque le mode de fonctionnement est capacitif.

L'allure de la puissance réactive est similaire à celle du courant réactive, ce qui confirme le fonctionnement en mode capacitif et inductif du compensateur. La Fig.4.15 montre que le STATCOM fournit la puissance réactive pendant les périodes de $t=0s$ à $t=0.15s$ et de $t=0.35s$ à $t=0.5s$.

IV.8.2 Implémentation de l'onduleur à cinq niveaux dans le STATCOM

L'onduleur du STATCOM est de cinq niveaux, nous allons tester ses performances pour deux cas de charge.

IV.8.3 Fonctionnement du STATCOM dans le cas d'une charge purement réactive

La référence de la puissance réactive varie à $t=0.15s$ de $-1600VAR$ à $0VAR$, puis elle prend la valeur de $1600VAR$ à $t=0.3s$, la puissance active est maintenue nulle.

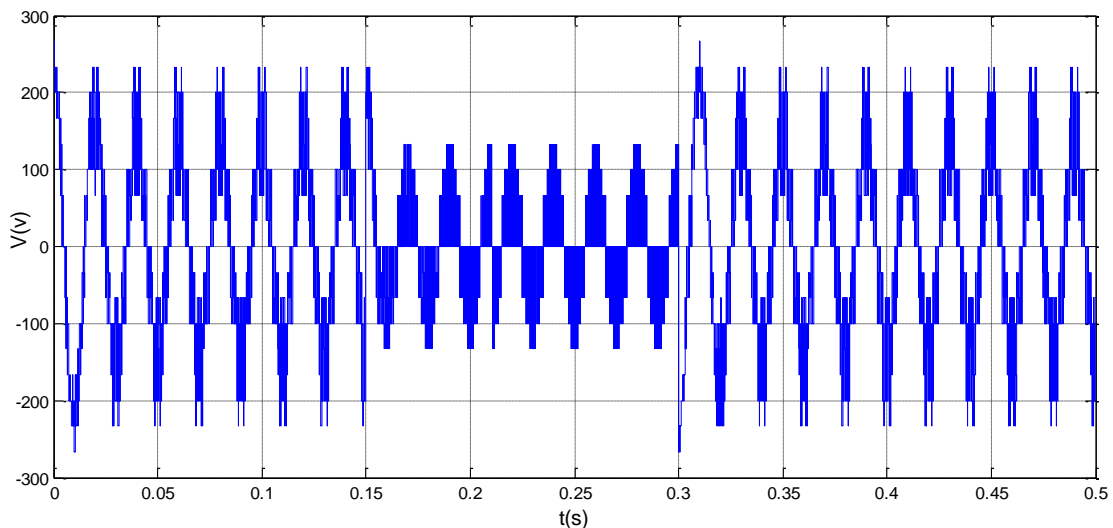


Fig.4.17: Tension de phase de l'onduleur à cinq niveaux du STATCOM.

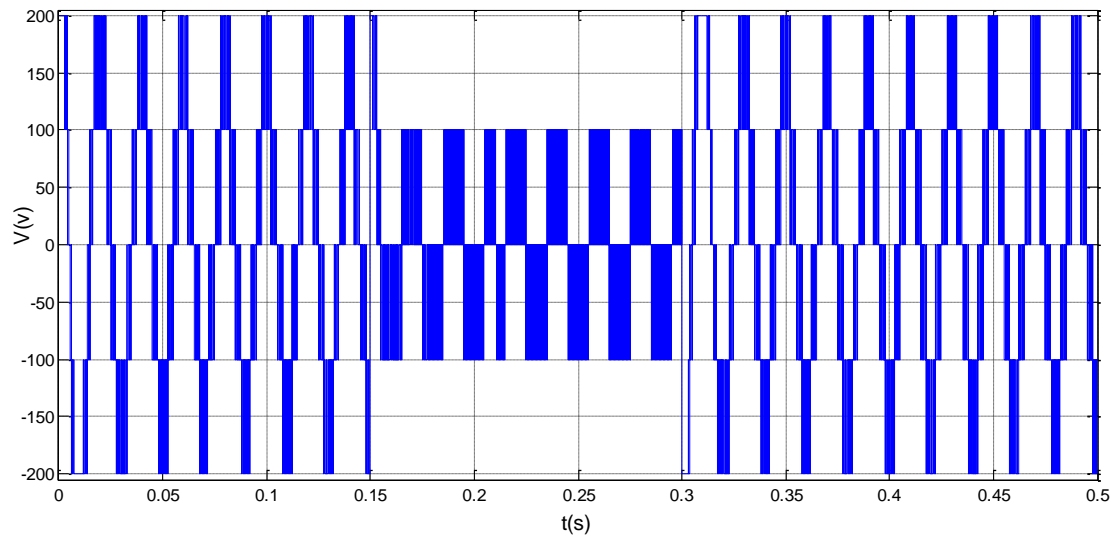


Fig.4.18: Tension entre phase de l'onduleur à cinq niveaux du STATCOM.

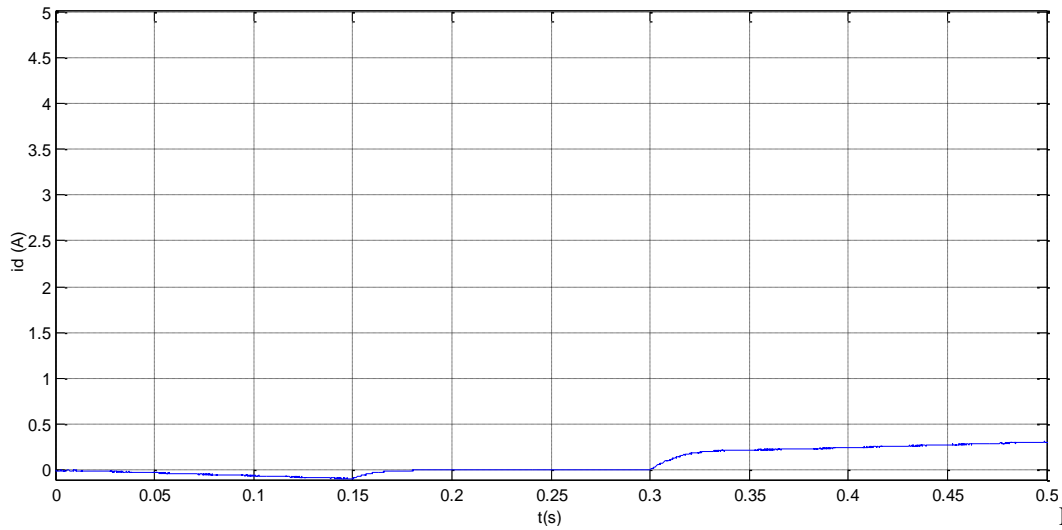


Fig.4.19.

Courant I_d de l'onduleur du STATCOM.

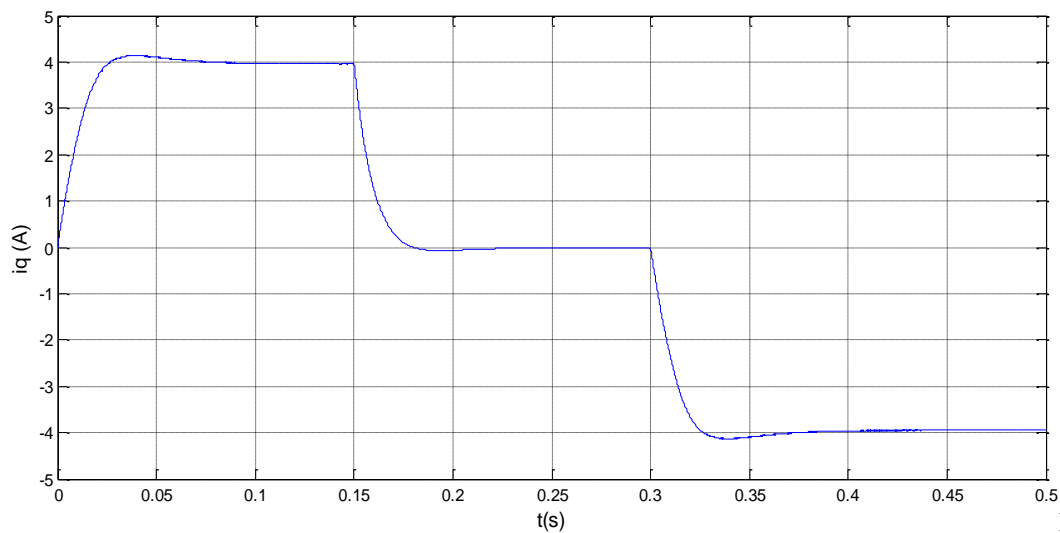


Fig.4.20:

Courant I_q de l'onduleur du STATCOM.

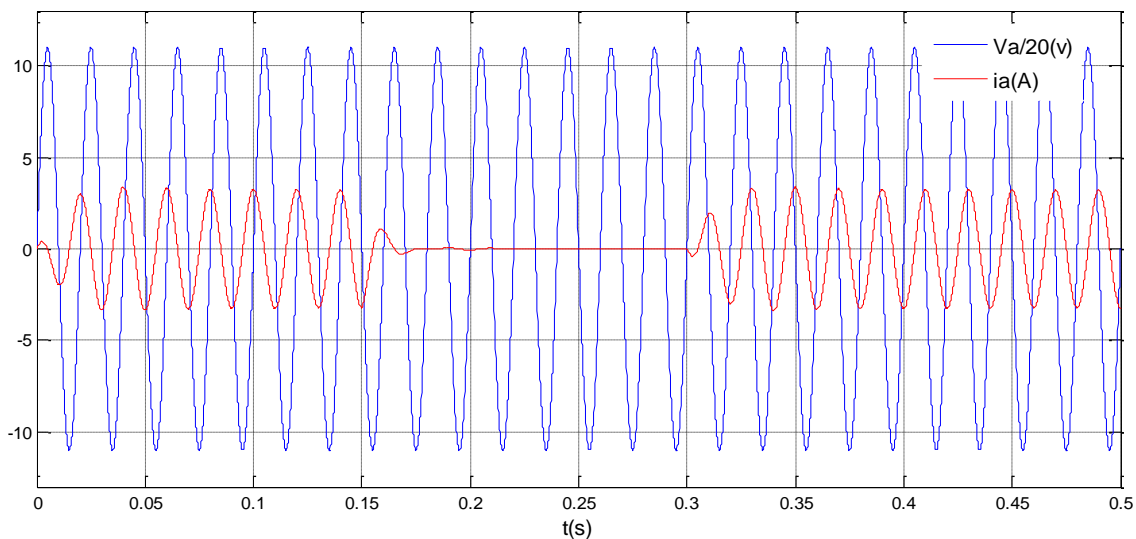


Fig.4.21: Courant de phase du STATCOM envers la tension de phase du réseau.

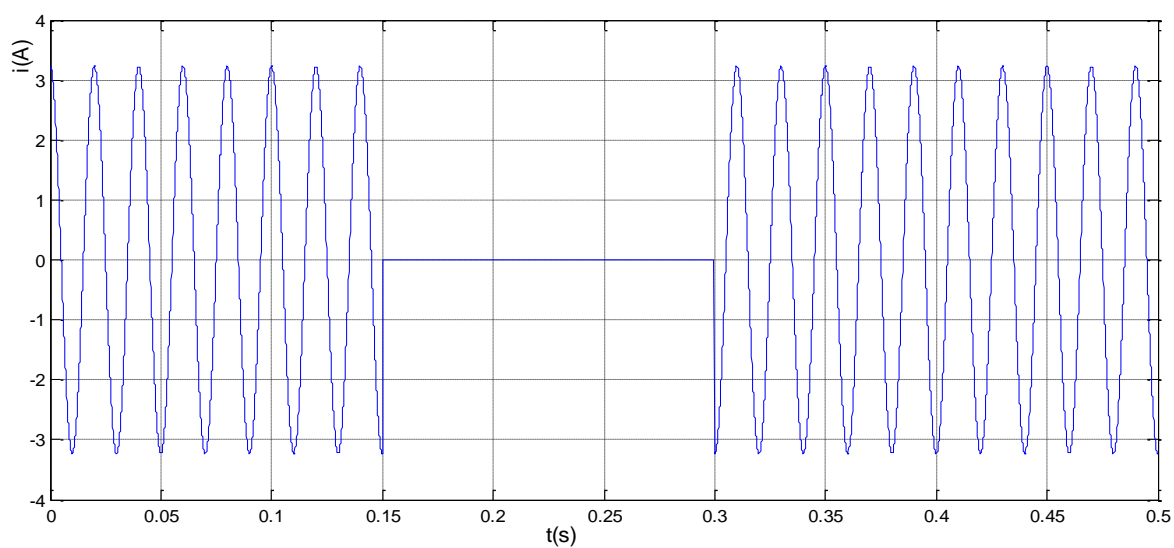


Fig.4.22: Courant de référence $I_{a\text{ref}}$.

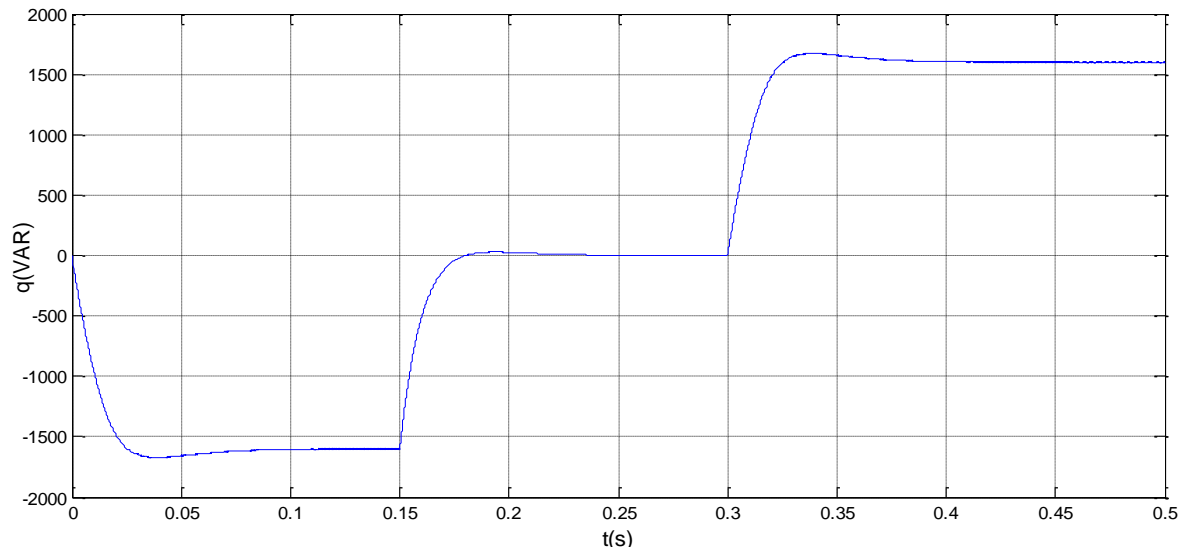


Fig.4.23: Puissance réactive du STATCOM.

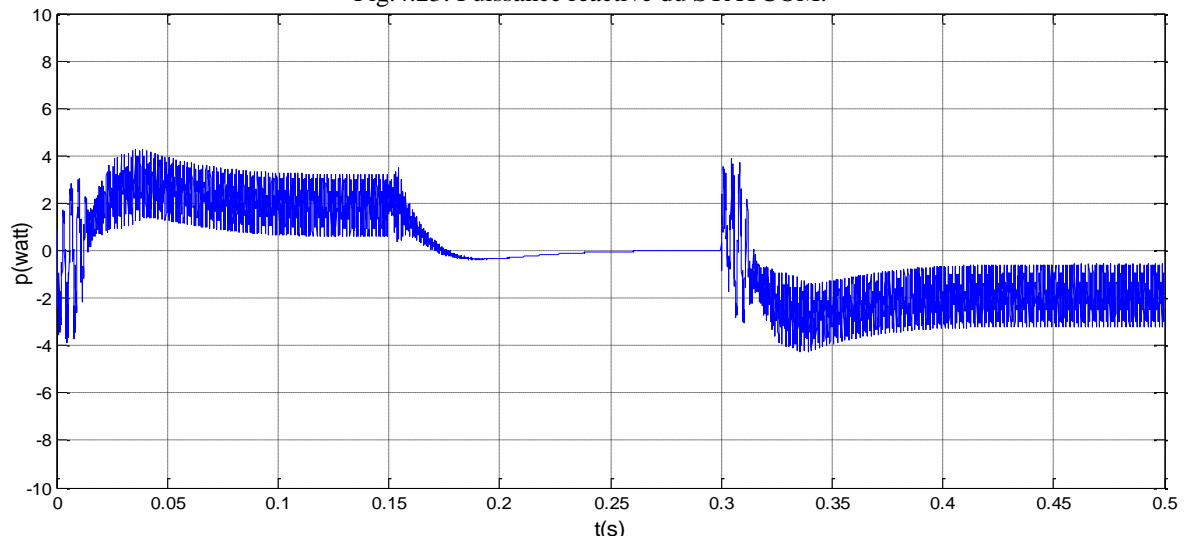


Fig.4.24: Puissance active du STATCOM.

IV.8.4 Fonctionnement du STATCOM pour différents modes de charge

La référence de la puissance réactive varie à $t=0.3$ s de -1600VAR jusqu'à 1600VAR, un deuxième changement de la puissance active de 0watt à 1000watt à $t=0.15$ s.

Les figures suivantes représentent la variation des différents paramètres avec ces changements.

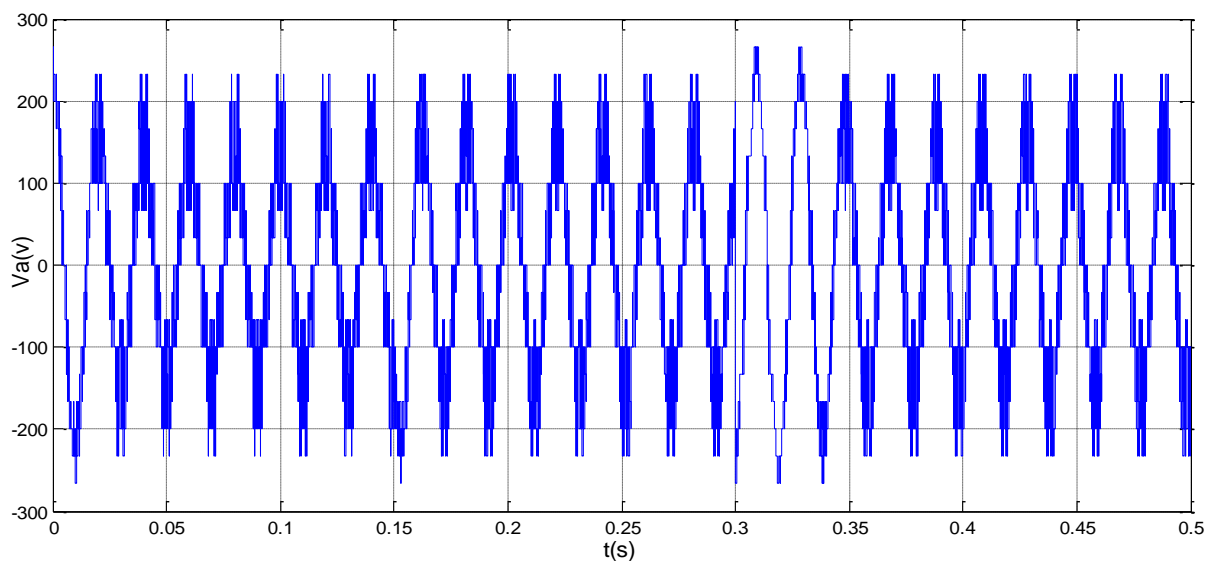


Fig.4.25: Tension V_a de l'onduleur à cinq niveaux du STATCOM.

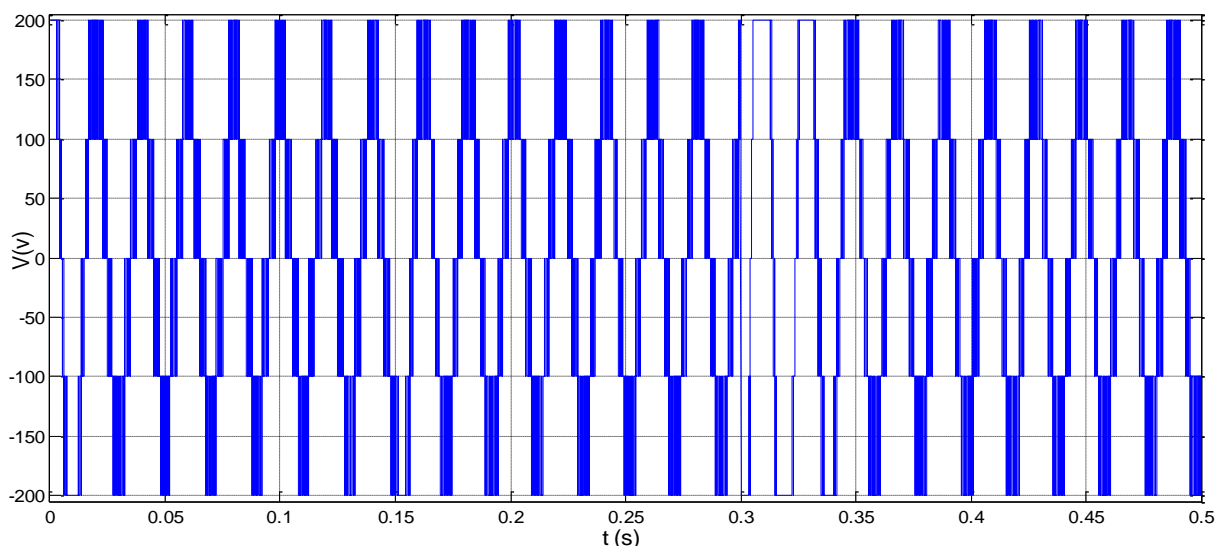


Fig.4.26: Tension entre phase de l'onduleur à cinq niveaux du STATCOM.

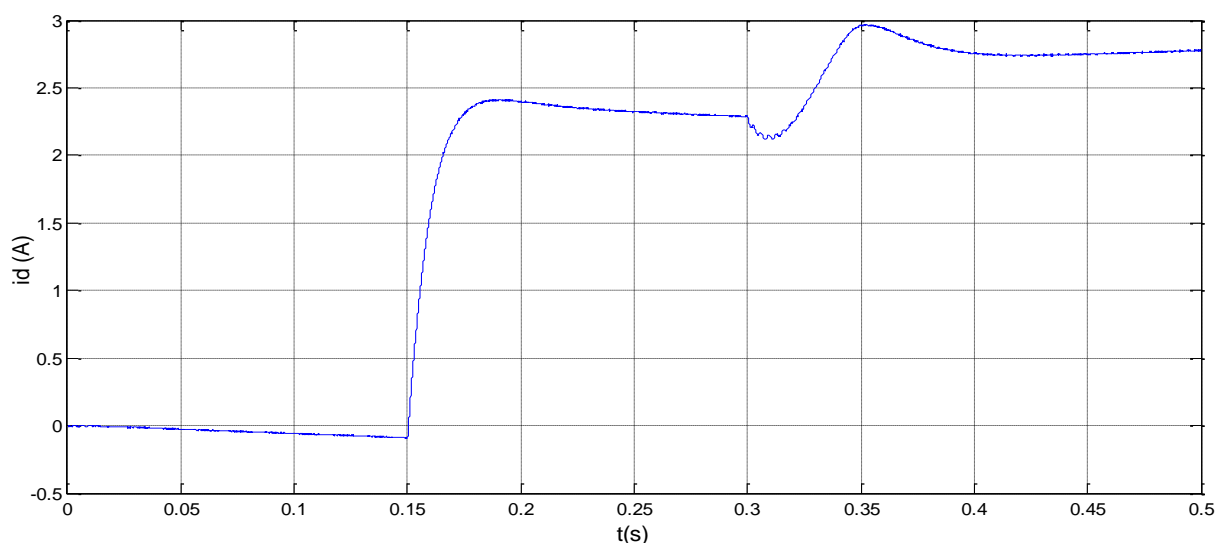


Fig.4.27: Courant I_d de l'onduleur à cinq du STATCOM.

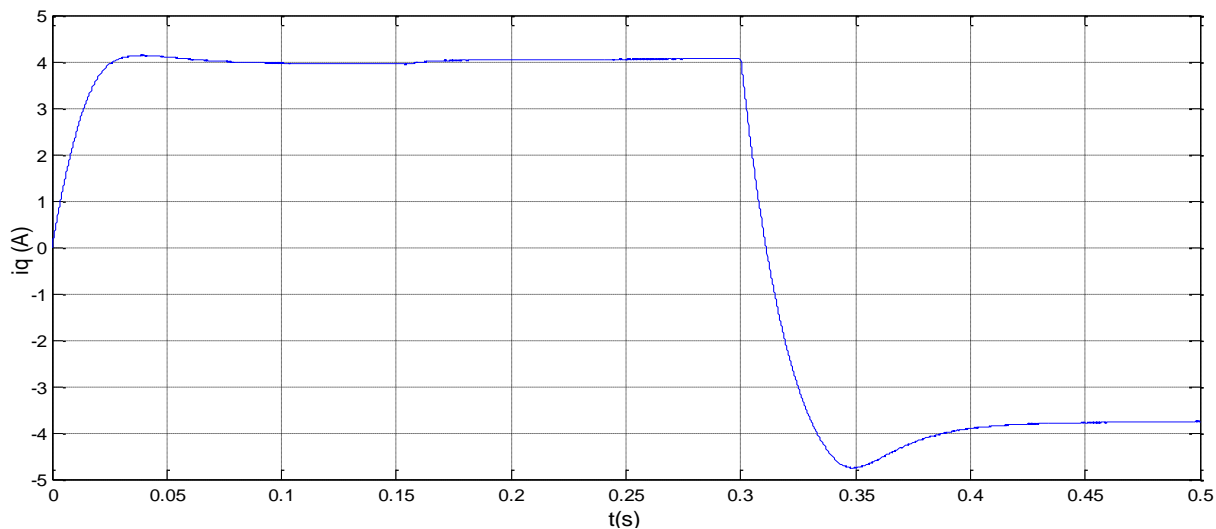


Fig.4.28: Courant I_q de l'onduleur à cinq du STATCOM.

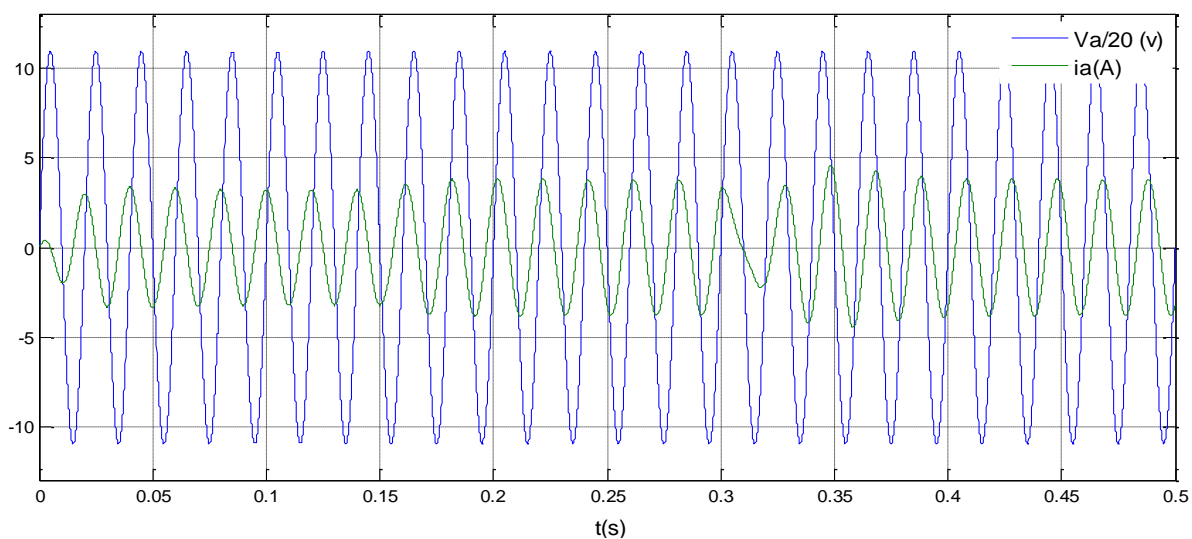


Fig.4.29: Courant de phase du STATCOM envers la tension de phase du réseau.

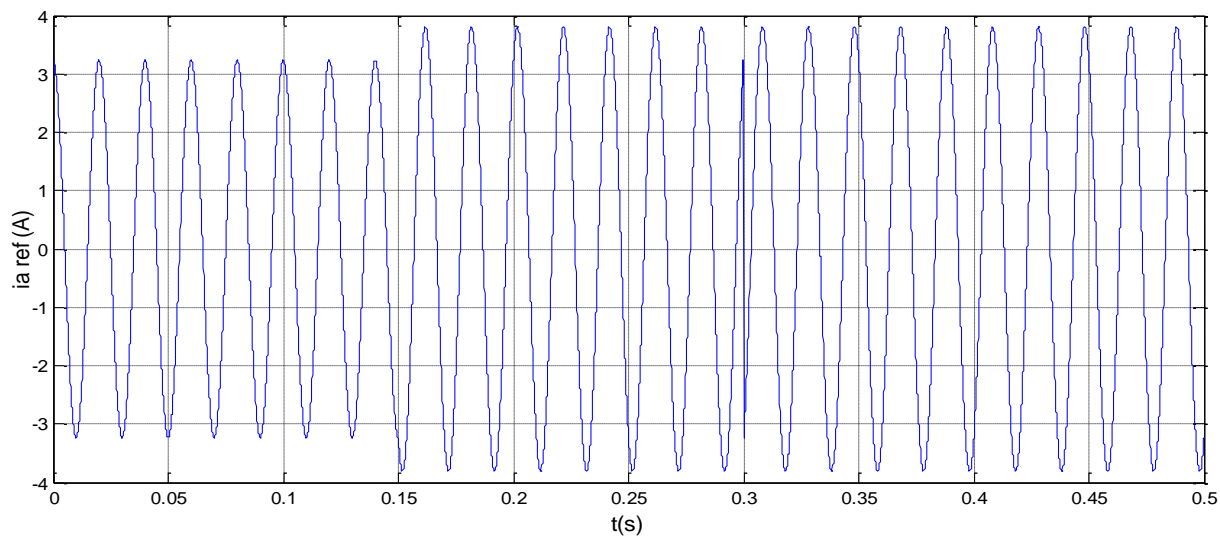


Fig.4.30: Courant de référence $I_{a \text{ ref}}$.

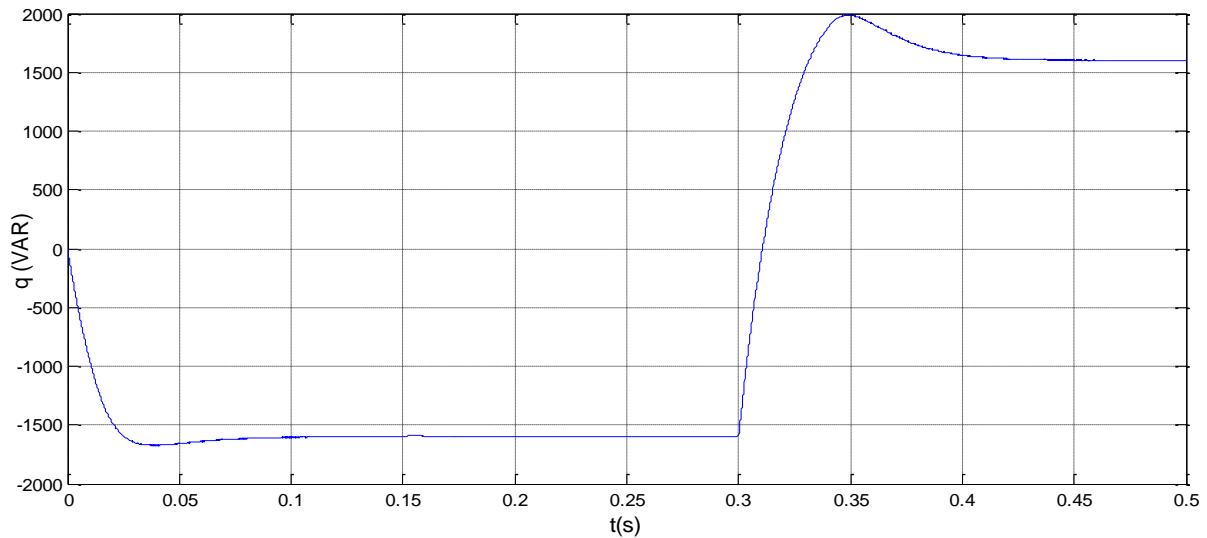


Fig.4.31: Puissance réactive du STATCOM.

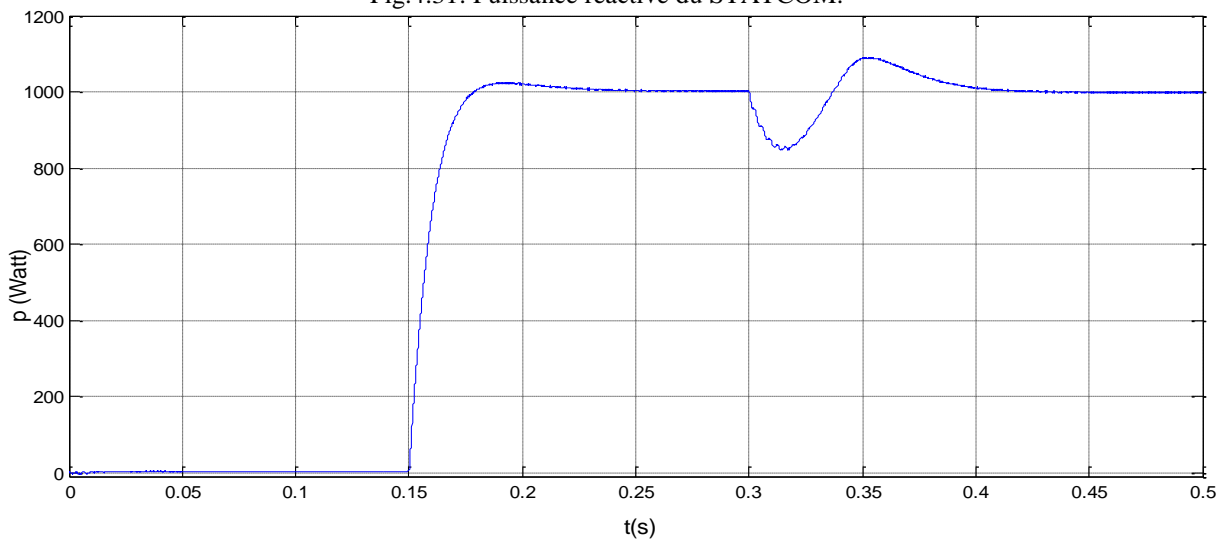


Fig.4.32: Puissance active du STATCOM.

IV.8.5 Interprétation des résultats de simulation

En premier lieu, les Figures 4.17 et 4.25 présentent la tension quasi-sinusoidale produite par l'onduleur, elle est formée de plusieurs niveaux intermédiaires.

Ensuite, les Figures 4.19, 4.20, 4.27 et 4.28 présentent l'évolution du courant du STATCOM pour les différents modes de la charge (capacitive, résistive et inductive).

La Fig.4.21 présente le courant de phase du compensateur I_{La} par rapport à la tension de phase du réseau. Pour un premier changement de référence du courant en quadrature (I_q capacitif), le courant est en avance de 90° par rapport à la tension (V_l). A partir de $t=0,15$, le

mode est résistif, ou il n'y a aucun échange de puissance Fig.4.23 et 4.24. A partir de $t=0.3s$, et pour un deuxième changement de la puissance réactive de 1600VAR (I_q inductif), le courant est en retard de phase par 90° rapport à la tension (VI). On voit la même dynamique sur les figures 4.21 et 4.29.

La Fig.4.23 décrit la dynamique de la puissance réactive, elle varie de -1600 VAR, le compensateur fournit de la puissance au système, à $t=0.15s$ la puissance réactive est nulle, ensuite elle prend la valeur de +1600VAR à $t=0.3s$, le compensateur absorbe de la puissance réactive à partir du système, elle a la même allure que le courant en quadrature I_q Fig4.20. La référence de la puissance active est nulle sur la Fig.4.24.

IV.9 Conclusion

Ce chapitre décrit l'utilisation de l'onduleur ANPC à niveaux multiple pour la compensation shunt de la puissance réactive. L'onduleur joue un rôle important dans le fonctionnement du STATCOM. Il maintient un niveau requis de la tension continue, fournit la puissance réactive nécessaire au nœud auquel il est connecté.

Pour le contrôle du STATCOM la méthode des puissances découplées a été utilisée. La commande comprend deux boucles de régulation, la modélisation de la boucle interne est représentée par une maille générée par une tension alternative en série avec une impédance. La sortie de cette maille est donnée par la tension que fournit le compensateur. La boucle externe sert à maintenir la tension du condensateur à une tension de référence.

Les résultats de simulation présentés montrent une bonne performance dynamique du STATCOM avec les différents modes réactive de la charge changement de puissance.

L'analyse des résultats de simulation montre que la stratégie de commande a de bonnes performances dynamiques quelque soit le mode de fonctionnement du compensateur. Nous concluons également que lors de l'utilisation d'un régulateur (PI), on a obtenu des réponses très rapides avec de bonnes performances dynamiques du système.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Dans le présent travail, nous avons tout d'abord discute sur la compensation de l'énergie réactive et nous avons cite quelques méthodes et moyens pour une telle compensation. Nous avons développé le modèle du compensateur statique d'énergie réactive STATCOM de type shunt, nous avons implanté l'onduleur à trois et cinq niveaux de tension commandé en tension par la stratégie MLI dans ce compensateur. Puis nous avons appliqué la commande par découplage. Ce qui différencie une solution à base de convertisseurs multi-niveaux par rapport aux convertisseurs classiques à deux niveaux, c'est une meilleure qualité de tension et des niveaux de tension plus élevés.

Ce travail a permis de construire un modèle du STATCOM satisfaisant du point de vue du comportement dynamique. Ce modèle est bien adapté aux exigences du STATCOM puisqu'il sépare les composantes actives et réactives mises en jeu.

Dans le but d'évaluer les performances du STATCOM dans un système électrique et d'examiner son apport au contrôle du flux de puissance réactive des charges, une stratégie de contrôle pour le STATCOM a été élaboré dans cette thèse.

Les résultats de simulations montrent bien la validité de la stratégie de contrôle proposée et l'amélioration de l'amortissement des oscillations de la puissance durant les périodes transitoires et dynamique.

Le travail réalisé au cours de cette thèse ouvre un certain nombre de perspectives, parmi les problèmes qui n'ont pas été abordés ici d'une façon détaillée et qui peuvent faire l'objet d'une recherche future, on peut citer les points suivants :

- Utiliser une technique de commande plus performante tel que la commande non linéaire,
- Faire une étude sur les techniques MLI de commande des onduleurs multi-niveaux,
- Utilise des techniques intelligentes pour déterminer les variables de commande dans le cas de la commande.
- Faire la conception d'une nouvelle structure de l'onduleur qui peut satisfaire les exigences de fonctionnement du STATCOM dans différentes applications.

Annexe A

A.1 Introduction

La transformation de PARK appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes

- Homopolaire (indice O)
- D'axe direct (indice d)
- D'axe en quadrature (indice q)

A.2 Forme modifiée de la transformation de PARK

Dans le cas d'un système de courant (ou de tension), cette transformation s'écrit :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = p^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} X_o \\ X_d \\ X_q \end{bmatrix}$$

La variable x peut être une tension ou un courant, ou θ est l'écart angulaire entre l'axe d'une phase et l'axe d'observateur.

La matrice de transformation modifiée s'écrit :

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{A-1})$$

La matrice de transformation inverse est :

$$p(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{A-2})$$

Dans le cas d'un système de tension on écrit :

$$[V] = [Z] [I] \quad (A-3)$$

$[V]$ et $[I]$ sont des vecteurs formés par les tensions et les courants réels.

En appliquant la transformation de PARK :

$$[V_c] = [Z_c] [I_c] \quad (A-4)$$

Avec :

$$[V_c] = [p(\theta)]^{-1} [V] \quad (A-5)$$

$$[Z_c] = [p(\theta)]^{-1} [Z] [p(\theta)] \quad (A-6)$$

A.3 Relation entre les composantes de CONCORDIA et celle de PARK:

La matrice $[p(\theta)]^{-1}$ pour $\theta=0$ a l'expression :

$$p(0)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (A-7)$$

La matrice de rotation est définie par :

$$p_1(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (A-8)$$

Il est facile de vérifier que :

$$[p(\theta)]^{-1} = [p_1(\theta)]^{-1} [p(0)]^{-1} \quad (A-9)$$

A.4 Matrice de transformation impédance

La matrice est expliquée en considérant un système triphasé simple comme indiqué par la figure suivante :

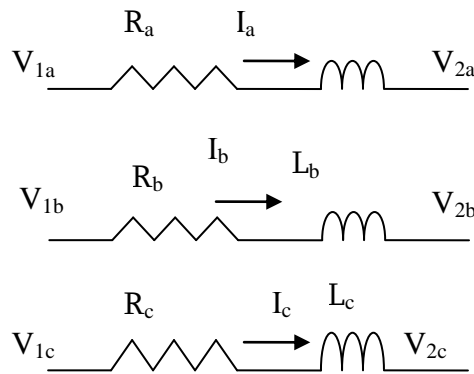


Fig. (A-1) système triphasé équilibré.

Le système triphasé peut être transformé en un système symétrique synchrone

Les équations décrivant le système de la fig. (B-1) sont :

$$\begin{bmatrix} V_{1a} - V_{2a} \\ V_{1b} - V_{2b} \\ V_{1c} - V_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L \frac{d}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & R + L \frac{d}{dt} & 0 \\ 0 & 0 & R + L \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

Ou simplement par :

$$[V] = [Z] [I]$$

En introduisant la transformation de PARK on trouve:

$$[p(\theta)][V_c] = [R][p(\theta)][i_c] + \frac{d}{dt} \{ [L][p(\theta)][i_c] \} \quad (\text{A.11})$$

Si on prémultiplie (A-11) par $[p(\theta)]^{-1}$ elle devient :

$$[Vc] = [p(\theta)]^{-1} [R][p(\theta)][i_c] + \frac{d}{dt} [p(\theta)]^{-1} \{ [L][p(\theta)][i_c] \} \quad (\text{A.12})$$

Puisque tous les éléments de $[R]$ sont constants on peut écrire :

$$[p(\theta)]^{-1} [R][p(\theta)] = [\lambda] \quad (\text{A.13})$$

On écrit :

$$[L][p(\theta)] = [\lambda] \quad (\text{A.14})$$

de (A-12) , (A-13) et (A-14) on écrit :

$$[Vc] = [R] [i_c] + [p(\theta)]^{-1} \left\{ \frac{d}{dt} [\lambda][i_c] \right\} \quad (\text{A.15})$$

$$[Vc] = [R] [i_c] + [p(\theta)]^{-1} [\lambda] \frac{d}{dt} [i_c] + [p(\theta)]^{-1} \left\{ \frac{d}{d\theta} [\lambda][i_c] \right\} \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{A.16})$$

$$[p(\theta)]^{-1} \frac{d}{d\theta} [\lambda] = \lambda \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

on remarque que $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ fréquence de synchronisme.

En indiquant par \mathbf{p} l'opération différentielle, et en remplaçant par (A.17) dans (A-7) on arrive à :

$$\begin{bmatrix} Vd \\ Vq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL & -\omega L \\ \omega L & R + pL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} \quad (\text{A.18})$$

donc la matrice $[Zc]$ s'écrit :

$$[Zc] = \begin{bmatrix} R + pL & -\omega L \\ \omega L & R + pL \end{bmatrix} \quad (\text{A.19})$$