

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERSCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES**  
**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**  
**N° : CE-13**



**DOMAINE :SCIENCES ET TECHNOLOGIE**  
**FILIERE : ELECTROTECHNIQUE**  
**OPTION : COMMANDES ELECTRIQUES**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par:**

**Choayb DJEDILI**

**Feteh ZIANE**

**Intitulé**

**Modélisation et commande d'un DSTATCOM**  
**à base d'un convertisseur multiniveau**

**Soutenu devant le jury composé de:**

<b>Mr. Fayssal OUAGUENI</b>	<b>Université Mohamed Boudiaf - M'sila</b>	<b>Président</b>
<b>Dr. Hani BENGUESMIA</b>	<b>Université Mohamed Boudiaf - M'sila</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Dr. Saber BOUAFIA</b>	<b>Université Mohamed Boudiaf - M'sila</b>	<b>Co-Rapporteur</b>
<b>Dr. Saad BELHAMDI</b>	<b>Université Mohamed Boudiaf - M'sila</b>	<b>Examineur</b>

**Année universitaire : 2019/ 2020**

# *Dédicaces*

*A ma mère, mon père, ma femme, mes enfants Hiba, Ouis et Nouha et  
toute ma famille.*

*Djedili choayb*

# *Dédicaces*

*À ma mère, mon père, ma femme, mes enfants Tamim, Wassim, Maram  
et toute ma famille.*

*ZIANE Fateh*

# *Remerciements*

*Nos remerciements les plus vifs et chaleureux, vont à notre encadreur Monsieur BENGUESMAI Hani, Maître de conférences à U.M.B de M'sila pour son aide, son orientation et sa disponibilité, aussi pour la confiance et la compréhension qu'il nous a toujours manifesté.*

*Nous remercions Monsieur BOUAFIA Saber, pour son aide, son orientation et sa disponibilité.*

*Nous adressons nos remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner cette mémoire.*

*Nous remercions également tous les enseignants du département du génie électrique qui ont participé à notre formation pendant tout le cycle universitaire*

*.*

*Enfin, nous désirons adresser nos remerciements à toutes les personnes qui, par leur assistance, ont contribué de près ou de loin à rendre possible la réalisation de cette recherche.*

# Sommaire

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre I : État de l'art sur les FACTS et les D-STATCOM

I.1 Introduction.....	3
I.2 Qualité d'énergie dans les réseaux électrique.....	4
I.3 Définitions et généralités .....	5
I.4 Contribution et avantages des systèmes FACTS.....	5
I.5 Applications pratiques des dispositifs FACTS .....	6
I.6 Classification des dispositifs FACTS :.....	6
I.6.1 Classification basée sur la topologie de puissance .....	7
I.6.1.1 Dispositifs FACTS à base de thyristors.....	7
I.6.1.2 Dispositifs FACTS à base de convertisseurs de tension.....	8
I.6.2 Classification basée sur la configuration de connexion au réseau.....	8
I.6.2.1 Dispositifs séries.....	8
I.6.2.2 Dispositifs shunts.....	9
I.6.2.3 Dispositifs hybrides série-shunt.....	10
I.7 Structure des principaux dispositifs FACTS.....	10
I.7.1 Dispositifs FACTS shunts.....	10
I.7.1.1 SVC (Static Var Compensator) .....	10
I.7.1.2 STATCOM (Static Synchronous Compensator.....	12
I.7.2 Dispositifs FACTS séries.....	14
I.7.2.1 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor).....	14
I.7.2.2 SSSC (Static Synchronous Series Compensator).....	15
I.7.3 Dispositifs FACTS hybrides.....	15
I.7.3.1 UPFC (Unified Power Flow Controller).....	15
I.8 Présentation du système DSTATCOM.....	17
I.8.1 Description.....	17
I.8.2 Principe de fonctionnement.....	18
I.9 Conclusion.....	20

## Chapitre II : Modélisation et modulation des convertisseurs multiniveaux

II.1 Introduction.....	21
II.2 Histoire des composants de l'électronique de puissance .....	22
II.3 Principales topologies des convertisseurs multiniveaux .....	23
II.3.1 Convertisseur en cascade.....	23
II.3.2 Convertisseur à capacités flottantes.....	23
II.3.3 Convertisseur à diodes flottantes.....	24
II.4 Types des commandes des convertisseurs multiniveaux.....	24

II.4.1 MLI sinusoïdale.....	25
II.4.2 MLI par hystérésis .....	25
II.4.3 MLI vectorielle.....	25
II.5 Modélisation de l'onduleur trois niveaux.....	26
II.5.1 Structure générale.....	26
II.5.1.1 Fonctions de commutation.....	27
II.5.1.2 Commande complémentaire des interrupteurs.....	27
II.5.1.3 Etats d'un bras de l'onduleur.....	27
II.5.1.4 Tension de sortie.....	28
II.5.1.5 Représentation vectoriel.....	30
II.5.1.5 SVM de l'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes.....	31
II.5.1.6 Détermination de la localisation du vecteur tension de référence.....	32
II.5.1.6. a) <i>Première étape : Détermination du secteur</i> .....	32
II.5.1.6. b) <i>Deuxième étape : Identification du triangle</i> .....	32
II.5.1.7 Calcul des temps d'application.....	36
II.5.1.8 Génération des impulsions.....	37
II.6 Problème d'équilibrage du bus continu des convertisseurs multi-niveaux.....	38
II.7 Equilibrage du bus continu par minimisation de l'énergie des condensateurs.....	39
II.8 Résultats de simulation.....	41
II.9 Conclusion.....	44

### **Chapitre III : Modélisation et commande du D-STATCOM**

III.1 Introduction.....	45
III.2 Modélisation du D-STATCOM.....	46
III.2.1 Configuration du système D-STATCOM.....	46
III.2.2 Schéma simplifié du D-STATCOM.....	46
III.2.3 Modélisation dans le repère (abc).....	47
III.2.4 Modélisation dans le repaire (dq).....	48
III.3 Contrôle du D-STATCOM .....	49
III.3.1 Synthèse des régulateurs des courants .....	52
III.3.2 Contrôleur de la tension du bus continu.....	53
III.3.3 Contrôleur de la tension au point de couplage commun PCC.....	54
III.3.4 Détermination des consignes de références.....	55
III.4 Simulations et Résultats.....	55
III. 4.1 Description du réseau étudié .....	55
III.4.2 Résultats de simulations et interprétations.....	56
III.4.2.1 Mode de correction du facteur de puissance.....	56
III.4.2.2 Mode de régulation de tension .....	58
III.5 Conclusion .....	61
Conclusion Générale.....	62
Bibliographie.....	63

# *Liste des figures*

Figure (I.1) : Circuit équivalent de deux réseaux avec la ligne de transmission.....	5
Figure (I.2) : schéma type d'un SVC.....	11
Figure (I.3) : Réseau Equivalent.....	11
Figure (I.4) : Caractéristique V-I d'un SVC.....	12
Figure (I.5) : Structure d'un STATCOM.....	13
Figure (I.6) : Caractéristique V-I d'un STATCOM.....	14
Figure (I.7) : Schéma d'une ligne équipée d'un TCSC.....	14
Figure (I.8) : Structure d'un SSSC.....	15
Figure (I.9) : Structure d'un UPFC.....	16
Figure (I.10) : Structure de base d'un D-STATCOM couplé au réseau.....	17
Figure (II.1) Évolution des composants semi-conducteurs de puissance.....	22
Figure (II.2): Convertisseur en cascade.....	23
Figure(II.3): Convertisseur à capacités flottantes.....	23
Figure (II.4): Convertisseur à diodes flottantes.....	24
Figure (II.5): Convertisseur triphasé à trois niveaux à diodes flottantes .....	26
Figure (II.6): Diagramme vectoriel de l'onduleur à trois niveaux.....	31
Figure (II.7): Régions triangulaires de l'onduleur à trois niveaux.....	33
Figure (II.8): Diagramme vectoriel de l'onduleur à trois niveaux dans le premier secteur..	34
Figure (II.9): Formes des impulsions de commande des interrupteurs des demi-bras supérieurs de l'onduleur à trois niveaux pour la région $\Delta_4^S$ .....	38
Figure (II.10) (a) (b Zoom) Courants de charge de courant de charge.....	42
Figure (II.11): Tensions de charge.....	42
Figure (II.12): Tension des condensateurs.....	43
Figure (II.13): Spectres harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur.....	43
Figure (II.14): Spectres harmoniques du courant de sortie de l'onduleur.....	43
Figure (III.1): Schéma d'un D-STATCOM triphasé connecté au système de distribution...	46
Figure (III.2) : Schéma simplifié du D-STATCOM.....	47
Figure (III.3) : Diagramme vectoriel de la tension du point PCC.....	48
Figure (III.4) : Structure de contrôle d'un D-STATCOM.....	50
Figure (III.5) : Boucle interne de contrôle de courant.....	51
Figure (III.6) : Schéma bloc de régulation des courants par des régulateurs PI.....	52
Figure (III.7) : Schéma bloc de régulation de la tension continue par un régulateur PI...	53
Figure (III.8) : Génération de la référence du courant actif $i_{fd}$ .....	54
Figure (III.10) : Schéma unifilaire du réseau étudié.....	55
Figure (III.11) : (a) Courant de la première phase injectée par le D-STATCOM dans le . réseau, ainsi que sa tension réduite, courant triphasé injecté par le D-STATCOM, (c) Zoom du courant triphasé injecter par le D-STATCOM. ....	57
Figure (III.12) : Tension du bus continu du D-STATCOM et sa référence.....	57
Figure (III.13) : Tensions des condensateurs du bus continu.....	58
Figure (III.14) : Courant réactif injecté par le D-STATCOM dans le réseau.....	58
Figure (III.15) : Courant actif injecté par le D-STATCOM dans le réseau.....	58
Figure (III.16) : (a) Courant de la première phase injectée par le D-STATCOM dans le réseau, ainsi que sa tension réduite, b) courant triphasé injecté par le D-STATCOM, c) Tension au point PCC.....	59

Figure (III.17) : Tension du bus continu du D-STATCOM et sa référence.....	60
Figure (III.18) : Tensions des condensateurs du bus continu.....	60
Figure (III.19) : Courant réactif injecté par le D-STATCOM dans le réseau.....	60
Figure (III.20) : Courant actif injecté par le D-STATCOM dans le réseau.....	61

## *Liste des Tableaux*

Tableau (I.1) : Dispositifs FACTS installés dans le monde et leurs puissances totales ....	6
Tableau (I.2) : Grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques.....	7
Tableau (I.3) : Caractéristique des FACTS à la résolution des problèmes survenu au réseau.....	16
Tableau (II.1): Etats d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.....	28
Tableau (II.2) : Etats de l'onduleur à trois niveaux et les coordonnées du vecteur $v_i$ dans le plan $(\alpha\beta)$ .....	30
Tableau (II.3): Coordonnées des sommets des triangles pour le premier secteur de l'onduleur à trois niveaux.....	35
Tableau (II.4): Identification des différents triangles du secteur $S$ de l'onduleur à trois niveaux.....	36
Tableau (II.5): Temps d'application des vecteurs adjacents dans les différents triangles du secteur $S$ . ....	37
Table (III.1) : Paramètres de simulation.....	56

# Liste des symboles

- $i_{abc}$  : Les courants de l'onduleur.
- $i_{fabc}$  : Les courants du D-STATCOM.
- $i_{f\alpha\beta}$  : Les courants du D-STATCOM dans le repère  $(\alpha\beta)$ .
- $i_{fdq}$  : Les courants du D-STATCOM dans le repère  $(dq)$ .
- $i_{fdq}^*$  : Les courants de références du D-STATCOM dans le repère  $(dq)$ .
- $i_{sabc}$  : Les courants de la source.
- $i_{sdq}$  : Les courants de la source dans le repère  $(dq)$ .
- $i_{chabc}$  : Les courants de la charge.
- $i_{chdq}$  : Les courants de la charge dans le repère  $(dq)$ .
- $i_{céq}$  : Le courant équivalent de la côté continue.
- $icéq^*$  : La référence du courant équivalent de la côté continue.
- $v_{xo}$  : La tension entre la phase x de l'onduleur et le point milieu o.
- $v_{xy}$  : La tension entre les phases x et y.
- $v_{abc}$  : Les tensions de sortie de l'onduleur.
- $v_{abc}^*$  : Les tensions de référence.
- $v_{\alpha\beta}$  : Les tensions de sortie de l'onduleur dans le repère  $(\alpha\beta)$ .
- $v_{\alpha\beta i}$  : Les projections du vecteur  $v_i$  sur les axes  $\alpha$  et  $\beta$ .
- $v_i^{rd}$ ,  $rd = a, b, c$  ou  $d$  : La redondance  $rd$  du vecteur  $v_i$ .
- $v^*$  : Le vecteur tension de référence.
- $v_m^*$  : L'amplitude du vecteur tension de référence.
- $v_{max}^*$  : La valeur maximale du vecteur de sortie.
- $v_{\alpha\beta}^*$  : Les projections du vecteur  $v^*$  sur les axes  $\alpha$  et  $\beta$ .
- $v_{fabc}$  : Les tensions de sortie du D-STATCOM.
- $v_{f\alpha\beta}$  : Les tensions de sortie du D-STATCOM dans le repère  $(\alpha\beta)$ .
- $v_{fdq}$  : Les tensions de sortie du D-STATCOM dans le repère  $(dq)$ .
- $v_{fdq}^*$  : Les références de tensions de sortie du D-STATCOM dans le repère  $(dq)$ .
- $v_{sabc}$  : Les tensions de la source.
- $v_{sdq}$  : Les tensions de la source dans le repère  $(dq)$ .
- $v_{chabc}$  : Les tensions de la charge.
- $v_{chdq}$  : Les tensions de la charge dans le repère  $(dq)$ .
- $v_{dc}$  : La tension globale du bus continu.
- $v_{dc}^*$  : La tension de référence du bus continu.
- $v_{ci}$  : La tension partiel aux bornes du condensateur  $C_i$ .
- $S$  : La puissance apparente.
- $P$  : La puissance active.
- $Q$  : La puissance réactive.
- $\theta$  : L'angle de tension du PCC.
- $L_f$  : L'inductance du filtre.
- $R_f$  : La résistance du filtre.
- $Z_f$  : L'impédance du filtre.

$X_f$ : La réactance du filtre.  
 $L_s$ : L'inductance de la source.  
 $R_s$ : La résistance de la source.  
 $L_{ch}$ : L'inductance de la charge.  
 $R_{ch}$ : La résistance de la charge.  
 $C_i$ : La capacité du condensateur i.  
 $C_{\acute{e}q}$ : La capacité équivalente du bus continu.  
 $t$ : Le temps.  
 $t_i$ : Le temps d'application du vecteur  $v_i$ .  
 $T_h$ : La période de commutation.  
 $f_h$ : La fréquence de commutation.  
 $N$ : Nombre des intervalles de commutation.  
 $T_e$ : La période d'échantillonnage.  
 $f_e$ : La fréquence d'échantillonnage.  
 $\omega$ : La pulsation électrique.  
 $m$ : L'indice de modulation.  
 $FP$ : Facteur de puissance.  
 $T$ : Semi-conducteur bidirectionnel.  
 $D$ : Diode de clamp.  
 $S$ : Fonction de commutation.  
 $k_{pdc}, k_{idc}$ : Les gains du régulateur PI de la tension continue.  
 $\omega_{ndc}$ : La pulsation de coupure régulateur PI de la tension continue.  
 $k_{pc}, k_{ic}$ : Les gains du régulateur PI des courants actif et réactif  
 $\omega_{nc}$ : La pulsation de coupure du régulateur PI des courants actif et réactif.  
 $\zeta$ : Coefficient d'ammortissement.  
 $p$ : L'opérateur de Laplace.

# *Abréviations*

*FACTS*: Flexible AC Transmission Systems.  
*STATCOM*: STATic COMPensator.  
*D-STATCOM*: Distributed STATic COMPensator.  
*SVC*: Static Var Compensator.  
*TCSC*: Thyristor Controlled Series Capacitor.  
*SSSC*: Static Synchronous Series Compensator.  
*UPFC*: Unified Power Flow Controller.  
*TCR*: Thyristor Controlled Reactor.  
*TSC*: Thyristor Swithed Capacitor.  
*IGBT*: Insulated Gate Bipolar Transistors.  
*IGCT*: Insulated Gate Commutated Thyristors.  
*GTO*: Gate turn-Off Thyristor.  
*AC*: Alternative Current.  
*DC*: Direct Current.  
*NPC*: Neutral Point Clamped.  
*SVM*: Space Vector Modulation.  
*PI*: Proportionnel Intégral.  
*MLI*: Modulation de Largeur d'Impulsion.

## *Introduction générale*

Actuellement, les problèmes liés au fonctionnement des réseaux de transport et de production d'énergie électrique ont pris une importance considérable. Face à une consommation d'électricité qui ne cesse d'augmenter [28] et les pressions écologistes associées aux lourdeurs administratives rendent très difficile la construction de nouveaux équipements (lignes, centrales, etc ... ).[8], notamment le protocole kyoto [29] les réseaux d'énergie électrique ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et composés d'un grand nombre de sous-systèmes interconnectés dont chacun affecte la fiabilité globale du système [28,29]. Devant Cette complexité de structure et en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats beaucoup de problèmes peuvent survenir sur ce réseau tel que le transit de puissance réactive excessif dans les lignes, les creux de tension entre différentes parties du réseau...etc.

En outre, les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateur à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux problèmes d'instabilité du réseau ce qui affaiblie la capacité des réseaux et le potentiel de ce dernier ne sera pas exploiter d'une part[28,10], De plus, on vut aujourd'hui dans l'ère de l'électronique et de l'informatique, et toute les charges sont très sensibles aux perturbations et fluctuations qui surviennent sur leurs alimentations, le client devient de plus en plus exigeant (il veut plus d'énergie et de meilleurs qualité) et en même temps ils sont plus vulnérables d'autre part.

L'amélioration des performances des systèmes d'énergie électriques est orientée vers l'emploi des systèmes actifs capables de réagir instantanément afin de confronter les perturbations. Cette réaction peut être réalisée en utilisant des techniques modernes à base de l'électronique de puissance, [29] c'est dans ce contexte qu'est né le projet F ACTS (Flexible AC Transmission System) lancé par un consortium de compagnies d'électricités américaines (EPRI) en 1988 [8]. Le développement des dispositifs FACTS a ouvert de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux régulées, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité de tension ou de tendre vers les limites thermiques des lignes. Le maintien de l'équilibre entre la production et la consommation nécessite alors une surveillance permanente du système afin d'assurer la qualité du service (problème de conduite), garantir sa sécurité (problème de protection) et sa stabilité (problème de réglage).

L'un des dispositifs FACTS les plus connus est le STATCOM (STATic COMpensator) qui a été proposé en 1976. C'est une source à base de semi-conducteurs capable de fournir ou d'absorber d'énergie réactive [10]. La commande de ce dispositif est effectuée pour maintenir la tension de réseau, pour compenser la puissance réactive ou pour les deux au même temps [4]. Le D-STATCOM (Distributed STATic COMpensator), destiné pour les réseaux de

distribution, réalise les mêmes fonctions que le STATCOM. Cependant, la fréquence de commutation des IGBT permettent d'assurer des trajectoires de courant plus élaborées, ouvrant donc des possibilités plus larges : filtrage actif de courant, réglage découplé des puissances active et réactive échangées avec le réseau [10].

L'objectif de ce travail est d'étudier en premier lieu la compétence du D-STATCOM multiniveaux dans la compensation de la totalité de puissance réactive demandée par la charge afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire côté source et la correction de la tension au point de raccordement commun (PCC) en deuxième lieu.

Le présent mémoire est structuré comme suit

Dans le premier chapitre, nous présenterons les dispositifs FACTS : leurs définitions et conceptions générales, leurs applications et leurs catégories. Nous introduirons quelques dispositifs en citant le rôle important qu'ils jouent dans l'exploitation et la gestion des réseaux électriques, tout en donnant pour chacun d'entre eux sa configuration, son principe de fonctionnement et ses applications. Dans la deuxième section de ce chapitre, nous baserons sur la description de la structure du dispositif DSTATCOM. Une explication détaillée de son principe de fonctionnement en modes inductif et capacitif sera envisagée

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation et la modulation vectorielle des onduleurs conventionnels et multiniveaux. Nous développerons l'algorithme de la modulation vectorielle dans le cas des onduleurs à trois niveaux. tout en traitant, le problème de déséquilibre des tensions des condensateurs.

Le troisième chapitre consacre l'exploitation du D-STATCOM multiniveaux dans la compensation de la totalité d'énergie réactive dans un réseau de distribution et la régulation de tension au niveau du point de raccordement commun (PCC). Les différents modèles mathématiques du dispositif seront développés. La stratégie de commande par des régulateurs PI adoptée pour le contrôle des courants actif et réactif et de la tension de bus continu sera expliquée. On terminera par la présentation et l'interprétation des résultats obtenus.

La dernière partie de notre mémoire est consacrée à la conclusion générale et à la présentation de quelques perspectives.

# *Chapitre I :*

## *État de l'art sur les FACTS et les D-STATCOM*

### **I.1 Introduction**

Les réseaux de transport d'énergie électrique sont actuellement de plus en plus sollicités. L'augmentation de la consommation due à l'industrialisation, à l'urbanisation et à la croissance de la population en est une des causes importante. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc..., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

Cet état de fait conduit à la saturation des réseaux électriques, tout en obligeant les compagnies d'énergie électrique d'exploiter plus en plus leurs réseaux près des limites de sécurité. Cette situation engendre des problèmes d'exploitation, notamment pour le contrôle de l'écoulement de puissance, le maintien d'un profil de tension acceptable, la surveillance des reports de charge, etc. A cet effet, l'aspect sécurité prend une grande importance et des recherches sont entreprises pour trouver des moyens susceptibles d'améliorer la sécurité et rendre l'exploitation des réseaux plus flexible [1]. Le développement récent des dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System) ouvre de nouvelles perspectives pour une

exploitation plus dense des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Dans la première section de ce premier chapitre, nous introduisons quelques dispositifs FACTS et citons le rôle important qu'ils jouent dans l'exploitation et la gestion des réseaux électriques, en donnant pour chacun d'entre eux sa configuration, son principe de fonctionnement et ses applications. La deuxième section est consacrée à la description de la structure de dispositif D-STATCOM, une explication en détail des principes de leurs fonctionnements et puis la contribution de ce dernier et son effet dans le contrôle des réseaux électriques est montrée.

## **I.2 Qualité d'énergie dans les réseaux électrique**

La qualité d'énergie électrique concerne tous les acteurs du domaine énergétique, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs, ou consommateurs d'électricité. Elle est devenue un sujet de grand intérêt ces dernières années, notamment pour des raisons économiques, dont les perturbations électriques ont un coût élevé pour les industriels car elles engendrent des arrêts de production, des pertes de matières premières, une baisse de la qualité de la production, un vieillissement prématuré des équipements, etc.

Le développement des usages de l'électricité dans l'industrie induit des exigences dans la qualité de l'énergie à fournir. La qualité de l'énergie fournie aux utilisateurs dépend de celle de la tension au point de livraison. Elle peut être affectée par certains incidents, soit externes comme la défaillance de la source d'alimentation ou bien inhérents à l'installation. Ces défauts détériorant la qualité de la tension se manifestent sous forme de différentes perturbations: surtension, déséquilibre, fluctuation, harmonique, creux de tension.

Selon leur fréquence, les perturbations sont classées en deux groupes: perturbations au niveau du fondamental et perturbations harmoniques. Les perturbations au niveau du fondamental [2] affectent l'amplitude des grandeurs d'intérêt (tension ou courant). Ce sont par exemple les creux de tension, les coupures, les surtensions et les déséquilibres. Les perturbations dites 'harmoniques' sont caractérisées par l'apparition de nouvelles composantes à des fréquences multiples de la fréquence fondamentale. En s'ajoutant à la composante fondamentale, elles provoquent donc la distorsion des formes d'onde des grandeurs d'intérêt.

Il existe des solutions préventives et curatives aux problèmes de la qualité de l'énergie. Des solutions préventives vont vers l'immunisation des charges (alimentation régulée), d'autres vers le confinement des sources perturbantes (éloignement électrique des sources perturbantes des charges sensibles) et certaines vers la conversion « propre » (redressement à prélèvement sinusoïdal). Les solutions curatives s'insèrent dans des architectures déjà existantes et se basent sur la compensation (filtrages passifs et/ou actifs, compensation de l'énergie réactif...), parmi les dispositifs largement utilisés dans les systèmes de compensation on trouve les FACTS qui fait l'objet de ce premier chapitre.

### I.3 Définitions et généralités

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), le terme FACTS est l'abréviation de « Flexible AC Transmission Systems » et défini comme étant un système comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statiques utilisés afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes [3].

Avec leurs aptitudes de modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Il est donc important de souligner que les dispositifs FACTS ne peuvent pas augmenter la capacité thermique des lignes de transport. En revanche, ils permettent d'utiliser les lignes plus proches de leurs limites en repoussant d'autres limitations, en particulier celles liées à la stabilité.

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le écoulement de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau : tension, impédance, déphasage...etc. ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie. [4]

Finalement, il faut noter que les FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes, Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant.

### I.4 Contribution et avantages des systèmes FACTS

L'intérêt majeur de la technologie FACTS pour les opérateurs de l'énergie électrique est d'ouvrir plus d'opportunités pour le contrôle de la puissance et d'augmenter les capacités utilisables des présentes lignes sous les conditions normales. Ces possibilités résulte par l'habilité des contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres intervenant dans l'équation (I.1) qui gouverne l'opération de transmission de l'énergie dans une ligne tel que les impédances séries, impédances shunts, courant , tension angle de phase. [3]

$$P = \frac{v_1}{v_2} \sin \delta \quad (\text{I.1})$$

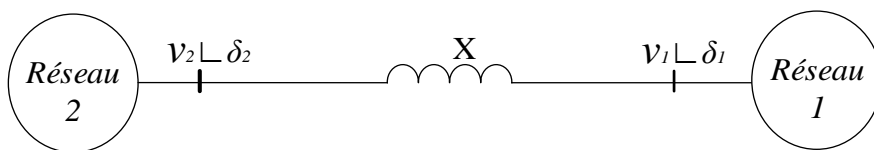


Figure (I.1) : Circuit équivalent de deux réseaux avec la ligne de transmission

A partir de l'équation (I.1) il est possible d'augmenter la puissance active transitée entre deux réseaux et ce en manipulant sur l'un de ces paramètres :

- Augmentant la tension des systèmes ;
- Augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes ;
- Réduisant artificiellement l'impédance de la liaison.

De plus et si en jouant sur un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettent :

- Un contrôle précis des transits de puissance réactive ;
- Une optimisation des transits de puissance active sur les installations existantes ;
- Une amélioration de la stabilité dynamique du réseau ;
- Permettent aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges ;
- Le contrôler de la fluctuation de tensions créées par des variations rapides de la demande de puissance réactive ;
- Augmenter les productions, réduire les coûts et d'allonger la durée de vie des équipements.

### I.5 Applications pratiques des dispositifs FACTS

Les systèmes FACTS sont habituellement connus comme nouvelle technologie, mais des centaines d'installations dans le monde, plus particulièrement du SVC depuis 1970 avec une puissance totale installée de 90.000 MVAR, prouvent l'acceptation de ce genre de technologie. Le tableau (I.1) montre des chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde avec les puissances totales installées. [2]

Tableau (I.1) : Dispositifs FACTS installés dans le monde et leurs puissances totales

<i>Type</i>	<i>Nombre</i>	<i>Puissance installée en MVA</i>
<b>SVC</b>	600	90.000
<b>STATCOM</b>	15	1200
<b>Série Compensation</b>	700	350.000
<b>TCSC</b>	10	2.000
<b>HVDC B2B</b>	41	14.000
<b>UPFC</b>	2-3	250

### I.6 Classification des dispositifs FACTS :

Les systèmes de transmission flexible en courant alternatif peuvent être classés selon leurs topologies de puissance ou selon la configuration de connexion avec le réseau tableau (I.2). [6]

La colonne gauche du tableau présente les solutions conventionnelles basées sur des éléments passifs. Ces dispositifs sont connectés en série, shunt ou en hybride avec le réseau principal.

La colonne droite du tableau présente les différents dispositifs FACTS les plus connus dans la littérature.

Tableau (I.2) : Grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques

Classification basée sur la technologie de l'électronique de puissance			
Classification basée sur la configuration de connexion au réseau	Conventionnelles	à base de Thyristor	à base de VSC
	Éléments R, L, C	Dispositifs FACTS	
	<b>Dispositifs shunt</b>	Compensation Shunt (Éléments R,L,C ) <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Static VAR Compensator (SVC)</li> <li>▪ Static VAR Generator (SVG)</li> <li>▪ Static VAR System (SVS)</li> <li>▪ Thyristor-Controlled Reactor (TCR)</li> <li>▪ Thyristor-Switched Capacitor (TSC)</li> <li>▪ Thyristor-Switched Reactor (TSR)</li> <li>▪ Thyristor-Controlled Braking Resistor (TCBR)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Static Synchronous Compensator (STATCOM)</li> </ul>
	<b>Dispositifs série</b>	Compensation Série (Éléments R, L, C) <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC)</li> <li>▪ Thyristor- Switched Series Capacitor (TSSC)</li> <li>▪ Thyristor-Controlled Series Reactor (TCSR)</li> <li>▪ Thyristor-Switched Series Reactor (TSSR)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Static Synchronous Series Compensator (SSSC)</li> <li>▪ Dynamic Voltage Restorer (DVR)</li> <li>▪ Static Voltage Restorer (SVR)</li> </ul>
<b>Dispositifs hybride (série-shunt)</b>	Transformateur déphaseur <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Thyristor Control Phase Shifting Transformer (TCPST)</li> <li>▪ Thyristor Controlled Voltage and phase Angle Regulators (TCVR)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unified Power Flow Controller (UPFC),</li> <li>▪ Interline Power Flow Controller (IPFC),</li> <li>▪ Generalized Unified Power Flow Controller (GUPFC).</li> </ul>	

### I.6.1 Classification basée sur la topologie de puissance

Les dispositifs FATCS peuvent être classés selon leurs topologies d'électronique de puissance en deux catégories principales [4] [7] :

- les FACTS basés sur les convertisseurs à thyristors (commutateurs à commutation naturelle) ;
- les FACTS basés sur des convertisseurs à interrupteurs totalement commandés (commutateurs à commutation forcée).

#### I.6.1.1 Dispositifs FACTS à base de thyristors

Parmi les caractéristiques de convertisseurs de cette rubrique, c'est la faible fréquence de commutation, ce qui en résulte de faibles pertes de commutation, néanmoins ils ne peuvent

fonctionner que dans seule mode (capacitive ou inductive), de nombreux FACTS à base de thyristors ont été proposés dans la littérature, à savoir [6] [8] :

- Le Thyristor-Controlled Reactor (TCR),
- Le Thyristor-Switched Capacitor (TSC),
- Le Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC),
- Le Thyristor-Controlled Phase Angle Regulator (TCPAR).

### **I.6.1.2 Dispositifs FACTS à base de convertisseurs de tension**

Plusieurs dispositifs FACTS basés sur les convertisseurs de tension ont été proposés et développés dans la littérature à savoir [8] [9] :

- Le Static Synchronous Compensator (STATCOM),
- Le Static Synchronous Series Compensator (SSSC),
- L'Unified Power Flow Controller (UPFC),
- Le Generalized Unified Power Flow Controller (GUPFC).

Ces derniers sont à base d'interrupteurs totalement commandables tels que les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) ou des thyristors à commutation isolée (IGCT) constituant des convertisseurs de tension (Voltage Source Converter VSC). Ces derniers produisent des signaux de sortie de faible contenu harmonique en raison des fréquences de modulation élevées entraînant des pertes par commutation élevées, ce qui exige des algorithmes de modulation avancés pour atténuer ce problème.

## **I.6.2 Classification basée sur la configuration de connexion au réseau**

La classification basée sur la configuration de connexion au réseau dépend du système de contrôle et des objectifs visés. Les différentes configurations de connexion possibles pour les dispositifs FACTS sont comme suit :

### **I.6.2.1 Dispositifs séries**

Les FACTS connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance affecte la stabilité et l'écoulement de puissance. Les dispositifs FACTS connectés en série ont les avantages suivants :

- Réduction de la chute de tension en série ;
- Réduction des fluctuations de tension dans des limites définies lors d'un changement de la puissance transmise ;
- Amélioration d'amortissement des oscillations du système d'alimentation ;
- Limitation des courants de court-circuit dans le réseau et/ou dans les postes de transformation.

Ces dispositifs injectent une tension en série avec la ligne, ils sont à base de thyristors tels que [7] [8]:

- Le Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC);
- Le Thyristor- Switched Series Capacitor (TSSC);
- Le Thyristor-Controlled Series Reactor (TCSR), Thyristor-Switched Series Reactor (TSSR).

Ou à base de convertisseurs de tension tel que : Le Static Synchronous Series Compensator (SSSC) et le Dynamic Voltage Restorer (DVR).

### **I.6.2.2 Dispositifs shunts**

Les FACTS connectés en shunt consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent contrôler la tension au point de couplage commun (PCC), et ont les avantages suivants [10].

- Diminution de la puissance réactive indésirable et donc réduction des pertes dans le réseau ;
- Conservation de l'échange de puissance entre les différents réseaux avec une puissance réactive équilibrée ;
- L'amélioration de la qualité de l'énergie en particulier avec d'énormes fluctuations de la demande telle que les machines industrielles, les usines de fusion des métaux, ...etc ;
- Compensation de la puissance réactive requise par les convertisseurs à thyristors dans certaines applications, par ex. dans les lignes HVDC classiques ;
- Amélioration de la stabilité statique ou transitoire.

Les compensateurs connectés en shunt pourraient être des dispositifs FACTS à base de thyristors, y compris [7][8] :

- Le Static VAR Compensator (SVC),
- Le Static VAR Generator (SVG);
- Le Static VAR System (SVS);
- Le Thyristor-Controlled Reactor (TCR);
- Le Thyristor-Switched Capacitor (TSC);
- Le Thyristor-Switched Reactor (TSR);
- Le Thyristor-Controlled Braking Resistor (TCBR).

Ou à base de convertisseur de tension tel que : le Static synchronous compensator (STATCOM).

### **I.6.2.3 Dispositifs hybrides série-shunt**

Les FATCS connectés en hybride (séries/shunts) sont une combinaison de dispositifs FACTS connectés en série et en shunt, ils caractérisent par :

- contrôle d'écoulement de puissance tout en assurant un contrôle indépendant de la tension
- contrôle multivariables.

Cependant, les principaux inconvénients de cette configuration sont le coût élevé et la complexité de la configuration [8].

Les FATCS connectés en hybride, peuvent comprendre aussi bien des dispositifs à base de thyristors tels que :

- Le Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer (TCPST);
- Le Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (TCPAR).

Ou à base de convertisseurs de tension tels que :

- Le Unified Power Flow Controller (UPFC);
- Le interlines Power Flow Controller (IPFC).

Dans la gamme de puissance élevée, la configuration Back to Back est utilisée, plus particulièrement dans les systèmes HVDC.

## **I.7 Structure des principaux dispositifs FACTS**

### **I.7.1 Dispositifs shunts**

#### **I.7.1.1 SVC (Static Var Compensator)**

IEEE définit le SVC (Static Var Compensator) comme un générateur (ou absorbeur) statique d'énergie réactive shunt, dont la sortie est ajustée en courant capacitif ou inductif afin de contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, typiquement la tension des jeux de barres [3].

Le SVC conventionnel est composé de l'association d'un condensateur commandé par thyristors (TSC «Thyristor Switched Capacitor») et d'une réactance commandée par thyristors (TCR «Thyristor Controlled Reactor») qui sont connectés en parallèle [11]. Le SVC est connecté au réseau à travers un transformateur. La Figure I.2 montre le schéma type d'un SVC.

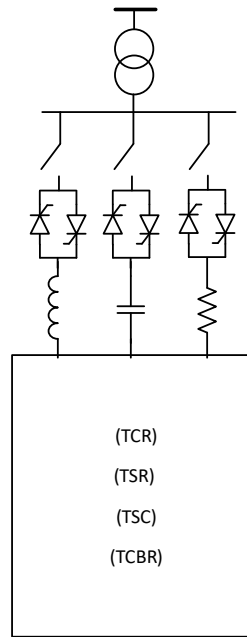


Figure I.2 : schéma type d'un SVC

**Principe de fonctionnement :**

Pour expliquer le fonctionnement du SVC dans le réseau électrique, une simplification du fonctionnement du réseau peut être représentée par une courbe V-I. Au nœud où le SVC est installé, le système peut être représenté par son réseau équivalent de Thevenin ( $E_{Th}$ ,  $X_{Th}$ ) comme montre la figure I.3. [11]

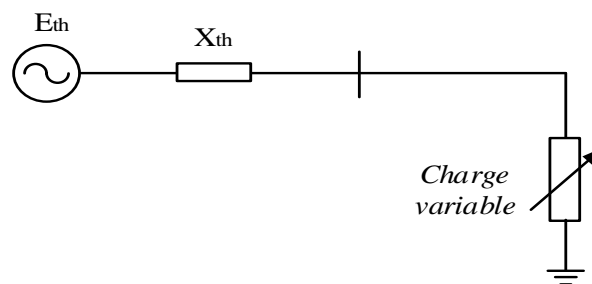


Figure I.3 : Réseau Equivalent

La charge de ce nœud est considérée réactive variable. La tension augmente linéairement avec une augmentation de charge capacitive et diminue linéairement avec une augmentation de charge inductive (Figure I.4). De cette manière, la caractéristique V-I du réseau est donnée par l'équation

$$V = E_{th} - X_{th}I \quad (I.2)$$

Toute variation de la tension équivalent du système ( $E_{th}$ ) représente une caractéristique V-I parallèle à la caractéristique initiale.

Quand un SVC est installé au nœud de charge, celui-ci réalisera une commande de la tension. Ainsi, si la tension  $E_{th}$  augmente (par exemple, dû à la diminution de la charge du système), il y aura une variation de la caractéristique du système, telle que le montre la Figure I.4, par un passage de la courbe (a) à (b). Sans SVC la nouvelle tension sera  $V_1$ , alors qu'avec SVC le point de fonctionnement est déplacé en **B** (intersection de la caractéristique du système et la caractéristique du SVC) par l'absorption de courant par l'inductance (absorption de puissance réactive).

D'autre part, si  $E_{th}$  diminue (par exemple, par l'augmentation de la charge du système) la nouvelle caractéristique de tension sera donnée par la courbe (c) comme illustrer dans figure I.4 et le nouveau point de fonctionnement est **C** dû à la génération de puissance réactive par le SVC.

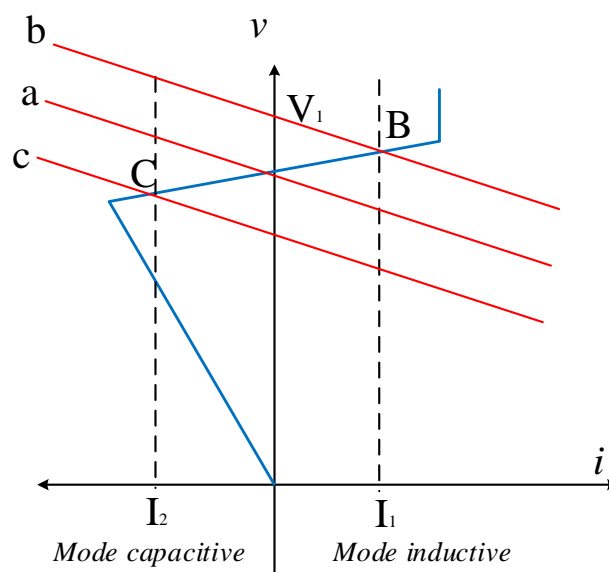


Figure I.4 : Caractéristique V-I d'un SVC

### I.7.1.2 STATCOM (Static Synchronous Compensator)

Après le SVC, l'arrivée des thyristors GTO a conduit au développement d'un autre dispositif FACTS shunt: le STATCOM. Similaire au compensateur synchrone tournant classique, le STATCOM présente un temps de réponse plus court et il n'a pas d'inertie mécanique. Il est

capable de fournir ou d'absorber de l'énergie réactive. Il se présente le plus souvent sous la forme d'un onduleur de tension (figure 1.5).

Son principe est simple : un onduleur de tension produit, grâce à une source de tension continue, un jeu de tensions triphasées, en phase et couplées aux tensions d'une ligne via une inductance faible. Celle-ci correspond en général à l'inductance de fuite par phase du transformateur de couplage. [8] [13]

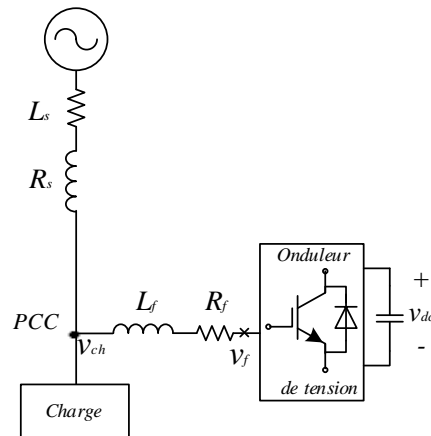


Figure (I.5) : Structure d'un STATCOM

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse. L'avantage de ce dispositif est de pouvoir 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. Comme on peut le voir de la figure (I.6), ce dispositif peut travailler avec son courant nominal même à des tensions réduites. Donc, sa puissance réactive varie linéairement avec la tension. Par contre, le courant injecté par le SVC diminue linéairement avec la tension et par conséquent la puissance réactive diminue quadratiquement. Cette caractéristique induit que le STATCOM est mieux adapté aux transitoires comme les creux de tension.

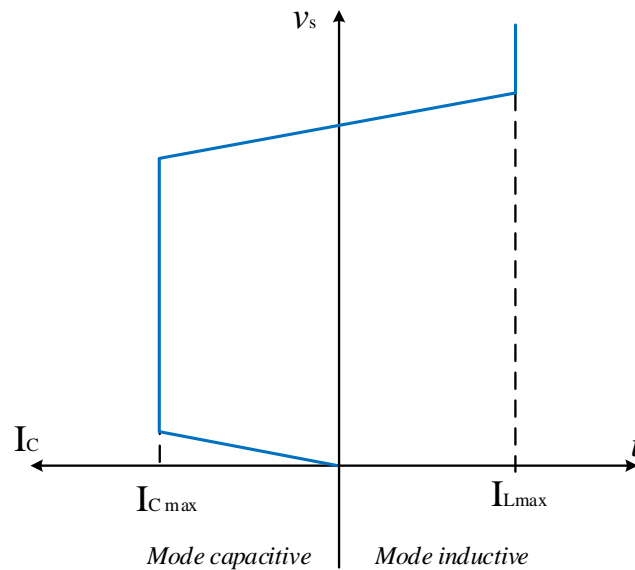


Figure (I.6) : Caractéristique V-I d'un STATCOM

## I.7.2 Dispositifs FACT séries

### I.7.2.1 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur et l'ensemble en parallèle avec une capacité comme le montre la figure (I.7). Le TCSC placé en série dans une ligne de transport permet de contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance  $X_{TCSC}$  qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors  $\alpha$ .

L'idée de base d'un tel modèle est simple, il s'agit d'une impédance variable placée en série sur la ligne à compenser comme le montre la figure (I.7).

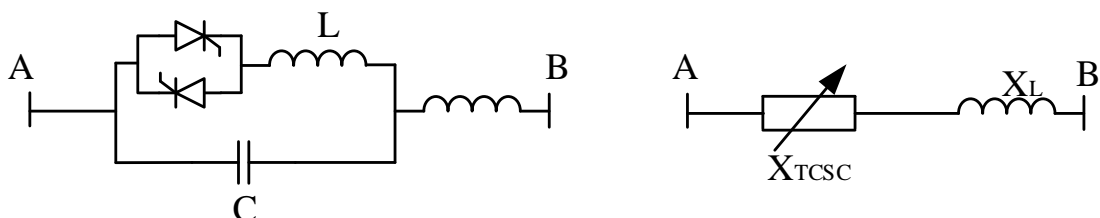


Figure (I.7) : Schéma d'une ligne équipée d'un TCSC

Suivant l'angle d'amorçage des thyristors, la valeur de l'impédance sera variable. Par conséquent, la puissance active  $P$  peut aussi avoir plusieurs valeurs distinctes. Le changement d'une puissance à l'autre se fait presque instantanément car l'amorçage des valves s'effectue

en moins d'un demi-cycle. Ce changement ultra-rapide de la puissance constitue un avantage lorsqu'on doit maintenir la stabilité de l'un ou l'autre des deux réseaux connectés aux deux extrémités de la ligne. [13]

### I.7.2.2 SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

C'est un dispositif FACTS à base d'onduleur de tension connectée en série au réseau électrique et appelé Static Synchronous Series Compensator (SSSC) injecte une tension de sortie en série dans la ligne, son schéma de principe est donné par la figure (I.8). Est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants

Le SSSC ne diffère pas dans sa structure de base de celle du STATCOM seulement il est connecté en série avec la ligne de transport; il consiste alors en un onduleur de tension avec une source de tension continue (condensateur) et l'ensemble lié à la ligne de transport en série à travers un transformateur de couplage comme représente la figure I.8

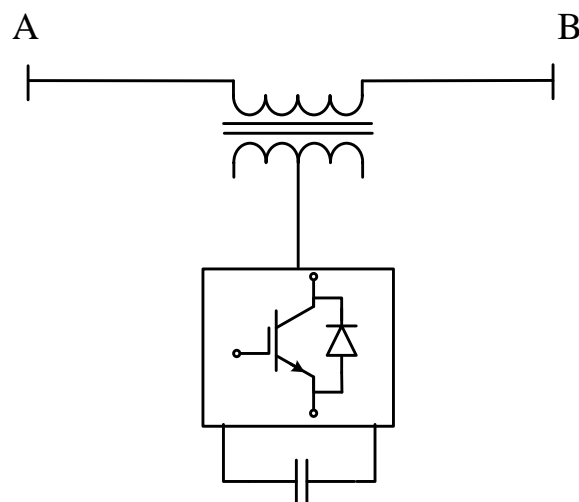


Figure (I.8) : Structure d'un SSSC

## I.7.3 Dispositifs hybrides

### I.7.3.1 UPFC (Unified Power Flow Controller)

UPFC (unified power flow controller): L'UPFC est composé de deux onduleurs triphasés de tension qui partagent le même condensateur dans leurs côtés continus et possédant un système de commande unifié, la figure 1.9 donne son schéma de principe. [2]

Le premier concept a été présenté par Gyugyi en 1999. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler simultanément la puissance active, la puissance réactive et les tensions aux extrémités de la ligne.[1]

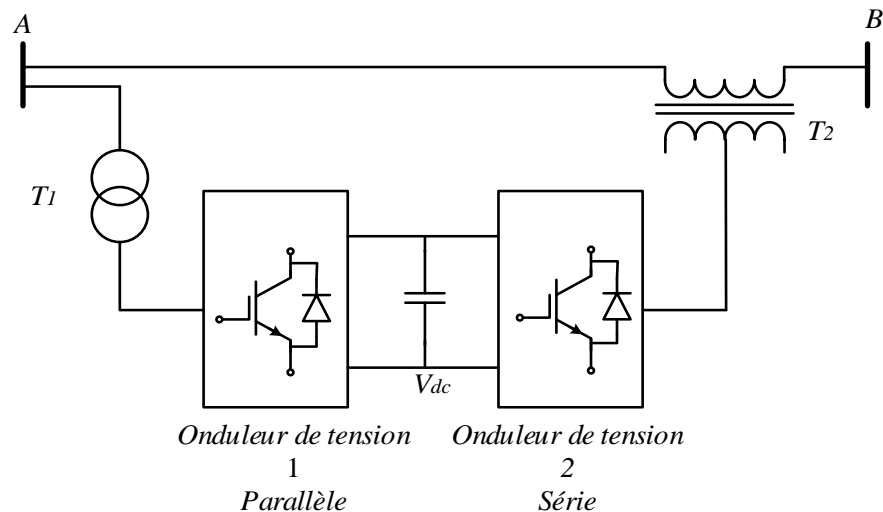


Figure (I.9) : Structure d'un UPFC

Le principe de fonctionnement consiste de l'échange d'énergie entre les deux convertisseurs, par exemple, la puissance active demandée par le convertisseur série est tirée du réseau par le convertisseur shunt à travers la partie continue DC pour l'acheminée au jeu de barre "B". La tension de sortie du convertisseur série est ajoutée à la tension du jeu de barre de départ "A" pour soutenir la tension du jeu de barre "B". De ce fait l'amplitude de la tension injectée permet une régulation de la tension et la phase se détermine le mode de contrôle du flux de puissance. [4]

Dernièrement, voici le tableau (I.3) regroupant les principaux dispositifs FACTS avec leurs caractéristiques à la résolution des différents problèmes survenu au réseau électrique [10].

Tableau (I.3) : Caractéristique des FACTS à la résolution des problèmes survenu au réseau

	<i>Contrôle de Charge</i>	<i>Contrôle de Tension</i>	<i>Stabilité Transitoire</i>	<i>Amplitude des Oscillations</i>
<i>SVC</i>	+	++	+	++
<i>STATCOM</i>	+	+++	+	++
<i>TCSC</i>	++	+	+++	++
<i>SSSC</i>	+++	++	+++	++
<i>UPFC</i>	+++	+++	+++	+++

+ : Petite, ++ : moyenne, +++ : forte.

Après avoir fait un tour d'horizon des principaux dispositifs FACTS et de leurs avantages et applications d'une manière générale. Le choix dans cette étude, s'est porté sur le dispositif D-STATCOM, que nous allons détailler dans le reste de ce chapitre.

## I.8 Static Synchronous Compensator (D-STATCOM)

### I.8.1 Description

Le STATCOM (Statique Compensateur) a connu jusqu'à maintenant différentes appellations, CSERA (Compensateur statique d'énergie réactive de type avancé). ASVC (Advanced Static Var Compensator). SVG (Static Var Generator) et STATCON (Static Condenser).

Le STATCOM pour le réseau de distribution (DSTATCOM) est une version des STATCOM basés principalement sur des commutateurs IGBTs et dimensionnés pour les basses et moyennes tensions. Afin d'améliorer la qualité du courant injecté, ces dispositifs sont généralement basés sur des topologies multiniveaux [6]. Le schéma de D-STATCOM est donné par la figure (I.10).

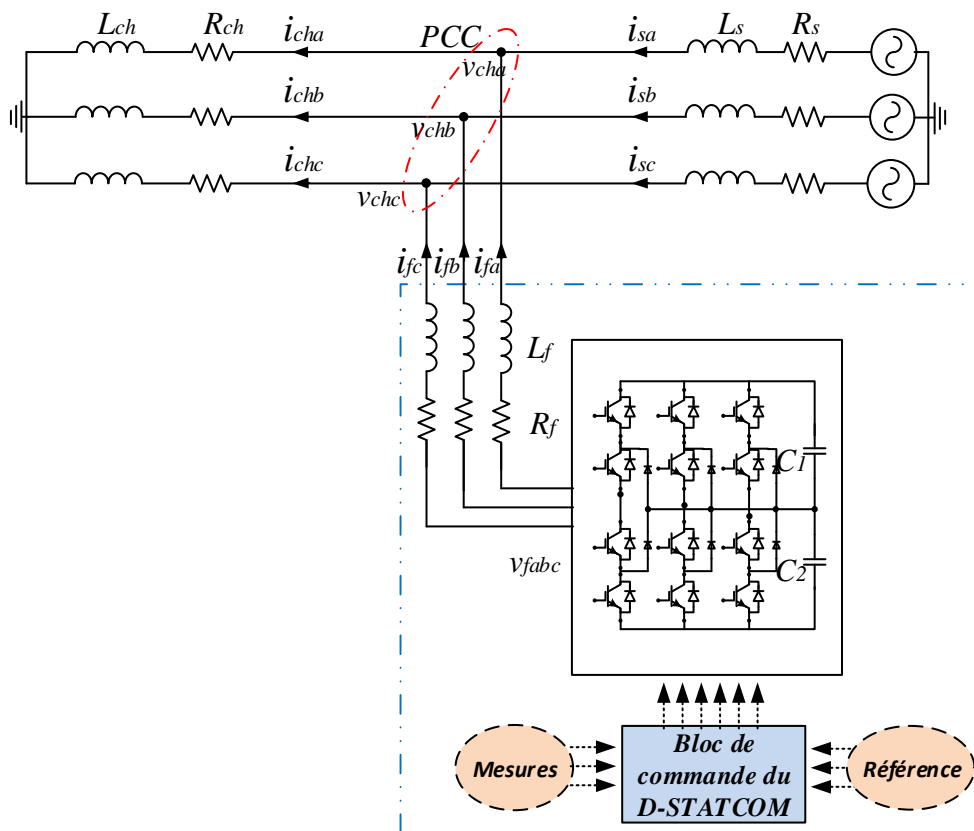


Figure (I.10) : Structure de base d'un D-STATCOM couplé au réseau

### I.8.2 Principe de fonctionnement

Le DSTATCOM est un générateur synchrone statique connecté en shunt au réseau alternatif principal près de la charge. Le DSTATCOM génère une tension alternative triphasée synchrone avec la tension de ligne provenant d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension du DSTATCOM peut être contrôlée pour ajuster la quantité d'échange de la puissance réactive avec le réseau.

La tension de sortie alternative du DSTATCOM varie en fonction de la tension du condensateur du bus continu et peut être contrôlée en variant la différence de phase entre  $v_f$  et  $v_{ch}$ .

L'objectif principal du DSTATCOM est d'obtenir des signaux de tension de sortie alternative triphasés contrôlables au point de couplage commun (PCC) pour réguler le courant réactif soit par génération ou absorption de la puissance réactive contrôlée par le système de commande [6].

Le D-STATCOM est la version des SVC composé d'un convertisseur de tension à base de semiconducteur de haute technologie associé à un condensateur comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle au réseau comme représenté dans la figure (I.10).

Dans des applications à basse puissance, la technologie d'électronique de puissance en basse tension peut être utilisée. Ainsi, on peut utiliser des fréquences de commutation plus élevées et des convertisseurs de tension à deux niveaux à base d'IGBTs conventionnels.

La figure (I.10) représente la structure de base d'un D-STATCOM couplé au réseau de distribution. Ce dispositif se compose de quatre parties principales, qui sont [14] :

- 1- Onduleur de tension : c'est le noyau du D-STATCOM, il permet de générer une tension alternative en phase avec celle du PCC (Point of Common Coupling) et totalement contrôlable en module, la différence entre ces deux tensions résulte un courant réactif injecté dans le réseau ;
- 2- Bus continu : il compose des condensateurs afin d'injecter une puissance réactive dans le réseau. La tension aux bornes de ce bus doit être maintenue constante par une faible consommation de la puissance active ;
- 3- Filtre : La modulation vectorielle utilisée pour la commande de l'onduleur donne une tension ondulée ce qui résulte un courant injecté dans le réseau riche en harmoniques, ces harmoniques influent sur la qualité de tension du réseau. Donc un filtre inductif doit être installé entre l'onduleur et le PCC pour filtrer ces harmoniques. Ce filtre peut être faible si on utilise une haute fréquence de commutation pour la SVM (Space Vector Modulation) ;

4- Bloc de commande : les contrôleurs calculent les tensions de références de l'onduleur et par conséquent les impulsions d'ouverture et de fermeture des IGBT.

Le courant injecté par le D-STATCOM est donné par:

$$\bar{i}_f = \frac{\bar{v}_f - \bar{v}_{ch}}{\bar{Z}_f} \quad (\text{I.3})$$

Où :

$$\bar{Z}_f = R_f + jX_f$$

Si on néglige l'effet résistif, l'équation (I.3) devient :

$$\bar{i}_f = \frac{\bar{v}_f - \bar{v}_{ch}}{jX_f} \quad (\text{I.4})$$

La puissance apparente injectée par le D-STATCOM au point de raccordement commun (PCC) est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{S} = \bar{v}_{ch} \bar{i}_f = \bar{v}_{ch} \left( \frac{\bar{v}_f - \bar{v}_{ch}}{jX_f} \right) = \frac{\bar{v}_{ch} \bar{v}_f - \bar{v}_{ch}^2}{jX_f} \quad (\text{I.5})$$

D'où on aboutit aux puissances active et réactive injectées par le D-STATCOM au PCC exprimées par les formules suivantes :

$$P_f = \frac{v_{ch} v_f \sin(\theta_{ch} - \theta_f)}{X_f} \quad (\text{I.6})$$

$$Q_f = \frac{-v_{ch} (v_f \cos(\theta_{ch} - \theta_f) - v_{ch})}{X_f} \quad (\text{I.7})$$

Le contrôle de l'écoulement de puissance active s'effectue avec l'angle de déphasage entre la tension de l'onduleur et la tension du PCC. Avec l'hypothèse d'un D-STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le D-STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau

$$P_f = \frac{v_{ch} v_f \sin(\theta_{ch} - \theta_f)}{X_f} = 0 \quad (\text{I.8})$$

$$\Rightarrow \theta_{ch} = \theta_f = \theta$$

D'après cette condition la tension injectée par le DSTATCOM  $v_f$  doit être en phase avec la tension  $v_{ch}$  du PCC. En pratique, il y a habituellement une petite quantité de puissance active qui est prélevée sur le réseau pour couvrir les pertes de commutation du convertisseur du DSTATCOM et maintenir constante la tension continue aux bornes du condensateur [6] [10].

L'équation de puissance active devient :

$$P_f = 0$$

Et l'équation de puissance réactive devient :

$$Q_f = \frac{v_{ch}^2}{X_f} \left( 1 - \frac{v_f}{v_{ch}} \right) \quad (I.9)$$

A partir de l'équation (I.9), l'échange de puissance réactive entre l'onduleur et le réseau est contrôlé par l'amplitude de la tension produite à la sortie de l'onduleur. On distingue trois cas possibles [10] :

- **Mode de fonctionnement capacitif :**

Lorsque  $v_f > v_{ch}$ , le DSTATCOM agit comme une capacité et injecte une puissance réactive au réseau.

- **Mode de fonctionnement inductif :**

Quand  $v_f < v_{ch}$ , le DSTATCOM agit comme une inductance et absorbe une puissance réactive du réseau.

- **Mode de fonctionnement en veille :**

Quand  $v_f = v_{ch}$ , le DSTATCOM fonctionne en mode veille ; il n'y a pas de puissance réactive injectée ou absorbée par le DSTATCOM.

## I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dressé d'une manière générale l'état de l'art des dispositifs FACTS avec leurs différentes configurations (série, shunt et hybride) permettent de donner des solutions en tenant compte des différentes contraintes, notamment, l'amélioration du contrôle du transit de puissance dans les réseaux, ensuite nous avons focalisé sur le dispositif D-STATCOM constitué principalement par un onduleur de tension, un bus continu, un filtre RL et un bloc de commande. Le mode de fonctionnement du D-STATCOM est attaché à la puissance réactive échangé avec le réseau; il est inductif si la puissance est positive où capacitif dans le cas inverse.

## *Chapitre II*

# *Modélisation et modulation des convertisseurs multiniveaux*

### **II.1 Introduction**

La technologie de conversion de l'énergie du continu vers l'alternatif en utilisant Les convertisseurs statiques est une partie de l'électronique de puissance en pleine croissance. Cela tient essentiellement d'une part aux progrès technologiques réalisés ces dernières années dans le domaine de l'électronique de puissance et d'autre part l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) [17], ainsi que les progrès réalisés dans le domaine de la micro-informatique.

Il existe principalement trois topologies d'onduleurs multiniveaux à savoir les onduleurs à diodes flottantes, les onduleurs à capacités flottantes et les onduleurs en cascade [18, 19]. L'onduleur à diodes flottantes est celui qui attire le plus d'attention, vu la simplicité de sa structure par rapport à l'onduleur à capacités flottantes, en effet on n'a pas besoin d'utiliser des

capacités pour chaque phase, ce qui élimine les risques des résonances parasites [18,19]. Néanmoins, le problème d'équilibrage des tensions aux bornes des capacités de source continue est fortement posé. La solution de ce problème est plus simple dans le cas de l'onduleur à diodes flottantes par rapport au cas de l'onduleur à capacités flottantes, vu le nombre réduit des capacités utilisées [20]. Dans la suite de ce travail, on se limite à l'étude de l'onduleur multiniveaux à diodes flottantes.

Ce chapitre comportera deux parties essentielles. La première partie sera consacrée à la modélisation de l'onduleur de tension à diodes flottantes à trois niveaux, ainsi que sa modulation vectorielle. La seconde partie traitera le problème du déséquilibre des tensions continues aux bornes des condensateurs.

## II.2 Histoire des composants de l'électronique de puissance

Les éléments semi-conducteurs utilisés dans la conversion électrique de puissance peuvent être classifiés dans deux grandes technologies :

- La technologie des transistors ou bien la technologie des éléments à commutation par tension (voltage switched technology) ;
- La technologie des thyristors ou bien la technologie des éléments à commutation par courant (current switched technology).

La figure (II.1) montre le chronogramme de l'évolution des composants de puissance. Ainsi, on a vu apparaître la diode puis le thyristor classique aux alentours de l'année 1960. La technologie des transistors allait voir le jour vers la moitié des années 70. Avec l'avènement de la microélectronique, ces éléments ont été améliorés et on a vu naître ainsi le GTO et l'IGBT basse tension. Dès lors les recherches ont été très pointues et on a vu naître l'IGCT et SGCT de la famille des thyristors et l'IGBT moyenne tension et l'IEGT de la famille des transistors. [16]

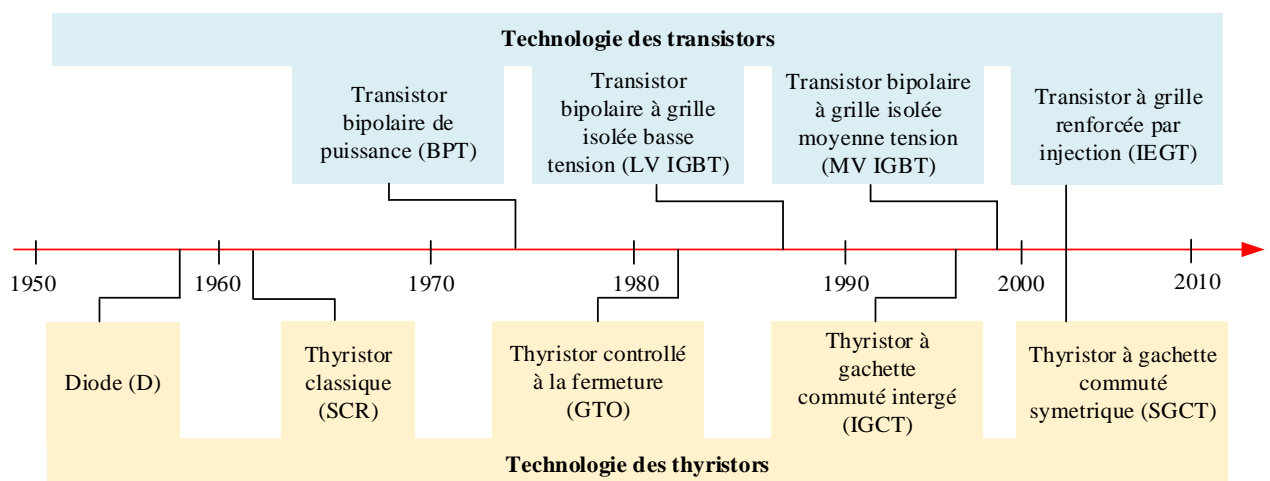


Figure II.1 Évolution des composants semi-conducteurs de puissance.

### II.3 Principales topologies des convertisseurs multiniveaux

Les convertisseurs de tension multi niveaux peuvent être implantés de différentes manières, dans lesquelles la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux. Pour cela, il y a lieu de présenter une brève synthèse des principales topologies des convertisseurs multi niveaux, lesquelles se résument comme suites :

#### II.3.1 Convertisseur en cascade

La structure de l'onduleur en cascade est présentée à la figure (II.2). Elle consiste à mettre en cascade, pour chaque phase, plusieurs onduleurs monophasés à deux niveaux, alimentés par des sources continues séparées. L'inconvénient de cette topologie est la nécessité d'isolation des sources continues des trois phases, ainsi que le nombre élevé des composants utilisés [17].

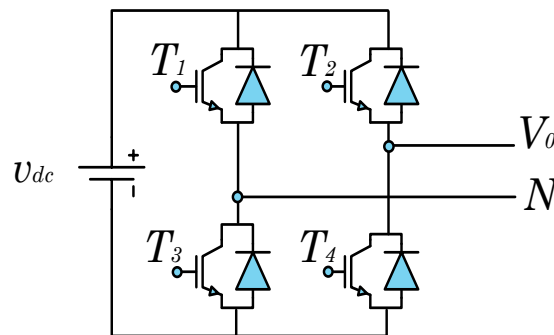
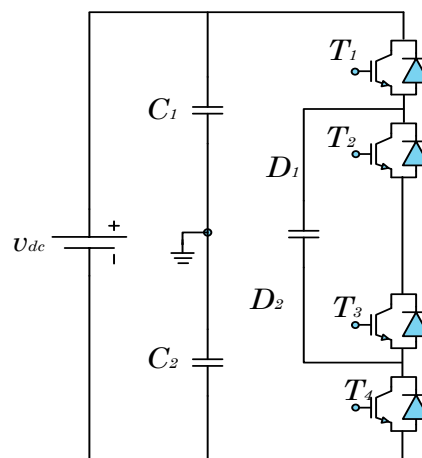


Figure (II.2): Convertisseur en cascade.

#### II.3.2 Convertisseur à capacités flottantes

La topologie d'un onduleur multiniveaux à capacités flottantes est présentée à la figure (II.3). Les interrupteurs de chaque phase sont reliés par des condensateurs pour pouvoir appliquer différents niveaux de tension à la sortie. Cet onduleur a l'avantage d'utiliser un nombre plus réduit des composants. En plus, il présente le risque d'avoir une résonance parasite entre les différentes capacités [18]



Figure(II.3): Convertisseur à capacités flottantes.

### II.3.3 Convertisseur à diodes flottantes

L'onduleur à diodes flottante est plus connu par son nom en anglais Diode-Clamped Inverter (DCI). Cet onduleur a été aussi appelé onduleur clampé par le neutre (Neutral Point Clamped, NPC, en anglais), lorsqu'il était utilisé pour la première fois dans la topologie à trois niveaux, dans laquelle le niveau de tension du point milieu était le point neutre [19]. La structure de ce type d'onduleurs est présentée sur la figure (II.4). Dans cette structure, on associe à chaque phase des diodes appelées diodes flottantes, qui sert à appliquer les différents niveaux de tension de la source continue.

Le principal avantage réside dans une réduction considérable des pertes de commutation et de sa capacité à contrôler le contenu harmonique [20]. Les points négatifs sont le grand nombre de diodes flottantes requis et la difficulté de maintenir l'équilibre des tensions aux bornes des condensateurs.

Actuellement l'onduleur à diodes flottantes est celui qui attire le plus d'attention, vu la simplicité de sa structure par rapport aux onduleurs à capacités flottantes et en cascade. En effet par rapport à l'onduleur à capacités flottantes on n'a pas besoin d'utiliser des capacités pour chaque phase, ce qui élimine les risques des résonances parasites [21]. Par rapport à l'onduleur en cascade on n'a pas besoin des sources continues isolées.

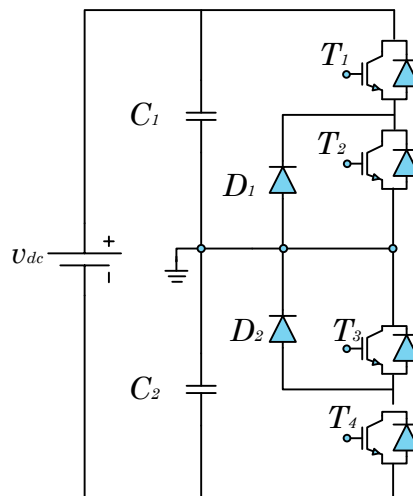


Figure (II.4): Convertisseur à diodes flottantes.

### II.4 Types des commandes des convertisseur multiniveaux

La forme de la tension de sortie dépend également de la méthode utilisée pour la commande de l'onduleur. Généralement on utilise des commandes par modulation de largeurs d'impulsions (MLI). On rencontre plusieurs stratégies de ce type de commande, telles que :

- La modulation triangulo-sinusoidale ;
- La modulation par hystérésis ;
- La modulation vectorielle.

### II.4.1 MLI sinusoïdale

La technique de commande par MLI sinusoïdale résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. Cette technique de commande est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [22]. Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- 1- L'indice de modulation ( $m$ ) égal au rapport de la fréquence de modulation ( $f_p$ ) sur la fréquence de référence ( $f$ ), ( $m = f_p/f$ ),
- 2- Le coefficient de réglage en tension ( $r$ ) égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $v_{ref}$ ) à la valeur crête de l'onde de modulation ( $v_{pm}$ ), ( $r = v_{ref}/v_{pm}$ ).

### II.4.2 MLI par hystérésis

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation, de manière à rester à l'intérieur de la bande [23].

L'avantage principal de cette méthode est la simplicité de mise en œuvre, tandis que la fréquence de commutation variable qu'on ne peut pas maîtriser correctement peut être son majeur inconvénient. Cette fréquence variable rend le filtrage à la sortie difficile. Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée, à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis. De plus, le fonctionnement avec une fréquence de commutation quasi fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis.

### II.4.3 MLI vectorielle

Le concept de la MLI vectorielle, couramment désigné par (*Space Vector Modulation SVM*), consiste à traiter les signaux directement dans le plan biphasé  $\alpha$ - $\beta$ , en supposant que l'analyse se situe dans le cadre d'une commande numérique et qu'un algorithme de régulation a déjà déterminé les composantes du vecteur de référence. Cependant, l'onduleur ne peut fournir de façon exacte et instantanée que les vecteurs de tensions distribués sur le diagramme vectoriel.

La modulation vectorielle est reconnue comme étant la plus performante et la plus utilisée. L'algorithme de cette modulation devient de plus en plus compliqué lors de son application sur les onduleurs multiniveaux. Cette technique présente des avantages par rapport au reste des techniques de modulation lesquelles se résument comme suites : [24] :

- La modulation est valable pour tous les types des onduleurs multiniveaux ;
- Elle contrôle directement les trois phases de l'onduleur ;
- Elle peut augmenter la valeur maximale de la tension de sortie de l'onduleur avec un taux de distorsion harmonique réduit par rapport à ceux obtenus par la méthode MLI sinusoïdale ;
- Une bonne utilisation de la tension du bus continu est atteinte car le troisième harmonique est introduit implicitement ;
- Le courant de sortie à une ondulation très réduite ;
- Les vecteurs redondants fournissent un degré de liberté additionnel. Ceci permet l'incorporation des fonctions complémentaires comme par exemple l'équilibrage de la tension du bus continu, la minimisation des pertes, et la réduction d'harmoniques ;
- L'implantation physique est relativement simple avec un processeur de signaux numériques.

## II.5 Modélisation de l'onduleur trois niveaux

### II.5.1 Structure générale

La figure (II.5) représente la structure de convertisseur à diodes flottantes à trois niveaux introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981 [18]

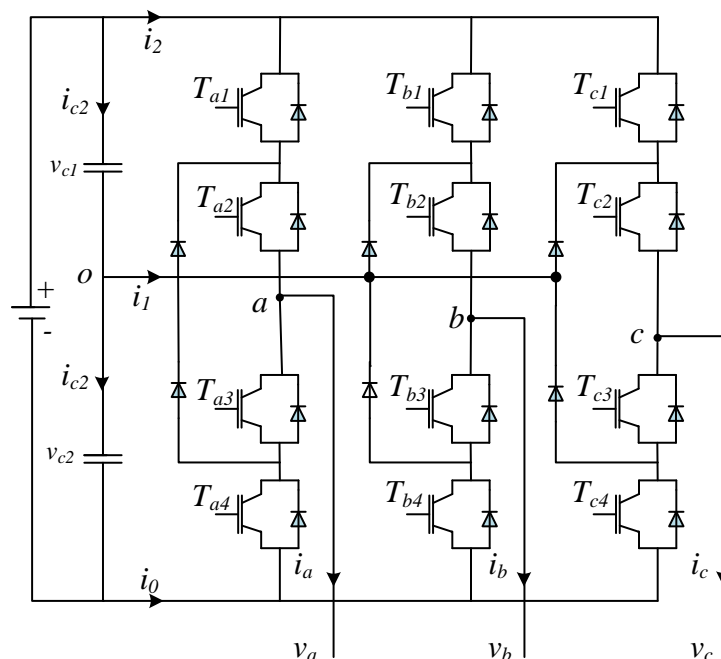


Figure (II.5): Convertisseur triphasé à trois niveaux à diodes flottantes

La structure se compose de trois bras symétriques constitués chacun de quatre interrupteurs totalement commandables. Ces interrupteurs ne doivent pas être ouverts ou fermés simultanément, afin d'éviter le court-circuit de la source continue à l'entrée de l'onduleur, ou

l'ouverture du circuit inductif de sa charge. Chaque interrupteur est composé d'un transistor en antiparallèle avec une diode.

Les diodes flottantes assurent l'application des différents niveaux de tension à la sortie de chaque bras. La tension d'entrée continue est divisée en deux parties égales en utilisant deux condensateurs permettant de créer un ensemble d'un point milieu capacitifs [25]. L'ensemble des condensateurs correspondants à la valeur total du bus continu  $v_{dc}$ . Chaque condensateur doit être dimensionné pour une tension égale à  $v_{dc}/2$ .

### II.5.1.1 Fonctions de commutation

La fonction de commutation de chaque interrupteur  $T_{xi}$ , est associé à une fonction de connexion  $F_{xi}$  tel que :

$$\begin{cases} F_{xi} = 1 & \text{si } T_{xi} \text{ est Fermé} \\ F_{xi} = 0 & \text{si } T_{xi} \text{ est Ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Avec  $x = a, b, c$  : indicateur de phase ;  $i = 1, 2$  : numéro de l'interrupteur du bras  $x$

### II.5.1.2 Commande complémentaire des interrupteurs

Afin d'éviter la fermeture et l'ouverture simultanée des deux interrupteurs du même bras, qui peut provoquer la détérioration du condensateur et des composants semi-conducteurs, il est indispensable de réaliser la commande complémentaires suivantes :

$$F_{x(j+2)} = \bar{F}_{xj} = 1 - F_{xj} \quad (\text{II.2})$$

### II.5.1.3 Etats d'un bras de l'onduleur

En mode commandable, chaque bras de l'onduleur a trois états possibles.

- **Etat 2** : Les deux interrupteurs du demi-bras supérieur  $T_{x1}$  et  $T_{x2}$  sont fermés, tandis que les deux interrupteurs du demi-bras inférieur  $T_{x3}$  et  $T_{x4}$  sont ouverts. La tension de sortie du bras par rapport au point  $o$  est alors  $v_{c2}$ .
- **Etat 1** : Les deux interrupteurs  $T_{x2}$  et  $T_{x3}$  sont fermés, tandis que les deux interrupteurs  $T_{x1}$  et  $T_{x4}$  sont ouverts. La tension de sortie du bras par rapport au point  $o$  est  $0$ .
- **Etat 0** : Les deux interrupteurs du demi-bras inférieur  $T_{x3}$  et  $T_{x4}$  sont fermés, tandis que les quatre interrupteurs du demi-bras supérieur  $T_{x1}$ ,  $T_{x2}$  sont ouverts. La tension de sortie du bras par rapport au point  $o$  est alors  $-v_{c1}$ .

La correspondance entre les états du bras, les états des interrupteurs et la tension de sortie est résumée au tableau II.1

Tableau (II.1): Etats d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.

Etats de commutation	Etat des interrupteurs d'un bras				Tension de sortie $v_{xo}$
	$T_{x1}$	$T_{x2}$	$T_{x3}$	$T_{x4}$	
2	1	1	0	0	$v_{c2}$
1	0	1	1	0	0
0	0	0	1	1	$-v_{c1}$

Nous définissons pour chaque état  $h$  du bras  $x$  une fonction de connexion. Elle est notée  $F_x^h$  et s'exprime au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_x^2 = F_{x1} F_{x2} \\ F_x^1 = F_{x2} F_{x3} \\ F_x^0 = F_{x3} F_{x4} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

#### II.5.1.4 Tension de sortie

Les tensions de sortie par rapport au point neutre de la source continue ( $o$ ) sont exprimées Par :

$$v_{xo} = \begin{cases} v_c & \text{si } F_x^2 = 1 \\ 0 & \text{si } F_x^1 = 1 \\ -v_c & \text{si } F_x^0 = 1 \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

L'équation (II.4) peut s'écrire à la forme suivante :

$$v_{xo} = v_c (F_x^2 - F_x^0) \quad (\text{II.5})$$

Et pour les tensions phases –point milieu  $v_{ao}$ ,  $v_{bo}$  et  $v_{co}$  on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = v_c \begin{bmatrix} F_a^2 - F_a^0 \\ F_b^2 - F_b^0 \\ F_c^2 - F_c^0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Les tensions composées entre les phases de la charge sont :

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ao} - v_{bo} \\ v_{bo} - v_{co} \\ v_{co} - v_{ao} \end{bmatrix} = v_c \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (F_a^2 - F_a^0) \\ (F_b^2 - F_b^0) \\ (F_c^2 - F_c^0) \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Les tensions simple aux bornes de la charge seront données, en fonction des tensions composées ensuite en fonctions des tensions phases points milieu, par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{ab} - v_{ca} \\ v_{bc} - v_{ab} \\ v_{ca} - v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

A partir des équations (II.6) et (II.8), nous obtenons le système matriciel donnant l'expression des tensions simples aux bornes de la charge en fonction des fonctions de connexions

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{v_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (F_a^2 - F_a^0) \\ (F_b^2 - F_b^0) \\ (F_c^2 - F_c^0) \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

La forme complexes de la tension de sortie est donnée par :

$$v = v_a e^{j0} + v_b e^{-j2\pi/3} + v_c e^{j2\pi/3} \quad (\text{II.10})$$

On effectue le passage du plan triphasé au plan biphasé, par la transformation de concordia, on peut présenter le vecteur  $v$  dans un espace à deux dimensions stationnaire  $(\alpha, \beta)$  par :

$$v = v_\alpha + jv_\beta \quad (\text{II.11})$$

Où,  $v_\alpha$  et  $v_\beta$  sont les projections du vecteur  $v$  dans le système stationnaire  $(\alpha, \beta)$  données par :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

La relation (II.12) en fonction des fonctions de connexion devient :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{1}{6}} v_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (F_a^2 - F_a^0) \\ (F_b^2 - F_b^0) \\ (F_c^2 - F_c^0) \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

### II.5.1.5 Représentation vectoriel

Le tableau (II.2) représente les différents états de l'onduleur à trois niveaux et les coordonnées du vecteur de tension de sortie  $v$  correspondant à chaque état.

Tableau (II.2) : Etats de l'onduleur à trois niveaux et les coordonnées du vecteur  $v_i$  dans le plan ( $\alpha\beta$ )

Etat de l'onduleur	$v_{ai}$	$v_{\beta i}$	$v_i$
<b>222, 111, 000</b>	0	0	$v_0^a, v_0^b, v_0^c$
<b>211, 100</b>	$\sqrt{1/6}v_{dc}$	0	$v_1^a, v_1^b$
<b>200</b>	$\sqrt{2/3}v_{dc}$	0	$v_2$
<b>210</b>	$\sqrt{3/8}v_{dc}$	$\sqrt{1/8}v_{dc}$	$v_3$
<b>221, 110</b>	$\sqrt{1/24}v_{dc}$	$\sqrt{1/8}v_{dc}$	$v_4^a, v_4^b$
<b>220</b>	$\sqrt{1/6}v_{dc}$	$\sqrt{1/2}v_{dc}$	$v_5$
<b>120</b>	0	$\sqrt{1/2}v_{dc}$	$v_6$
<b>121, 010</b>	$-\sqrt{1/24}v_{dc}$	$\sqrt{1/8}v_{dc}$	$v_7^a, v_7^b$
<b>020</b>	$-\sqrt{1/6}v_{dc}$	$\sqrt{1/2}v_{dc}$	$v_8$
<b>021</b>	$-\sqrt{3/8}v_{dc}$	$\sqrt{1/8}v_{dc}$	$v_9$
<b>122, 011</b>	$-\sqrt{1/6}v_{dc}$	0	$v_{10}^a, v_{10}^b$
<b>022</b>	$-\sqrt{2/3}v_{dc}$	0	$v_{11}$
<b>012</b>	$-\sqrt{3/8}v_{dc}$	$-\sqrt{1/8}v_{dc}$	$v_{12}$
<b>112, 001</b>	$-\sqrt{1/24}v_{dc}$	$-\sqrt{1/8}v_{dc}$	$v_{13}^a, v_{13}^b$
<b>002</b>	$-\sqrt{1/6}v_{dc}$	$-\sqrt{1/2}v_{dc}$	$v_{14}$
<b>102</b>	0	$-\sqrt{1/2}v_{dc}$	$v_{15}$
<b>212, 101</b>	$\sqrt{1/24}v_{dc}$	$-\sqrt{1/8}v_{dc}$	$v_{16}^a, v_{16}^b$
<b>202</b>	$\sqrt{1/6}v_{dc}$	$-\sqrt{1/2}v_{dc}$	$v_{17}$
<b>201</b>	$-\sqrt{3/8}v_{dc}$	$-\sqrt{1/8}v_{dc}$	$v_{18}$

L'onduleur à trois niveaux possède 27 états, identifiés par la combinaison des états des trois bras. Ces vecteurs peuvent prendre plusieurs positions dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  distribuées sur deux hexagones, centré à l'origine. Les positions discrètes du vecteur tension  $v^*$  divise le diagramme vectoriel en six secteurs triangulaires. Chaque secteur est composé de quatre régions triangulaires, donnant ainsi dans la totalité du diagramme vectoriel à 24 régions, les sommets de ces secteurs triangulaires étant l'origine du diagramme vectoriel, comme montre la figure (II.6).

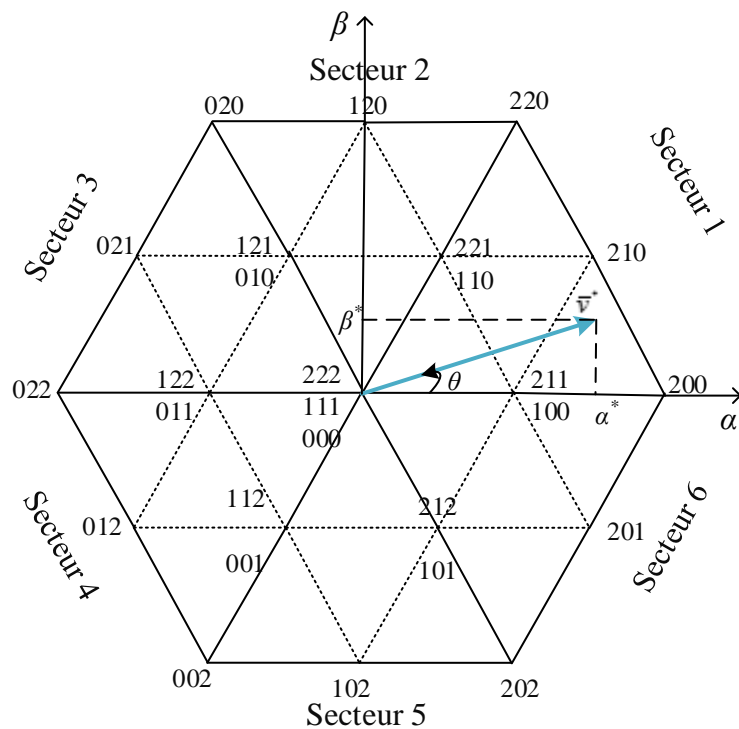


Figure (II.6): Diagramme vectoriel de l'onduleur à trois niveaux.

### II.5.1.5 SVM de l'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes

La modélisation de l'onduleur de tension à trois niveaux a montré que pour les différentes combinaisons de commande, l'onduleur peut générer seulement 27 vecteurs de tension dans le plan  $(\alpha\beta)$ , dont trois sont nuls. On ne peut réaliser une tension quelconque qu'en valeur moyenne et sur une période de hachage  $T_s$ . Il faut donc appliquer des vecteurs de tension réalisables pendant des durées adéquates sur cet intervalle  $T_s$ . Afin de minimiser les ondulations de tensions, et par voie de conséquence les harmoniques, on admet qu'il faut réaliser  $(v_a^*, v_\beta^*)$  avec les deux vecteurs de tension les plus proches [25].

Dans le repère stationnaire  $\alpha$ - $\beta$ , le vecteur  $v^*$  s'écrit :

$$\bar{v}^* = v_\alpha^* + jv_\beta^* = v^* e^{j\theta} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$v_\alpha^*, v_\beta^*$  : Composantes du vecteur  $\bar{v}^*$  dans le plan  $\alpha$ - $\beta$  ;

$v^*$  : Module de vecteur  $\bar{v}^*$  ;

$\theta$  : Position angulaire du vecteur  $\bar{v}^*$  .

Le vecteur  $\bar{v}^*$  tourne dans le plan  $\alpha$ - $\beta$  avec une vitesse angulaire égale à la pulsation des tensions  $v_a^*, v_b^*$  et  $v_c^*$ . Sur le diagramme de la figure (II.6), le vecteur de référence est repéré par sa position arbitraire  $\theta$ .

### II.5.1.6 Détermination de la localisation du vecteur tension de référence

La localisation du vecteur tension de référence est déterminée en deux étapes [26] :

- La première étape détermine le numéro de secteur où le vecteur se trouve ;
- La deuxième étape détermine le triangle dans lequel le vecteur se situe.

#### II.5.1.6. a) Première étape : Détermination du secteur

Le module du vecteur tension de référence et sa position sont donnés par :

$$\begin{cases} v^* = \sqrt{v_{\alpha}^{*2} + v_{\beta}^{*2}} \\ \theta = \tan^{-1} \left( \frac{v_{\beta}^*}{v_{\alpha}^*} \right) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Où, la fonction  $\tan^{-1}$  renvoie la tangente inverse dans les quatre-quadrants du cercle trigonométrique. Une fois la valeur de  $\theta$  calculée, les numéros des secteurs sont donnés par [23]:

$$S = \text{ceil} \left( \frac{\theta}{\pi/3} \right), \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \quad (\text{II.16})$$

Où, *ceil* est une fonction qui ajuste un nombre réel donné à un nombre entier supérieur adjacent.

#### II.5.1.6. b) Deuxième étape : Identification du triangle

La figure (II.7) représente les différentes régions triangulaires de l'onduleur à trois niveaux.

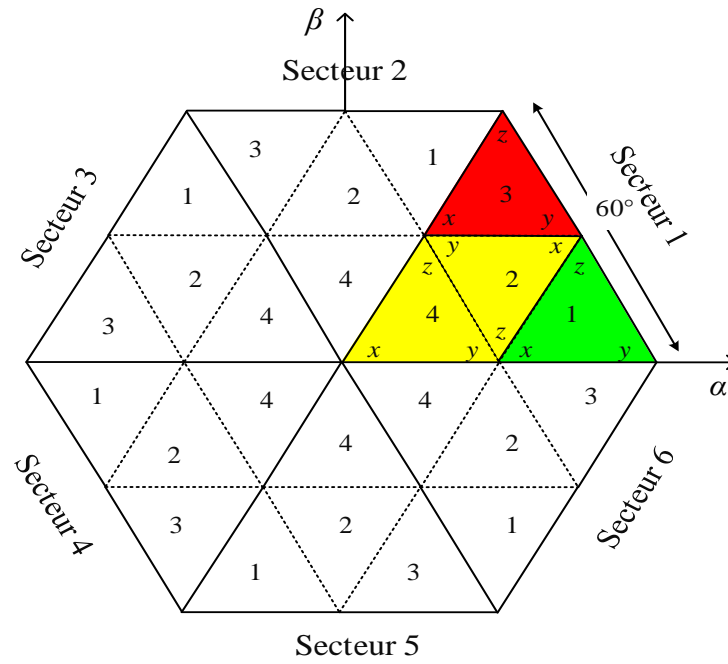


Figure (II.7): Régions triangulaires de l'onduleur à trois niveaux.

Le vecteur de référence est projeté sur les deux axes faisant  $60^\circ$  entre eux [27]. Les composantes projetées sont normalisées par l'équation (II.17) :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1^{*1} = \frac{v^* \cos(\theta) - \frac{v^*}{\sqrt{3}} \sin(\theta)}{\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{v_{dc}}{2}} \\ v_2^{*1} = \frac{\frac{2}{\sqrt{3}} v^* \sin(\theta)}{\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{v_{dc}}{2}} \end{array} \right. \quad (II.17)$$

Le taux de modulation  $M$  est donné par :

$$M = \frac{v^*}{v_{dc} \sqrt{2/3}} \quad (II.18)$$

A l'aide de (II.18), l'équation (II.17) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1^{*1} = 2M \left( \cos(\theta) - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin(\theta) \right) \\ v_2^{*1} = 2M \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\theta) \right) \end{array} \right. \quad (II.19)$$

Pour chaque secteur  $S$ , les composantes  $v_1^{*S}$  et  $v_2^{*S}$  sont données par :

$$\begin{cases} v_1^{*S} = 2M \left( \cos(\theta - (S-1)\frac{\pi}{3}) - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin(\theta - (S-1)\frac{\pi}{3}) \right) \\ v_2^{*S} = 2M \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\theta - (S-1)\frac{\pi}{3}) \right) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Afin de déterminer le numéro du triangle dans un secteur  $S$ , les deux entiers suivants sont à définir :

$$\begin{cases} I_1^{*S} = \text{int}(v_1^{*S}) \\ I_2^{*S} = \text{int}(v_2^{*S}) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Où, *int* est une fonction qui donne la partie entière d'un nombre réel donné.

La figure (II.8) représente la projection de  $v^*$  dans le premier secteur :

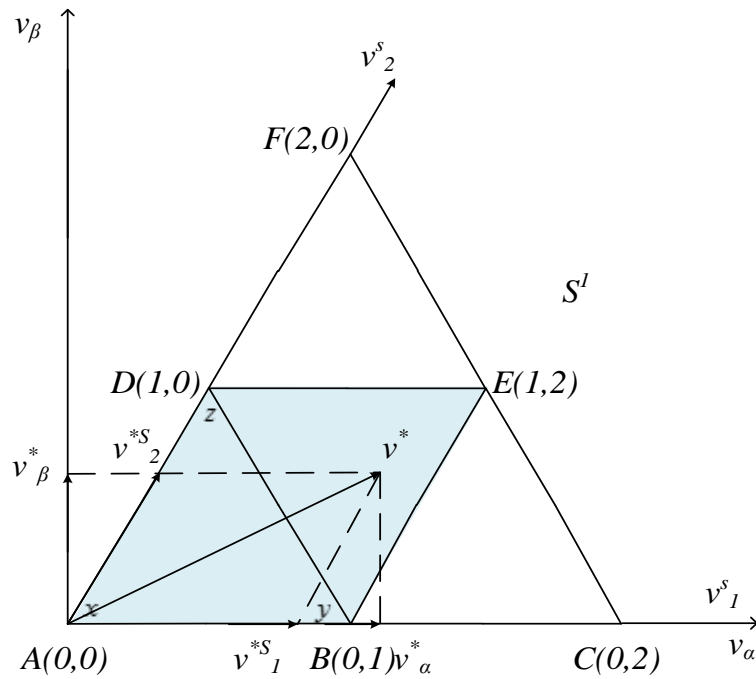


Figure (II.8): Diagramme vectoriel de l'onduleur à trois niveaux dans le premier secteur.

Dans un repère formé par les deux vecteurs  $v_1^{*S}$  et  $v_2^{*S}$  les coordonnées des sommets  $A$ ,  $B$ ,  $D$  et  $E$  sont données par :

$$\begin{cases} \left( v_{A_1}^{\Delta_q^S}, v_{A_2}^{\Delta_q^S} \right) = \left( l_1^S, l_2^S \right) \\ \left( v_{B_1}^{\Delta_q^S}, v_{B_2}^{\Delta_q^S} \right) = \left( l_1^S + 1, l_2^S \right) \\ \left( v_{D_1}^{\Delta_q^S}, v_{D_2}^{\Delta_q^S} \right) = \left( l_1^S, l_2^S + 1 \right) \\ \left( v_{E_1}^{\Delta_q^S}, v_{E_2}^{\Delta_q^S} \right) = \left( l_1^S + 1, l_2^S + 1 \right) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Où,  $q \in \{1, \dots, 4\}$

Les coordonnées des différents sommets pour le secteur  $S^1$  sont données par le tableau (II.3).

Tableau (II.3): Coordonnées des sommets des triangles pour le premier secteur de l'onduleur à trois niveaux

<i>Sommet</i>	<i>Coordonnées</i>	<i>Sommet</i>	<i>Coordonnées</i>
<b>A</b>	$(v_{A_1}^{\Delta_q^S}, v_{A_2}^{\Delta_q^S}) = (0, 0)$	<b>D</b>	$(v_{D_1}^{\Delta_q^S}, v_{D_2}^{\Delta_q^S}) = (0, 1)$
<b>B</b>	$(v_{B_1}^{\Delta_q^S}, v_{B_2}^{\Delta_q^S}) = (1, 0)$	<b>E</b>	$(v_{E_1}^{\Delta_q^S}, v_{E_2}^{\Delta_q^S}) = (1, 2)$
<b>C</b>	$(v_{C_1}^{\Delta_q^S}, v_{C_2}^{\Delta_q^S}) = (2, 0)$	<b>F</b>	$(v_{F_1}^{\Delta_q^S}, v_{F_2}^{\Delta_q^S}) = (0, 2)$

A partir de l'équation (II.22), si le vecteur de référence se situe dans le parallélogramme constitué par les sommets  $A, B, E$  et  $D$ , comme le montre la figure (II.8), les deux entiers  $l_1^S$  et  $l_2^S$  doivent vérifier la condition suivante :

$$\begin{cases} l_1^S = 1 \\ l_2^S = 1 \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Pour savoir si le vecteur de référence est situé dans le triangle formé par les sommets  $A, B$  et  $D$ , ou dans celui formé par les sommets  $B, E$  et  $D$ , les deux conditions suivantes sont à vérifier :

$v^*$  est dans le triangle numéro 4 ( $ABD$ ) si :

$$v_1^{*S} + v_2^{*S} < l_1^S + l_2^S + 1 \quad (\text{II.24})$$

$v^*$  est dans le triangle numéro 2 ( $BED$ ) si :

$$v_1^{*S} + v_2^{*S} \geq l_1^S + l_2^S + 1 \quad (\text{II.25})$$

Le tableau (II.4) montre l'identification des autres triangles formant un secteur donné  $S$ .

Tableau (II.4): Identification des différents triangles du secteur  $S$  de l'onduleur à trois niveaux.

$l_1^S$	$l_2^S$	$\Delta_q^S (q \in \{1, \dots, 4\})$
<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta_4^S$ Si $(v_1^{*S} + v_2^{*S} < 1)$
<b>1</b>	<b>0</b>	$\Delta_2^S$ Si $(v_1^{*S} + v_2^{*S} \geq 1)$
<b>0</b>	<b>1</b>	$\Delta_1^S$
		$\Delta_3^S$

### II.5.1.7 Calcul des temps d'application

Si le vecteur de référence se trouve dans le triangle 4 il peut être alors reconstitué à partir des trois vecteurs adjacents  $v_x^{\Delta_4^S}$ ,  $v_y^{\Delta_4^S}$  et  $v_z^{\Delta_4^S}$  en utilisant la relation suivante :

$$\frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} v^* dt = \frac{1}{T_s} \left( \int_t^{t+t_x^{\Delta_4^S}} v_x^{\Delta_4^S} dt + \int_{t+t_x^{\Delta_4^S}}^{t+t_x^{\Delta_4^S}+t_y^{\Delta_4^S}} v_y^{\Delta_4^S} dt + \int_{t+t_x^{\Delta_4^S}+t_y^{\Delta_4^S}}^{t+T_s} v_z^{\Delta_4^S} dt \right) \quad (\text{II.26})$$

Pour une période de commutation  $T_s$  très faible on peut admettre que la référence est constante ce qui conduit à :

$$\begin{cases} v_x^{\Delta_4^S} t_x^{\Delta_4^S} + v_y^{\Delta_4^S} t_y^{\Delta_4^S} + v_z^{\Delta_4^S} t_z^{\Delta_4^S} = v^* T_s \\ t_x^{\Delta_4^S} + t_y^{\Delta_4^S} + t_z^{\Delta_4^S} = T_s \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

La projection de (II.27) dans le repère formé par les deux axes faisant  $60^\circ$  entre eux, conduit à

$$\begin{cases} v_{x1}^{\Delta_4^S} t_x^{\Delta_4^S} + v_{y1}^{\Delta_4^S} t_y^{\Delta_4^S} + v_{z1}^{\Delta_4^S} t_z^{\Delta_4^S} = v_1^* T_s \\ v_{x2}^{\Delta_4^S} t_x^{\Delta_4^S} + v_{y2}^{\Delta_4^S} t_y^{\Delta_4^S} + v_{z2}^{\Delta_4^S} t_z^{\Delta_4^S} = v_2^* T_s \\ t_x^{\Delta_4^S} + t_y^{\Delta_4^S} + t_z^{\Delta_4^S} = T_s \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Le calcul de :  $t_x^{\Delta_4^S}$ ,  $t_y^{\Delta_4^S}$ , et  $t_z^{\Delta_4^S}$  nécessite la substitution des coordonnées des vecteurs  $v_x^{\Delta_4^S}$ ,  $v_y^{\Delta_4^S}$ , et  $v_z^{\Delta_4^S}$  données par (II.22) dans (II.28). Dans le cas où les sommets  $x$ ,  $y$ ,  $z$  correspondant  $A$ ,  $B$ ,  $D$ , respectivement, les temps d'application sont calculés par :

$$\begin{cases} t_y^{\Delta_1^S} = (v_1^{*S} - l_1^S) T_s \\ t_z^{\Delta_1^S} = (v_2^{*S} - l_2^S) T_s \\ t_x^{\Delta_1^S} = T_s - (t_y^{\Delta_1^S} + t_z^{\Delta_1^S}) \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Les expressions analytiques des temps d'application pour les différents triangles sont résumées dans le tableau (II.5). Ces expressions sont valables quelque soit le secteur contenant le vecteur de référence.

Tableau (II.5): Temps d'application des vecteurs adjacents dans les différents triangles du secteur  $S$ .

Numéro du triangle	Temps d'application		
	$t_x^{\Delta_q^S}$	$t_y^{\Delta_q^S}$	$t_z^{\Delta_q^S}$
$\Delta_1^S = (x, y, z)$			
$\Delta_1^S = (B, C, E)$		$(v_1^{*S} - 1)T_s$	$v_2^{*S}T_s$
$\Delta_2^S = (E, D, B)$	$T_s - t_y^{\Delta_q^S} - t_z^{\Delta_q^S}$	$(1 - v_1^{*S})T_s$	$(1 - v_2^{*S})T_s$
$\Delta_3^S = (D, E, F)$		$v_2^{*S}T_s$	$(v_2^{*S} - 1)T_s$
$\Delta_4^S = (A, B, D)$		$v_1^{*S}T_s$	$v_2^{*S}T_s$

### II.5.1.8 Génération des impulsions

Pendant chaque période de commutation  $T_s$  et dans chaque triangle du diagramme vectoriel, les vecteurs  $v_x^{\Delta_q^S}$ ,  $v_y^{\Delta_q^S}$ , et  $v_z^{\Delta_q^S}$  seront appliqués durant les temps d'application  $t_x^{\Delta_q^S}$ ,  $t_y^{\Delta_q^S}$ , et  $t_z^{\Delta_q^S}$  respectivement. La séquence des états et le choix entre les redondances de chaque état peuvent être effectués selon le critère de minimisation des harmoniques et des pertes.

Les séquences des états  $x$ ,  $y$  et  $z$  qui vérifient les exigences du premier critère consiste à :

- Appliquer les trois états dans un ordre donné durant la demi-période, puis dans l'ordre inverse ;
- Diviser le temps approprié à chaque état sur toutes les redondances ;
- Utiliser le même état au début et à la fin de la période de commutation.

Finalement on résume l'algorithme de la modulation vectorielle de l'onduleur multiniveaux comme suit :

- A partir des tensions de référence  $v_a^*$ ,  $v_b^*$  et  $v_c^*$ , on calcule ses composantes  $v_\alpha^*$  et  $v_\beta^*$  du vecteur tension de référence  $v^*$ , ainsi que l'angle  $\theta$  et le taux de modulation  $M$  ;
- A partir de  $\theta$  on déduit le numéro du secteur  $S$  ;

- Le taux de modulation  $M$ , l'angle  $\theta$  et le numéro du secteur  $S$  sont utilisés pour calculer les deux composantes  $v_1^{*S}$  et  $v_2^{*S}$  des axes de 60° ;
- Détermination du triangle du diagramme vectoriel contenant le vecteur de référence  $v^*$  ;
- Calcul des temps d'application des vecteurs adjacents ;
- Enfin génération des impulsions.

La figure (II.9) indique la forme des impulsions de commande des interrupteurs appartenant aux demi-bras supérieurs, sur une période de commutation  $T_s$  dans le triangle 4 du premier secteur. Les impulsions de commande des interrupteurs appartenant aux demi-bras inférieurs sont générées d'une manière complémentaire.

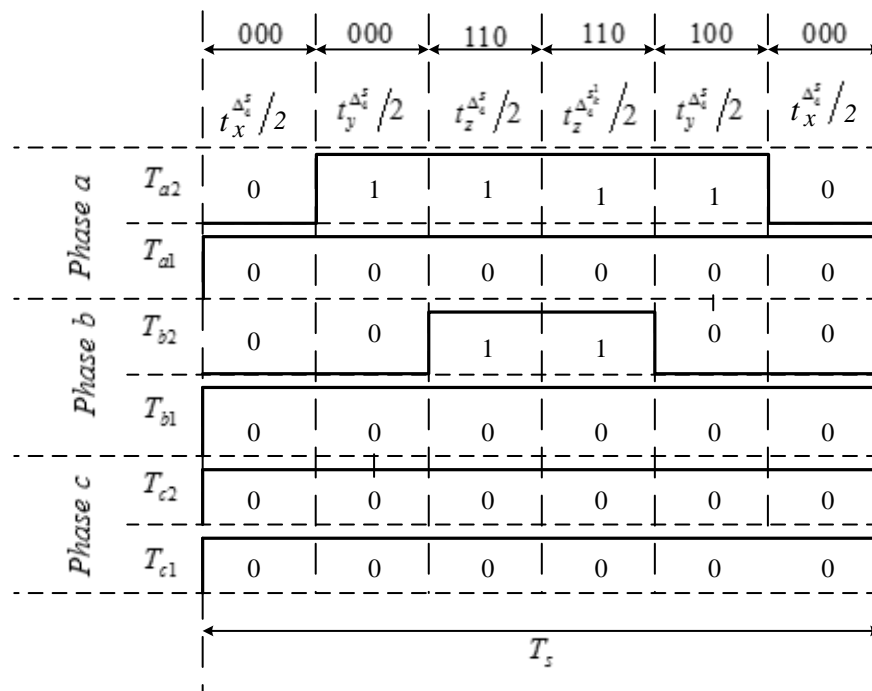


Figure (II.9): Formes des impulsions de commande des interrupteurs des demi-bras supérieurs de l'onduleur à trois niveaux pour la région  $\Delta_4^S$ .

### II.6 Problème d'équilibrage du bus continu des convertisseurs multi-niveaux

Lorsque le bus continu est composé de plusieurs condensateurs, les tensions aux bornes des différents condensateurs ne sont plus équilibrées. Cet inconvénient majeur des convertisseurs multi-niveaux qui réside dans le déséquilibre, se produit entre les tensions aux bornes des condensateurs se trouvant dans le côté continu du convertisseur et provoqué par les courants qui circulent dans ces condensateurs. Ceci se manifeste lors de la charge de certaines capacités et la décharge d'autres et par conséquent peut limiter l'utilisation d'une telle structure [32]. Alors, il est nécessaire de prévoir une technique pour assurer la stabilité de ces tensions afin d'avoir des formes d'ondes en sortie convenables.

## II.7 Equilibrage du bus continu par minimisation de l'énergie des condensateurs

L'énergie totale des 2 condensateurs est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 C_j v_{cj}^2 \quad (\text{II.30})$$

En supposant que tous les condensateurs ont des capacités égales, c-à-d.  $C_1 = C_2 = C$ , l'énergie  $E$  est minimale si toutes les tensions des condensateurs sont équilibrées [38]. En effet :

$$E_{\min} = \frac{1}{2} C \sum_{j=1}^2 \frac{v_{dc}^2}{2} \quad (\text{II.31})$$

La propriété de minimisation d'énergie peut être employée pour l'équilibrage des tensions des condensateurs. Pour cette raison, une fonction coût  $J$  est définie. Cette fonction est basée sur la somme quadratiques des écarts entre les tensions  $v_{cj}$  et leurs valeurs de référence.

$$J = \frac{1}{2} C \sum_{j=1}^2 \left( v_{cj} - \frac{v_{dc}}{2} \right)^2 \quad (\text{II.32})$$

Basé sur un choix approprié des vecteurs redondants, la fonction  $J$  peut être minimisée à zéro et les tensions des condensateurs seront maintenues à leurs valeurs de référence. La condition mathématique assurant la convergence de la fonction coût  $J$  à sa valeur minimale est donnée par :

$$\frac{dJ}{dt} = C \sum_{j=1}^2 \Delta v_{cj} \frac{dv_{cj}}{dt} \leq 0 \quad (\text{II.33})$$

Où :

$\Delta v_{cj} = v_{cj} - v_{dc}/2$  : est l'erreur de tension du condensateur  $C_j$ .

Le courant dans chaque condensateur est défini par :

$$i_{cj} = C \frac{dv_{cj}}{dt} \quad (\text{II.34})$$

A l'aide de (II.33), l'équation (II.34) devient :

$$\sum_{j=1}^2 \Delta v_{cj} i_{cj} \leq 0 \quad (\text{II.35})$$

A noter que, les courant des condensateurs  $i_{c1}$  et  $i_{c2}$  sont affectés par le courant d'entrée de l'onduleur. D'autre part, comme les courants d'entrée peuvent être calculés à partir des

vecteurs de commutation et leur temps d'application. Il est avantageux d'exprimer l'équation (II.35) en fonction des courants  $i_1^S$  [17], nous pouvons écrire :

$$i_{c2} = \sum_{k=1}^2 i_{1k}^S + i_{c1} \quad (\text{II.36})$$

La tension  $v_{dc}$  étant supposée constante, on déduit que :

$$C \sum_{j=1}^2 \frac{dv_{cj}}{dt} = \sum_{j=1}^2 i_{cj} = 0 \quad (\text{II.37})$$

A partir des équations (II.36) et (II.37), les courants des condensateurs peuvent être exprimés par :

$$\begin{cases} i_{c1} = \frac{1}{2} (i_1^S + 2i_2^S) - (i_1^S + i_2^S) \\ i_{c2} = \frac{1}{2} (i_1^S + 2i_2^S) - i_2^S \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

On peut écrire (II.38) sous la forme suivante :

$$i_{cj} = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 m(i_m^S) - \sum_{m=j}^2 (i_m^S), \text{ avec : } m = 1, 2. \quad (\text{II.39})$$

Remplaçons  $i_{cj}$  de (II.39) dans (II.35), la condition d'équilibrage des tensions devient :

$$\sum_{j=1}^2 \Delta v_{cj} \left( \frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 m(i_m^S) - \sum_{m=j}^2 (i_m^S) \right) \leq 0 \quad (\text{II.40})$$

Nous avons également :

$$\sum_{j=1}^2 \Delta v_{cj} = 0 \quad (\text{II.41})$$

En remplaçant  $\Delta v_{c2}$  de (II.41) dans (II.40), la condition d'équilibrage se réduit à :

$$\Delta v_{c1} \sum i_1^S \geq 0 \quad (\text{II.42})$$

L'application de l'opérateur moyen sur l'équation (II.42) durant une période de commutation  $T_s$  donne:

$$\frac{1}{T_s} \sum_{T_s}^{T_s+1} \Delta v_{c1} \left( \sum i_1^S \right) dt \leq 0 \quad (\text{II.43})$$

Si on admet que la période de commutation est faible devant le temps de réponse des tensions des condensateurs, les tensions des condensateurs peuvent être considérées comme des constantes [10], et par conséquent l'équation (II.51) sera simplifiée à :

$$\Delta v_{c1}(K) \frac{1}{T_s} \int_{kT_s}^{(K+1)T_s} (i_1^S) dt \geq 0 \quad (\text{II.44})$$

Alors :

$$\Delta v_{c1}(K) \bar{i}_1^S(K) dt \geq 0 \quad (\text{II.45})$$

Où :  $\Delta v_{c1}(K)$  est l'erreur de tension du condensateur  $C_1$  à l'état discret  $K$  et  $\bar{i}_1^S(K)$  est la valeur moyenne du courant d'entrée  $i_1^S$ .

Les courants  $i_1^S$  devraient être calculés pour les différentes combinaisons des états adjacents sur une période de commutation et la meilleure combinaison maximisant (II.45) est retenue.

Si le vecteur de référence se trouve dans le triangle  $\Delta_q^S$  et  $t_x^{\Delta_q^S}, t_y^{\Delta_q^S}$  et  $t_z^{\Delta_q^S}$  sont les temps d'application des vecteurs  $v_x^{\Delta_q^S}, v_y^{\Delta_q^S}$  et  $v_z^{\Delta_q^S}$  respectivement, les courants  $i_1^S$  sont exprimés par :

$$\bar{i}_k^S = \frac{1}{T_s} \begin{bmatrix} i_{1x}^S & i_{1y}^S & i_{1z}^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x^{\Delta_q^S} & t_y^{\Delta_q^S} & t_z^{\Delta_q^S} \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.46})$$

Où :  $i_{1x}^S, i_{1y}^S$  et  $i_{1z}^S$  sont les courants de charge aux états de commutation  $x, y$  et  $z$  dans le triangle  $\Delta_q^S$  minimisant la fonction coût.

## II.8 Résultats de simulation

Paramètre de simulation

- Charge inductive  $L = 20mH$   
 $R = 50\Omega$ ,
- La charge connectée à la de l'onduleur est ( $L = 20mH$  et  $R = 50\Omega$ ),
- la tension d'entrée de l'onduleur est fixée à  $v_{dc} = 800V$  divisée en égalité entre les condensateurs supposés des sources continues idéales.

Après simulation numérique nous avons obtenu les résultats suivants :

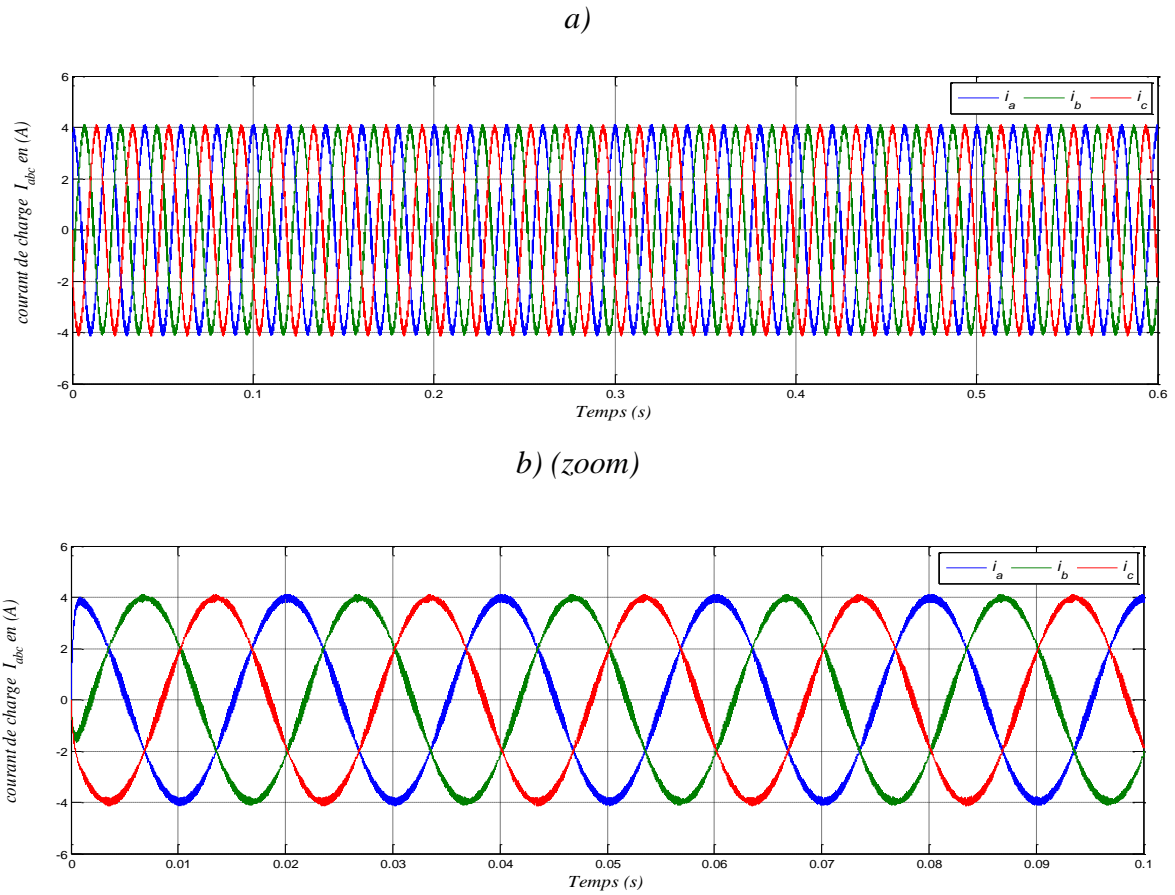


Figure (II.10) : (a) (b zoom) courant de charge

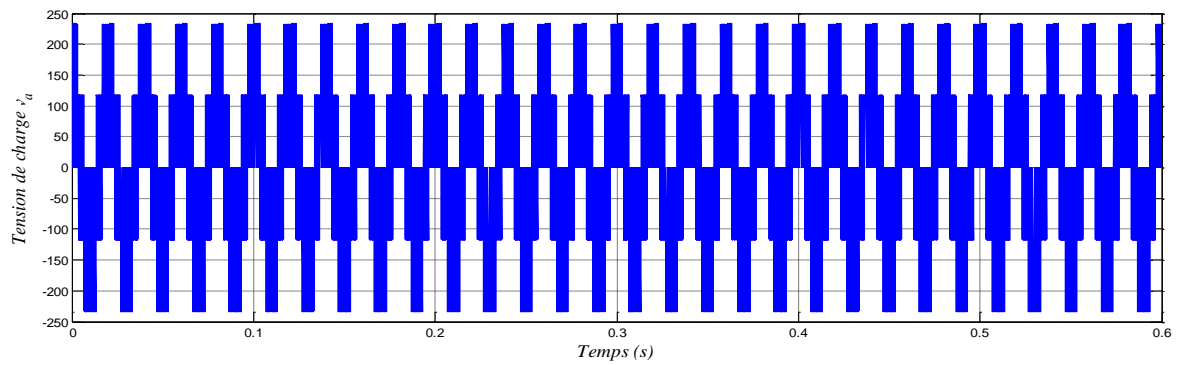


Figure (II.11): Tensions de charge.

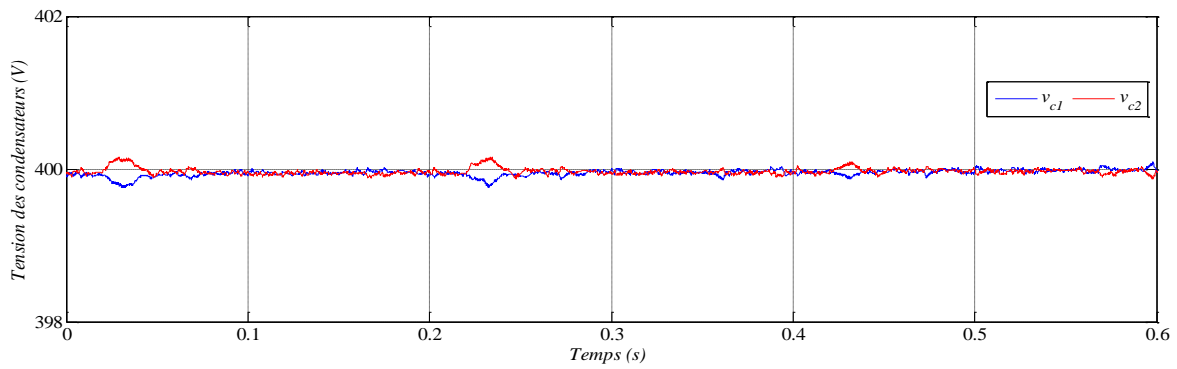


Figure (II.12): Tension des condensateurs.

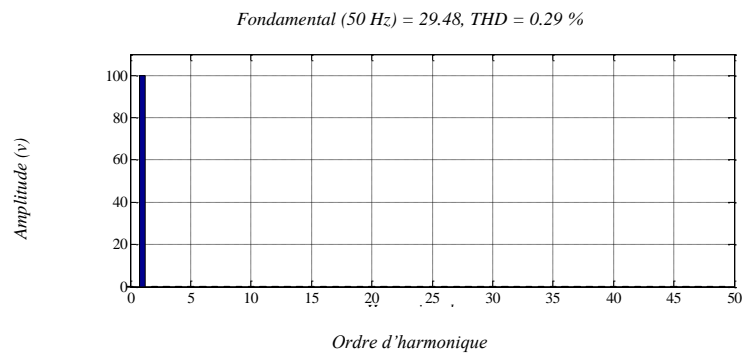


Figure (II.13): Spectres harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur.

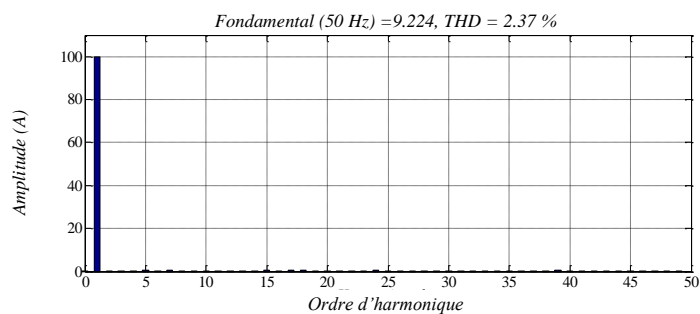


Figure (II.14): Spectres harmoniques du courant de sortie de l'onduleur.

D'après les résultats de simulation obtenus sur les figures (II.10), (II.11) et (II.12), respectivement, figures du courant, tension de charge et tension des condensateurs, il paraît très clair la performance de la technique SVM justifié par le spectre harmonique qui est très satisfaisantes, (THD = 2.37 % pour le courant de sortie de l'onduleur et THD = 0.29 % pour

sa tension) (figures (II.13) et (II.14), aussi l'efficacité de technique d'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs.

## **II.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux concepts de la conversion d'énergie multi-niveaux. Une brève présentation des trois principales topologies de ces convertisseurs a été faite, ressortant ainsi leurs principales caractéristiques.

Cette technologie permet de réduire le taux de distorsion harmonique, limitant ainsi la taille des éventuels filtres. L'analyse des différentes topologies montre que les convertisseurs DCC possèdent beaucoup d'avantages sur les convertisseurs à capacités flottantes et en cascade vu la simplicité de la structure. En effet, on n'a plus besoin d'utiliser des capacités pour chaque phase tel les convertisseurs à capacités flottantes, ni de sources de tension continue isolés comme dans le cas des convertisseurs en cascade.

Aussi la technique de modulation vectorielle de l'onduleur multiniveaux à diodes flottantes a donné des résultats de simulation montrant la qualité remarquable du courant et de la tension de sortie de l'onduleur justifiées par le taux de distorsion harmonique (THD) qu'est très satisfaisant.

Par ailleurs, la topologie multiniveaux adoptée souffre du déséquilibre des tensions aux bornes des condensateurs cotés continu. A cet effet une technique d'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs a été adoptée laquelle à donner des meilleurs performances.

## Chapitre III

# Modélisation et commande du D-STATCOM

### III.1 Introduction

Les dispositifs D-STATCOM sont de purs systèmes d'électronique de puissance réalisés avec des convertisseurs à base d'IGBTs. Ils sont raccordés au réseau à travers un filtre inductif et injectent un courant contrôlé dans le système afin de régler la tension au nœud de raccordement et/ou de compenser la puissance réactive d'une charge/générateur.

On ne parle pas ici des D-STATCOM de première génération qui, eux, ne disposent que d'un contrôle indirect via le déphasage entre la tension côté alternatif de l'onduleur et la tension au nœud de raccordement (commande en pleine onde). Les D-STATCOM modernes à base d'interrupteurs plus rapides permettent la commande directe des courants injectés ainsi que de la tension du bus continu. Ils présentent beaucoup d'avantages tel que :

- Temps de réponse est quasiment instantané ;
- Le coût d'entretien est minimal ;
- Il n'y a pas d'inertie ;
- Il n'y a pas de possibilité d'instabilité rotationnelle.

Dans ce chapitre on va traiter l'exploitation du *D-STATCOM* multiniveaux dans la compensation de l'énergie réactive dans un réseau de distribution d'une part et d'autre part la correction de la tension au point de raccordement commun (PCC).

Dans la première partie de ce chapitre, le modèle mathématique du *D-STATCOM* dans le repère  $(abc)$  ainsi que dans le repère  $(dq)$  sera développé. La deuxième partie de ce chapitre sera réservée à la commande du bus continu ainsi que des courants côté alternatif en utilisant des régulateurs de type *PI*.

## III.2 Modélisation du D-STATCOM

### III.2.1 Configuration du système DSTATCOM

La figure (III.1) montre une représentation schématique d'un D-STATCOM à trois niveaux, via à un filtre  $(R_f, L_f)$  connecté en série, le D-STATCOM est couplé en tant que compensateur shunt à un système de distribution triphasé. Un ensemble de charges à facteur de puissance non unitaire est connecté au système de distribution. Les éléments  $R_s$  et  $L_s$  représentent respectivement la résistance et l'inductance de la ligne de distribution. Le bus continu est composé de deux condensateurs identiques  $C_1 = C_2 = C$  qui supportent une tension continue totale de  $v_{dc}$ .

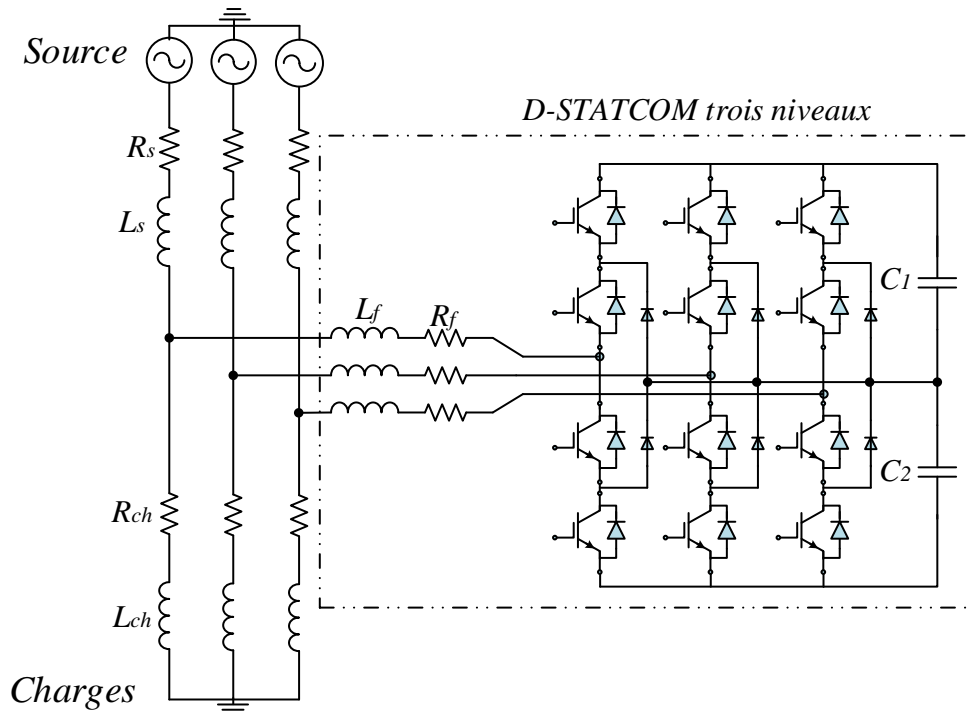


Figure (III.1): Schéma d'un D-STATCOM triphasé connecté au système de distribution

### III.2.2 Schéma simplifié du D-STATCOM

La figure (III.2), représente le modèle simplifié du D-STATCOM, en tenant compte uniquement du point PCC où il est connecté. Le principe consiste de présenter les sources de tension sinusoïdales connectées au PCC. Le circuit continu est représenté par une source de courant connectée au condensateur  $C_{\text{ég}}$ .

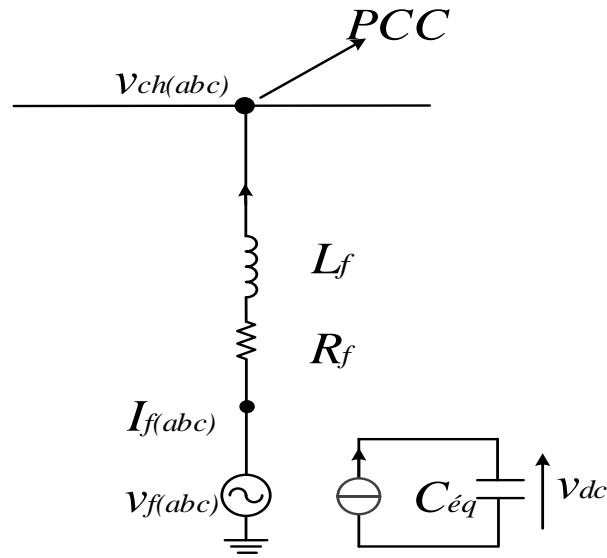


Figure (III.2) : Schéma simplifié du D-STATCOM

### III.2.3 Modélisation dans le repère (abc)

Le courant dans une phase du *D-STATCOM* dépend de la différence entre la tension  $v_{ch}$  (tension au nœud et la tension ajustable du *D-STATCOM*  $v_f$ . En appliquant la loi des mailles on obtient, les équations des courants triphasés en termes des tensions suivantes :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fa}}{dt} = -R_f i_{fa} + v_{fa} - v_{cha} \\ L_f \frac{di_{fb}}{dt} = -R_f i_{fb} + v_{fb} - v_{chb} \\ L_f \frac{di_{fc}}{dt} = -R_f i_{fc} + v_{fc} - v_{chc} \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

Pour le côté continu du D-STATCOM, on utilise le modèle équivalent de la figure (III.2) afin d'exprimer l'équation du courant continu équivalent  $i_{c\acute{e}q}$  en fonction de la tension continue globale comme suit :

$$i_{c\acute{e}q} = C_{\acute{e}q} \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (\text{III.2})$$

Sur la base de conservation des puissances entre les côtés continu et alternatif, tout en négligeant les pertes de commutation de l'onduleur, il est possible d'exprimer le courant  $i_{c\acute{e}q}$  en fonction des tensions et des courants côté alternatif :

$$i_{c\acute{e}q} = -\frac{1}{v_{dc}} (v_{fa} i_{fa} + v_{fb} i_{fb} + v_{fc} i_{fc}) \quad (\text{III.3})$$

Aussi et si on néglige la puissance dissipée dans le filtre RL, la puissance de sortie de l'onduleur devient la même que celle du point PCC, ce qui donne :

$$i_{c\acute{e}q} = -\frac{1}{v_{dc}}(v_{cha}i_{fa} + v_{chb}i_{fb} + v_{chc}i_{fc}) \quad (\text{III.4})$$

### III.2.4 Modélisation dans le repaire (dq)

Afin de réduire l'ordre du système, nous allons effectuer une transformation dans l'axe triphasé ( $abc$ ) au l'axe biphasé ( $dq$ ), via la transformation du *park*.

La transformation de *Park* est définie par la matrice suivante:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

À partir des composantes  $v_{cha}$  et  $v_{ch\beta}$  qui sont calculées par la transformation de *Concordia* des tensions du PCC, l'angle  $\theta$  est calculé par l'équation suivante :

$$\theta = \text{arc tan}\left(\frac{v_{ch\alpha}}{v_{ch\beta}}\right) \quad (\text{III.6})$$

L'axe direct du repère tournant ( $dq$ ) est typiquement fixé sur le vecteur tension du *PCC*  $v_{ch}$ , afin d'annuler la composante  $v_{chq}$ , [10] comme le représente la figure (III.3).

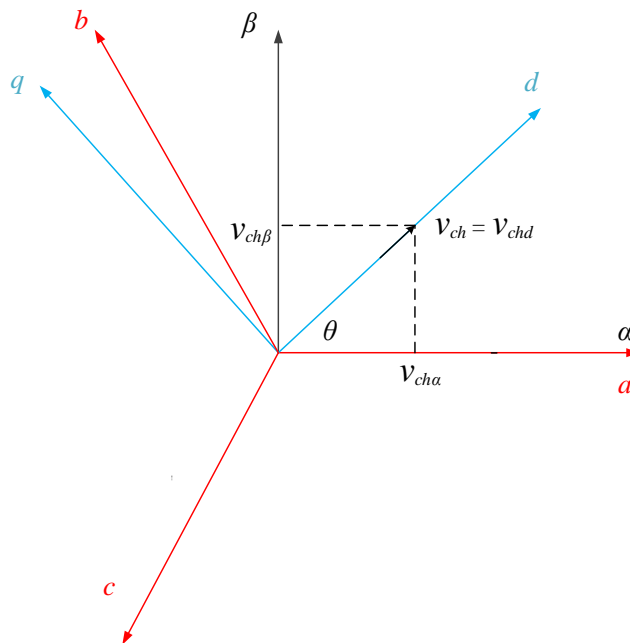


Figure (III.3) : Diagramme vectoriel de la tension du point PCC

Après avoir transformé l'équation (III.1), en aboutit aux équations dynamiques du D-STATCOM dans le repère  $(dq)$  suivantes :

$$\begin{cases} v_{fd} = R_f i_{fd} + L_f \frac{di_{fd}}{dt} - L_f \omega i_{fq} + v_{chd} \\ v_{fq} = R_f i_{fq} + L_f \frac{di_{fq}}{dt} + L_f \omega i_{fd} + v_{chq} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

L'équation (III.7) montre que le modèle du D-STATCOM dans le repère  $(dq)$  fait apparaître des termes de couplage entre les axes  $d$  et  $q$ , et l'équation (III.4) peut s'écrire :

$$i_{céq} = -\frac{1}{v_{dc}} (v_{chd} i_{fd} + v_{chq} i_{fq}) \quad (\text{III.8})$$

Et comme  $v_{chq} = 0$ , il en résulte :

$$i_{céq} = -\frac{1}{v_{dc}} v_{chd} i_{fd} \quad (\text{III.9})$$

Les équations (III.7) et (III.9) forment le modèle mathématique du D-STATCOM dans le repère  $(dq)$ . Ce modèle est utilisé pour synthétiser la commande du D-STATCOM.

### III.3 Contrôle du D-STATCOM

La structure de contrôle du D-STATCOM présentée dans la figure (III.4) est constituée de deux boucles de régulation suivantes :

- Une boucle externe de régulation des tensions ;
- Une boucle interne de contrôle des courants.

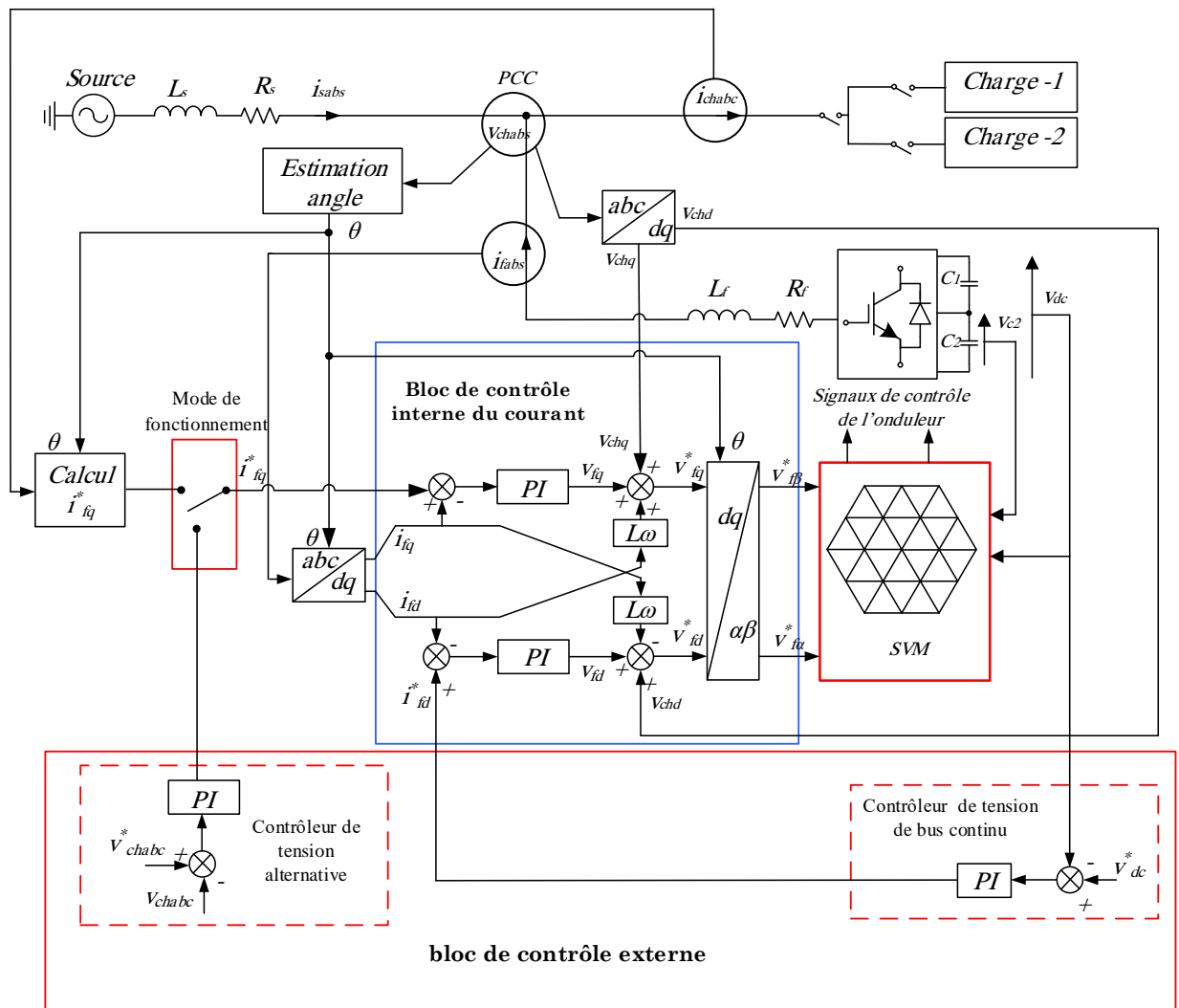


Figure (III.4) : Structure de contrôle d'un D-STATCOM

Après avoir obtenu le modèle simplifié par le passage du système triphasé au système biphasé tout en réduisant l'ordre du système, on peut dire que les puissances active et réactive échangées entre le D-STATCOM et le réseau sont contrôlées par la régulation des composantes directe et quadratique du courant ( $i_{fd}$  et  $i_{fq}$ ). Les composantes  $v_{fd}$  et  $v_{fq}$  sont les variables de commande

et  $v_{chd}$  et  $v_{chq}$  sont les variables de perturbation. Le système d'équation (III. 7) peut être découplé par le changement de variables suivant :

$$\begin{cases} v_{fd} = v_d - L_f \omega i_{fq} + v_{chd} \\ v_{fq} = v_q + L_f \omega i_{fd} + v_{chq} \end{cases} \quad (III.10)$$

Où les deux composantes  $v_d$  et  $v_q$  sont les nouveaux variables de commandes obtenus à partir de deux régulateurs PI (proportionnel intégral). Par comparaison entre les équations (III.7) et (III.10) on peut en déduire les relations de  $v_d$  et  $v_q$  comme suit :

$$\begin{cases} v_d = R_{fd} + L_f \frac{di_{fd}}{dt} \\ v_q = R_{fq} + L_f \frac{di_{fq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

À partir de l'équation (III.11), on définit les deux systèmes découplé de premier ordre suivants :

$$\begin{cases} \frac{di_{fd}}{dt} = \frac{v_d}{L_f} - \frac{R_{fd}}{L_f} \\ \frac{di_{fq}}{dt} = \frac{v_q}{L_f} - \frac{R_{fq}}{L_f} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

La boucle de contrôle de courant interne calcule les tensions de référence nécessaires pour le block de la modulation vectorielle, qui à son tour calcule les signaux d'ouverture et fermeture des IGBTs.

Dans le cadre de cette étude, on a utilisé deux régulateurs PI dans le repère tournant pour contrôler les composantes active et réactive du courant. La Figure (III.5) présente la structure de la boucle interne de contrôle de courant.

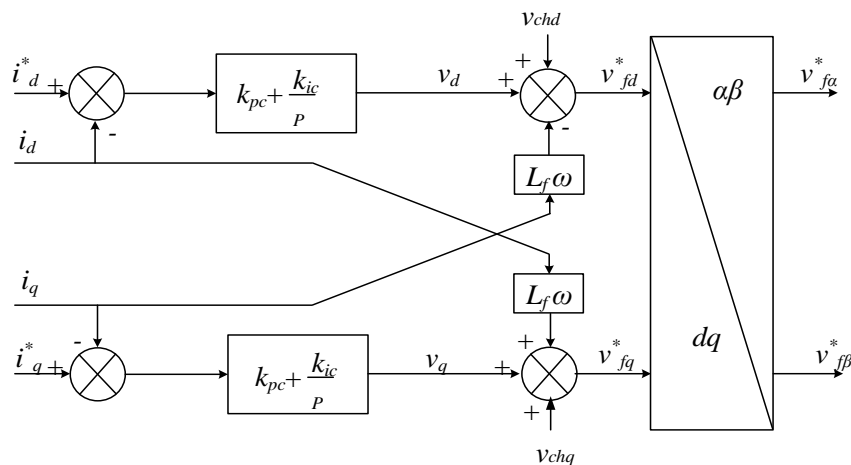


Figure (III.5) : Boucle interne de contrôle de courant.

### III.3.1 Synthèse des régulateurs des courants

Le régulateurs proportionnel-intégral est le correcteur le plus classiquement utilisé pour le contrôle du courant à cause de sa simplicité. L'équation temporelle de ce correcteur est donnée comme suit :

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \quad (\text{III.13})$$

Où :

- $e(t)$  : l'erreur à l'instant  $t$  ;
- $u(t)$  : la commande générée ;
- $k_p$  : gains proportionnel du correcteur ;
- $k_i$  : gains intégral du correcteur.

La fonction de transfert correspondante est donnée par:

$$R(p) = \frac{k_p + k_i}{p} \quad (\text{III.14})$$

Où :  $p$  est l'opérateur de Laplace.

Le schéma simplifié de la boucle de régulation du courant est illustré par la figure (III.6).

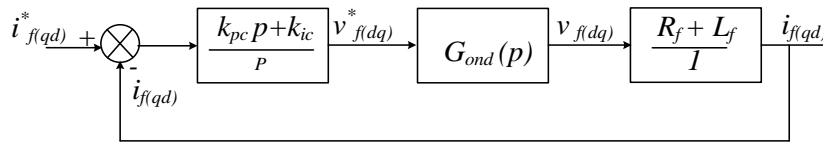


Figure (III.6) : Schéma bloc de régulation des courants par des régulateurs PI

Etant donné que la fonction de transfert de l'onduleur est généralement choisi ( $G_{ond} = 1$ ) et ce, afin d'assurer que la valeur de la tension de sortie doit être égale à sa valeur de référence, de ce fait la fonction de transfert en boucle fermée devient :

$$H(p) = \frac{k_{pc}p + k_{ic}}{L_f p^2 + (R_f + k_{pc})p + k_{ic}} \quad (\text{III.15})$$

Dans le but de déterminer les valeurs des gains  $k_{pc}$  et  $k_{ic}$ , on opte la méthode de comparaison entre l'équation caractéristique de la fonction  $H(p)$  et celle de la fonction de transfert d'un système du deuxième ordre en boucle fermée donnée par :

$$G(p) = p^2 + 2\xi\omega_{nc}p + \omega_{nc}^2 \quad (\text{III.16})$$

On peut déduire donc les valeurs des gains  $k_{pc}$  et  $k_{ic}$  :

$$\begin{aligned} k_{pc} &= 2\xi\omega_{nc}L_f - R_f \\ k_{ic} &= L_f\omega_{nc}^2 \end{aligned} \quad (\text{III.17})$$

### III.3.2 Contrôleur de la tension du bus continu

La tension continue  $v_{dc}$  aux bornes du bus continu, doit être maintenue constante et les fluctuations de cette tension doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semiconducteurs constituant les interrupteurs, et d'autre part pour ne pas dégrader les performances du D-STATCOM. A cet effet, un régulateur PI est indispensable pour la régulation de la tension continue.

Le courant  $i_{c\acute{e}q}$  qui traverse le bus continu peut s'écrire sous la forme suivante :

$$i_{c\acute{e}q} = C_{\acute{e}q} \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (\text{III.18})$$

L'application de la transformation de Laplace sur l'équation (III.18) conduit à :

$$i_{c\acute{e}q}(p) = C_{\acute{e}q} p v_{dc}(p) \quad (\text{III.19})$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$v_{dc}(p) = \frac{1}{C_{\acute{e}q} p} i_{c\acute{e}q}(p) \quad (\text{III.20})$$

Pour obtenir le signal  $i_{c\acute{e}q}$  nous avons le choix entre un régulateur proportionnel et un régulateur proportionnel intégral. Ce dernier est souvent préférable du fait qu'il permet d'annuler l'erreur statique.

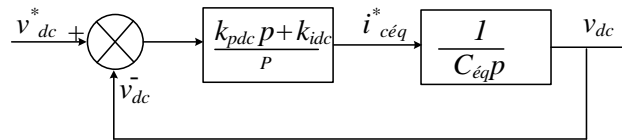


Figure (III.7) : Schéma bloc de régulation de la tension continue par un régulateur PI

La fonction de transfert en boucle ouverte correspondante à ce schéma est :

$$F_{dc}(p) = \frac{k_{pdc} p + k_{idc}}{p} \frac{1}{C_{\acute{e}q} p} \quad (\text{III.21})$$

La fonction de transfert en boucle fermée sera donc :

$$H_{dc}(p) = \frac{k_{pdc}p + k_{idc}}{C_{\acute{e}q}p^2 + k_{pdc}p + k_{idc}} \quad (\text{III.22})$$

On doit faire une analogie entre l'équation caractéristique de la fonction  $H_{dc}(p)$  et celle de la fonction de transfert d'un système du deuxième ordre en boucle fermée donnée par :

$$G(p) = p^2 + 2\xi\omega_{nc}p + \omega_{nc}^2 \quad (\text{III.23})$$

On peut déduire donc les valeurs des gains  $k_{pc}$  et  $k_{ic}$  :

$$\begin{aligned} k_{pdc} &= 2\xi\omega_{ndc}C_{\acute{e}q} \\ k_{idc} &= C_{\acute{e}q}\omega_{ndc}^2 \end{aligned} \quad (\text{III.24})$$

Pour une bonne réponse dynamique du système, on choisit la valeur de  $\zeta=0.707$ .

La régulation du bus continu fournit la référence du courant côté continu  $i_{c\acute{e}q}^*$ , puis on calcul la référence du courant actif du côté alternatif  $i_{fd}^*$  à partir de l'équation (III.9), ce qui donne :

$$i_{fd}^* = -\frac{v_{dc}}{v_{chd}} i_{c\acute{e}q}^* \quad (\text{III.25})$$

Le schéma simplifié de la détermination de la référence du courant actif du côté alternatif est représenté par la figure (III.8).

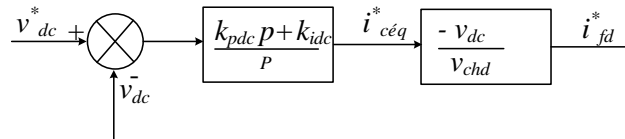


Figure (III.8) : Génération de la référence du courant actif  $i_{fd}$

### III.3.3 Contrôleur de la tension au point de couplage commun PCC

Ce contrôleur de tension régule le niveau de tension du point de couplage commun en contrôlant la puissance réactive échangée entre le DSTATCOM et le système d'alimentation. Pour ce faire, un contrôleur PI est utilisé pour générer un signal de référence du courant réactif.

### III.3.4 Détermination des consignes de références

La référence du courant réactif  $i_{fq}^*$  est déterminée en premier lieu pour le mode de fonctionnement du D-STATCOM, comme régulateur de tension au point PCC, puis en deuxième lieu en mode régulateur de la puissance réactive échangée entre le D-STATCOM et le réseau. [6, 10].

## III.4 Simulations et Résultats

### III.4.1 Description du réseau étudié

Dans la totalité des applications pratiques les D-STATCOM sont utilisés principalement pour compenser la puissance réactive au point de connexion commun (PCC), néanmoins dans cette section on va présenter les deux modes de fonctionnement

- ✓ Mode correction de facteur de puissance ;
- ✓ Mode de réglage de tension au point de connexion commun (PCC).

Le schéma unifilaire du réseau simple de distribution d'énergie électrique utilisé pour valider le fonctionnement du *D-STATCOM* est représenté par la figure (III.10)

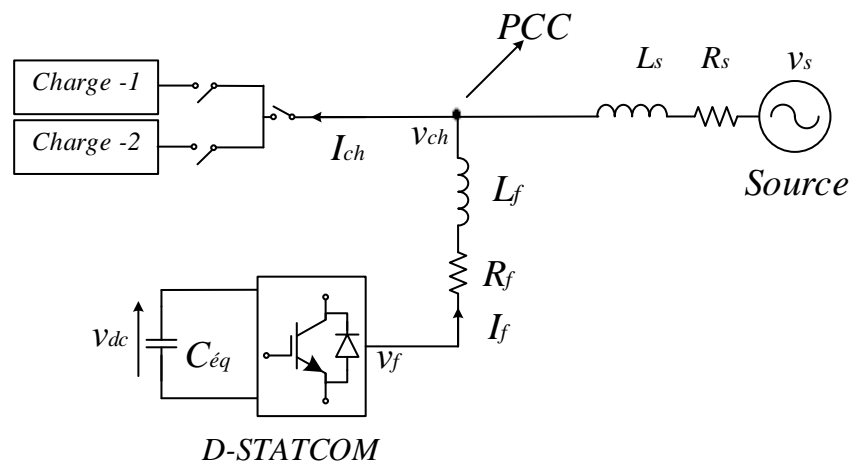


Figure (III.10) : Schéma unifilaire du réseau étudié

### III.4.2 Résultats de simulations et interprétations

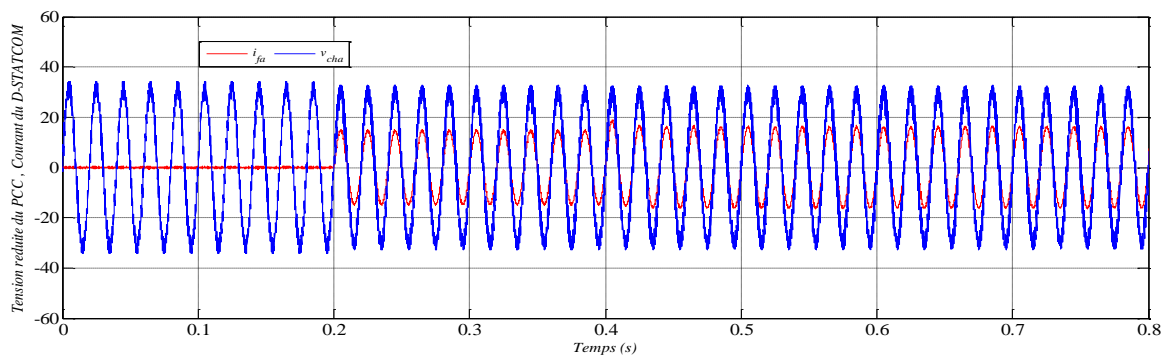
Table (III.1) : Paramètres de simulation

<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>
<i>Tension simple du réseau</i>	220V
<i>Fréquence du réseau f</i>	50Hz
<i>Résistance de la ligne Rs</i>	0.2 Ω
<i>Inductance de la ligne Ls</i>	3mH
<i>Résistance du filtre du DSTATCOM Rf</i>	0.01 Ω
<i>Inductance du filtre du DSTATCOM Lf</i>	8mH
<i>Tension du bus continu vdc</i>	800V
<i>Capacités des condensateurs du bus continu C = C<sub>1</sub> = C<sub>2</sub></i>	4mF
<i>Fréquence de commutation de l'onduleur fs</i>	9kHz
<i>Résistance de la charge R<sub>ch1</sub> = R<sub>ch2</sub></i>	10Ω
<i>Inductance de la charge L<sub>ch1</sub> = L<sub>ch2</sub></i>	0.01H

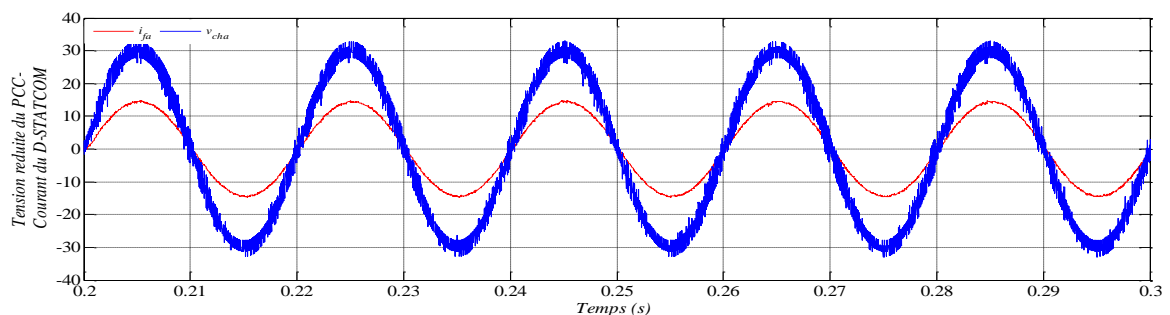
#### III.4.2.1 Mode de correction du facteur de puissance

Au début de la simulation, le système de distribution n'est pas chargé. A l'instant (t=0,2 s) une charge inductive est alimentée par le système de distribution ensuite une deuxième charge inductive est connectée à (t=0.4 s), sur la courbe de la figure III.11, il est bien clair que le D-STATCOM fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance et ce, par l'injection chaque fois un courant réactif afin de compenser la puissance réactive nécessaire pour la charge et pour rendre les tensions et les courants du point de couplage commun en phase.

(a)



(b)



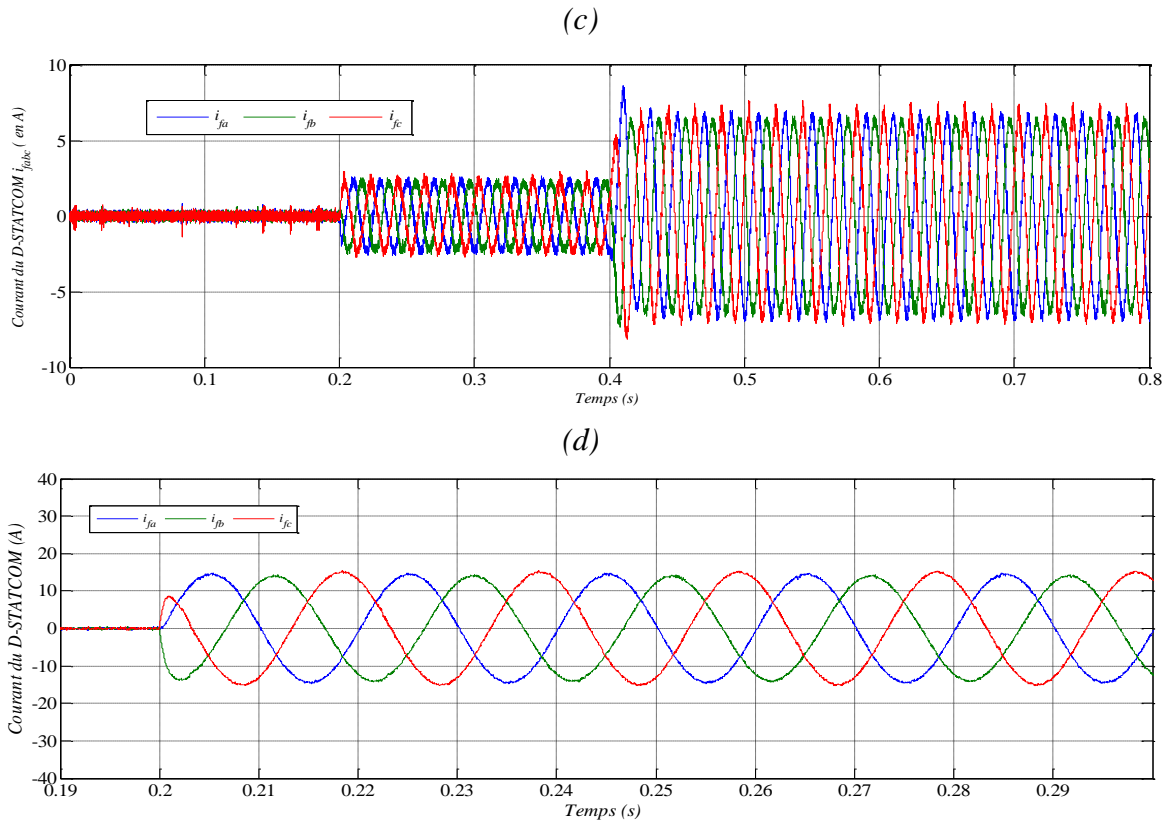


Figure (III.11) : (a) (b zoom) du courant de la première phase injecté par le D-STATCOM dans le réseau, ainsi que sa tension réduite, (c) (d zoom) du courant triphasé injecté par le D-STATCOM.

Sur la courbe de la figure (III.12), il paraît très clair que le bloc de régulation de la tension continue à prouver son efficacité dans le maintien d'une tension constante aux bornes du bus continu global. Dont la tension aux bornes des condensateurs revient à sa référence après l'insertion des charges à ( $t=0.2s$  et  $0.4s$ ).

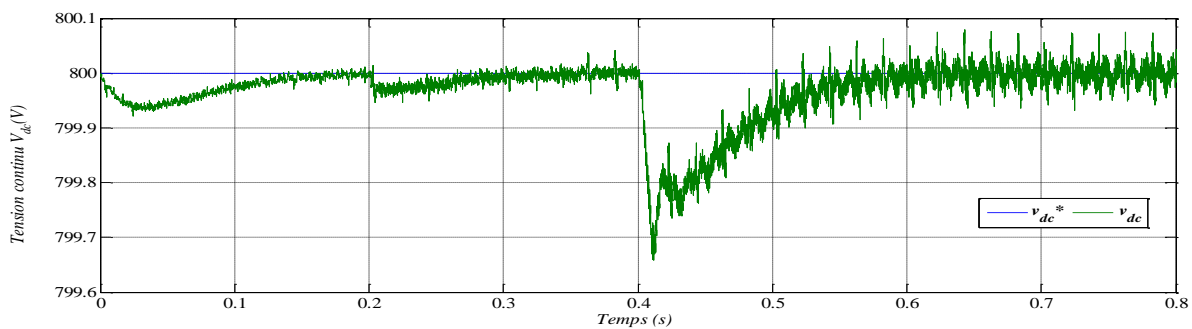


Figure (III.12) : Tension du bus continu du D-STATCOM et sa référence.

La figure (III.13) montre que les tensions des condensateurs sont équilibrées et proches de leurs valeurs de référence, ce qui démontre l'efficacité de l'algorithme de stabilisation associé à la SVM stabilisante.

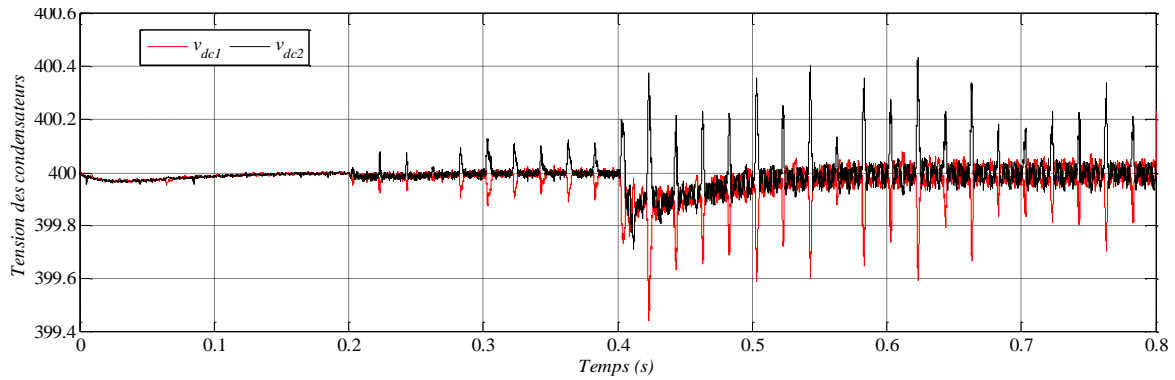


Figure (III.13) : Tensions des condensateurs du bus continu

Sur les courbes de la figure (III.14) et figure (III.15) on constate que les courants  $i_{fq}$  et  $i_{fd}$  suivent leurs grandeurs de références calculées à partir de puissance réactive nécessaires à compenser la puissance réactive dans la ligne et puissance active pour maintenir la tension continue constante. Ces résultats prouvent l'efficacité des régulateurs utilisés.

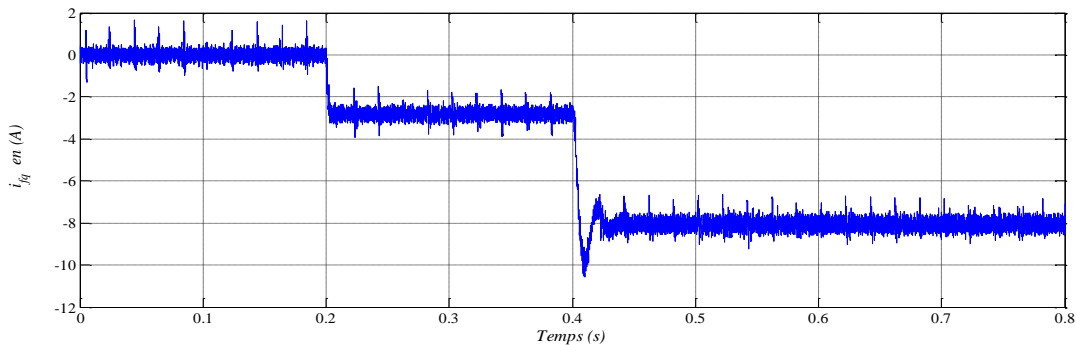


Figure (III.14) : Courant réactif injecté par le D-STATCOM dans le réseau

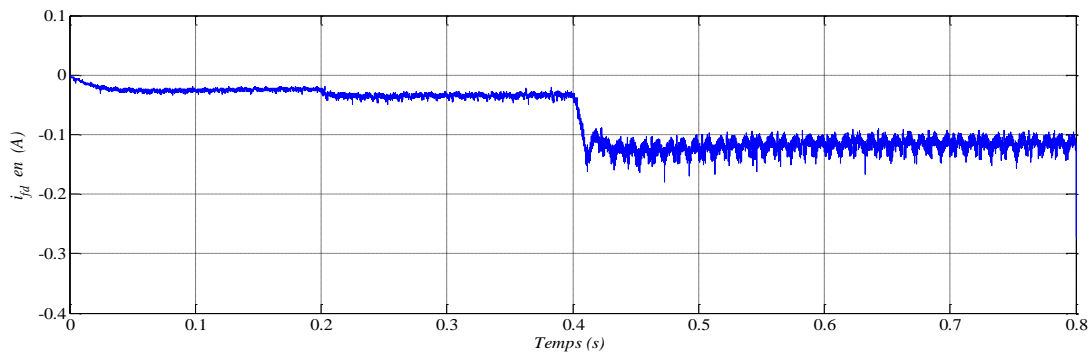


Figure (III.15) : Courant actif injecté par le D-STATCOM dans le réseau.

### III.4.2.2 Mode du régulateur de tension

Au début de la simulation, le système de distribution n'est pas chargé. A l'instant ( $t=0,02$  s) une charge inductive est alimentée par le système de distribution, sur la figure (III.16) (a)

L'analyse des résultats montre une bonne performance de la compensation de la puissance réactive afin de réguler la tension du point de couplage commun.

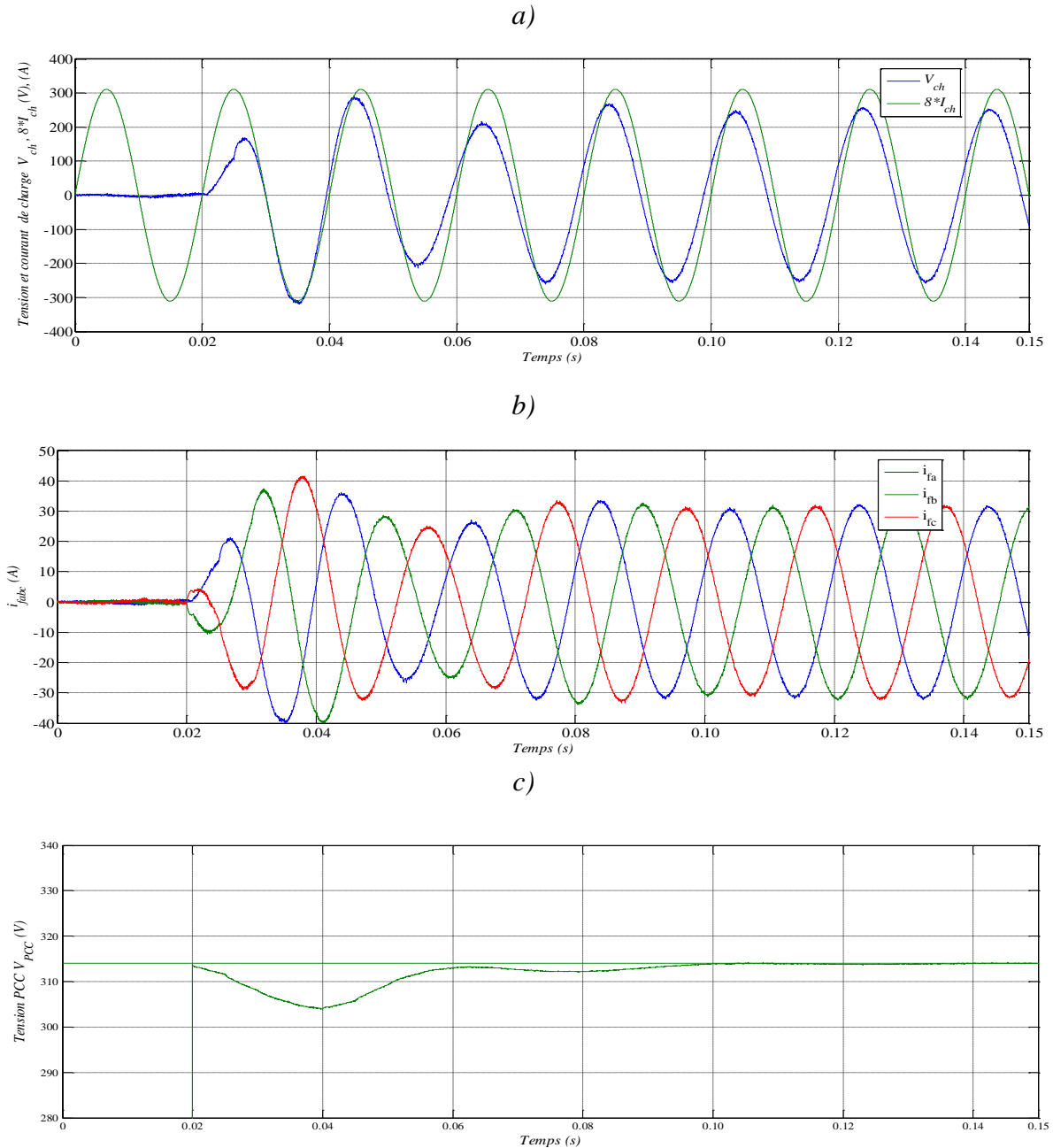


Figure (III.16) : (a) Courant de la première phase injectée par le D-STATCOM dans le réseau, ainsi que sa tension réduite, b) courant triphasé injecté par le D-STATCOM, c) Tension au point PCC.

Sur la courbe de la figure (III.17), il paraît très clair que le bloc de régulation de la tension continue à prouver son efficacité dans le maintien d'une tension constante aux bornes du bus continu global. Dont la tension continue revient à sa référence après l'insertion de la charge.

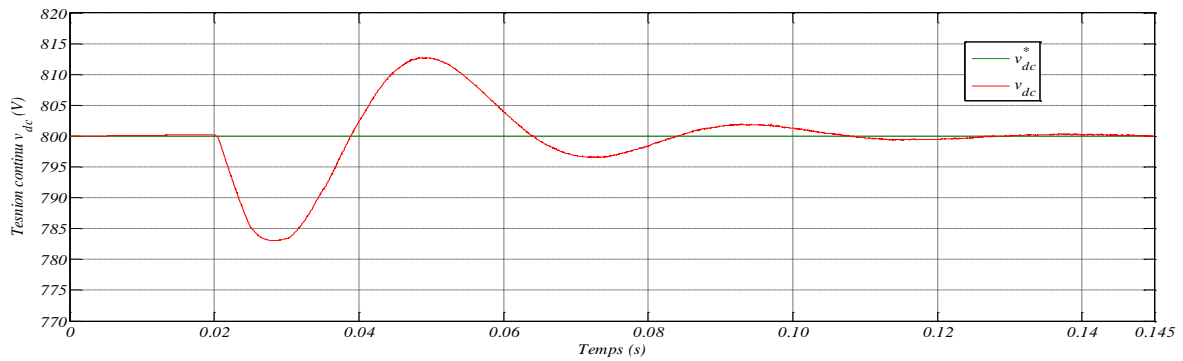


Figure (III.17) : Tension du bus continu du D-STATCOM et sa référence.

La figure (III.18) montre que les tensions des condensateurs sont équilibrées et proches de leurs valeurs de référence, ce qui démontre l'efficacité de l'algorithme de stabilisation associé à la SVM stabilisante.

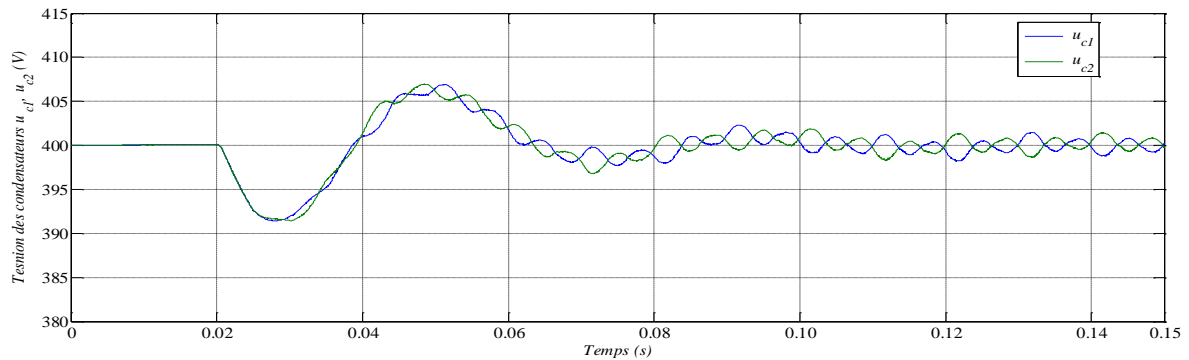


Figure (III.18) : Tensions des condensateurs du bus continu

Sur les courbes de la figure (III.19) et figure (III.20) on constate que les courant  $i_{fq}$  et  $i_{fd}$  suivent leurs grandeurs de références calculés à partir de la puissance réactive nécessaires à compenser la puissance réactive afin de réguler la tension PCC et puissance active pour maintenir la tension continue constante. Ces résultats prouvent l'efficacité des régulateurs utilisés.

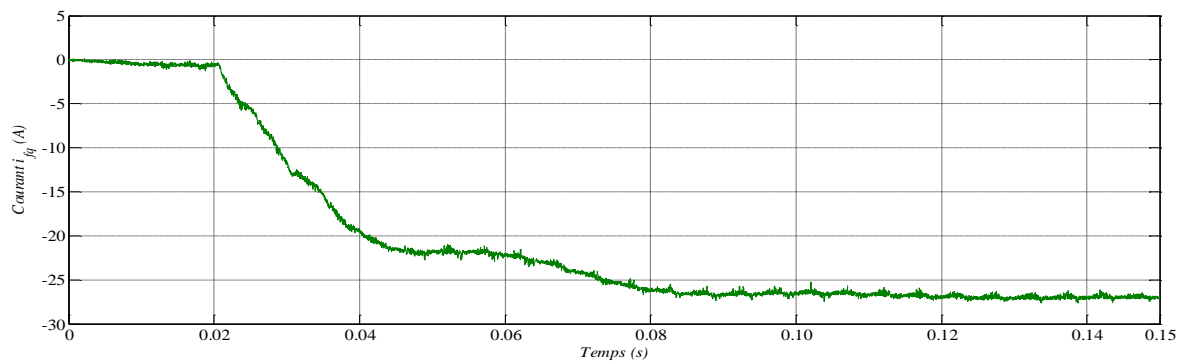


Figure (III.19) : Courant réactif injecté par le D-STATCOM dans le réseau

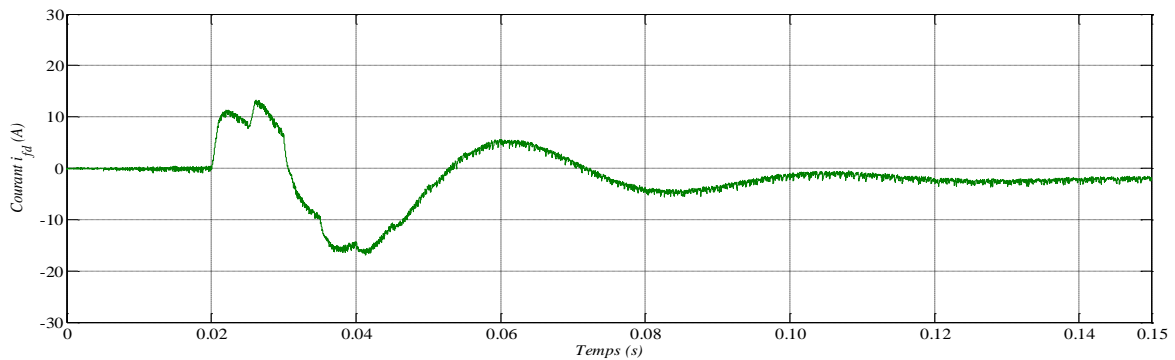


Figure (III.20) : Courant actif injecté par le D-STATCOM dans le réseau.

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit le comportement d'un D-STATCOM connecté à un réseau de distribution fonctionnant en premier lieu en mode correction de facteur de puissance puis en mode correction de la tension au point de raccordement commun (PCC). L'étude a été déclinée par une phase de modélisation suivie de la synthèse de l'ensemble des régulateurs indispensables pour le bon fonctionnement de ce dispositif. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de la méthode adoptée dans la régulation des puissances active et réactive à travers le contrôle des courants actif et réactif correspondants. Le contrôle de ces derniers par des régulateurs proportionnel intégral a conduit à des résultats satisfaisants. Nous avons vérifiés aussi l'efficacité de l'algorithme d'équilibrage des tensions de condensateurs associé à la modulation vectorielle multiniveaux.

## *Conclusion générale*

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'amélioration de la gestion des réseaux électriques de distribution. Le travail porte sur modélisation et commande d'un D-STATCOM à base des convertisseurs multiniveau commandé par SVM. Notre objectif étant de compenser la puissance réactive consommée par la charge afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire coté source et de réguler la tension au point de raccordement commun (PCC).

Dans le premier chapitre, nous avons vu un état de l'art sur les dispositifs FACTS, en présentant leurs définitions, leurs applications et leurs déférentes catégories selon le type de connexion. Après, on a cité quelques dispositifs en présentant pour chacun d'eux sa configuration, son principe de fonctionnement et ses applications. La deuxième partie à fait l'objet d'une étude plus détaillée sur le compensateur shunt D-STATCOM, sa structure, son principe de fonctionnement et son action sur le réseau de distribution d'énergie.

Dans le deuxième chapitre, une étude approfondie sur la modélisation et la modulation vectorielle des onduleurs de tension conventionnels et multiniveaux a été effectuée, tout en traitant le problème de déséquilibre des tensions aux bornes des condensateurs du côté continu de l'onduleur.

Le troisième chapitre était consacré à l'élaboration des modèles mathématiques du D-STATCOM dans le repère triphasé (abc) puis dans le repère biphasé synchrone (dq). Du fait de leur structure simple, les régulateurs linéaires de type PI sont utilisés pour commander le D-STATCOM. La régulation des puissances active et réactive a été effectuée à travers le contrôle des courants actif et réactif correspondants.

Les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité de cette méthode de contrôle en dépit de sa simplicité. Nous avons vérifié aussi l'efficacité de l'algorithme d'équilibrage des tensions de condensateurs associé à la modulation vectorielle multiniveaux.

A titre de perspectives, ce travail peut être étendu suivant les axes ci-dessous :

- Application d'autres méthodes de commandes non-linéaires;
- Introduction des autres dispositifs FACTS.

## ***BIBLIOGRAPHIE***

- [1] Patrice Petitclair, « Modélisation et Commande de structures FACTS : (Flexible Alternative Current Transmission System) Application au STATCOM (Static Compensator) », *Thèse de Doctorat, l'INPG, Juillet 1997.*
- [2] Philippe FERRACCI, « La qualité de l'énergie électrique », Cahier Technique Schneider Electric n° 199.
- [3] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, "Flexible AC Transmission systems: Modelling and Control", Springer 2005.
- [4] Abdelaali ALIBI, « Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems) », Mémoire de magister, Université de Batna, juin 2009.
- [6] BOUAFIA Saber, « Commande non linéaire d'un DSTATCOM quatre bras multiniveaux couplé à une unité de stockage d'énergie supraconductrice (SMES) », Thèse de Doctorat, université de Sidi-Bel-Abbes – 2018.
- [7] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. Piscataway, NJ, IEEE Press, 2000.
- [8] Y. Besanger, « Etude des FACTS (Flexible AC Transmission System) et de leur Comportement dans les Réseaux de Transport et d'Interconnexion », *Thèse de Doctorat, l'INPG, Juillet 1996.*
- [9] A. Lopez, « Commande avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie de la basse tension à la moyenne tension », Thèse de Doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, (France) 2006.
- [10] BOUZIDI Ali & BOUCHAREB Mohammed, « Commande par mode glissant flou d'un D-STATCOM multiniveaux », Université M'sila, Mémoire ingénieurat juin 2009 ;
- [11] Mario-Alberto Rios « Modélisation pour Analyses Dynamiques des Réseaux Electriques avec Compensateurs de Puissance Réactive - SVC » ; Thèse de Doctorat, l'INPG, Septembre 1998 ;
- [12] Brahim Bekki, « Contribution du SMES, Dispositif FACTS, à la Stabilisation d'un Réseau Electrique Haute Tension », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Septembre 2006.

- [13] Sami Ammari, « Interaction des dispositifs FACTS avec les charges dynamiques dans les réseaux de transport et d'interconnexion », *Thèse de Doctorat, l'INPG, novembre 2000* ;
- [14] Brahim Bekki, « Contribution du SMES, Dispositif FACTS, à la Stabilisation d'un Réseau Electrique Haute Tension », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Septembre 2006.
- [15] HANAFI Salah, « Contribution à l'étude et à la commande des structures de conversion d'énergie électrique de type convertisseur multicellulaire » Thèse de Doctorat, université de Sidi-Bel-Abbès, 2018.
- [16] Youssef OUNEJJAR, « Convertisseur électronique de puissance multiniveaux et à faible répercussion sur le réseau électrique », Thèse doctorat, université du Quebec, janvier 2011.
- [17] Panda Y., « Analysis of Cascaded Multilevel Inverter Induction Motor Drives », Master Thesis, National Institute of Technology Rourkela, 2002.
- [18] Derakhshanfar M., « Analysis of Different Topologies of Multilevel Inverters », Master Thesis, Chalmers University of Technology and Göteborg, Sweden, 2010.
- [19] Singh B., Mittal N, Verma D., Singh D., Singh S., Dixit R., Singh M., and Baranwal A. « Multi-Level Inverter: a Literature Survey on Topologies and Control Strategies », *International Journal of Reviews in Computing*, Vol. 10, 2012, pp. 1-16.
- [20] Pan Z., Peng F., Corzine K., Stefanovic V., Leuthen j., and GataricS., « Voltage Balancing Control of Diode-Clamped Multilevel Rectifier/Inverter Systems », *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No. 6, 2005, pp. 1698-1706.
- [21] Saeedifard M., « Space Vector Modulation of Multi-Level and Multi-Module Converters for High Power Applications », Ph.D, Thesis, University of Toronto, Canada, 2008.
- [22] Lalili D., « MLI Vectorielle and Commande Non Linéaire du Bus Continu des Onduleurs Multiniveaux. Application à la Conduite de la Machine Asynchrone », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.
- [23] Jian-yu B., Zhi-hong B., Qing-song W., and Zhong-chao Z., « A New Three Phase 5-Level Current-Source Inverter », *Journal of Zhejiang*, Vol. 12, No. 7, 2006, pp. 1973- 1978.
- [24] Galván J., « Multilevel Converters: Topologies, Modelling, Space Vector Modulation Techniques and Optimisations », Ph.D, Thesis, University of Seville Electronic Engineering, 2006.
- [25] Subrata M., Bimal B., and Valentin O., « Space Vector Pulse Width Modulation of Three-Level Inverter Extending Operation Into Overmodulation Region », *IEEE* 2002, pp. 497-502.

[26] Bouzidi M., « Stratégie de Contrôle Direct de Puissance Associées à des Commandes non Linéaires d'un Filtre Actif Parallèle Multiniveaux », Mémoire de Magister, Université Djilali Liabes, Sidi Belabes, 2011.

[27] Saeedifard M., Iravani R., and Pou J., «A Space Vector Modulation Strategy for a Backto-Back Five-Level HVDC Converter System », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 2, 2009, pp. 452-466.

[28] Rabah BENABID, « Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques », Mémoire de Magister, Université Laghouat, septembre 2007.

[29] MESSALTI Sabir, «Analyse de la stabilité transitoire des réseaux de transport à courant continu en haute tension (HVDC-FACTS) », Thèse de Doctorat, université de Sétif juin 2011.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECNIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Année Universitaire : 2019 / 2020

Proposé et dirigé par : MM : BENGUESMIA Hani  
BOUAFIA Saber

Présenté par : DJEDIL Choayb  
ZIANE Fateh

**Thème :**

**Modélisation et commande d'un DSTATCOM  
à base d'un convertisseur multiniveau**

**Résumé :**

Dans les systèmes de distribution, la variation continue des charges conduisent à de nombreux problèmes affectant la qualité d'énergie. Ces charges consomment généralement plus de courant réactif entraînant une forte consommation de la puissance réactive tout en causant un faible facteur de puissance et diminution de niveau de tension PCC. Ces problèmes ont donné naissance aux dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System).

Dans ce travail, nous avons traité en détail le D-STATCOM (Distributed STATic COMPensator) qui considère l'un des principaux dispositifs dédié à la compensation d'énergie réactive transitant sur le réseau de distribution. Le D-STATCOM qu'on a choisi est basé sur les onduleurs multiniveaux à diodes flottantes commandés par modulation vectorielle (SVM) associée avec un algorithme de stabilisation des tensions continues des condensateurs. La commande de ce dispositif a été réalisée par une commande linéaire classique de type PI.

**Mots clés :** Compensation d'énergie réactive, FACTS, D-STATCOM, onduleurs multiniveaux, SVM.

في أنظمة توزيع الطاقة الكهربائية، يؤدي التغيير المستمر في الأحمال إلى العديد من المشكلات التي تؤثر على جودة الطاقة. تستهلك هذه الأحمال بشكل عام تياراً غير فعال بشكل أكثر مما يؤدي إلى ارتفاع استهلاك الطاقة الغير فعالة مسببة إنخفاضاً في عامل الطاقة وانخفاضاً في مستوى جهد PCC. أدت هذه المشاكل إلى ظهور أجهزة (FACTS) نظام نقل التيار المتردد المرنة).

في هذا العمل، تعاملنا بالتفصيل مع D-STATCOM (المعوض الثابت) الذي يعتبر أحد الأجهزة الرئيسية المخصصة لتعويض الطاقة التفاعلية التي تمر عبر شبكة التوزيع. يعتمد D-STATCOM الذي اخترناه على محولات الديود العائمة متعددة المستويات يتم التحكم فيها بواسطة تقنية التحكم في عرض الموجة (SVM) مرتبطة بخوارزمية لتثبيت جهد التيار المستمر للمكثفات. تم التحكم في هذا الجهاز عن طريق التحكم الخطي التقليدي من نوع PI.

**كلمات مفتاحية :** تعويض الطاقة غير الفعالة ، FACTS ، D-STATCOM ، عاكسات متعددة المستويات ، SVM .