

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



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Génie Electrique
Département d'Electrotechnique

Thèse présentée par :

BOUAFIA Saber

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Sciences

Spécialité : Electrotechnique

Option : Réseaux électriques

Intitulé de la thèse :

**Commande non linéaire d'un DSTATCOM quatre bras
multiniveaux couplé à une unité de stockage d'énergie
supraconductrice (SMES)**

Présentée devant le jury composé de :

M^r. Fellah Mohammed Karim
M^r. Benaissa Abdelkader
M^r. Zidi Sid Ahmed
M^r. Allali Ahmed
M^r. Bouzeboudja Hamid
M^r. Tahri Ali

Pr. (UDL de Sidi Bel Abbas)
Pr. (UDL de Sidi Bel Abbas)
Pr. (UDL de Sidi Bel Abbas)
Pr. (U.S.T.Oran)
Pr. (U.S.T.Oran)
MCA. (U.S.T.Oran)

Président
Encadreur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

Soutenue le : 12/12/2018

Remerciements

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

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma profonde gratitude au Monsieur **Benaissa Abdelkader**, Pr. (U.D.L. Sidi Bel-Abbès), qui ma honoré par son encadrement et d'avoir accepté la lourde tâche de promoteur. Je lui exprime également ma profonde reconnaissance pour son dévouement et d'avoir bien voulu de me faire profiter pleinement de ses compétences scientifiques et de ses idées pour l'accomplissement de ce travail.

Je tiens également à remercier Monsieur **Fellah Mohammed Karim**, Pr. (U.D.L. Sidi Bel-Abbès), pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.

Je remercie tous les membres de jury :

Monsieur, **Zidi Sid Ahmed**, Pr. (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)

Monsieur, **Allali Ahmed**, Pr. (U.S.T.Oran)

Monsieur, **Bouzeboudja Hamid**, Pr. (U.S.T.Oran)

Monsieur, **Tahri Ali**, MCA (U.S.T.Oran)

qui ont acceptent de juger mon travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

Aussi, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **Saïd Barkat**, Pr. (université de M'sila), pour son aide, ses conseils précieux et ses encouragements incessants durant la préparation de ce travail.

Mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à Monsieur **Mansour Bouzidi**, MAA (université Kasdi merbah ouargla) pour ses aides, conseils, soutien et sympathie.

Je n'en serais pas là aujourd'hui si je n'avais été l'élève de tous mes anciens enseignants. C'est avec eux que j'ai découvert l'électrotechnique et que j'y ai pris goût, et c'est grâce à eux que j'ai pu surmonter un difficile apprentissage, et finalement continuer dans cette voie. Je leur en suis profondément reconnaissant.

Table des matières

Table des acronymes	xix
Liste des publications	xxi
Introduction Générale	1
1 Problèmes de qualité d'énergie dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils	5
1.1 Introduction	6
1.2 Présentation des systèmes de distribution triphasés à quatre fils	7
1.3 Problèmes liés à la qualité d'énergie dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils	7
1.3.1 Variations de l'amplitude de la tension	8
1.3.2 Fluctuations de fréquence	9
1.3.3 Distorsions harmoniques	10
1.3.4 Déséquilibre du système triphasé	11
1.4 Solutions aux problèmes de qualité d'énergie	12
1.4.1 Filtres classiques	12
1.4.2 Machines synchrones	13
1.4.3 Condensateurs de compensation	14
1.4.4 Topologies basées sur les transformateurs	14
1.4.5 Filtre actif triphasé à quatre fils	17
1.4.6 Systèmes FACTS	18
1.5 Analyse des systèmes triphasés déséquilibrés	18

1.5.1	Composantes symétriques dans le repère abc	18
1.5.2	Théorie des composantes symétriques instantanées	24
1.5.3	Composantes symétriques dans le repère $\alpha\beta$	27
1.5.4	Composantes symétriques dans le repère dq	28
1.6	Conclusion	29
2	État de l'art sur le STATCOM et le SMES	31
2.1	Introduction	33
2.2	Système de transmission flexible en courant alternatif	33
2.2.1	Classification basée sur la topologie de puissance	34
2.2.2	Classification basée sur la configuration de connexion au réseau	35
2.3	Le Static Compensator (STATCOM)	39
2.3.1	Comparaison entre SVC et STATCOM	39
2.3.2	Présentation du STATCOM pour le réseau de distribution (DSTATCOM)	40
2.3.3	Applications du DSTATCOM dans les systèmes d'alimentation	41
2.3.4	Principe de fonctionnement du DSTATCOM	42
2.4	Aperçu sur les périphériques de stockage d'énergie pour les systèmes FACTS	44
2.4.1	Accumulateurs	44
2.4.2	Accumulateurs sodium-soufre (NaS)	45
2.4.3	Unité de stockage d'énergie à volant d'inertie	45
2.4.4	Supercondensateurs	45
2.4.5	Unités de stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES)	46
2.5	Stockage d'énergie magnétique supraconductrice	47
2.5.1	Contexte historique du SMES	47
2.5.2	Classification de SMES	48

2.5.3	Caractéristiques des SMES	50
2.5.4	Inconvénients des SMES	51
2.5.5	Projets et applications du SMES	51
2.6	DSTATCOM couplé à une unité de stockage d'énergie magnétique supra- conductrice SMES	52
2.7	Conclusion	53
3	Modélisation et commande d'un DSTATCOM à quatre bras à trois ni- veaux	55
3.1	Introduction	56
3.2	Topologies du DSTATCOM pour les systèmes de distribution triphasés à quatre fils	56
3.2.1	DSTATCOM à base d'un convertisseur de tension à trois bras avec un simple condensateur du bus continu	57
3.2.2	DSTATCOM à base de convertisseur de tension à trois bras avec bus continu à point milieu	57
3.2.3	DSTATCOM à base d'un convertisseur de tension à quatre bras . .	59
3.3	Technologie des convertisseurs multiniveaux pour les systèmes DSTATCOM	60
3.4	DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux	60
3.4.1	Configuration du système DSTATCOM quatre bras à trois niveaux	60
3.4.2	Modèle mathématique de DSTATCOM quatre bras à trois niveaux	61
3.5	Modulation vectorielle tridimensionnelle	63
3.5.1	Modèle instantané de l'onduleur de tension à quatre bras à trois niveaux	63
3.5.2	Algorithme SVM tridimensionnel	64
3.6	Stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs du bus continu . . .	71
3.7	Conception des contrôleurs du DSTATCOM dans des conditions asymétriques	73
3.7.1	Boucle de contrôle externe des tensions	73

3.7.2	Contrôleur interne des courants	76
3.8	Résultats de simulation et interprétations	80
3.9	Conclusion	87
4	Modélisation et commande d'un DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux couplé à une unité SMES	89
4.1	Introduction	90
4.2	Modélisation du système DSTATCOM-SMES quatre bras à trois niveaux .	90
4.3	Principe de fonctionnement du hacheur bidirectionnel du DSTATCOM-SMES	93
4.4	Équilibrage des tensions des condensateurs et stratégie de commutation du hacheur	95
4.5	Contrôle du système DSTATCOM-SMES basé sur la théorie des composants symétriques	101
4.5.1	Contrôleur externe des tensions	101
4.5.2	Contrôleur interne des courants	104
4.6	Résultats de simulation et interprétations	105
4.7	Conclusion	108
5	Commande par mode glissant d'un système DSTATCOM-SMES	115
5.1	Introduction	116
5.2	Présentation des contrôleurs non linéaires	116
5.3	Aperçu sur les commandes non linéaires des systèmes DSTATCOM et SMES	117
5.4	Commande par mode glissant	119
5.4.1	Historique	119
5.4.2	Concept général de la commande par mode glissant	119
5.5	Commande par mode glissant du premier ordre	120
5.5.1	Conception de la commande	120

5.5.2	Phénomène de chattering et ses solutions	124
5.6	Commande par mode glissant d'ordre supérieur	128
5.7	Application de la commande par mode glissant sur le DSTATCOM quatre bras à trois niveaux	136
5.7.1	Commande par mode de glissant de premier ordre	137
5.7.2	Commande par mode glissant du second ordre	139
5.7.3	Résultats de simulation	143
5.8	Application de commande par mode glissant sur le système DSTATCOM-SMES à quatre bras trois niveaux	155
5.8.1	Commande par mode glissant du premier ordre	155
5.8.2	Commande par mode glissant de second ordre	157
5.8.3	Résultats de simulation et interprétations	158
5.9	Étude comparative entre les différentes méthodes de commande	175
5.10	Conclusion	180
Conclusion générale		181
A Échange d'états de commutation entre les secteurs		185
B Les paramètres des régulateurs		193
Bibliographie		195

Table des figures

1.1	Système de distribution triphasé à quatre fils	7
1.2	Filtre classique connectée au système de distribution triphasé à quatre fils .	13
1.3	Machine synchrone connectée au système de distribution triphasé à quatre fils	13
1.4	Transformateur en Zigzag connecté au système de distribution triphasé à quatre fils	15
1.5	Transformateur étoile-triangle connecté au système de distribution triphasé à quatre fils	15
1.6	Transformateur en T connecté au système de distribution triphasé à quatre fils	16
1.7	Transformateur étoile-hexagone connecté au système de distribution triphasé à quatre fils	17
1.8	Représentation vectorielle de $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$	19
1.9	Représentation vectorielle de l'opérateur a	20
1.10	Représentation vectorielle de l'opérateur a^2	21
1.11	Représentation vectorielle des composantes triphasés directes	21
1.12	Représentation vectorielle des composantes triphasés indirectes	22
1.13	Représentation vectorielle des composantes homopolaires	23
1.14	Extraction des composantes symétriques dans repère abc	25
1.15	Système déséquilibré et ses composantes directe, indirecte et homopolaire dans le domaine temporel	26
1.16	Transformation des variables abc triphasées en $dq0$	29
2.1	Dispositifs FACTS et leurs configurations de connexion au réseau	38
2.2	Caractéristiques tension-courant du SVC et STATCOM	40
2.3	Schéma simplifié d'un DSTATCOM connecté au système de distribution . .	41

2.4	Comparaison des éléments de stockage d'énergie	46
2.5	Bobine solénoïdes (en haut) et bobines toroïdales (en bas)	48
2.6	Combinaison de DSTATCOM-SMES connecté à un réseau électrique	53
3.1	Schéma d'un DSTATCOM à base de convertisseur de tension trois bras avec condensateur de bus continue simple	57
3.2	Schéma d'un DSTATCOM triphasé à base de VSC avec un condensateur à point milieu	58
3.3	Schéma d'un DSTATCOM à quatre bras à base d'un convertisseur de tension.	59
3.4	Schéma d'un DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux connecté au système de distribution triphasé à quatre fils	61
3.5	Circuit de commutation de l'onduleur à quatre bras à trois niveaux	63
3.7	Diagramme victorien en trois dimensions du convertisseur à quatre bras à trois niveaux	66
3.8	Nouveau vecteur de référence de tension dans le plan de 60 degrés	68
3.9	Surfaces limitant le tétraèdre 10 dans le prisme 4 du secteur 1	69
3.10	Séquences de commutation de tétraèdre 6 dans le prisme 1 du secteur 1	70
3.11	Présentation de la forme des états de commutation de la séquence $N^{\circ}4$ pour le demi bras supérieure pendant une période de commutation T_s	71
3.12	Structure de contrôle du DSTATCOM quatre bras à trois niveaux	74
3.13	Schéma bloc du régulateur de la tension du bus continu	75
3.14	Génération des composantes directe, indirecte et homopolaire des courants actif et réactif en utilisant la théorie des composantes symétriques	76
3.15	Le schéma bloc du régulateur des courants	79
3.16	Contrôleurs interne des courants du DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux	80
3.17	Réponse dynamique du système DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'une alimentation de charges équilibrés et déséquilibré :	83

3.18	Réponse dynamique du système DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'un défaut asymétrique.	84
3.19	Réponse dynamique du système DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'une alimentation de charge équilibré et déséquilibré	85
3.20	Réponse dynamique du système DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'un défaut asymétrique	86
4.1	schéma de DSTATCOM-SMES à quatre bras à trois niveaux connecté à un système de distribution à quatre fils	91
4.2	Fonctionnement du système en mode de charge, lorsque $D > 0,5$	93
4.3	Fonctionnement du système en mode de décharge, lorsque $D < 0,5$	94
4.4	Fonctionnement du système en mode veille, lorsque $D = 0,5$	94
4.5	Voies des courants du hacheur bidirectionnel à trois niveaux pour différents cas	96
4.6	Signaux de commande des interrupteurs du hacheur pendant une période de commutation pour le mode de charge $D > 0.5$	99
4.7	Signaux de commande des interrupteurs du hacheur pendant une période de commutation pour le mode de décharge $D < 0.5$	100
4.8	Signaux de commande des interrupteurs du hacheur pendant une période de commutation pour le mode veille $D = 0.5$	100
4.9	Schéma de commande du DSTATCOM-SMES à quatre bras à trois niveaux	102
4.10	Contrôleur de la tension du bus continu du système DSTATCOM-SMES .	103
4.11	Contrôleur de la tension du condensateur C_2 du bus continu du DSTATCOM-SMES	104
4.12	Résultats de simulation du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'une alimentation de charges équilibrés et déséquilibré	109
4.13	Résultats de simulation du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors l'échange d'énergies active et réactive	110

4.14	Résultats de simulation du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance durant d'un défaut asymetrique	111
4.15	Résultats de simulation du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'une alimentation de charges équilibrés et déséquilibrés	112
4.16	Résultats de simulation du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de de régulation de tension lors l'échange d'énergies active et réactive	113
4.17	Résultats de simulation du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension durant défaut asymetrique	114
5.1	Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase (a) glissement idéal, (b) glissement réel	120
5.2	Fonctions Sat avec un seuil et deux seuils	125
5.3	Fonction d'interpolation	126
5.4	Fonction pseudo-signe	126
5.5	Fonction arctangente	127
5.6	Fonction tangente hyperbolique	127
5.7	Régime glissant classique (a) et mode glissant d'ordre supérieur (b)	129
5.8	Intersection des 3 surfaces de commutation définit le point de référence x_{ref}	129
5.9	Trajectoires de phase de l'algorithme sous-optimal	132
5.10	Trajectoires de phase de l'algorithme de Twisting	134
5.11	Trajectoires de phase de l'algorithme de Super Twisting	135
5.12	Commande par mode glissant du premier ordre d'un DSTATCOM quatre bras à trois niveaux	145
5.13	Comportement du système DSTATCOM à quatre bras trois niveaux fonctionnent en mode de correction du facteur de puissance lors d'alimentation d'une charge équilibrée et déséquilibrée (cas de commande par mode glissant du premier ordre)	146

5.14	Comportement du système DSTATCOM à quatre bras trois niveaux fonctionnent en mode de correction du facteur de puissance pendant un défaut asymétrique (cas de commande par mode glissant du premier ordre)	147
5.15	Comportement dynamique du système DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux fonctionné en mode de régulation de tension lors d'alimentation de charges équilibrée et déséquilibrée (cas de commande par mode glissant du premier ordre)	148
5.16	Comportement dynamique du système DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux fonctionné en mode de régulation de tension pendant un défaut (cas de commande par mode glissant du premier ordre)	149
5.17	Commande par mode glissant du seconde ordre d'un DSTATCOM quatre bras à trois niveaux	150
5.18	Comportement dynamique du système DSTATCOM à quatre bras trois niveaux fonctionne en mode de correction du facteur de puissance lors d'alimentation d'une charge équilibrés et déséquilibré (cas de commande par mode glissant du seconde ordre)	151
5.19	Comportement dynamique du système DSTATCOM à quatre bras trois niveaux fonctionnent en mode de correction du facteur de puissance pendant d'un défaut asymétrique (cas de commande par mode glissant du seconde ordre)	152
5.20	Comportement dynamique du système DSTATCOM à quatre bras trois niveaux fonctionnent en mode de régulation de tension lors d'alimentation d'une charge équilibrée et déséquilibrée (cas de commande par mode glissant du seconde ordre)	153
5.21	Comportement dynamique du système DSTATCOM quatre bras à trois niveaux fonctionné en mode de régulation de tension pendant d'un défaut asymétrique (cas de commande par mode glissant seconde ordre)	154
5.22	Commande par mode glissant du premier ordre d'un DSTATCOM-SMES quatre bras à trois niveaux	161
5.23	Comportement dynamique du système DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'alimentation d'une charge équilibré et déséquilibré, (cas de commande par mode glissant premier ordre)	162

5.24	Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors de d'échange d'énergie active et réactive , (cas de commande par mode glissant du premier ordre)	163
5.25	comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance pendant un défaut asymetrique, (cas de commande par mode glissant du premier ordre)	164
5.26	Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'alimentation d'une charge équilibrés et dés-équilibré, (cas de commande par mode glissant du premier ordre)	165
5.27	Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'échange d'énergie active et réactive , (cas de commande par mode glissant du premier ordre)	166
5.28	Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension durant défaut, (cas de commande par mode glissant du premier ordre)	167
5.29	Commande par mode glissant du seconde ordre d'un DSTATCOM-SMES quatre bras à trois niveaux	168
5.30	Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'alimentation d'une charge équilibré et déséquilibré, (cas de commande par mode glissant du seconde ordre) . .	169
5.31	Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'échange d'énergie active et réactive , (cas de commande par mode glissant du seconde ordre)	170
5.32	Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance durant défaut, (cas de commande par mode glissant du seconde ordre)	171
5.33	Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'alimentation d'une charge équilibré et déséquilibré, (cas de commande par mode glissant du seconde ordre)	172
5.34	Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'échange d'énergie active et réactive , (cas de commande par mode glissant du seconde ordre)	173

5.35	Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension durant défaut, (cas de commande par mode glissant du seconde ordre)	174
5.36	Étude comparative entre les régulateurs PI, la commande par mode glissant du premier ordre (CMGPO), et du seconde ordre (CMGSO) en cas d'alimentation des charge équilibrée et déséquilibrée	177
5.37	Étude comparative entre les régulateurs PI, la commande par mode glissant du premier ordre , et du seconde ordre en cas d'un défaut	178
5.38	Étude comparative entre les régulateurs PI, la commande par mode glissant du premier ordre, et du seconde ordre en présence d'un défaut	179

Liste des tableaux

2.1	Dispositifs FACTS	34
2.2	Comparaison entre les différents types d'éléments de stockage d'énergie . .	47
2.3	Comparaison entre les deux types de SMES selon la température de fonctionnement	50
2.4	Exigences pour l'augmentation des différents facteurs	50
2.5	Applications et projets de SMES dans les systèmes d'énergie et de puissance	52
3.1	Parameters de Simulation	81
4.1	Etats de commutation du hacheur bidirectionnel à trois niveaux	95
4.2	Parameters de simulation	105
5.1	Étude comparative entre les trois contrôleurs du système DSTATCOM-SMES (commande par mode glissant du premier ordre : CMGPO, commande par mode glissant du seconde ordre :CMGSO)	176
A.1	Identification du prisme dans chaque secteur	185
A.2	Échange d'états de commutation dans les secteurs paires.	185
A.3	Échange d'états de commutation dans les secteurs impairs.	185
A.4	Échange d'états de commutation de chaque tétraèdre dans chaque prisme du secteur 1	186
A.5	Échange d'états de commutation de chaque tétraèdre dans chaque prisme du secteur 2	187
A.6	Les surfaces de limiation de chaque tétraèdre dans les prismes 1 et 2 du secteur 1	188
A.7	Les surfaces de limiation de chaque tétraèdre dans les prismes 3 et 4 du secteur 1	189

A.8	Les surfaces de limitation du chaque tétraèdre dans les prismes 1 et 2 du secteur 02	190
A.9	Les surfaces de limitation de chaque tétraèdre dans les prismes 3 et 4 du secteur 02	191
B.1	Les paramètres des régulateurs	194

Table des acronymes

FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
DFACTS	Distribution FACTS
DSTATCOM	Distributed Static compensator
SVM	Space Vector Modulation
3DSVM	SVM Tridimensionnel
2DSVM	SVM Bidimensionnel
VSC	voltage source converter
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Integrated gatecommutated thyristor
SVC	Static VAR Compensator
SVG	Static VAR Generator
SVS	Static VAR System
TCR	Thyristor-Controlled Reactor
TSC	Thyristor-Switched Capacitor
TCBR	Thyristor-Controlled Braking Resistor
TCSC	Thyristor-Controlled Series Capacitor
TSSC	Thyristor- Switched Series Capacitor
TCSR	Thyristor-Controlled Series Reactor
TSSR	Thyristor-Switched Series Reactor
TCPST	Thyristor Control Phase Shifting Transformer
TCVPAR	Thyristor Controlled Voltage and phase Angle regulators
UPFC	Unified Power Flow Controller
IPFC	Interline Power Flow Controller
HVDC	High Voltage Direct Current
PCC	Point of common coupling

Liste des publications

Le travail présenté dans cette thèse a donné lieu à un certain nombre de publications.

Journaux internationaux avec comité de lecture :

1. Bouafia Saber, Benaissa Abdelkader, Bouzidi Mansour, Barkat Said, “**Second order sliding mode control of three-level four-leg DSTATCOM based on instantaneous symmetrical components theory**”, Energy Systems 9 (1), 79-111.
DOI : 10.1007/s12667-016-0217-5

Conférences internationales avec comité de lecture :

1. Bouafia Saber, Benaissa Abdelkader, Bouzidi Mansour, Barkat Said, “**Integral sliding mode control of four-leg DSTATCOM coupled with SMES unit**”, Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B), 2017 5th International Conference.
DOI : 10.1109/ICEE-B.2017.8192037
2. Bouafia Saber, Benaissa Abdelkader, Bouzidi Mansour, Barkat Said, “**DC-link capacitor voltage balancing strategy for three-level four-leg DSTATCOM-SMES system**”, Systems and Control (ICSC), 2017 6th International Conference on, 583-588
DOI : 10.1109/ICoSC.2017.7958649
3. Bouafia Saber, Benaissa Abdelkader, Bouzidi Mansour, Barkat Said, “**Reactive power compensation in three-phase four-wire distribution system using four-leg DSTATCOM based on symmetrical components**”, Electrical Engineering (ICEE), 2015 4th International Conference on,
DOI : 10.1109/INTEE.2015.7416687.
4. Bouafia Saber, Benaissa Abdelkader, Bouzidi Mansour, Barkat Said, “**Three-level three-dimensional SVM with a simplified algorithm of three-level four-leg diode-clamped inverter**”, Electrical Engineering (ICEE), 2015 4th International Conference on,
DOI : 10.1109/INTEE.2015.7416729

Introduction générale

L'objectif de nos travaux de thèse est de répondre à une problématique causée par la fluctuation de charges dans un réseau de distribution quatre fils. En effet, ces charges génèrent généralement plus de courant réactif entraînant une forte consommation de la puissance réactive, un faible facteur de puissance, un courant de neutre excessif et un déséquilibre dans le réseau [1,2,3]. De plus, et en raison du fil neutre qui est souvent distribué, il apparaît des composantes homopolaires [1,4]. Cela dit, il devient évident de mettre en place des dispositifs capables de faire face à ces problèmes et que leur fonction est aussi bien nécessaire aujourd'hui que dans le futur. En dépit de cela, différentes solutions ont été rapportées dans la littérature [1,5,6]. Toutefois, avec les inconvénients qui peuvent en résulter, et compte tenu de la variété des conditions de fonctionnement et de la sévérité des incidents, mais aussi des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance et des nouvelles opportunités technologiques en matière de contrôle de l'énergie cela constitue un réel enjeu en matière de production de nouveaux équipements électroniques peu encombrantes n'occasionnant aucune résonance et faisant preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de charge polluante. [3,7-9]

Dans ce contexte, une solution forte séduisante est l'utilisation de dispositifs FACTS afin de compenser tous types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau de distribution et de mieux maîtriser le transit des puissances dans les lignes [1,4].

Le concept des FACTS a été proposé dans les années quatre-vingt comme une technologie de contrôle basée sur l'électronique de puissance offrant une opportunité d'améliorer la contrôlabilité, la stabilité et la qualité de puissance des systèmes de transmission [2,5,10]. Divers dispositifs FACTS ont été proposés pour diverses applications telles que le contrôle du flux d'énergie, le contrôle de tension, la compensation de puissance réactive, l'amélioration de la stabilité, l'atténuation des fluctuations des sources de production décentralisée [10].

Dans le système de distribution, ces dispositifs sont connus sous le nom de « Distribution FACTS » (DFACTS) [2,10]. On les trouve sous différentes configurations shunt, série et hybride. Le DSTATCOM (Distributed Static compensator) est l'un des principaux dispositifs DFACTS shunt qui a de maintes applications dans les systèmes de distribution [4,10]. Comparé aux compensateurs conventionnels, le DSTATCOM possède plusieurs avantages tels qu'un temps de réponse rapide, un espace d'installation réduit et une fiabilité supérieure dans diverses conditions de fonctionnement [2,4,10].

Pour faire face aux éventuels problèmes causés par le déséquilibre des charges dans un système quatre fils, nous avons opté pour un DSTATCOM quatre bras réalisé à par-

tir d'un onduleur de tension trois niveaux et contrôlé par un algorithme de modulation vectorielle tridimensionnelle (3DSVM) et ce pour des fins d'une part de la compensation du courant de neutre et de la puissance réactive et d'autre part pour la régulation de la tension. Par ailleurs, pour permettre au DSTATCOM d'échanger avec le réseau aussi bien de la puissance réactive que de la puissance active, on le couple à un dispositif de stockage d'énergie SMES via un hacheur bidirectionnel multiniveaux capable aussi d'assurer l'équilibrage des tensions des condensateurs du bus continu [1,10]. Le SMES fait partie des dispositifs FACTS qui s'intègre de plus en plus dans les systèmes de réglage des réseaux et contribue à l'augmentation de la marge de manœuvre de leur exploitation dans des conditions optimales.

La plupart des commandes du système DSTATCOM-SMES à quatre bras sont basées essentiellement sur des approches linéaires à base de contrôleurs PI [4,5]. En raison des propriétés non linéaires du système, le contrôleur PI ne peut pas garantir des performances satisfaisantes dans une large gamme de fonctionnements. Afin d'améliorer les performances de contrôle, deux approches de commande par mode glissant sont proposées. Il s'agit des commandes par mode glissant du premier ordre et du second ordre basée sur l'algorithme de Super-Twisting. Ces méthodes ont prouvé leur efficacité en termes de réduction de la distorsion harmonique totale, du temps de réponse et de réduction du dépassement des tensions du bus continu et du point de couplage commun. Enfin, une étude comparative est réalisée sur les performances obtenues par les contrôleurs proposés.

En vu d'atteindre nos objectifs, cette thèse est structurée de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré dans une première partie aux systèmes de distribution triphasés à quatre fils et les problèmes liés à la qualité d'énergie. Après une brève présentation, et à travers l'examen de la littérature, des solutions seront exposées. La deuxième partie est dédiée à l'analyse des systèmes triphasés déséquilibrés.

Le deuxième chapitre présentera des généralités sur le compensateur statique STATCOM ainsi que des unités de stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES). En premier lieu, une classification des systèmes FACTS selon la technologie d'électronique de puissance et selon la structure de connexion avec le réseau sera discutée. Ensuite, une présentation des compensateurs statiques pour un système de distribution ainsi que son principe de fonctionnement seront présentés. Les concepts, les classifications et les caractéristiques de conception des systèmes de stockage d'énergie magnétique supraconductrice seront aussi exposés. Finalement, un DSTATCOM couplé à une unité de stockage SMES sera présenté brièvement dans la deuxième partie de ce chapitre.

Le troisième chapitre présentera la modélisation et le contrôle d'un DSTATCOM à quatre bras trois niveaux connecté au réseau de distribution à quatre fils. La première partie discutera les différentes topologies du DSTATCOM dédié aux systèmes de distribution

triphasé à quatre fils. Ensuite, une fois la configuration choisie, le modèle mathématique du DSTATCOM à quatre bras trois niveaux sera exposé. La deuxième partie du chapitre sera consacrée à la présentation de l'algorithme de la modulation vectorielle tridimensionnelle pour l'onduleur quatre bras trois niveaux ainsi qu'à la stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs du bus continu. Enfin, des simulations seront effectuées pour tester les performances du DSTATCOM dans le cas d'un fonctionnement équilibré puis déséquilibré.

Le couplage du DSTATCOM à quatre bras trois niveaux à l'unité de stockage SMES fera l'objet du quatrième chapitre. En premier lieu, la modélisation du système DSTATCOM-SMES à quatre bras trois niveaux ainsi que le principe de fonctionnement du hacheur bidirectionnel sera traitée. Ensuite, la stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs du bus continu proposée sera discutée en détail. L'approche adoptée est assurée à l'aide du hacheur bidirectionnel à trois niveaux et n'a pas besoin d'un circuit supplémentaire, mais seulement d'une boucle de contrôle d'équilibrage de tension, qui sera ajoutée au système de contrôle principal. Enfin, des simulations seront effectuées pour examiner la stratégie proposée, ainsi que les performances de la commande du système DSTATCOM-SMES.

Afin d'améliorer les performances du système DSTATCOM-SMES, deux approches basées sur le mode glissant seront discutées dans le cinquième chapitre. Après une brève présentation des contrôleurs non linéaires, ce chapitre sera divisé en deux parties. La première partie présentera les deux commandes proposées. On commencera par le contexte historique et le concept général de la commande par mode glissant, ensuite quelques généralités sur la commande par mode glissant du premier ordre, le concept de la commande équivalente ainsi que le phénomène de chattering et ses remèdes seront exposés. L'une de ces solutions est l'approche de commande par mode glissant d'ordre supérieur. Cette approche sera basée sur l'algorithme de Super-Twisting. La deuxième partie de ce chapitre sera consacrée à l'application des commandes par mode glissant de premier et de deuxième ordre sur le système DSTATCOM-SMES à quatre bras trois niveaux.

Ce chapitre sera terminé par une série de résultats de simulations montrant les performances statiques et dynamiques des approches proposées. De plus, une étude comparative sera effectuée entre les trois commandes à savoir : le PI, les commandes par mode glissant du premier ordre et du second ordre.

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

Problèmes de qualité d'énergie dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils

Sommaire

1.1	Introduction	6
1.2	Présentation des systèmes de distribution triphasés à quatre fils	7
1.3	Problèmes liés à la qualité d'énergie dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils	7
1.3.1	Variations de l'amplitude de la tension	8
1.3.2	Fluctuations de fréquence	9
1.3.3	Distorsions harmoniques	10
1.3.4	Déséquilibre du système triphasé	11
1.4	Solutions aux problèmes de qualité d'énergie	12
1.4.1	Filtres classiques	12
1.4.2	Machines synchrones	13
1.4.3	Condensateurs de compensation	14
1.4.4	Topologies basées sur les transformateurs	14
1.4.5	Filtre actif triphasé à quatre fils	17
1.4.6	Systèmes FACTS	18
1.5	Analyse des systèmes triphasés déséquilibrés	18
1.5.1	Composantes symétriques dans le repère abc	18
1.5.2	Théorie des composantes symétriques instantanées	24
1.5.3	Composantes symétriques dans le repère $\alpha\beta$	27
1.5.4	Composantes symétriques dans le repère dq	28
1.6	Conclusion	29

1.1 Introduction

La distribution de l'énergie électrique, dernière étape de livraison aux consommateurs après son transport, n'est devenue nécessaire que dans les années 1880, lorsque l'électricité a commencé à être produite dans les centrales électriques. Avant cela, l'électricité était généralement générée où elle était utilisée. Les premiers systèmes de distribution d'énergie installés dans les villes ont été utilisés pour l'éclairage. Actuellement, l'électricité est généralement distribuée pour l'industrie et l'usage domestique par des systèmes triphasés à trois fils et à quatre fils.

La qualité de l'électricité est devenue un porté stratégique pour les producteurs d'énergie, les consommateurs ainsi que les compagnies de maintenance et gestion d'énergie électrique pour trois raison principale [1,3] :

1. La réduction des coûts pour la nécessité économique et compétitive tels que : la réduction des coûts liés au surdimensionnement des installations et aux factures énergétiques ainsi que les coûts liés à la perte de continuité de service et à la mauvaise qualité d'énergie électrique.
2. L'ouverture et la libéralisation du marché de l'électricité crée une compétitivité entre les compagnies d'électricité pour fournir une bonne qualité que possible.
3. L'accroissement d'équipements générateurs de perturbations et/ou eux-mêmes sensibles aux perturbations de la tension. Ces équipements sont reliés essentiellement aux technologies modernes dans l'industrie telle que les systèmes automatisés et informatique, variateurs de vitesse et l'éclairage fluo-compact.

Toutefois, la qualité de l'énergie électrique fournie aux consommateurs peut être caractérisée par deux facteurs [3] :

- Un facteur de continuité de l'alimentation, lié à l'impossibilité de stockage et correspondant pratiquement aux coupures de tension.
- Un facteur de qualité de la tension et du courant, prenant en considération tous les phénomènes autres que les coupures.

Les problèmes qui apparaissent chez les consommateurs sont presque toujours dus à leur propre installation et rarement importés du réseau [2,5]. Nous présenterons dans une premier partie de ce chapitre les problèmes qui peuvent apparaître dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils, suivi d'un bref aperçue sur leurs solutions. Dans une seconde partie, nous présenterons la théorie des composantes symétriques qui nous permettent l'analyse des systèmes triphasés déséquilibrés dans les repères abc et $dq0$.

1.2 Présentation des systèmes de distribution triphasés à quatre fils

Les réseaux électriques de distribution triphasés à quatre fils ont été largement utilisés dans les domaines commercial, domestique et industriel. En effet, ces systèmes sont utilisés lorsque à la fois un ensemble de charges monophasées et triphasées est servi, tel qu'un système mixte constitué d'éclairage et moteurs électriques où chaque client est alimenté par une phase et un neutre ou lorsqu'un groupe de clients partage le même neutre et absorbe des courants de phase déséquilibrés [1,2,5].

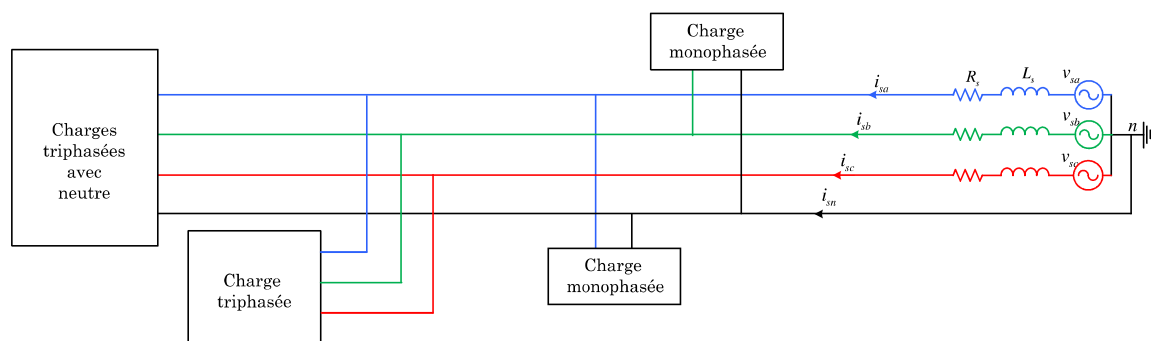


Figure 1.1: Système de distribution triphasé à quatre fils

La figure 1.1 présente un système de distribution triphasé à quatre fils alimentant différents types de charges. Comme l'indique cette figure, le système alimente des charges monophasées par l'un des fils de phase et le fil neutre, comme il alimente également des charges triphasées avec et sans connexion au fil neutre.

1.3 Problèmes liés à la qualité d'énergie dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils

Depuis de nombreuses années, le fournisseur d'énergie électrique s'efforce de garantir une qualité à l'énergie électrique ; les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur . Cependant, avec le développement des équipements où l'électronique a pris une prépondérance dans les systèmes de commande et de contrôle, les critères de qualité ont évolué [6].

Les systèmes de distribution triphasés à quatre fils alimentent généralement des charges équilibrées/non équilibrées et linéaires/non linéaires. Il faut remarquer que dans la pratique qu'il n'est pas toujours possible d'opérer dans des conditions idéales, et ce aux différents problèmes qui peuvent affecter la qualité d'énergie électrique. Pour un réseau électrique, la qualité d'énergie électrique est étroitement liée à la qualité de sa forme d'onde laquelle est caractérisée par [3,6] :

- Forme d'onde parfaitement sinusoïdale ;
- Equilibre et symétrie parfaite des phases de système quatre fils en amplitude et en phases ;
- Un niveau de tension stable avec l'absence de distorsions, de pics ou de creux ;
- Stabilité de la fréquence ;
- Facteur de puissance dans des limites tolérables.

Les problèmes liés à la qualité d'énergie dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils peuvent être classés en quatre grandes catégories comme suit :

1.3.1 Variations de l'amplitude de la tension

1.3.1.1 Origine

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'énergie électrique. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de 10% autour de la valeur nominale [1,2].

Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. Les principales causes de variations de l'amplitude de tension sont les perturbations dues à l'exploitation des réseaux comme la mise sous tension de gros transformateurs, les courts circuits, enclenchement des condensateurs et fonctionnement de certaines charges à puissance variable. Ces perturbations entraînent des variations de la tension qui se manifestent sous deux formes principales :

1. Des variations lentes de tension (creux de tension) se produisant à des intervalles de temps de quelque milliseconde à plusieurs secondes. Cette variation étant comprise entre 10% et 90% de la tension nominale est due aux charges fluctuantes où de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage tels que les moteurs, transformateur, etc. [3,2]. Elle sont liées également aux phénomènes aléatoires comme les courts-circuits accidentels sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes

des clients (défaut d'isolation, blessure de câbles, etc.)[6]. Pour caractériser un creux de tension, on calcule la valeur efficace de l'amplitude de la tension du signal sur une période de la fondamentale toutes les demi périodes [8].

2. Des variations rapides de tension (flicker) conduisant à une composition spectrale de fréquence dans la bande 0,5 et 25Hz d'une durée de quelques centièmes de seconde. Ces variations sont dues principalement à la propagation des courants d'appels sur les lignes du réseau. L'origine principale de ces courants est le branchement et débranchement des charges dont la puissance absorbée varie de manière rapide, tels que les fours à arc, machines à souder, etc [3,2].

En général ces variations ne dépassent pas les $\pm 10\%$ de la tension nominale. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension [8].

1.3.1.2 Conséquences

Les perturbations de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations domestiques et industrielles sensible tels que [1,2,8] :

- la continuité de fonctionnement des chaînes de fabrication dont le processus de production ne tolère aucun arrêt temporaire d'un élément dans la chaîne de fabrication. Ces chaînes peuvent être des imprimeries, sidérurgies, papeteries, pétrochimies, etc ;
- le fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à leur destruction totale ;
- des systèmes de sécurité et éclairages dans les immeubles de services sensibles tels que les hôpitaux, aéroports, immeubles de grande hauteur ou des locaux recevant du public ;
- la perte de synchronisme, décrochage et arrêt total des moteurs synchrones ;
- le fonctionnement des équipements et matériels informatiques dans les banques, les centres de traitement de données ainsi que les équipements de télécommunications.

1.3.2 Fluctuations de fréquence

Les fluctuations de fréquence sont caractérisées par des variations de la valeur nominale de la fréquence fondamentale, résultant des variations de vitesse des alternateurs suite à un déséquilibre entre la puissances mises en jeu par les centrales et les charges. Elles sont également provoquées par des pertes importantes de production ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge [1,2].

Si les variations sont très faibles (moins de 1%), ceci n'affecte pas le bon fonctionnement

des équipements électriques ou électroniques [6]. Il est à noter que ce type de perturbation concerne principalement le réseau de transport et non le réseau de distribution [8].

1.3.3 Distorsions harmoniques

1.3.3.1 Origine

La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau qui absorbent des courants non sinusoïdaux à cause de la présence des composantes à fréquence multiple de la fréquence fondamentale, où parfois à des fréquences quelconques. Ces charges peuvent être [5,9] :

- Charges industrielles tel que : équipements d'électronique de puissance, redresseurs à diodes ou à thyristors, variateurs de vitesse, onduleurs ;
- Charges basé sur l'utilisation de l'arc électrique tels que : des machines à souder, fours à arc, éclairage, et source d'harmonique temporaire tels que, les démarreurs électroniques des moteurs ou enclenchements de transformateurs de puissance ;
- Charges domestiques comme les fours à micro-ondes, plaques à induction, téléviseurs, imprimantes, ordinateurs, photocopieuses, gradateurs de lumière, équipements électroménagers et les lampes fluorescentes ;
- Charges non linéaires qui peuvent être comparées à une surintensité qui est prélevée du système à la fréquence fondamentale et réinjectée sur le réseau aux fréquences supérieures.

1.3.3.2 Conséquences

Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau.

Ils ont des effets nocifs sur les autres équipements électriques connectés en ces points tel que les chutes de tension ainsi que la déformation de la tension au point de raccordement commun qui peuvent également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de tous ces équipements [2,5,9].

Le taux de distorsion harmonique global (THD) est le paramètre qui permet de quantifier la pollution harmonique et donc le critère de jugement de la qualité d'énergie. La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. Le niveau d'harmoniques est régi par différentes normes proposées

1.3.4 Déséquilibre du système triphasé

1.3.4.1 Origine

En pratique, les systèmes électriques fonctionnent souvent dans un régime triphasé sinusoïdal équilibré où les trois grandeurs (tension ou courant) ont la même amplitude et même déphasage. Cependant, dans certaines situations, le système électrique peut fonctionner dans des conditions de fonctionnement déséquilibrées. Habituellement, il existe trois types de sources de déséquilibre dans les systèmes électriques [1,7] :

1. Charge déséquilibrée : dûe à un court-circuit dans la charge, une mauvaise répartition des charges sur le réseau ou des charges monophasées connectées à un système triphasé ;
2. Source déséquilibrée : dûe à un court-circuit à la source du système d'alimentation ou dans les transformateurs ;
3. Combinaison de charges et de sources déséquilibrées.

Il est à noter que la plupart des cas de déséquilibre dans le système électrique sont causés par des charges déséquilibrées plus que par des sources déséquilibrées [1,5,7]. Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance, la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont.

1.3.4.2 Conséquences

Les déséquilibres de tension engendrent des composantes indirectes et homopolaire du courant, qui provoquent le déséquilibre des installations triphasées et entraînent un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectés. Ils peuvent également conduire à un courant important circulant dans le fil neutre entraînant une réduction de l'efficacité et de la durée de vie des différents équipements connectés au point de couplage commun tels que [2,5,7] :

- Surcharge du système électrique ;
- Pertes de chaleur supplémentaires dans les différents équipements du systèmes ;
- Mauvais fonctionnement des charges monophasées alimentées par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),
- Problème de tension en mode commun ;

- Défaillance du câblage due à un dimensionnement incorrect et insuffisant de l'installation ;
- Création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal en présence de composantes inverses dans le fonctionnement des machines tournantes.

1.4 Solutions aux problèmes de qualité d'énergie dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils

Plusieurs recommandations ont été proposées par différentes organismes afin d'éliminer ou de réduire les effets de la plupart des problèmes liés à la qualité d'énergie dans les systèmes de distribution à quatre fils. Les solutions classiques sont des techniques faciles et rapides pour certains types de perturbation qui utilisent des composants passifs où des modifications dans l'installation tels que [1,7,11] :

- Déclassement du transformateur de distribution pour éviter son surchauffement et minimiser la distorsion excessive de la tension de sortie ;
- Surdimensionnement des conducteurs de neutre ;
- Alimentation des charges polluantes par une source séparée ;
- Utilisation de conducteurs de neutres séparés pour les charges non linéaires et asymétriques afin d'éviter un conducteur neutre commun avec d'autres charges. Cependant, ceci est presque impossible lorsque les charges sont largement connectées et dispersées ;
- Connection des charges les plus polluantes en amont du réseau ;
- Placement des inductances en amont de ces charges.

Toutefois, ces solutions ne sont efficaces que temporairement et présentent des inconvénients et des limitations [7]. Pour éviter ces limitations, de nombreux dispositifs et techniques de compensation ont été introduites. Par la suite, les solutions les plus courantes sont détaillées :

1.4.1 Filtres classiques

Ces types de filtres sont à base d'éléments passifs, ceci signifie qu'ils sont accordés à une fréquence harmonique spécifique. Les filtres harmoniques conventionnels sont généralement connectés entre les phases et le fil neutre afin de filtrer le courant de neutre dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils. Cette topologie comporte quatre branches passives connectées en étoile figure 1.2.

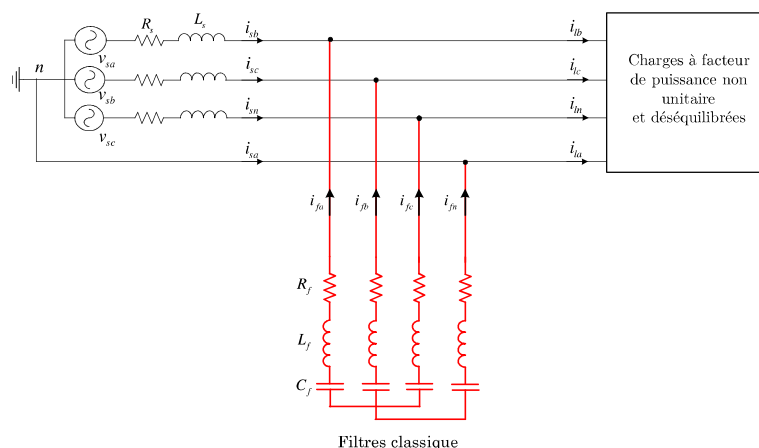


Figure 1.2: Filtre classique connecté au système de distribution triphasé à quatre fils

Les impédances de phase du filtre sont identiques et sont différentes au fil de neutre. Ces configurations présentent une capacité de filtrage inefficace dus à la sensibilité et au vieillissement des composants [1,2,7].

1.4.2 Machines synchrones

L'une des méthodes les plus utilisées pour absorber les courants harmoniques et homopolaires est le recours à la machine synchrone.

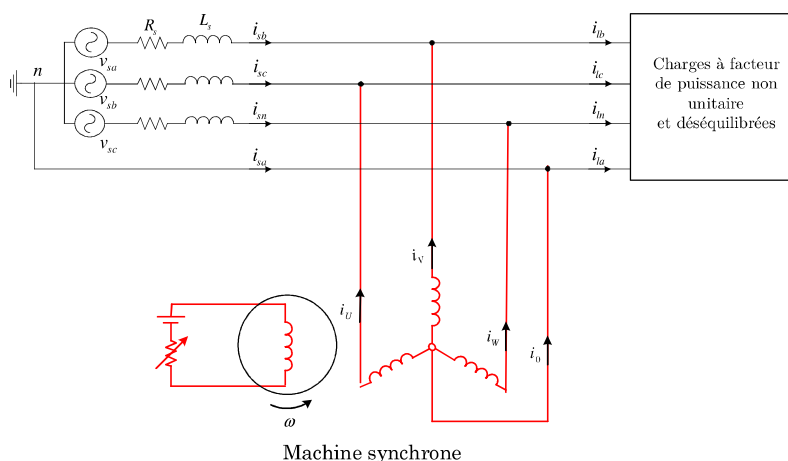


Figure 1.3: Machine synchrone connectée au système de distribution triphasé à quatre fils

Comme le montre la figure 1.3, la machine synchrone est connectée en shunt entre le système électrique et la charge. Le point neutre de l'enroulement d'induit de la machine

synchrone est relié au fil de neutre. Dans cette méthode, la machine synchrone peut être utilisée comme un condensateur synchrone pour contrôler la puissance réactive dans les systèmes de distribution et/ou fonctionner comme un moteur ou un groupe électrogène où aucun contrôleur supplémentaire n'est nécessaire [7]. Cependant, le coût de maintenance élevé, de plus les caractéristiques de compensation inadéquates dans certains cas, limitent son application [5].

1.4.3 Condensateurs de compensation

La méthode la plus simple de compensation consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau pour améliorer le facteur de puissance du réseau d'alimentation, à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance pour la compensation locale ou près d'un transformateur d'alimentation. Le principal inconvénient de ce type de compensation, est la fourniture d'une puissance réactive fixe qui ne peut s'adapter aux besoins des installations (variation de l'énergie réactive aléatoire)[3,7].

1.4.4 Topologies basées sur les transformateurs

Une autre solution pour résoudre les problèmes rencontrés dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils est l'utilisation des transformateurs spéciaux [7] :

1.4.4.1 Transformateurs en Zigzag

Le transformateur en zigzag est connecté à proximité et en parallèle avec la charge. Le transformateur en zigzag se compose de trois transformateurs monophasés avec un rapport unitaire. Ainsi, les courants d'entrée circulant dans les enroulements primaires sont égaux aux courants de sortie sortant des enroulements secondaires figure 1.4. La taille du transformateur en zigzag dépend de la quantité de déséquilibre de charge et du contenu harmonique [5,7].

Cependant, le courant de neutre élevé dans le système de distribution triphasé à quatre fils peut endommager aussi bien le transformateur en zigzag que le transformateur de distribution. Pour réduire ces conséquences, une inductance est insérée dans le conducteur neutre du côté de réseau ce que diminue ce courant et améliore les performances du transformateur en zigzag [7].

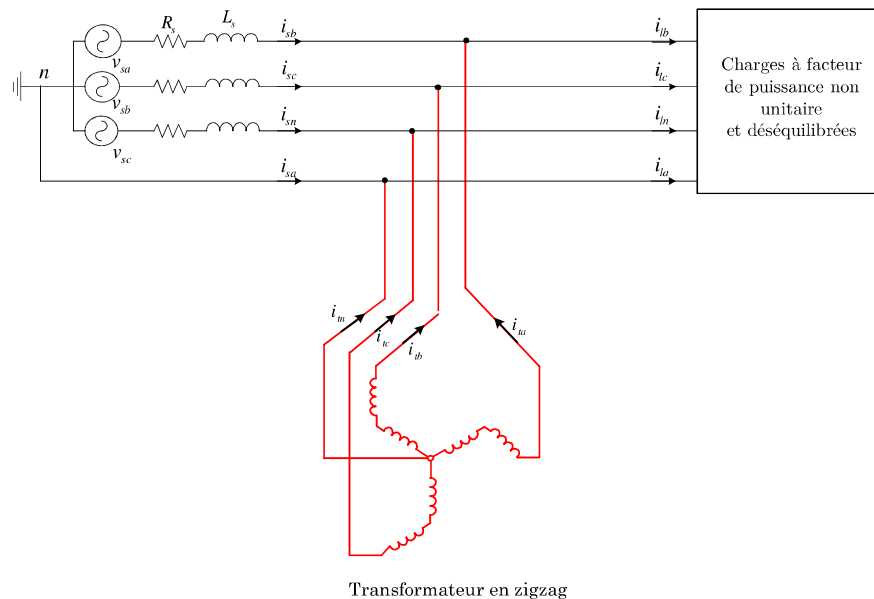


Figure 1.4: Transformateur en Zigzag connecté au système de distribution triphasé à quatre fils

1.4.4.2 Transformateurs étoile-triangle

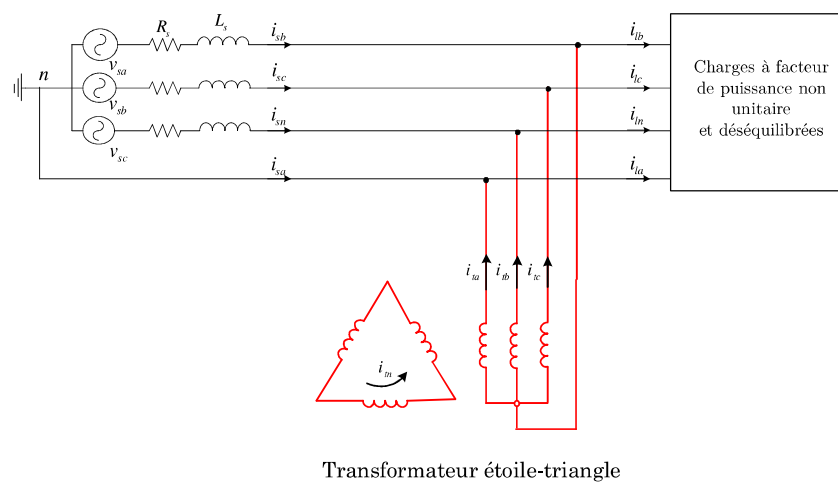


Figure 1.5: Transformateur étoile-triangle connecté au système de distribution triphasé à quatre fils

Le transformateur étoile-triangle peut également utilisé pour réduire le problème de courant du neutre dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils. Comme montre la figure 1.5, l'enroulement primaire en étoile du transformateur offre un chemin de faible

1.4.4.3 Transformateurs en T

Charges à facteur de puissance non unitaire et déséquilibrées

Transformateur connecté en T

Figure 1.6: Transformateur en T connecté au système de distribution triphasé à quatre fils

Le transformateur étoile-hexagone est une autre topologie dédiée à la réduction du courant neutre dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils. Le transformateur

étoile-hexagone comprend trois enroulements monophasés et un enroulement hexagonal. Dans cette configuration, l'enroulement primaire en étoile fournit un chemin de faible impédance pour les courants harmoniques homopolaires et l'enroulement secondaire en hexagone fournit un chemin pour la circulation des courants induits homopolaires figure 1.7. Ses caractéristiques de compensation dépendent de la tension de la source et de l'impédance du transformateur [2,7].

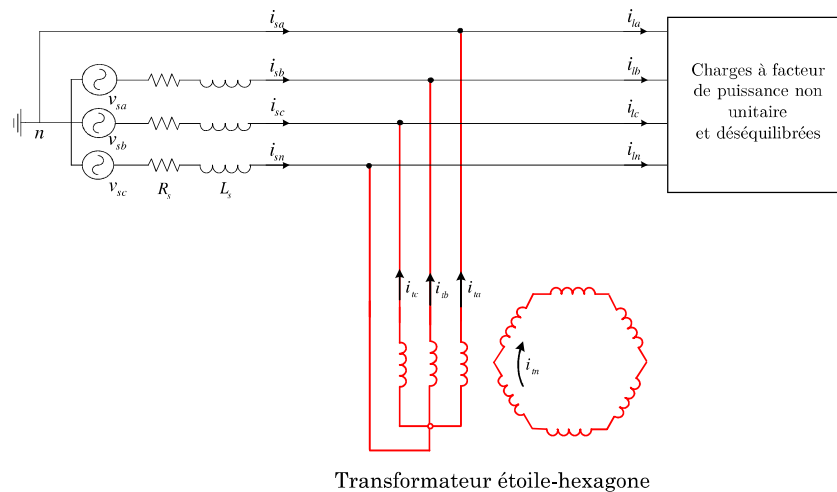


Figure 1.7: Transformateur étoile-hexagone connecté au système de distribution triphasé à quatre fils

1.4.5 Filtre actif triphasé à quatre fils

Pour surmonter les imperfections des filtres passifs et atténuer la pollution dans les réseaux causée par les charges non linéaires, le filtre actif a été mis en place vers les années 1970. Cette méthode a été considérée comme la solution la plus efficace pour réduire le taux d'harmoniques. Le filtre actif triphasé à quatre fils est une version conçue pour les systèmes de distribution triphasés à quatre fils afin de compenser les courants déséquilibrés, atténuer les harmoniques et compenser la puissance réactive nécessaire aux charges [5,9].

Il existe plusieurs familles de filtre actif à savoir [5,6] :

1. Le filtre actif parallèle : utilisée pour compenser les perturbations de courants tels que les harmoniques, la puissance réactive et le déséquilibre ;
2. Le filtre actif série : utilisé pour compenser les perturbations de tension telle que les creux de tension, les harmoniques et aussi les déséquilibres de tension ;
3. Les combinaisons parallèle-série actifs : sont des équipements universels pour compenser les perturbations de courant et ainsi que de tension ;
4. Les combinaisons hybride active et passive : Ces topologies sont conçues dans le but d'optimiser le rapport performance/coût.

1.4.6 Systèmes FACTS

Afin d'augmenter la performance dynamique et réaliser une compensation adaptative en fonction de la consommation d'énergie réactive variable de la charge, il est nécessaire d'utiliser de nouvelles technologies basées sur électronique de puissance appelés FACTS (Flexible AC transmission systems) [12-34]

Dans cette thèse, nous nous concentrerons sur les FACTS en tant que solution à la plupart des problèmes des systèmes de distribution triphasés à quatre fils, y compris la compensation de la puissance réactive, le réglage de la tension et la compensation du courant neutre en cas de présence de charges déséquilibrées et/ou des défauts asymétriques dans le réseau.

1.5 Analyse des systèmes triphasés déséquilibrés

En pratique, les systèmes électriques fonctionnent habituellement dans un régime triphasé sinusoïdal équilibré. Cependant, dans certaines situations, le système électrique peut fonctionner dans des conditions de fonctionnement déséquilibré. La méthode la plus courante pour analyser et étudier les circuits asymétriques est la théorie des composantes symétriques [1,2].

1.5.1 Composantes symétriques dans le repère abc

En 1918, Dr. Fortescue a proposé le concept des composantes symétriques pour la décomposition des phaseurs complexes déséquilibrés. La théorie des composantes symétriques

peut analyser les problèmes de déséquilibre en transformant arbitrairement les quantités triphasées asymétriques (tensions ou courants) en quantités symétriques et donc réduire la complexité de l'analyse lorsque le système d'alimentation est perturbé [1,7].

Avant de présenter la théorie des composantes symétriques dans le repère abc et d'établir les relations symétriques entre les phases, il convient de commencer par un développement général de la représentation vectorielle tournante et complexe.

Représentation vectorielle tournante

Soit deux vecteurs $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$ définis par :

$$\vec{V}_1 \xrightarrow{R_\theta} \vec{V}_2 \quad (1.1)$$

où : R_θ est le vecteur tournant, comme le montre la figure 1.8.

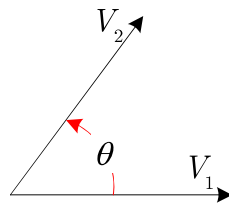


Figure 1.8: Représentation vectorielle de $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$

alors $\vec{V}_2$ est l'image de $\vec{V}_1$ par R_θ :

$$\vec{V}_2 = R_\theta(\vec{V}_1) \quad (1.2)$$

et $\|\vec{V}_2\| = \|\vec{V}_1\|$; $\widehat{\vec{V}_1 \vec{V}_2} = \theta$.

Représentation complexe

Soit : (x_1, y_1) , coordonnées de $\vec{V}_1$ et (x_2, y_2) , les coordonnées de $\vec{V}_2$.

V_1 est la représentation complexe de $\vec{V}_1$ où $V_1 = x_1 + jy_1$.

V_2 est la représentation complexe de $\vec{V}_2$ où $V_2 = x_2 + jy_2$.

L'opérateur $e^{j\theta}$ est la rotation de R_θ dans le plan complexe où :

$$R_\theta \rightarrow e^{j\theta} \quad (1.3)$$

$$V_2 = e^{j\theta} V_1$$

L'opérateur j est la rotation de l'angle 90° donné par : $j = e^{j90^\circ}$.

Définissons un nouvel opérateur dit a qui a est une rotation d'un angle de 120° . L'opérateur a représenté sur la figure 1.9 est donné par :

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1.4)$$

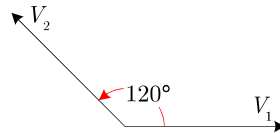


Figure 1.9: Représentation vectorielle de l'opérateur a

L'opérateur a^2 peut être défini comme une rotation d'un angle de 240° , figure 1.10 et donné par :

$$a^2 = \left(e^{j120^\circ}\right)^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1.5)$$

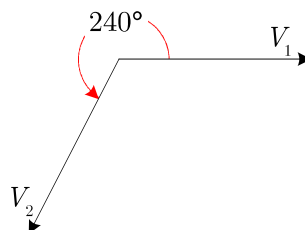


Figure 1.10: Représentation vectorielle de l'opérateur a^2

Théorème de Fortescue : Un ensemble déséquilibré de N phaseurs connectés peuvent être résolus en N systèmes de phase appelés les composantes symétriques des phaseurs d'origine. Pour un système triphasé, les trois composantes sont connues sous le nom de composantes directe, indirecte et homopolaire [12].

Composantes triphasées directes

Les composantes directes de courant ou de tension triphasés sont souvent désignées par l'exposant «1» ou «+», et présentent les phaseurs équilibrés triphasés réguliers. Les composantes directes notées par V_a^+ , V_b^+ et V_c^+ ont les caractéristiques suivantes :

- même amplitude ;
- décalées de 120° ;
- et arrangées de telle sorte qu'un observateur voit les vecteurs passer par 120° dans l'ordre V_a^+ , V_c^+ , V_b^+ .

Les composantes directes sont décrites par l'équation (1.6) et représentées par la figure 1.11.

$$\begin{pmatrix} V_a^+ \\ V_b^+ \\ V_c^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} V^+ \quad (1.6)$$

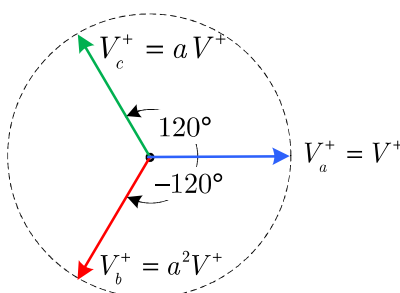


Figure 1.11: Représentation vectorielle de composantes triphasées directes

Composantes triphasés indirectes

Les composantes indirectes des courants et des tensions présentent les phaseurs équilibrés triphasés inverses et sont souvent désignées par l'exposant «2» ou «−». Les composantes indirectes décrites par l'équation (1.7) et représentées par la figure 1.12 ont les caractéristiques suivantes :

- même amplitude ;
- décalées de 120° ;
- et arrangées de telle sorte qu'un observateur voit les vecteurs passer par 120° dans l'ordre V_a^-, V_b^-, V_c^- .

$$\begin{pmatrix} V_a^- \\ V_b^- \\ V_c^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} V^- \quad (1.7)$$

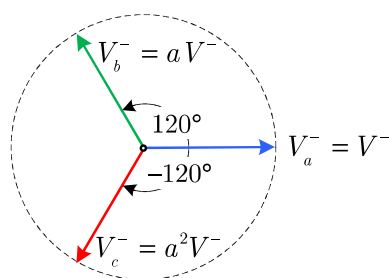


Figure 1.12: Représentation vectorielle des composantes triphasés indirectes

Composantes homopolaires

Les composantes homopolaires de courants (ou de tensions) sont souvent désignées par l'exposant "0", et représentés par V_a^0, V_b^0, V_c^0 avec les caractéristiques suivantes :

- même amplitude ;
- en phase et donc colinéaires ;
- et l'observateur les voit tous passer en même temps.

Les composantes homopolaires peuvent être décrites par l'équation (1.8) et représentées par la figure 1.13.

$$\begin{pmatrix} V_a^0 \\ V_b^0 \\ V_c^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} V^0 \quad (1.8)$$

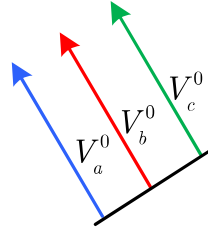


Figure 1.13: Représentation vectorielle de composante homopolaire

En définitif, en utilisant la matrice de transformation T l'ensemble original de phaseurs s'écrira en termes de composantes symétriques comme suit :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} V^+ \\ V^- \\ V^0 \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

Où :

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

Les composantes symétriques peuvent être alors transformées en repère abc en utilisant la matrice de transformation inverse T^{-1} :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = T^{-1} \begin{pmatrix} V^+ \\ V^- \\ V^0 \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

Où :

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

1.5.2 Théorie des composantes symétriques instantanées

En général, la théorie des composantes symétriques de Fortescue a été proposée qu'en termes de phaseurs. La première application des composants symétriques dans le domaine temporel a été présentée par Lyon [13] , c'est ce qu'on appelle la théorie des composantes symétriques instantanées.

Lyon a prouvé, qu'en utilisant la même approche que la théorie de Fortescue, il était possible d'analyser un système triphasé déséquilibré en utilisant des calculs en temps réel dans les cas stable et transitoire du système électrique.

Dans la théorie de Lyon, l'hypothèse la plus importante est que les phaseurs complexes de la théorie des composantes symétriques sont remplacés par des fonctions dépendant du temps, ce qui correspond au concept des composantes instantanées. Les composantes symétriques (de tension ou de courant) dans le domaine temporel sont définies comme v^0 , v^+ , v^- . Les valeurs instantanées des composantes directe, indirecte et homopolaire selon la théorie de Lyon, sont formulées comme suit :

$$\begin{aligned} v_a &= v_a^+ + v_a^- + v_a^0 \\ v_b &= v_b^+ + v_b^- + v_b^0 \\ v_c &= v_c^+ + v_c^- + v_c^0 \end{aligned} \quad (1.13)$$

Le vecteur tension (courant) en fonction des composantes directe et indirecte est donnée par :

$$v_{abc} = v_{abc}^+ + v_{abc}^- + v_{abc}^0 = V^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} + V^- \begin{bmatrix} \cos(-\omega t) \\ \cos\left(-\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(-\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} + V^0 \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Où V^+ , V^- et V^0 sont respectivement les amplitudes des composantes directe, indirecte et homopolaire de la tension.

Selon la théorie de Lyon, les composantes directe et indirecte instantanées de la tension sont formalisées par les équations :

$$v_{abc}^+ = \begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_b^+ \\ v_c^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

$$v_{abc}^- = \begin{bmatrix} v_a^- \\ v_b^- \\ v_c^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

La transformation des tensions déséquilibrées en composantes symétriques instantanées (et la transformation inverse) est similaire à la théorie de Fortescue. La différence se présente dans les opérateurs de déplacement.

Pour calculer les valeurs instantanées des composantes symétriques, l'opérateur de déplacement du domaine temporel doit être introduit. L'idée est de remplacer l'opérateur de rotation du phaseur par un opérateur de déphasage dans le domaine temporel, ce que signifie que l'opérateur a est interprété comme un retard de 120° et a^2 comme un retard de 240° .

L'extraction des composantes symétriques dans repère abc est schématisée par la figure 1.14.

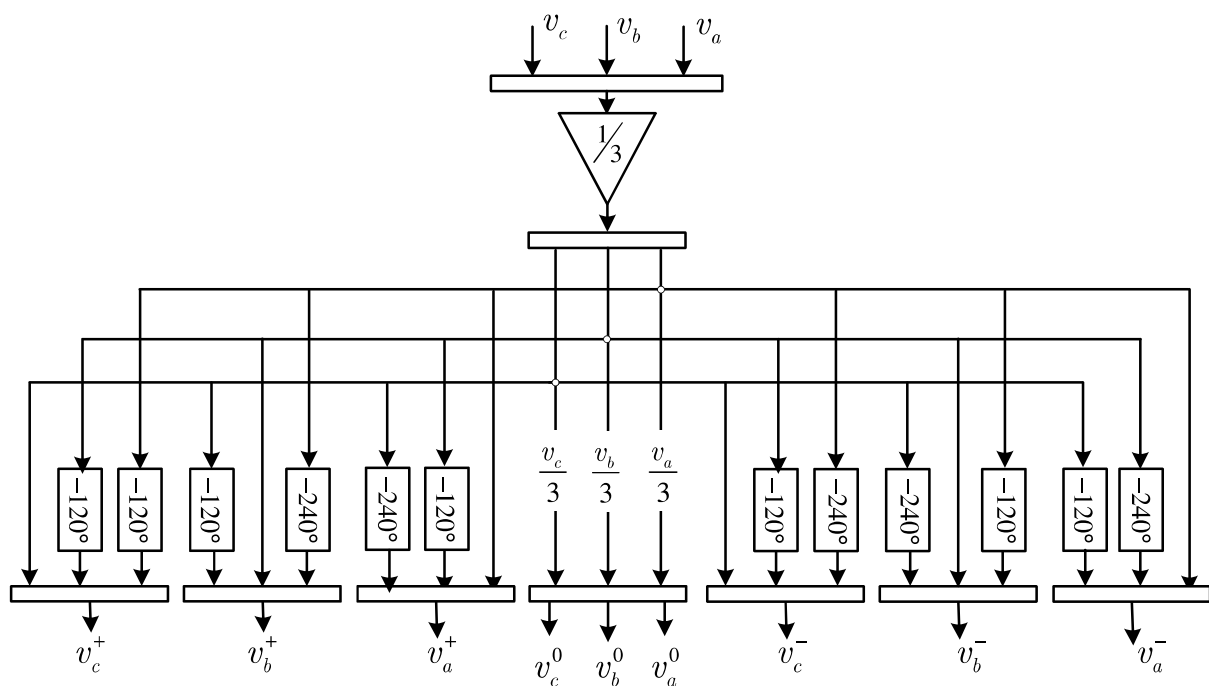


Figure 1.14: Extraction des composantes symétriques dans repère abc

La figure 1.15 représente un signal déséquilibré et ses composantes directe, indirecte et homopolaire dans le domaine temporel.

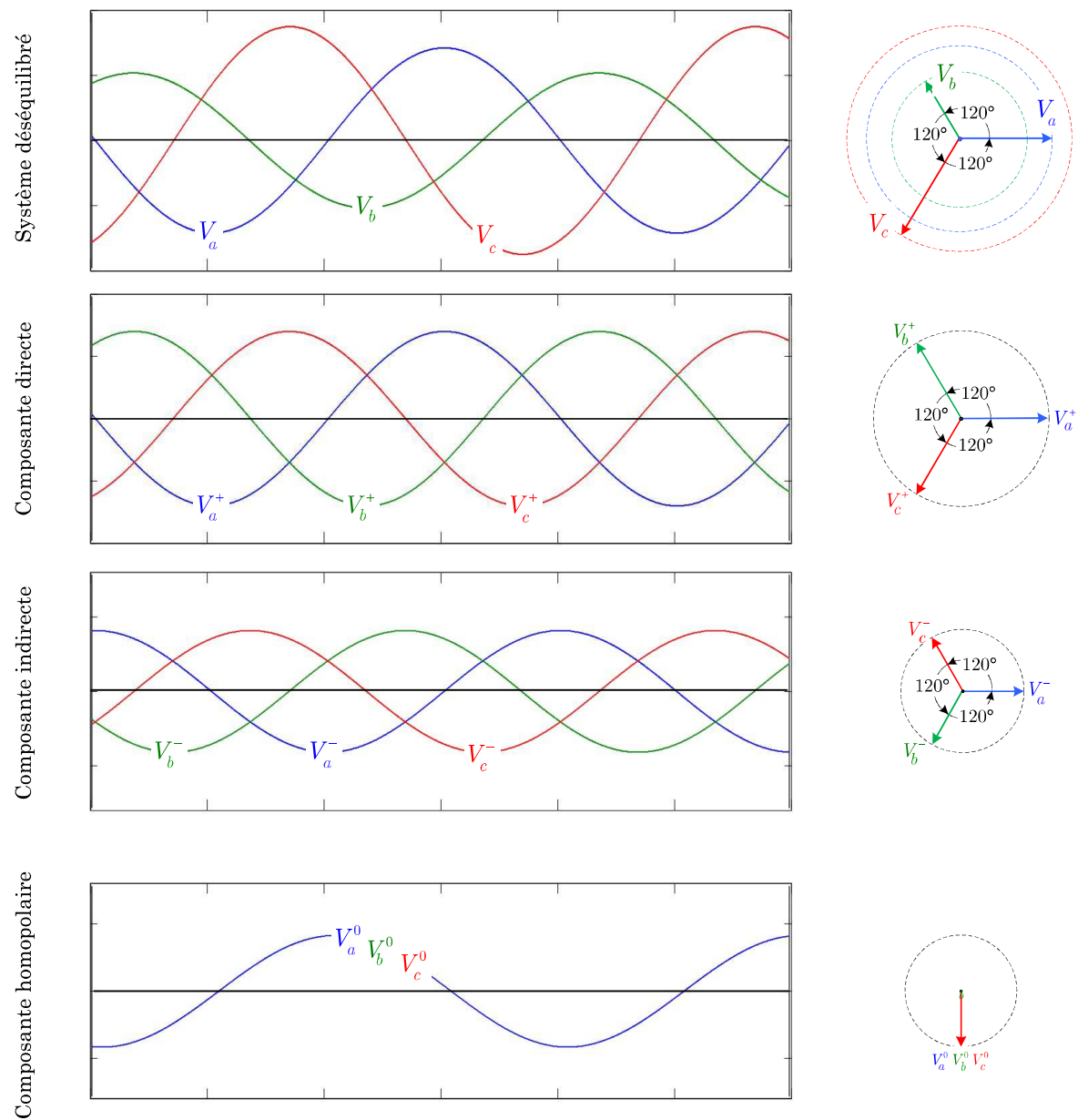


Figure 1.15: Système déséquilibré et ses composantes directe, indirecte et homopolaire dans le domaine temporel

1.5.3 Composantes symétriques dans le repère $\alpha\beta$

Les transformations de Clarke et de Park sont largement utilisées dans l'analyse et l'étude des applications des systèmes électriques, y compris les dispositifs de distribution à quatre fils.

La transformation de Clarke est utilisée pour la conversion des signaux triphasés du repère abc en deux signaux α, β dans le repère stationnaire. Il est donnée par :

$$\begin{pmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_o \end{pmatrix} = T_{\alpha\beta o} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \quad (1.17)$$

Où $T_{\alpha\beta o}$ est la matrice de transformation donnée par :

$$T_{\alpha\beta o} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (1.18)$$

La transformée de Clarke dans le repère stationnaire peut être représentée par la somme de composantes directe et indirecte comme suit :

$$v = v_{\alpha\beta}^+ + v_{\alpha\beta}^- \quad (1.19)$$

Où, chacune des tensions $v_{\alpha\beta}^+$ et $v_{\alpha\beta}^-$ est mise sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} v_{\alpha\beta}^+ &= v_\alpha^+ + jv_\beta^+ \\ v_{\alpha\beta}^- &= v_\alpha^- + jv_\beta^- \end{aligned} \quad (1.20)$$

Les deux vecteurs $v_{\alpha\beta}^+$ et $v_{\alpha\beta}^-$ sont donné par :

$$\begin{aligned} v_{\alpha\beta}^+ &= \begin{bmatrix} v_\alpha^+ \\ v_\beta^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta} \\ v_{\alpha\beta}^- &= \begin{bmatrix} v_\alpha^- \\ v_\beta^- \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (1.21)$$

avec : q est un opérateur est interprété comme un retard de de 90° .

alors, les composantes direct dans le repère $\alpha\beta o$ sont donnée par :

$$\begin{aligned} v_{\alpha}^{+} &= \frac{1}{2} \left[v_{\alpha}(t) - v_{\beta} \left(t - \frac{T}{4} \right) \right] \\ v_{\beta}^{+} &= \frac{1}{2} \left[v_{\beta}(t) - v_{\alpha} \left(t - \frac{T}{4} \right) \right] \end{aligned} \quad (1.22)$$

Où $T = 1/f$, f est la fréquence fondamentale.

Une fois que les composantes directes sont calculées, les composantes indirectes sont calculées à partir des composantes originales dans le repère $\alpha\beta$ comme suit :

$$\begin{aligned} v_{\alpha}^{-} &= v_{\alpha} - v_{\alpha}^{+} \\ v_{\beta}^{-} &= v_{\beta} - v_{\beta}^{+} \end{aligned} \quad (1.23)$$

1.5.4 Composantes symétriques dans le repère dq

La transformation du Park est donnée par :

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{pmatrix} = T_{dgo} \begin{pmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \\ v_o \end{pmatrix} \quad (1.24)$$

où la matrice de transformation dgo est définie comme :

$$T_{dgo} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.25)$$

Alors, les composantes directes et indirectes dans le repère $\alpha\beta$ deviennent dans le repère dgo comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_d^{+} \\ v_d^{-} \\ v_d^{-} \\ v_d^{-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta^{+} & \sin \theta^{+} & 0 & 0 \\ -\sin \theta^{+} & \cos \theta^{+} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta^{-} & \sin \theta^{-} \\ 0 & 0 & -\sin \theta^{-} & \cos \theta^{-} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha}^{+} \\ v_{\beta}^{-} \\ v_{\alpha}^{-} \\ v_{\beta}^{-} \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

La figure 1.16 résume la transformation des variables abc triphasées en dgo basées sur

la théorie des composantes symétriques :

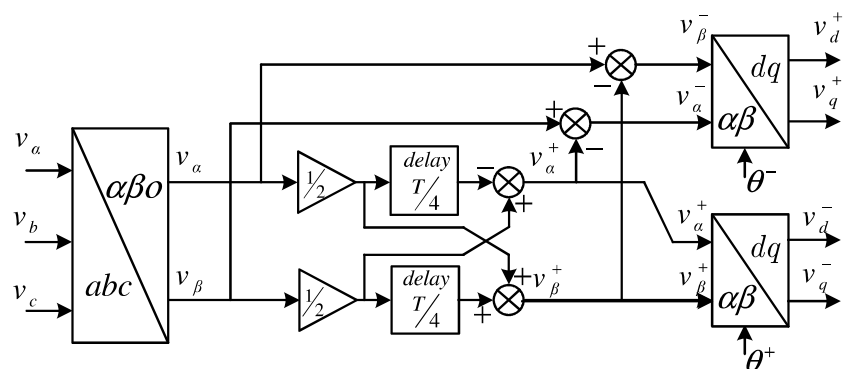


Figure 1.16: Transformation des variables abc triphasées en $dq0$

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les causes, les problèmes, et les conséquences des différentes perturbations affectant le réseau de distribution à quatre fils. Nous avons constaté que les problèmes liés à la qualité d'énergie telle que la variation de l'amplitude de tension, de fréquence, problème d'harmonique et le déséquilibre du système triphasé présentent des inconvénients sérieux qui peuvent conduire à l'échauffement des équipements électriques, l'arrêt et jusqu'à la destruction totale des équipements.

Plusieurs techniques et solutions d'atténuation des problèmes liés à la qualité d'énergie ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux perturbations des charges. On a constaté aussi que les solutions à base de transformateurs afin de réduire le problème de déséquilibre du système triphasé présentent des inconvénients à cause de ses caractéristiques de compensation limitées. Actuellement, les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance rend les filtres actifs et les systèmes FACTS parmi les solutions les plus efficaces pour atténuer les perturbations dans les systèmes de distribution triphasée à quatre fils.

En outre, la théorie des composantes symétriques connue comme la méthode la plus utilisée pour analyser les systèmes triphasés déséquilibré a été largement discutée aussi bien dans le repère abc que dans le repère $dq0$.

Dans le chapitre suivant, on présentera les systèmes FACTS en discutant les différentes classifications plus particulièrement le STATCOM pour le réseau de distribution, en mettant l'accent sur les périphériques de stockage d'énergie pour les systèmes FACTS en

insistant sur les unités de stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES).

État de l'art sur le compensateur statique (STATCOM) et les unités de stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES)

Sommaire

2.1	Introduction	33
2.2	Système de transmission flexible en courant alternatif	33
2.2.1	Classification basée sur la topologie de puissance	34
2.2.2	Classification basée sur la configuration de connexion au réseau	35
2.3	Le Static Compensator (STATCOM)	39
2.3.1	Comparaison entre SVC et STATCOM	39
2.3.2	Présentation du STATCOM pour le réseau de distribution (DSTATCOM)	40
2.3.3	Applications du DSTATCOM dans les systèmes d'alimentation	41
2.3.4	Principe de fonctionnement du DSTATCOM	42
2.4	Aperçu sur les périphériques de stockage d'énergie pour les systèmes FACTS	44
2.4.1	Accumulateurs	44
2.4.2	Accumulateurs sodium-soufre (NaS)	45
2.4.3	Unité de stockage d'énergie à volant d'inertie	45
2.4.4	Supercondensateurs	45
2.4.5	Unités de stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES)	46
2.5	Stockage d'énergie magnétique supraconductrice	47
2.5.1	Contexte historique du SMES	47
2.5.2	Classification de SMES	48
2.5.3	Caractéristiques des SMES	50
2.5.4	Inconvénients des SMES	51
2.5.5	Projets et applications du SMES	51

2.6	DSTATCOM couplé à une unité de stockage d’énergie magnétique supraconductrice SMES	52
2.7	Conclusion	53

2.1 Introduction

En 1988, le Dr N. Hingorani a introduit le concept de système de transmission flexible en courant alternatif (Flexible AC Transmission Systems : FACTS) comme une philosophie de contrôle basée sur l'électronique de puissance [14]. Cette approche offre plus de contrôlabilité, de stabilité et une amélioration de la qualité d'énergie dans les systèmes de transmission à courant alternatif .

D'autre part, pour améliorer les performances et de bénéficier de certaines caractéristiques, des dispositifs de stockage d'énergie couplés aux systèmes FACTS ont été proposés et étudiés dans la littérature [1,27]

Ce chapitre présentera un état de l'art sur les différents FACTS connectés en shunt, série et en hybride ainsi que les dispositifs de stockage d'énergie disponible pour les systèmes d'alimentation. On donnera également un aperçu sur le principe de fonctionnement des compensateurs statiques pour un système de distribution (DSTATCOM).

De plus, les concepts, les classifications et les caractéristiques de conception des systèmes de stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES) seront présentés. Enfin, un DSTATCOM couplé à une unité de stockage SMES sera présenté d'une manière succincte.

2.2 Système de transmission flexible en courant alternatif

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 2.1 [15,16] .

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.

Table 2.1: Dispositifs FACTS [15,16]

Classification basée sur la technologie de l'électronique de puissance				
Conventional		Dispositifs FACTS		
Éléments R,L,C		à base de Thyristor		à base de VSC
Classification basée sur la configuration de connexion au réseau	Dispositifs Shunt	Compensation Shunt (Éléments R,L,C)	• Static VAR Compensator(SVC) • Static VAR Generator (SVG) • Static VAR System (SVS) • Thyristor-Controlled Reactor (TCR) • Thyristor-Switched Capacitor (TSC) • Thyristor-Switched Reactor (TSR) • Thyristor-Controlled Braking Resistor (TCBR)	Static Synchronous Compensator (STATCOM)
	Dispositifs Série	Compensation Serie (Éléments R,L,C)	• Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) • Thyristor-Switched Series Capacitor (TSSC) • Thyristor-Controlled Series Reactor (TCSR) • Thyristor-Switched Series Reactor (TSSR)	• Static Synchronous Series Compensator (SSSC) • Dynamic Voltage Restorer (DVR) • Static Voltage Restorer (SVR)
	Dispositifs hybrid (Shunt-Series)	Transformateur déphaseur	• Thyristor Control Phase Shifting Transformer (TCPST) • Thyristor Controlled Voltage and phase Angle Regulators (TCVR)	• Unified Power Flow Controller (UPFC), • Interline Power Flow Controller (IPFC), • Generalized Unified Power Flow Controller (GUPFC).

2.2.1 Classification basée sur la topologie de puissance

Les dispositifs FACTS peuvent être classés selon leurs topologies d'électronique de puissance en deux catégories principales : les FACTS basés sur les convertisseurs à thyristors et ceux basés sur des convertisseurs à interrupteurs totalement commandés. Les dispositifs FACTS à base de thyristors sont des commutateurs à commutation naturelle. Alors que les dispositifs basés sur des éléments commandables sont des convertisseurs à commutation forcée. Ces convertisseurs sont associés généralement à des éléments passifs (bobines ou condensateurs) [15,17].

2.2.1.1 Dispositifs FACTS à base de thyristors

Ces technologies de convertisseurs sont bien connues depuis de nombreuses années. L'une des caractéristiques des convertisseurs basés sur des thyristors est leur faible fréquence de commutation, ce qui en résulte de faibles pertes de commutation. De nombreux FACTS à base de thyristors ont été proposés dans la littérature, à savoir [18-20] :

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

Ces compensateurs ont comme inconvénient leur mode de fonctionnement unique ; ils ne peuvent fonctionner que dans une compensation capacitive ou une compensation inductive. Le Static VAR Compensator (VAR) et le Static Var Compensator (SVC) sont considérés comme dispositifs à base de thyristors habituellement conçu pour fonctionner dans les deux modes de compensation.

2.2.1.2 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 [17-20] :

- 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.

2.2.2 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 :

2.2.2.1 FATCS connectés en série

Les FACTS connectés en série sont généralement utilisés pour compenser la puissance réactive. Ils pourraient être un élément d'impédance variable, à savoir, une bobine, un condensateur, ou un équipement d'électronique de puissance. Leur influence sur l'impédance de ligne affecte la stabilité et l'écoulement de puissance. Les dispositifs FACTS connectés en série ont une large gamme d'applications telles que [18] :

- 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.

Les dispositifs FACTS connectés en série sont des compensateurs qui injectent une tension en série avec la ligne. Ces compensateurs pourraient être des dispositifs FACTS à base de thyristors tels que le [17-20] :

- 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).

2.2.2.2 Dispositifs FATCS connecté en shunt

Les FACTS connectés en shunt sont aussi utilisés pour la compensation de la puissance réactive. Le compensateur injecte une puissance réactive au point de couplage commun (PCC) afin d'améliorer la stabilité de la tension. Les applications de ces derniers sont [16] :

- 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, les

systèmes de train ferroviaire ou métro,

- 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 [17-20] :

- 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).

2.2.2.3 Dispositifs FATCS connectés en hybride avec le réseau

Les FATCS connectés en hybride avec le réseau sont une combinaison de dispositifs FACTS connectés en série et en shunt. Ils injectent un courant dans le système à l'aide de la partie shunt du compensateur et une tension en série dans la ligne à l'aide de sa partie série. Les FATCS connectés en hybride assurent un contrôle d'écoulement de puissance tout en assurant un contrôle indépendant de la tension. Cependant, les principaux inconvénients de cette configuration sont le coût élevé et la complexité de la configuration [17-20].

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 interline Power Flow Controller (IPFC).

Une autre configuration utilisée en tant que configuration FACTS dans la gamme de puissance élevée, est le Back-to-Back. Cette dernière est plus particulièrement employée dans les systèmes HVDC [16]. La figure 2.1 présente les dispositifs FACTS et leurs configurations de connexion au réseau.

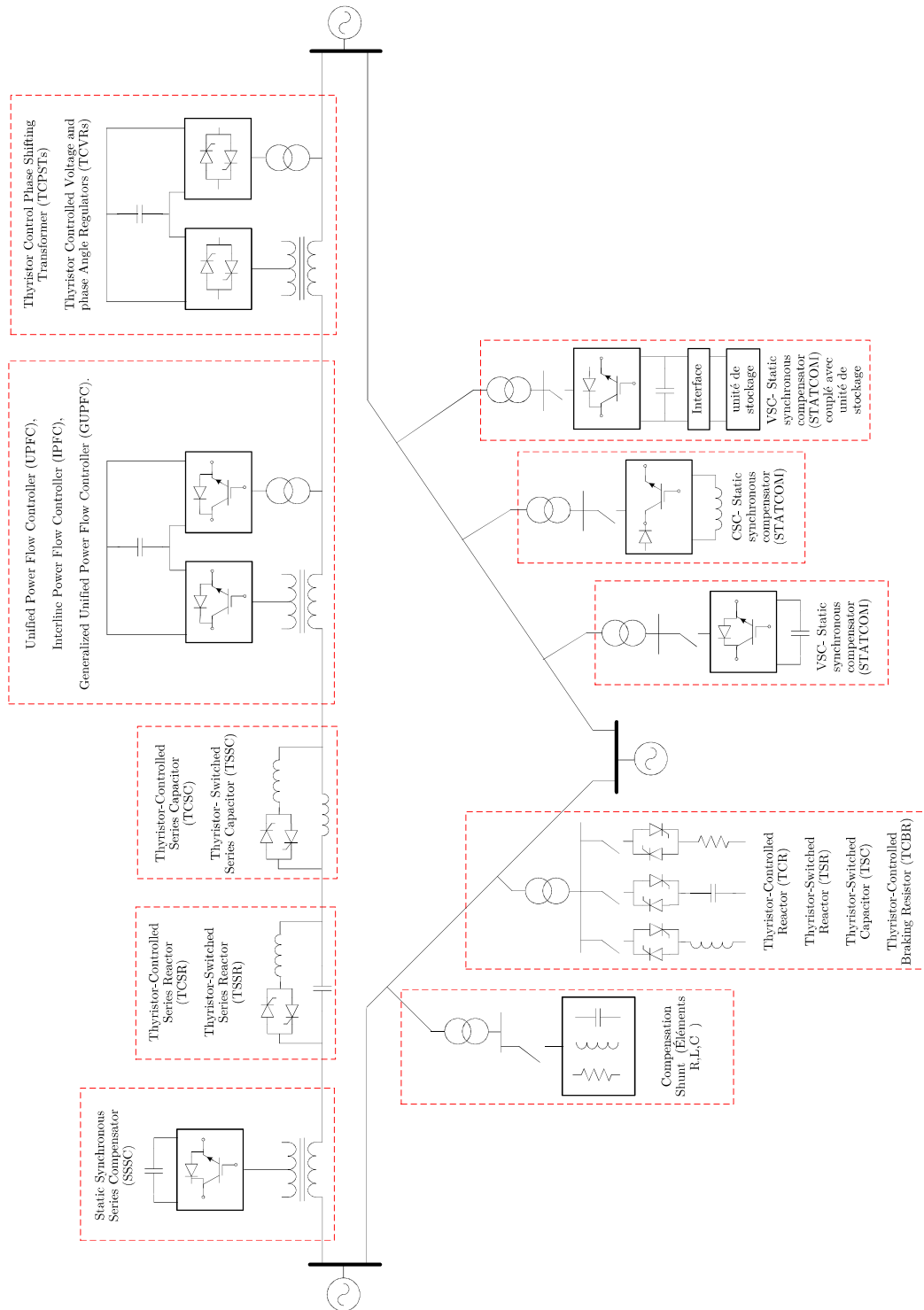


Figure 2.1: Dispositifs FACTS et leurs configurations de connexion au réseau

2.3 Le Static Compensator (STATCOM)

Dans les systèmes d'alimentation électrique, les charges varient considérablement d'une heure à l'autre. Ces charges génèrent et absorbent continuellement de la puissance réactive, ce qui conduit à une variation aléatoire et continue de la puissance réactive dans le réseau, entraînant par conséquent une mauvaise stabilité de la tension au niveau du point de bus PCC du système d'alimentation [20-26].

Le STATCOM peut alors fournir continuellement une compensation de la puissance réactive afin de réguler la tension du bus PCC, ce qui améliore la stabilisation du système d'alimentation et assure une haute qualité d'énergie [9].

2.3.1 Comparaison entre SVC et STATCOM

Le SVC et le STATCOM sont les compensateurs shunts les plus courants dans la littérature. Ces derniers ont la capacité de contrôler la tension par compensation de la puissance réactive. Cependant, dans le cas du SVC, le courant de compensation est plus petit pour les tensions les plus basses, alors que, dans le cas du STATCOM, le changement du courant de compensation n'est pas significatif aussi bien pour les basses tensions que pour les hautes tensions. Cela signifie que le compensateur SVC fonctionne comme un contrôleur d'impédance, c.à.d. que le courant du compensateur augmente avec l'augmentation de tension, tandis que le compensateur STATCOM est considéré comme une source de tension. La capacité de compensation est limitée uniquement par le type des interrupteurs de commutation [24,25].

De plus, le STATCOM peut atteindre le courant de compensation maximum même à basse tension et reste inchangé pour des valeurs de tension plus élevées. Par conséquent, comparé au SVC, les courants du STATCOM sont indépendants de la tension. Cette caractéristique rend le STATCOM plus approprié pour les creux de tension transitoires. Les caractéristiques tension-courant du SVC et STATCOM sont illustrées dans la figure 2.2 [25].

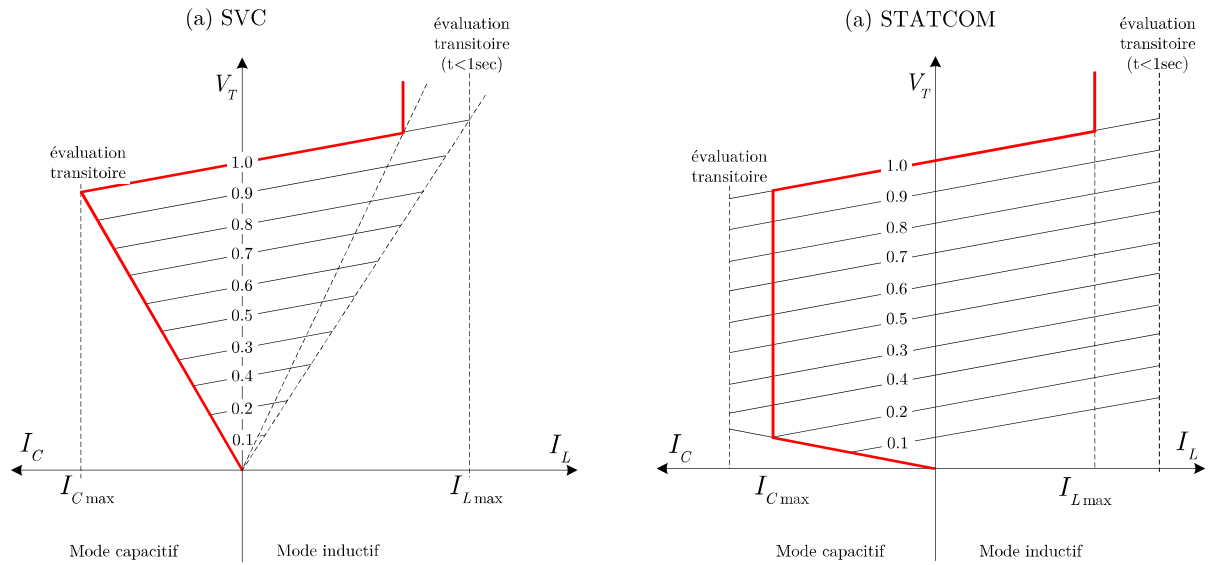


Figure 2.2: Caractéristiques tension-courant du SVC et STATCOM

2.3.2 Présentation du STATCOM pour le réseau de distribution (DSTATCOM)

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 [23].

La structure de base d'un DSTATCOM couplé au système de distribution est constitué de quatre parties principales figure 2.3, à savoir :

- Un onduleur de tension : partie principale du DSTATCOM ;
- Bus continu : il s'agit de condensateurs qui stockent la puissance réactive injectée dans le réseau. La tension à travers ce bus doit être maintenue constante avec une faible consommation de puissance active ;
- Un filtre RL connecté en série, installé entre l'onduleur et le bus PCC afin d'atténuer les harmoniques générés par l'onduleur et qui affectent la qualité de la tension au point PCC.
- Un système de contrôle : partie responsable des opérations de calcul.

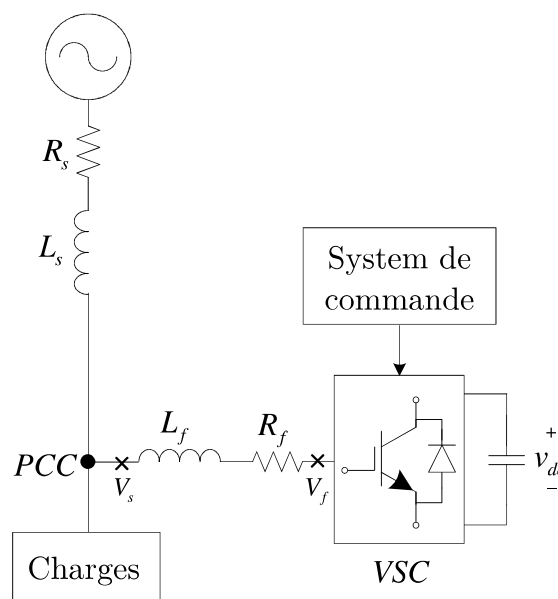


Figure 2.3: Schéma simplifié d'un DSTATCOM connecté au système de distribution

2.3.3 Applications du DSTATCOM dans les systèmes d'alimentation

En raison des problèmes causés par les charges non équilibrées ou des charges à un facteur de puissance non unitaire dans les systèmes de distribution et vu les nombreuses caractéristiques intéressantes de temps de réponse rapide, de fonctionnement polyvalentes et de marge de stabilité plus élevée, le DSTATCOM est devenu l'un des dispositifs les plus efficaces pour éliminer certains problèmes à savoir [16,23-25] :

- Amélioration de la qualité d'alimentation,
- Contrôle de puissance réactive et régulation des tensions,
- Équilibrage de la puissance et amortissement des oscillations,
- Amélioration de la capacité de la ligne de transmission,
- Amélioration de la stabilité transitoire de la tension.

Le DSTATCOM a été adopté aussi dans le but d'améliorer la qualité de l'alimentation et la fiabilité des systèmes de distribution d'énergie en présence des générateurs décentralisés [1,16].

2.3.4 Principe de fonctionnement du DSTATCOM

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 (C_{dc}) et peut être contrôlée en variant la différence de phase entre V_f et V_s .

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 [23,25].

La figure 2.3 est régie par les équations suivantes :

$$\bar{i}_f = \frac{\bar{v}_f - \bar{v}_s}{\bar{Z}_f} \quad (2.1)$$

Où : $Z_f = R_f + jX_f$.

En négligeant l'effet résistif, l'équation (2.1) dévient :

$$\bar{i}_f = \frac{\bar{v}_f - \bar{v}_s}{jX_f} \quad (2.2)$$

La puissance apparente injectée par le DSTATCOM au point de couplage commun (PCC) est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{S} = \bar{v}_s \bar{i}_f = \bar{v}_s \frac{\bar{v}_f - \bar{v}_s}{jX_f} = \frac{\bar{v}_f \bar{v}_s - \bar{v}_s^2}{jX_f} \quad (2.3)$$

Ainsi, les puissances active et réactive injectées par le DSTATCOM sont exprimées par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} P_f &= \frac{v_f v_s \sin(\theta_s - \theta_f)}{X_f} \\ Q_f &= \frac{-v_s(v_f \cos(\theta_s - \theta_f) - v_s)}{X_f} \end{aligned} \quad (2.4)$$

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 DSTATCOM idéal, la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le DSTATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau.

Alors :

$$\begin{aligned} P_f &= \frac{v_f v_s \sin(\theta_s - \theta_f)}{X_f} = 0 \\ \text{Soit, } \theta_s &= \theta_f = \theta \end{aligned} \quad (2.5)$$

D'après cette condition la tension injectée par le DSTATCOM v_f doit être en phase avec la tension v_s 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 [23,26].

L'équation de puissance active devient :

$$P_f = 0 \quad (2.6)$$

Et l'équation de puissance réactive devient :

$$Q_f = \frac{v_s^2}{X_f} \left(1 - \frac{v_f}{v_s} \right) \quad (2.7)$$

D'après l'équation (2.7), la puissance réactive échangée entre le compensateur et le réseau est contrôlée par l'amplitude de la tension produite à la sortie de l'onduleur v_f .

Par conséquent, trois cas possibles peuvent être distingués :

- Mode de fonctionnement capacitif :
Lorsque $v_f > v_s$, le DSTATCOM agit comme une capacité et injecte une puissance réactive au réseau.
- Mode de fonctionnement inductif :

Quand $v_f < v_s$, le DSTATCOM agit comme une inductance et absorbe une puissance réactive du réseau.

- Mode de fonctionnement en veille :

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

2.4 Aperçu sur les périphériques de stockage d'énergie pour les systèmes FACTS

Dans les systèmes électriques modernes, les unités de stockage de l'énergie sont devenues de plus en plus indispensables parce qu'ils permettent d'atténuer jusqu'à éliminer la plupart des problèmes de dégradation de la qualité d'énergie et de renforcer la stabilité des systèmes électriques avec plus de flexibilité.

Les éléments de stockage peuvent être du type : Accumulateurs, Volant d'inertie, Supracondensateurs et SMES [27,28] :

2.4.1 Accumulateurs

Les systèmes de stockage d'énergie basés sur les accumulateurs ont récemment émergé comme l'une des technologies de stockage les plus courantes pour les applications de puissance. Les accumulateurs stockent l'énergie sous forme électrochimique avec une efficacité estimée de 60 à 80% et disponible de 100 W à plusieurs mégawatts.

De nombreux types d'accumulateurs sont disponibles selon les cycles de fonctionnement ou selon la catégorie d'électrochimie, on citera : l'accumulateur plomb-acide (Lead-acid), l'accumulateur nickel-fer, l'accumulateur nickel-cadmium (NiCd), l'accumulateur nickel-hydrure métallique (Nickel-Metal Hydride (NiMh) et les accumulateurs lithium-ion.

Ce type de stockage présente plusieurs avantages tels que : la haute densité d'énergie, la haute capacité énergétique, la capacité cyclique. Cependant, en raison de l'effet cinétique et chimique, les accumulateurs ne peuvent pas fonctionner à des niveaux de puissance élevés pendant de longues périodes. En outre, les décharges rapides peuvent nécessiter un remplacement rapide de l'accumulateur, car la chaleur résultante réduit significativement la durée de vie de l'accumulateur.

2.4.2 Accumulateurs sodium-soufre (NaS)

Afin de réaliser des systèmes de stockage basés sur des accumulateurs beaucoup plus performants, nouvelles technologies ont été proposées et développées. L'accumulateur sodium-soufre (NaS) est l'un de ces types déjà utilisé dans les systèmes électriques pour plus de 20 projets au Japon et dans de nombreuses autres constructions à travers le monde depuis les années 1980.

Les condensateurs des accumulateurs sodium-soufre stockent l'énergie électrique en accumulant des charges positives et négatives sur des électrodes métalliques (souvent sur des plaques parallèles) séparées par un diélectrique isolant. Comparé à d'autres types de systèmes de stockage d'accumulateurs, l'accumulateur NaS présente des caractéristiques beaucoup plus attrayantes telles que la densité d'énergie élevée (quatre fois plus que celle de la batterie au plomb-acide) et un coût beaucoup plus bas []. L'accumulateur NaS a également un long cycle (plus de 2500 cycles pour 90% de profondeur de décharge ou plusieurs centaines de milliers de cycles à 10% de profondeur de décharge et un temps de réponse en milliseconde pour un fonctionnement de charge et de décharge complète.

2.4.3 Unité de stockage d'énergie à volant d'inertie

L'unité de stockage d'énergie à volant d'inertie (Flywheels (FES)) stocke l'énergie électrique sous forme d'énergie cinétique de rotation. Elle peut être utilisée pour les applications où le volant est couplé à une machine électrique tournante comme un générateur.

Comparé aux accumulateurs, le système de stockage d'énergie à volant d'inertie peut être utilisé avec un nombre presque illimité de cycles de charge/décharge, ce qui le rend approprié à l'environnement. Cependant, il présente certaines inconvénients tels que : grande dimension, la faible densité d'énergie, et des difficultés à augmenter la quantité de stockage d'énergie.

2.4.4 Supercondensateurs

Les supercondensateurs également connus sous le nom d'ultracondensateurs stockent l'énergie dans des condensateurs à double couche afin d'augmenter la capacité de stockage.

Comparativement aux autres types de condensateurs et d'accumulateurs, les supercondensateurs sont très rapides dans les processus de charge et de décharge. Leur capacité de stockage peut être augmentée proportionnellement en fonction de la tension ou de la capacité des condensateurs.

2.4.5 Unités de stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES)

Les unités de stockage d'énergie magnétique supraconductrice stockent l'énergie sous forme d'un champ magnétique généré par un courant continu. Comparés à d'autres dispositifs de stockage d'énergie, ces dispositifs ont un rendement de cycle élevé (plus de 95%), un temps de réponse très rapide (de l'ordre du milliseconde), un temps de décharge rapide (moins d'une minute) et une durée de vie qui s'élève à 30 ans [29]. L'élément principal d'une unité SMES est la bobine supraconductrice d'inductance élevée.

Avec une capacité flexible d'échange de puissances active et réactive, par rapport à d'autres dispositifs de stockage d'énergie, le SMES peut être utilisé pour améliorer la qualité d'énergie de l'alimentation, à savoir : l'amélioration du facteur de puissance, la stabilisation de la fréquence et la régulation de la tension [29,30].

Une comparaison complète entre les différents types d'éléments de stockage d'énergie est présentée dans la figure 2.4 et le tableau 2.2 [27].

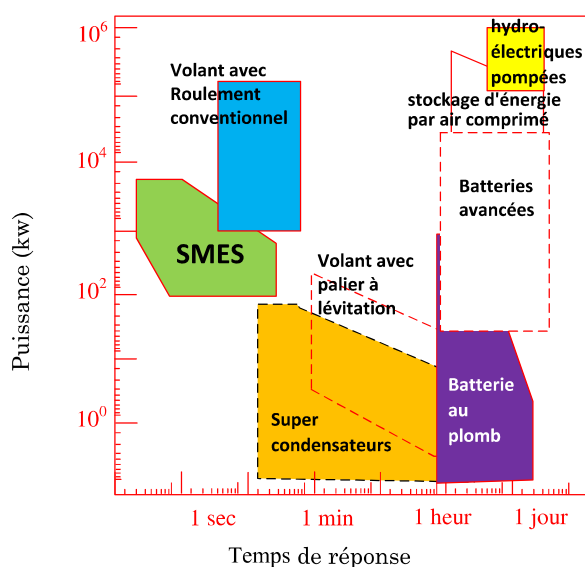


Figure 2.4: Comparaison des éléments de stockage d'énergie [20]

Table 2.2: Comparaison entre les différents types d'éléments de stockage d'énergie [26]

Efficacité	Accumulateur	NaS	FES	Supercondensateur	SMES
Gamme d'énergie stockée	60-80%	70%	95%	95%	95-98%
Densité énergétique (Wh/kg)	20-1000	120	1,000-5000	4,000	10,000-100,000
Temps de réponse (ms)	30	100	5	5	5
Cycle de vie (fois)	200-2,000	2,000	>20,000	500,000	1,000,000
Coût	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Elevé

2.5 Stockage d'énergie magnétique supraconductrice

2.5.1 Contexte historique du SMES

Le concept de stockage d'énergie magnétique supraconductrice a été proposé depuis 1970. La spécificité de la supériorité des systèmes de stockage d'énergie magnétique supraconductrice se résume dans l'inexistence de formes de conversion d'énergie telle que mécanique-électrique ou chimique-électrique. Son concept est simple ; faire circuler un courant continu dans une bobine supraconductrice et stocker l'énergie dans le champ magnétique avec un effet résistif presque nul (typiquement pas de pertes). La partie principale de l'unité SMES est la bobine supraconductrice qui fonctionne à la température cryogénique. Cette température est maintenue par un cryostat ou un vase Dewar qui contient un liquide d'hélium ou d'azote [29,30].

Lorsque la bobine est en mode veille, un interrupteur de dérivation est nécessaire pour diminuer les pertes d'énergie. En outre, il est utilisé aussi pour d'autres objectifs tels que le retrait du convertisseur du service ou la protection de la bobine si le refroidissement est perdu et en court-circuitant le courant de la bobine si la connexion de l'utilitaire est perdue [30].

Le SMES est une invention française proposée par M. Ferrier dans les années 1970 basé sur l'utilisation d'un enroulement supraconducteur pour stocker de l'énergie électrique. En 1976, le laboratoire national d'Oak Ridgea installé à « Bonneville Power Authority Pacific Intertie » situé à Tacoma Washington un SMES de 30 MJ et 10 MW pour le maintien de la stabilité. Cette unité a fonctionné pendant un an où plus d'un million de cycles de charge/décharge ont été effectué sous un réseau de 500kV. En 1982, un autre système SMES a été installé dans la même station pour expérimenter la surveillance, la prévision et l'amélioration de la stabilité du système. En 1987, l'armée américaine a sponsorisé la

recherche et le développement de systèmes SMES. L'initiative a lancé le programme de modèle d'essai d'un système SMES pour concevoir et construire une bobine SMES de 20 MWh utilisée pour l'alimentation électrique d'un laser à électrons libres. En 1995, un autre projet SMES a été développé et sponsorisé par « Office of Naval Research (ONR) » à démontrer son efficacité dans les applications navales [29].

2.5.2 Classification de SMES

Les SMES peuvent être classifiés selon la configuration de la bobine ou selon la température de fonctionnement [27,28] :

2.5.2.1 Classification selon la configuration de bobine

Il existe deux types de bobines SMES, bobine solénoïde et bobine toroïdale figure 2.5.

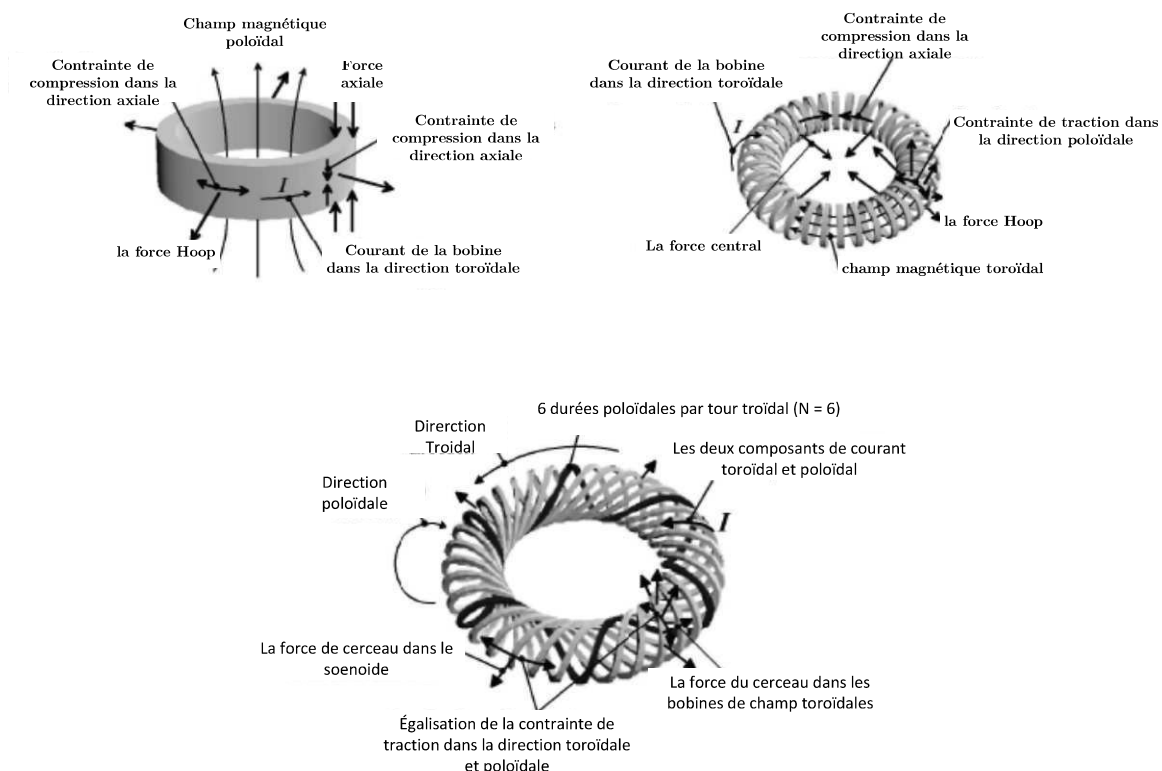


Figure 2.5: Bobine solénoïdes (en haut) et bobines toroïdales (en bas)

Les bobines SMES configurées en solénoïdes et toroïdales sont largement étudiées dans la littérature [27]. Comparé au type toroïdal, le type solénoïde est simple et facile à construire, et nécessite moins de conducteurs pour construire une capacité de stockage donnée. Cependant, le type de bobines SMES à solénoïde produit un champ magnétique parasite légèrement grand, ce qui affecte l'emplacement des systèmes SMES en raison des préoccupations liées à la santé et aux considérations environnementales.

Les SMES basés sur des bobines toroïdales ont été conçus pour diminuer le champ magnétique parasite. Cependant, en raison des difficultés de fabrication et des exigences d'une grande quantité de conducteurs, cette conception est nettement plus coûteuse. En conséquence, du fait de sa simplicité et de sa rentabilité, la bobine solénoïde a été largement utilisée par rapport à la bobine toroïdale [27-30].

2.5.2.2 Classification selon la température de fonctionnement de la bobine

Selon la température de fonctionnement, les bobines SMES peuvent être divisées en deux groupes : les supraconducteurs à basse température (SBT) et les supraconducteurs à haute température (SHT) [27-30].

La température de fonctionnement d'un dispositif supraconducteur est un compromis entre le coût et les exigences opérationnelles. Le SHT présente l'avantage d'une température de fonctionnement plus élevée au profit des matériaux fragiles et durs. De plus, le SHT est plus cher que le SBT, cela est dû aux limitations des technologies cryogéniques. En effet, ils sont refroidis à 77°K en utilisant de l'azote liquide. Le SBT est généralement refroidi en utilisant de l'hélium liquide à 4.2°K. De ce fait, le SBT est généralement utilisé pour les SMES [27-30].

Avec le développement de la technologie cryogénique et des conducteurs supraconducteurs à haute température, les SHT deviennent plus compétitives dans les applications SMES. En effet, un SMES basé sur un SHT refroidi par conduction de 600V/150 kJ/100kW a été expérimenté en Chine dans le laboratoire [30].

Le tableau 2.3 donne la comparaison entre les deux types de SMES selon la température de fonctionnement.

Table 2.3: Comparaison entre les deux types de SMES selon la température de fonctionnement [29]

	STH	SBT
Densité du courant	Faible	Élevé
La fragilité	Elevée	Faible
Le coût	- plus de quantité de conducteurs - Système cryogénique moins cher	- Moins de quantité des conducteurs - Système cryogénique plus cher
Efficacité de la réfrigération	Plus haute	Normal
Fiabilité	Elevée	Faible
L'utilisation pour les projets SMES	La plupart des projets	Quelques projets

2.5.3 Caractéristiques des SMES

Lors de la conception d'un SMES, de nombreux facteurs sont pris en compte à savoir : la structure de la bobine, la capacité énergétique et la température de fonctionnement. La capacité énergétique d'un SMES et la puissance échangée entre le SMES avec réseau électrique est limitée par trois principaux facteurs, à savoir : le courant maximum à travers la bobine, la tension maximale aux bornes de la bobine et l'inductance de la bobine. L'augmentation de l'un de ces facteurs augmente la capacité du SMES. Le tableau 2.4 présente les exigences nécessaires pour chaque augmentation de facteur [28-30].

Table 2.4: Exigences pour l'augmentation des différents facteurs

	Augmentation du courant maximum à travers la bobine de SMES	Augmentation de la tension maximale aux bornes la bobine de SMES	Augmentation de l'inductance de la bobine
Exigences	• Section de conducteur plus large • Un courant plus important mène à pertes de charge associées. • Système de conditionnement d'énergie plus grand et plus coûteux.	• Système de conditionnement d'énergie plus grand et plus coûteux • Existence de problèmes d'isolation	• Plus de tours dans l'aimant • Grand système cryogénique

Outre ces facteurs, de nombreuses considérations de surveillance et de protection doivent être prises en compte lors de la conception d'un système SMES. Ces considérations, se résument comme suit [31] :

1. Une instrumentation capable de surveiller les conditions de fonctionnement structurales, électriques et thermiques du système SMES,
2. Un système de détection empêchant la température de dépasser un certain niveau,

3. Une résistance de décharge de secours.

2.5.4 Inconvénients des SMES

Généralement, la réalisation d'un projet SMES est fixée par des limites. Le coût élevé de la construction d'un projet d'un SMES peut être considéré comme l'obstacle économique principal. Deux composants peuvent déterminer le coût d'un projet SMES, à savoir le coût de la bobine (coûts de construction des conducteurs, des composants de la structure de la bobine, le récipient cryogénique, l'équipement de réfrigération, le système de protection) et du système de conditionnement d'énergie qui comprend le coût des différents convertisseurs, filtres et équipements du système de contrôle [27-30].

2.5.5 Projets et applications du SMES

Tableau 2.5 résume la plupart des applications du SMES dans le domaine des systèmes de puissance et d'énergie. On retrouve les applications du SMES dans trois domaines principaux : les applications d'amélioration de la stabilité du réseau, de la qualité d'énergie et dans le stockage d'énergie [27-34].

De nombreux projets et prototypes dans le monde ont été développés, testés et réalisés. On citera à titre indicatif les projets suivants [29] :

- Utilisation d'une unité SMES de 30 MJ pour la stabilisation d'une ligne de transmission pour "Bonneville Power Administration (BPA)".
- Développement d'un SMES de 1 MJ/1MW avec des conducteurs de courant résistifs de 1100A refroidis par conduction par un réfrigérateur à cycle fermé dans la plage de température de 60 à 70K.
- Vérification d'un modèle expérimental d'une bobine SMES de 100 MJ / 100 MW.
- Réalisation d'un modèle expérimental avec une capacité d'énergie de 5 MJ et une puissance de sortie à 130 MW est proposé dans.
- Développement un projet SMES de 600V /150kJ /100kW avec une bobine haute température (SHT) [24].
- Amélioration de la qualité de puissance des charges sensibles à l'aide d'une SMES de 3 MJ/750 kVA.
- Suppression des oscillations de puissance utilisant un SMES de 35kJ.

Table 2.5: Applications et projets de SMES dans les systèmes d'énergie et de puissance [27-34]

Domain	Applications
Applications pour améliorer la stabilité du réseau	• Réduction des oscillations du réseau • Alimentation de secours • Augmentation de la stabilité de tension dynamique • Minimisation des fluctuations de puissance et de tension d'éolienne • Amélioration du creux de tension transitoire • Réenclenchement du disjoncteur • Lanceur électromagnétique • Amortissement par résonance sous-synchrone • Alimentations sans interruption
Application pour d'amélioration de la qualité de puissance	• Offrir une réserve de puissance • Contrôle de puissance réactive et correction du facteur de puissance • Améliorer les performances des dispositifs FACTS. • Équilibrer les charges fluctuantes. • Protéger les charges critiques et sensible • Offrir une alimentation de secours • Équilibrer la tension des asymétries du système d'alimentation • Lisser les perturbations sur les systèmes d'alimentation • Réduire la perte de charge en sous-fréquence
Applications de stockage de l'énergie	Un SMES a la capacité de fournir une grande quantité d'énergie jusqu'à 5000 MWh avec un rendement élevé jusqu'à 95%. Cela fait que les SMES agissent comme un dispositif de stockage et de transfert pour des quantités massives d'énergie. Économiquement, SMES peut réduisant potentiellement le coût de l'électricité pour certaines applications

2.6 DSTATCOM couplé à une unité de stockage d'énergie magnétique supraconductrice SMES

Le DSTATCOM a un degré de liberté limité et peut compenser seulement la puissance réactive requise, cependant, combiné à un SMES, il a plus de degrés de liberté en contrôlant indépendamment l'absorption/injection de puissances active et réactive dans/depuis le réseau. Ainsi une telle association prévoit une meilleure performance que des dispositifs autonomes [32].

Pour assurer un flux bidirectionnel de la puissance active, il est nécessaire de coupler le SMES au DSTATCOM via un hacheur bidirectionnel figure 2.6. Le hacheur convertira alors le courant continu de la bobine SMES en tension continue qui sera transformée en

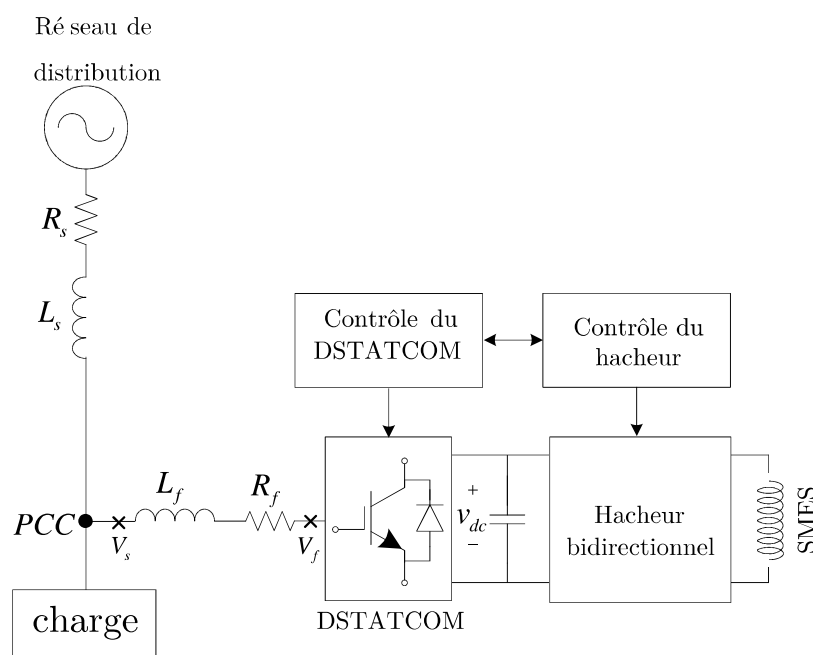


Figure 2.6: Combinaison de DSTATCOM-SMES connecté à un réseau électrique

courant alternatif triphasé par l'onduleur de tension du DSTATCOM [32].

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dressé d'une manière générale l'état de l'art des dispositifs FACTS avec leurs différentes configurations. Les trois types de compensation série, shunt et hybride ont été passés en revue. Leur comparaison ont mis en avant l'intérêt du compensateur shunt à savoir le DSTATCOM. Ce dernier régule la tension au point de raccordement commun à une valeur stable pour protéger les charges critiques contre les perturbations de tension.

Afin d'ajouter un degré de liberté au DSTATCOM, nous avons passé en revue les différents systèmes de stockage qui peuvent lui être associé. Ceci a été très approprié par l'utilisation d'une bobine SMES qui permet au DSTATCOM de fournir à la fois une compensation de la puissance active et de la puissance réactive pour améliorer la qualité de l'énergie et contrôler le flux des puissance active et réactive.

Dans les chapitres suivants, nous discuterons en détail de la combinaison de DSTATCOM/SMES connecté à un système de distribution à quatre fils fonctionnant dans des

conditions d'équilibre et de déséquilibre.

Modélisation et commande d'un DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux

Sommaire

3.1	Introduction	56
3.2	Topologies du DSTATCOM pour les systèmes de distribution triphasés à quatre fils	56
3.2.1	DSTATCOM à base d'un convertisseur de tension à trois bras avec un simple condensateur du bus continu	57
3.2.2	DSTATCOM à base de convertisseur de tension à trois bras avec bus continu à point milieu	57
3.2.3	DSTATCOM à base d'un convertisseur de tension à quatre bras	59
3.3	Technologie des convertisseurs multiniveaux pour les systèmes DSTATCOM	60
3.4	DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux	60
3.4.1	Configuration du système DSTATCOM quatre bras à trois niveaux	60
3.4.2	Modèle mathématique de DSTATCOM quatre bras à trois niveaux	61
3.5	Modulation vectorielle tridimensionnelle	63
3.5.1	Modèle instantané de l'onduleur de tension à quatre bras à trois niveaux	63
3.5.2	Algorithme SVM tridimensionnel	64
3.6	Stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs du bus continu	71
3.7	Conception des contrôleurs du DSTATCOM dans des conditions asymétriques	73
3.7.1	Boucle de contrôle externe des tensions	73
3.7.2	Contrôleur interne des courants	76
3.8	Résultats de simulation et interprétations	80
3.9	Conclusion	87

3.1 Introduction

Afin d'atténuer les problèmes de la qualité d'énergie, le DSTATCOM est reconnu comme un dispositif efficace de compensation shunt à action rapide. Le DSTATCOM triphasé à quatre fils compense la puissance réactive, et équilibre les courants de charge en compensant le courant neutre. Dans un DSTATCOM, le convertisseur de puissance le plus utilisé est le convertisseur à deux niveaux. Toutefois, ces convertisseurs injectent des harmoniques indésirables dans le réseau électrique, leur fonctionnement est limité en haute fréquence en raison des pertes par commutation [36,37]. Afin d'éliminer les harmoniques, des filtres passifs ou plusieurs convertisseurs connectés en parallèle peuvent être utilisés, mais le coût du convertisseur global se trouve augmenté. Pour résoudre ce dernier problème, l'utilisation des convertisseurs multiniveaux semble une solution attrayant [36].

Dans ce chapitre, après une brève présentation des différentes topologies des convertisseurs utilisées dans les systèmes DSTATCOM pour les systèmes de distribution triphasés à quatre fils, l'étude d'un système DSTATCOM à base d'un convertisseur de tension à quatre bras à trois niveaux sera présentée. Toutefois, le bon fonctionnement d'un tel système exige que les tensions des condensateurs du bus continu soient maintenues équilibrées aussi bien en régime permanent qu'en régime dynamique. Sur la base d'un modèle qui suit, le système de commande sera conçu pour contrôler la compensation de l'énergie réactive et réguler la tension du bus continu. L'efficacité de la stratégie SVM-3D d'équilibrage des tensions de condensateurs du bus continu ainsi que celle des contrôleurs conçus seront vérifiées par un certain nombre de tests dans des conditions de fonctionnement équilibrés et de déséquilibrés.

3.2 Topologies du DSTATCOM pour les systèmes de distribution triphasés à quatre fils

L'analyse de la littérature montre qu'il existe principalement trois topologies de DSTATCOM triphasés à quatre fils capables de fournir de meilleures performances à savoir [36-40] :

- DSTATCOM à base d'un convertisseur de tension à trois bras avec un simple condensateur du bus continu,
- DSTATCOM à base d'un convertisseur de tension à trois bras avec un bus continu à point milieu,
- DSTATCOM à base d'un convertisseur de tension à quatre bras.

3.2.1 DSTATCOM à base d'un convertisseur de tension à trois bras avec un simple condensateur du bus continu

La figure 3.1 montre un DSTATCOM à base d'un convertisseur de tension à trois bras avec un seul condensateur du bus continu. Le DSTATCOM est connecté à un système de distribution triphasé à quatre fils, où il n'y a pas de chemin de retour entre le fil neutre et le compensateur. Dans le cas d'une charge équilibrée et un fonctionnement normal, le DSTATCOM a la capacité de compenser la puissance réactive avec bonnes performances [36]. Cependant, dans les conditions déséquilibrées, le DSTATCOM ne peut pas compenser la composante homopolaire. Par conséquent, une compensation complète ne sera pas possible et l'application de cette topologie dans un système de distribution triphasé à quatre fils est limitée [40].

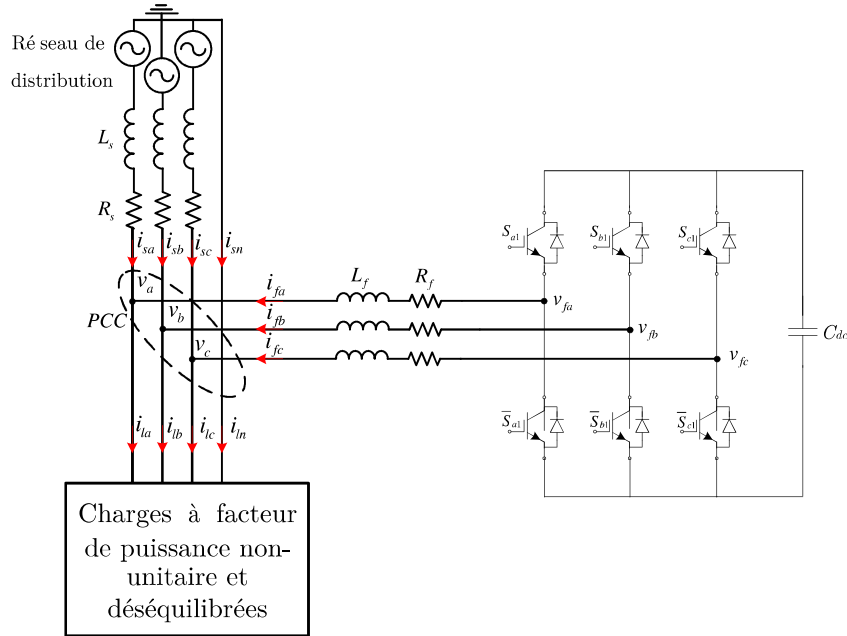


Figure 3.1: Schéma d'un DSTATCOM à base de convertisseur de tension trois bras avec condensateur de bus continue simple

3.2.2 DSTATCOM à base de convertisseur de tension à trois bras avec bus continu à point milieu

La figure 3.2 présente un DSTATCOM à base d'un convertisseur de tension à trois bras avec connexion du point milieu du bus continu au fil de neutre. Comme le montre la figure,

le point milieu du bus continu, le neutre de la charge et le fil neutre de la source sont connectés ensemble. Si la charge est déséquilibrée, le compensateur génère une composante homopolaire afin de compenser le courant de déséquilibre au point de couplage commun par le chemin neutre-neutre entre le point milieu du bus continu et le quatrième fil du système de distribution.

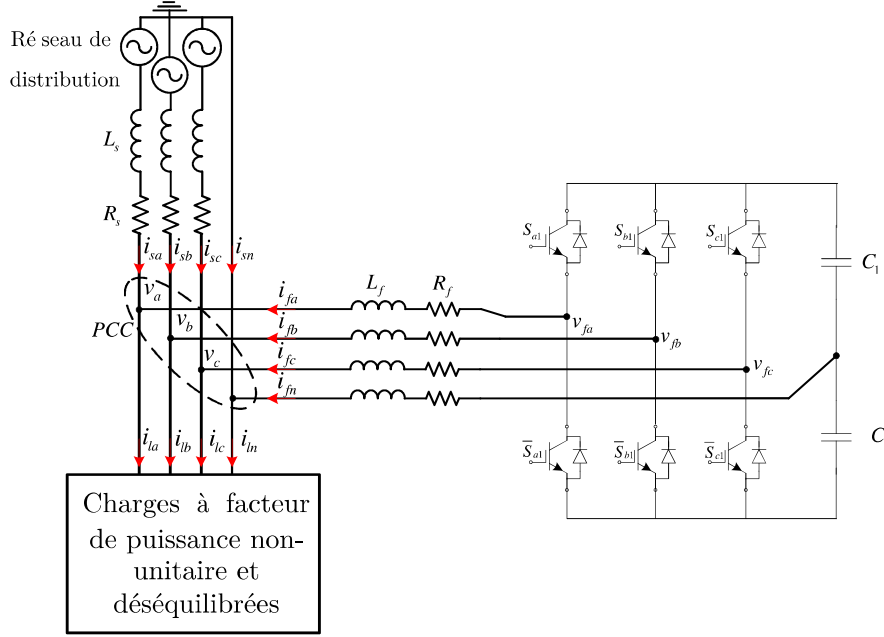


Figure 3.2: Schéma d'un DSTATCOM triphasé à base de VSC avec un condensateur à point milieu

Cette topologie a la capacité de fonctionner dans des conditions où la charge peut être équilibrée ou déséquilibrée. Cependant, il existe un problème commun à ce type de topologie, l'ondulation des tensions des condensateurs provoquée par le courant homopolaire de compensation conduit à décharger l'un des condensateurs et à charger l'autre. Par conséquent, la stabilité des tensions des condensateurs du bus continu n'est pas assurée, ce qui constitue un problème sérieux dans un tel système [36]. Deux moyens possibles d'éviter l'instabilité des condensateurs du bus continu sont proposés dans la littérature, à savoir [43] :

1. La modification de la stratégie de commutation de l'onduleur de DSTATCOM,
2. L'utilisation d'un hacheur. Cependant, cette approche nécessite un circuit de commande supplémentaire et augmente le coût du montage.

3.2.3 DSTATCOM à base d'un convertisseur de tension à quatre bras

Le DSTATCOM à base d'un onduleur à quatre bras a la capacité de compenser le courant du neutre puisque son quatrième bras est connecté directement au quatrième fil du système de distribution [5,40]. Dans cette configuration, le neutre de la charge est connecté au neutre de la source et également au quatrième bras de l'onduleur à travers un filtre série figure 3.3.

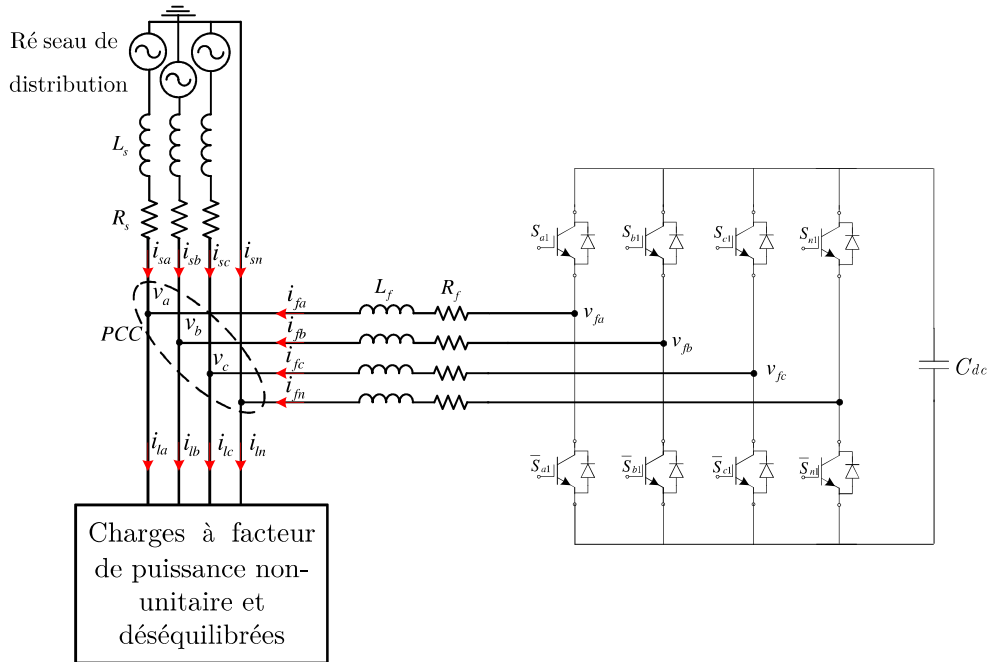


Figure 3.3: Schéma d'un DSTATCOM à quatre bras à base d'un convertisseur de tension.

Un des problèmes relatif à cette topologie par rapport aux précédentes est le nombre élevé de semi-conducteurs utilisés. Comparé à un DSTATCOM à trois bras avec un bus continu à point milieu, elle présente une meilleure contrôlabilité. En effet, le DSTATCOM nécessite le contrôle d'une seule tension qui est celle aux bornes du condensateur de sortie. Cette caractéristique a un impact significatif sur la simplification du système de contrôle.

Ces caractéristiques et d'autres [40,44] font de cette topologie la plus appropriée pour réaliser un DSTATCOM pour compenser la puissance réactive dans un système de distribution à quatre fils dans des conditions équilibrées ou déséquilibrées.

3.3 Technologie des convertisseurs multiniveaux pour les systèmes DSTATCOM

Au cours des dernières années, la technologie des convertisseurs multiniveaux est devenue une alternative très concurrente à la topologie traditionnelle à deux niveaux dans le domaine du contrôle de l'énergie à moyenne et haute tension [40]. Le développement de la technologie multiniveaux a été marqué par deux aspects principaux [40,46] :

- Le premier aspect concerne la fabrication de convertisseurs de puissance supportant des tensions plus élevées en raison de l'importante évolution technologique des matériaux semi-conducteurs,
- Le deuxième aspect est lié à la mise en œuvre d'algorithmes de contrôle efficaces de ces convertisseurs dû à l'évolution des processeurs de très grande rapidité et de coût réduit.

Comparés aux onduleurs à quatre bras à deux niveaux, les onduleurs à quatre bras multiniveaux présentent de nombreuses caractéristiques attrayantes telles qu'une tension de blocage réduite, une faible tension en mode commun et une faible teneur en harmoniques de la tension de sortie [23-29]. Néanmoins, l'attrait des convertisseurs multiniveaux est limité par certains inconvénients [40,46] :

- Lorsque le nombre de niveau de tension augmente, le convertisseur nécessite plus de semi-conducteur et l'algorithme de contrôle devient plus compliqué,
- Problème de déséquilibre des tensions des condensateurs.

3.4 DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux

3.4.1 Configuration du système DSTATCOM quatre bras à trois niveaux

La figure 3.4 montre une représentation schématique d'un DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux. Grâce à un filtre (R_f , L_f) connecté en série, le DSTATCOM est couplé en tant que compensateur shunt à un système de distribution à quatre fils. Un ensemble de charges à facteur de puissance non unitaire et déséquilibrées est connecté au système de distribution à quatre fils. 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} .

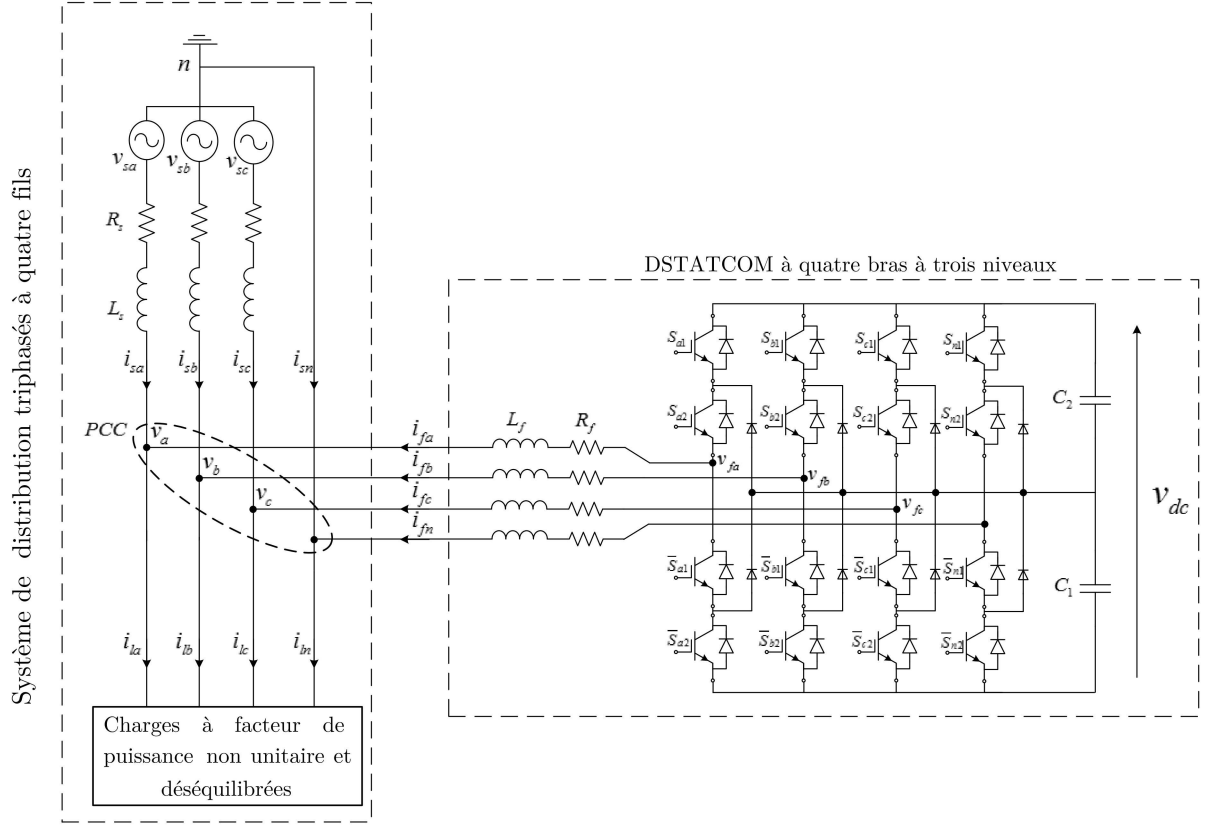


Figure 3.4: Schéma d'un DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux connecté au système de distribution triphasé à quatre fils

Sur la figure 3.4, v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} , v_a, v_b, v_c et v_{fa}, v_{fb}, v_{fc} représentent respectivement les tensions de la ligne, du point de couplage commun et la sortie d'onduleur, $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}, i_{sn}$, $i_{la}, i_{lb}, i_{lc}, i_{ln}$ et $i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}, i_{fn}$ sont respectivement les courants de ligne, de la charge et de DSTATCOM.

3.4.2 Modèle mathématique de DSTATCOM quatre bras à trois niveaux

Les équations des courants triphasés en termes des tensions sont données par :

$$\begin{aligned}
 L_f \frac{di_{fa}}{dt} &= -R_f i_{fa} + v_{fa} - v_a \\
 L_f \frac{di_{fb}}{dt} &= -R_f i_{fb} + v_{fb} - v_b \\
 L_f \frac{di_{fc}}{dt} &= -R_f i_{fc} + v_{fc} - v_c
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Afin de simplifier la synthèse du système de contrôle du DSTATCOM, les équations triphasées (3.1) sont transformées en repère tournant synchrone équivalent dqo . Le repère dqo est synchronisé sur la tension du point de couplage commun de sorte que sa composante en quadratique soit égale à zéro. Les équations du circuit côté AC dans le repère dqo peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{fd}}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fd} + \omega i_{fq} + \frac{v_{fd} - v_d}{L_f} \\
 \frac{di_{fq}}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fq} - \omega i_{fd} + \frac{v_{fq}}{L_f} \\
 \frac{di_{fo}}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fo} + \frac{v_{fo}}{L_f}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Où i_{fd}, i_{fq}, i_{fo} sont respectivement les composantes d et q et homopolaire du courant du DSTATCOM, v_{fd}, v_{fq}, v_{fo} sont respectivement les composantes d et q et homopolaire de la tension du DSTATCOM.

L'équation du bus continu peut être écrite dans le repère dqo comme suit :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = -\frac{v_d i_d}{C_{eq} v_{dc}} - \frac{v_{dc}}{C_{eq} R_{dc}} \tag{3.3}$$

Où R_{dc} est la résistance du circuit continu qui représente une estimation des pertes de commutation et $C_{eq} = C/2$ est la capacité du condensateur équivalent du bus continu du DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux.

Les équations (3.2) et (3.3) représentent le modèle du DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux dans le repère dqo qui sera utilisé pour la conception des régulateurs des courants et de la tension du bus continu du DSTATCOM.

3.5 Modulation vectorielle tridimensionnelle

3.5.1 Modèle instantané de l'onduleur de tension à quatre bras à trois niveaux

La figure 3.5 représente le circuit de commutation équivalent d'un onduleur à quatre bras à trois niveaux.

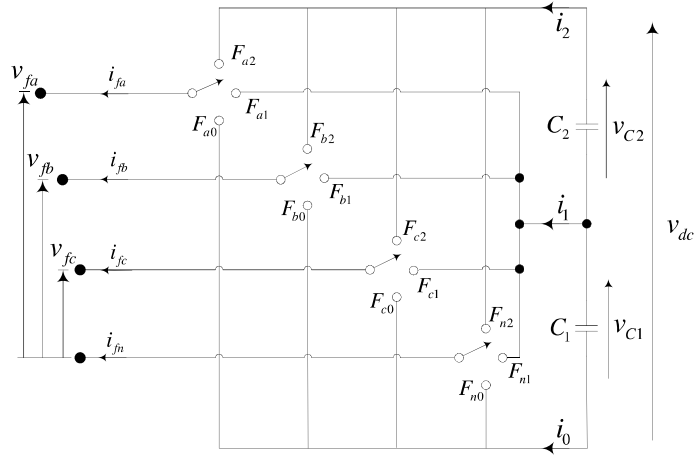


Figure 3.5: Circuit de commutation de l'onduleur à quatre bras à trois niveaux

Sur la figure (3.5), les termes F_{ij} représentent les fonctions de commutation où i représente l'indice des phases a, b, c ou n , et j indique le niveau de tension. Chaque bras de l'onduleur est vu comme un commutateur ayant trois positions 0, 1 et 2, ce qui permet de changer le niveau de tension. Les fonctions de commutation peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{aligned} F_{i2} &= S_{i2}S_{i1} \\ F_{i1} &= S_{i2}\overline{S}_{i1} \\ F_{i0} &= \overline{S}_{i2}\overline{S}_{i1} \end{aligned} \quad \text{avec } i = a, b, c \text{ ou } n \quad (3.4)$$

En termes de fonctions de commutation, la relation entre les tensions instantanées (v_{fa}, v_{fb}, v_{fc}) et les tensions du bus continu de l'onduleur (v_{C1}, v_{C2}) peut être exprimée comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{a2} - F_{n2} & F_{a1} - F_{n1} & F_{a0} - F_{n0} \\ F_{b2} - F_{n2} & F_{b1} - F_{n1} & F_{b0} - F_{n0} \\ F_{c2} - F_{n2} & F_{c1} - F_{n1} & F_{c0} - F_{n0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{C1} + v_{C2} \\ v_{C1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

La relation entre les courants de du bus continu (i_2, i_1, i_0) et les courants alternatifs $(i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}, i_{fn})$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix} i_2 \\ i_1 \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{a2} & F_{b2} & F_{c2} & F_{n2} \\ F_{a1} & F_{b1} & F_{c1} & F_{n1} \\ F_{a0} & F_{b0} & F_{c0} & F_{n0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \\ i_{fn} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Les vecteurs de tension donnés par (3.5) peuvent être transformés dans le repère $\alpha\beta o$. Par conséquent, il est possible de représenter les vecteurs de commutation dans un espace tridimensionnel comme le montre la figure 3.6.

3.5.2 Algorithme SVM tridimensionnel

Comme l'illustre la figure 3.7, il y a $3^4 = 81$ combinaisons de commutation. Les combinaisons de commutation sont décrites dans l'ordre de S_a, S_b, S_c et S_n où $S_a = j$ montre que $F_{aj} = 1$ avec $j = 0, 1, 2$, idem pour les phases b, c et la quatrième bras de neutre. Les 81 combinaisons de commutation sont réparties en 13 couches d'hexagones. Au total, il existe 65 vecteurs de commutation non nuls et trois vecteurs de commutation nuls situés à l'origine du plan [44-48].

La première étape dans l'algorithme 3DSVM est de déterminer la localisation du vecteur de tension de référence (v_f^*) dans l'espace tridimensionnel. v_f^* est situé dans l'un des 192 tétraèdres, chaque tétraèdre étant défini par quatre vecteurs de commutation adjacents au vecteur de tension de référence. Le diagramme hexagonal des vecteurs spatiaux est divisé en six secteurs et chaque secteur contient 32 tétraèdres répartis en quatre prismes.

Comme le montre la figure 3.7, sept tétraèdres forment les prismes 1 et 3, tandis que les prismes 2 et 4 contiennent respectivement huit et dix tétraèdres. La deuxième et troisième tâche de l'algorithme 3DSVM sont le calcul de la durée ON de chaque vecteur de commutation et la génération des impulsions correspondantes. Ces trois tâches doivent être faites pour tous les tétraèdres dans tous les secteurs où v_f^* est situé. Par conséquent, ce processus nécessite un temps de calcul important et rend son implémentation plus complexe [44,46].

Afin de réduire la complexité de l'algorithme 3DSVM, seuls deux secteurs au lieu de six



sont utilisés pour effectuer les différentes étapes de la modulation, si on adopte les secteurs 1 et 2. Les secteurs impairs prennent toutes les informations nécessaires du secteur 1 et les secteurs paires prennent celle du secteur 2. Cette relation de correspondance entre secteurs peut réduire considérablement la complexité du processus de calcul dans l'algorithme 3DSVM [44,47,48].

1. Première tâche : Localisation du vecteur de tension de référence

Cette tâche est effectuée en trois étapes :

– Détermination du nombre de secteurs

Le module et la position du vecteur de tension de référence v_f^* dans le repère $\alpha\beta$ sont déterminés comme suit :

$$\begin{aligned} v_{f\alpha\beta}^* &= \sqrt{v_{f\alpha}^{*2} + v_{f\beta}^{*2}} \\ \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{v_{f\beta}^*}{v_{f\alpha}^*} \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Où : $\tan^{-1}$ est une fonction qui donne la tangente inverse à quatre quadrants.

Une fois la valeur de θ est connue, le numéro du secteur est calculé par :

$$Secteur_i = \text{ceil} \left(\frac{\theta}{\pi/3} \right) \quad (3.8)$$

Où : i est le numéro de secteur et ceil est une fonction qui ajuste un nombre réel donné à l'entier le plus proche, supérieur ou égal à ce nombre.

– Détermination du prisme

Puisque le 3DSVM proposé n'utilise que deux secteurs, il est nécessaire de créer un nouveau vecteur de référence $U_{\alpha\beta}^*$ qui ne tourne que dans les deux secteurs un et deux. L'amplitude du nouveau vecteur est donnée par :

$$U_{f\alpha\beta}^* = \sqrt{U_{f\alpha}^{*2} + U_{f\beta}^{*2}} \quad (3.9)$$

Où : $U_{f\alpha}^* = v_{f\alpha\beta}^* \cos(\delta)$ et $U_{f\beta}^* = v_{f\alpha\beta}^* \sin(\delta)$

L'angle δ est donné par $\delta = \text{mod}(\theta, 2\pi/3)$, où $\text{mod}(x, y)$ est une fonction qui donne le reste de la division de x par y .

Comme le montre la figure (3.8), U_1^{*N} et U_2^{*N} sont les projections du nouveau vec-

teur de référence de tension dans le plan de 60 degrés.

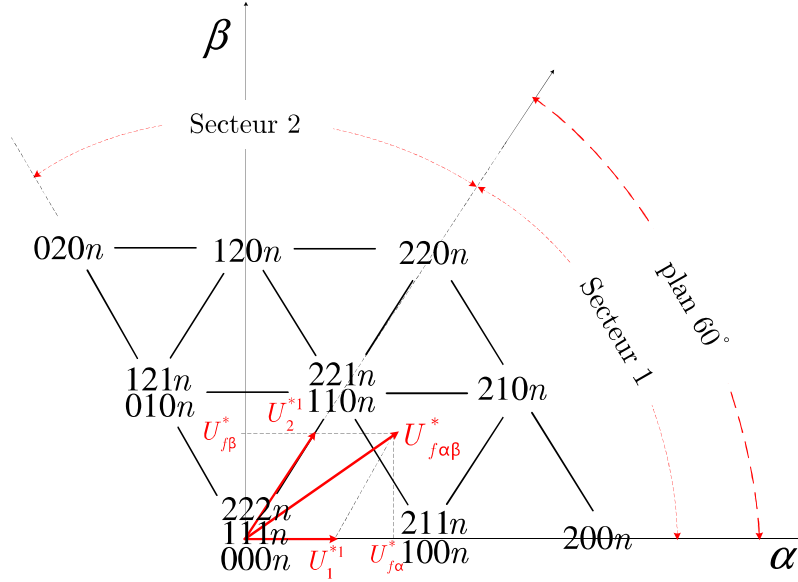


Figure 3.8: Nouveau vecteur de référence de tension dans le plan de 60 degrés

Les composantes U_1^{*N} et U_2^{*N} sont calculées par :

$$\begin{aligned} U_1^{*N} &= \frac{2}{v_{dc}} \sqrt{\frac{3}{2}} \left(U_{f\alpha\beta}^* \cos(\delta - (N-1)\pi/3) - \frac{U_{f\alpha\beta}^*}{\sqrt{3}} \sin(\delta - (N-1)\pi/3) \right) \\ U_2^{*N} &= \frac{4}{v_{dc}} \sqrt{\frac{3}{2}} \left(\frac{U_{f\alpha\beta}^*}{\sqrt{3}} \cos(\delta - (N-1)\pi/3) \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Où $N = 1$ si $U_{\alpha\beta}^*$ est situé dans le secteur 1 et $N = 2$ s'il est situé dans le secteur 2. Afin de déterminer le nombre de prismes où le vecteur $U_{\alpha\beta}^*$ est situé, deux valeurs entières $I_j = \text{int}(U_j^{*N})$, $j = 1, 2$ sont calculées, (Int est une fonction qui donne l'entier le plus proche inférieur ou égal à son argument).

La relation entre ces deux entiers et le nombre de prisme est donnée dans les tableaux 1, 2 et 3 de l'annexe A

– Détermination du tétraèdre

La dernière étape pour localiser v_f^* est la détermination du nombre de tétraèdres. Comme le montre la figure (3.9), chaque tétraèdre est limité du haut et du bas par deux surfaces. Chaque surface est à son tour est définie par trois états de commutation.

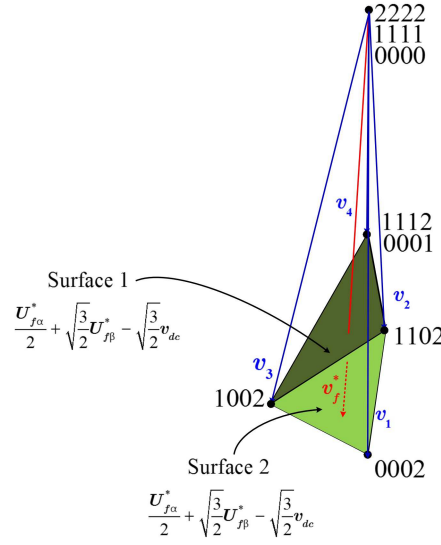


Figure 3.9: Surfaces limitant le tétraèdre 10 dans le prisme 4 du secteur 1

2. Deuxième tâche : Calcul des intervalles de temps de la durée ON

Une fois que l'emplacement du vecteur de référence est connu, les temps d'application des quatre vecteurs de commutation adjacents peuvent être calculés. Ces temps sont calculés pour chaque période de commutation selon le principe de la valeur moyenne où v_f^* peut être synthétisé en utilisant une combinaison des quatre vecteurs de commutation actifs adjacents. Cette formulation dans le repère $\alpha\beta o$ est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\begin{aligned} v_{1\alpha}t_1 + v_{2\alpha}t_2 + v_{3\alpha}t_3 + v_{4\alpha}t_4 &= v_{\alpha}^*T_s \\ v_{1\beta}t_1 + v_{2\beta}t_2 + v_{3\beta}t_3 + v_{4\beta}t_4 &= v_{\beta}^*T_s \\ v_{1o}t_1 + v_{2o}t_2 + v_{3o}t_3 + v_{4o}t_4 &= v_o^*T_s \end{aligned} \quad (3.11)$$

Où t_1, t_2, t_3 et t_4 sont respectivement les durées d'application des vecteurs adjacents v_1, v_2, v_3 et v_4 et $T_s = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ est la période de commutation.

3. Troisième tâche : états de commutation et génération d'impulsions

Les impulsions sont générées uniquement dans les secteurs 1 et 2, dans les autres secteurs elle peuvent être déduites simplement en échangeant les états des phases de sortie des secteurs pairs et impairs. Les relations entre secteurs pairs et impairs sont présentées respectivement dans les tableaux A.2 et A.3 de l'annexe A.

De plus, l'avantage du 3DSVM proposé n'est pas seulement la correspondance entre les

secteurs 1 et 2 avec les autres secteurs, mais il y a aussi une autre correspondance entre les tétraèdres dans le même prisme. Cette caractéristique fait que l'algorithme 3DSVM proposé nécessite moins de temps d'exécution. En effet, d'après les tableaux B.1 et B.2 de l'annexe B, il n'est pas nécessaire d'utiliser tous les tétraèdres pour générer les états de commutation, où il est possible d'utiliser seulement quatre tétraèdres au lieu de sept tétraèdres dans les deux prismes 1 et 3 du premier secteur. De même dans les prismes 2 et 4 où seulement quatre tétraèdres peuvent être utilisés. La même procédure est appliquée dans le secteur 2.

D'autre part, afin de réduire les pertes de puissance et de minimiser la fréquence de commutation, les séquences sont choisies de manière à permettre d'ouvrir ou de fermer un seul interrupteur autant que possible pour chaque transition entre les séquences. Prenons le cas où le vecteur de référence est situé dans le tétraèdre 6 dans le prisme 1 du secteur 1.

Dans ce cas, il existe six séquences de commutation différentes figure (3.10). On remarque que les séquences de commutation N°2 et N°5 ne sont pas souhaitables car il y a plus d'une transition entre les séquences.

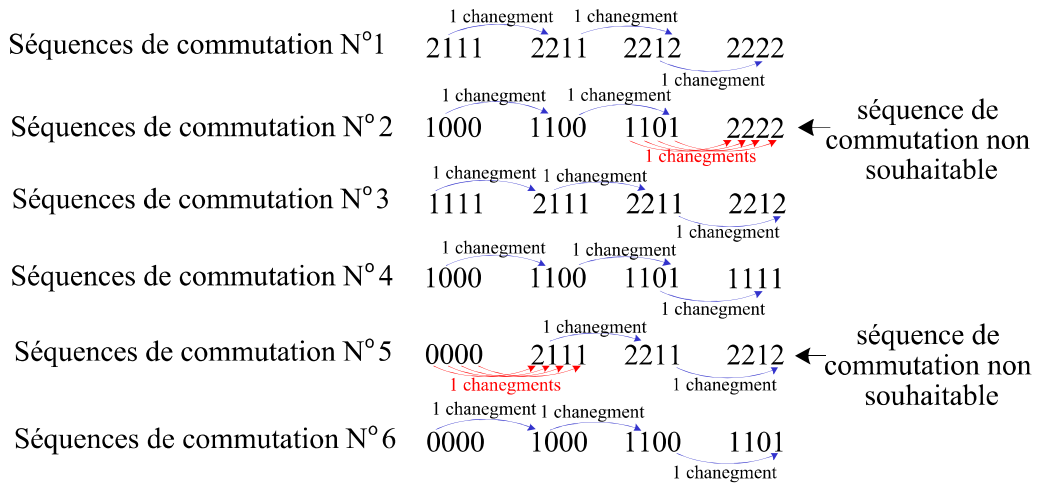


Figure 3.10: Séquences de commutation de tétraèdre 6 dans le prisme 1 du secteur 1

En se basant sur la symétrie d'états de commutation [30], le temps d'application de chaque vecteur de commutation est divisé en deux. La première moitié de ce temps est répartie en $T_s/2$, tandis que sa deuxième moitié est répartie d'une manière symétrique sur le reste de la période de commutation T_s .

La figure 3.11 représente la forme des états de commutation de la séquence N°4 pour le demi bras supérieure pendant une période de commutation complète T_s . Les impulsions de commutation pour le demi bras inférieure sont générées de manière complémentaire.

Séquences de commutation N°4 = (1000, 1100, 1101, 1111)								
	1000	1100	1101	1111	1111	1101	1100	1000
S_{a1}	1	1	1	1	1	1	1	1
S_{a2}	0	0	0	0	0	0	0	0
S_{b1}	0	1	1	1	1	1	1	0
S_{b2}	0	0	0	0	0	0	0	0
S_{c1}	0	0	0	1	1	0	0	0
S_{c2}	0	0	0	0	0	0	0	0
S_{n1}	0	0	1	1	1	1	0	0
S_{n2}	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\frac{d_1}{2}$	$\frac{d_2}{2}$	$\frac{d_3}{2}$	$\frac{d_4}{2}$	$\frac{d_3}{2}$	$\frac{d_3}{2}$	$\frac{d_2}{2}$	$\frac{d_1}{2}$
$\longleftrightarrow T_s$								

Figure 3.11: Présentation de la forme des états de commutation de la séquence N°4 pour le demi bras supérieure pendant une période de commutation T_s .

3.6 Stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs du bus continu

Les valeurs moyennes des courants des condensateurs du bus continu dépendent de l'indice de modulation et du facteur de puissance de la charge [46,47]. Si le DSTATCOM agit comme un correcteur de facteur de puissance, il échangera alors avec le système de distribution une quantité de puissance réactive. Les valeurs moyennes des courants des condensateurs du bus continu, dans ce cas, ne sont pas nulles. Par conséquent, la composante active du courant entraîne des déviations de tensions aux bornes des condensateurs. En raison de leur influence sur les courants des condensateurs, les vecteurs de commutation redondants sont utilisés dans la stratégie d'équilibrage pour résoudre le problème d'asymétrie des tensions de condensateurs sans faire appel à des circuits auxiliaires [46].

La stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs du bus continu adoptée repose essentiellement sur la propriété de minimisation d'énergie [46]. En supposant que tous les condensateurs ont la même capacité, l'énergie totale des condensateurs du bus continu $\frac{1}{2}C(v_{C1}^2 + v_{C2}^2)$ atteint son minimum de $\frac{Cv_{dc}^2}{4}$ lorsque toutes les tensions des condensateurs sont équilibrées. La technique consiste à minimiser une fonction de coût J à l'aide d'une sélection appropriée des vecteurs redondants. La fonction de coût J est donnée par :

$$J = C \sum_{j=1}^2 \Delta v_{Cj}^2$$

$$\Delta v_{Cj} = v_{cj} - \frac{v_{dc}^*}{2}$$
(3.12)

La condition nécessaire pour minimiser J est :

$$\frac{dJ}{dt} = \sum_{j=1}^2 \Delta v_{Cj} i_{cj} \leq 0$$
(3.13)

Où i_{cj} est le courant qui circule dans chaque condensateur C_j ($j = 1, 2$).

Puisque ces courants peuvent être écrits en tant que fonctions des courants de branche du bus continu i_0 et i_1 , l'expression (3.13) peut être réécrite en fonction des courants du bus continu comme suit :

$$\Delta v_{C1} i_1 + \Delta v_{C2} (i_1 + i_0) \leq 0$$
(3.14)

Si les tensions des condensateurs sont maintenues à leurs valeurs de référence de $v_{dc}/2$, la condition $\Delta v_{C1} + \Delta v_{C2} = 0$ est vérifiée. En utilisant cette condition sur (3.14) et en appliquant l'opérateur moyen sur une période d'échantillonnage, on obtient :

$$\frac{1}{T_s} \int_{kT_e}^{(k+1)T_e} (\Delta v_{C1} i_0) dt \geq 0$$
(3.15)

Comparé à la dynamique des tensions aux bornes des condensateurs, la période d'échantillonnage T_e est supposée suffisamment faible. De ce fait, les tensions des condensateurs sur une période d'échantillonnage peuvent être considérées comme constantes. Par conséquent, la condition (3.15) est simplifiée à :

$$\Delta v_{C1}(k) \bar{i}_0 \geq 0$$
(3.16)

Où : $\Delta v_{C1}(k)$ est la dérivée de la tension du condensateur C_1 à la période d'échantillonnage k . $\bar{i}_0$ est la valeur moyenne du courant intermédiaire du bus continu.

$\bar{i}_0$ doit être calculé pour les différentes séquences de commutation. La séquence de commutation minimisant (3.16) sera retenue.

3.7 Conception des contrôleurs du DSTATCOM dans des conditions asymétriques

Dans les systèmes d'alimentation électrique, le DSTATCOM peut être utilisé comme compensateur de puissance réactive soit pour stabiliser la tension, soit pour corriger le facteur de puissance. En outre, le DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux peut réguler le courant du neutre en utilisant le quatrième bras de l'onduleur. La composante indirecte du courant doit être également compensée pour assurer un courant de source équilibré en cas de charges déséquilibrées ou de défauts asymétriques dans le système d'alimentation.

La figure (3.12) illustre la commande du DSTATCOM quatre bras à trois niveaux basée sur les concepts des composantes symétriques composée de deux blocs de contrôle externe et interne.

3.7.1 Boucle de contrôle externe des tensions

Le bloc de contrôle externe des tensions s'occupe de la régulation de la tension du bus continu de l'onduleur et de la tension alternative du point de couplage commun à leurs valeurs de référence v_{dc}^* et v_{pc}^* , respectivement.

3.7.1.1 Contrôleur de la tension du bus continu

Afin d'assurer des performances élevées du DSTATCOM, la tension du bus continu v_{dc} doit être maintenue constante. De plus, les fluctuations de la tension continue doivent être faibles et ne dépassent pas la tension maximale des semiconducteurs constituant les dispositifs de commutation. Pour ce faire, un contrôleur PI est nécessaire pour contrôler la tension du bus continu.

D'après le schéma de contrôle de la figure 3.13, la fonction de transfert du système admettant comme entrée la composante directe du courant i_d et comme sortie v_{dc}^2 est donnée par :

$$G(s)_{BO} = \frac{-v_d}{C_{dc}s + \frac{1}{R_{dc}}} \quad (3.17)$$

Sa fonction de transfert en boucle fermée est :

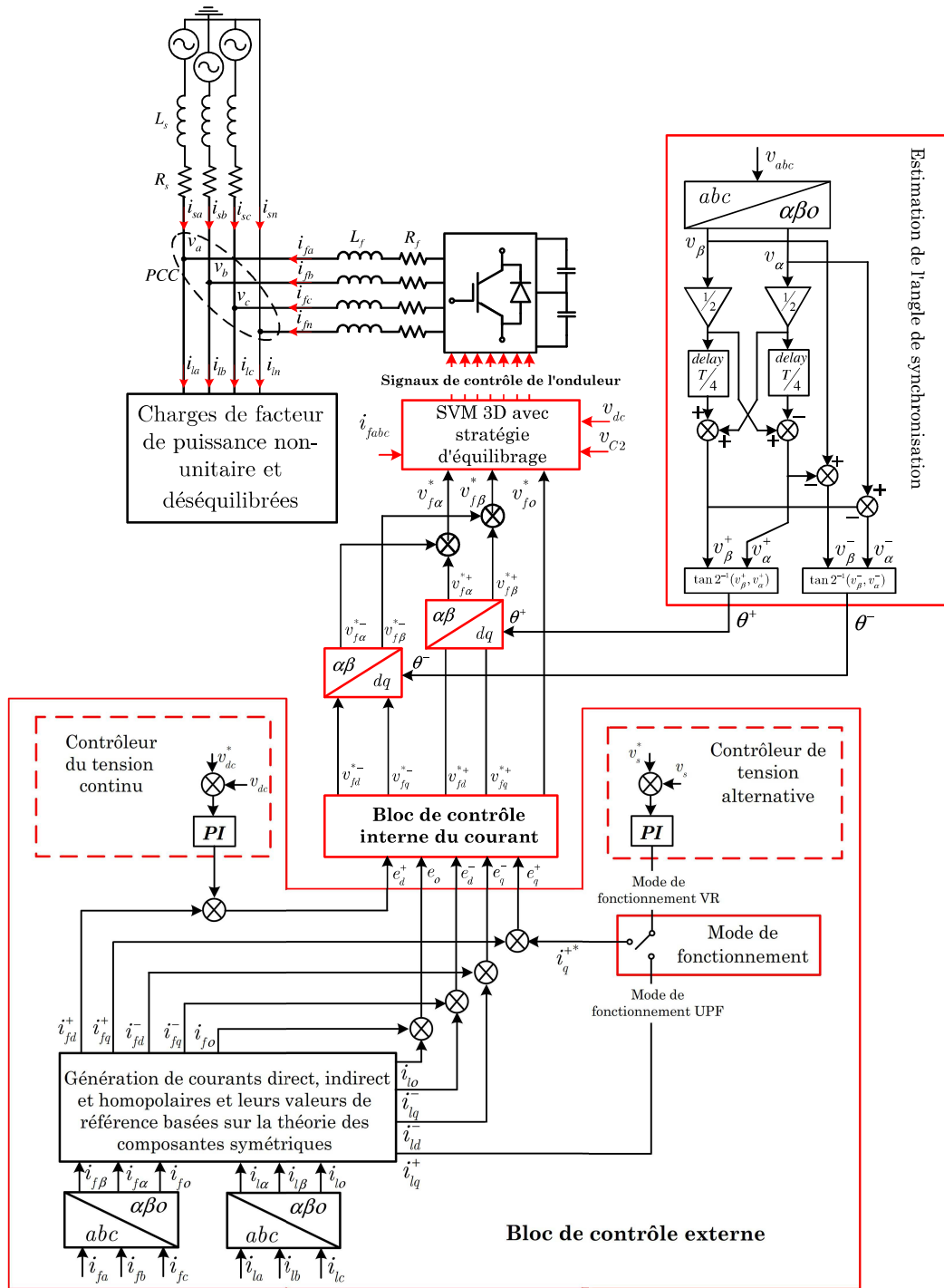


Figure 3.12: Structure de contrôle du DSTATCOM quatre bras à trois niveaux

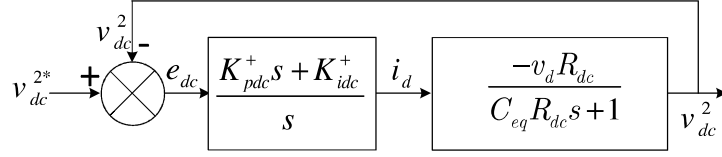


Figure 3.13: Schéma bloc du régulateur de la tension du bus continu

$$G(s)_{BF} = \frac{-v_d K_{pdc} s - v_d K_{idc}}{C s^2 + \left(\frac{1}{R_{dc}} - v_d K_{pdc} \right) s - v_d K_{idc}} \quad (3.18)$$

Sachant que la fonction de transfert d'un système du deuxième ordre en boucle fermée est caractérisée par :

$$F(s) = \frac{\omega_{ndc}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{ndc}s + \omega_{ndc}^2} \quad (3.19)$$

Où : ζ_{dc} est le taux d'amortissement et ω_{ndc} est la pulsation de coupure.

Alors, par analogie entre les expressions (3.18) et (3.19) on trouve :

$$\begin{aligned} k_{pdc} &= \frac{1}{R_{dc} v_d} - \frac{2C_{eq} \omega_n \zeta}{v_d} \\ k_{idc} &= \frac{C_{eq} \omega_n^2}{v_d} \end{aligned} \quad (3.20)$$

3.7.1.2 Contrôleur de la tension au point de couplage commun

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 pour la composante directe du courant réactif i_q^{+*} .

De plus, le bloc de commande externe génère aussi les séquences directe, indirecte et homopolaire des courants du DSTATCOM et celles de la charge. La génération de ces courants est basée sur la théorie des composantes symétriques figure 3.14.

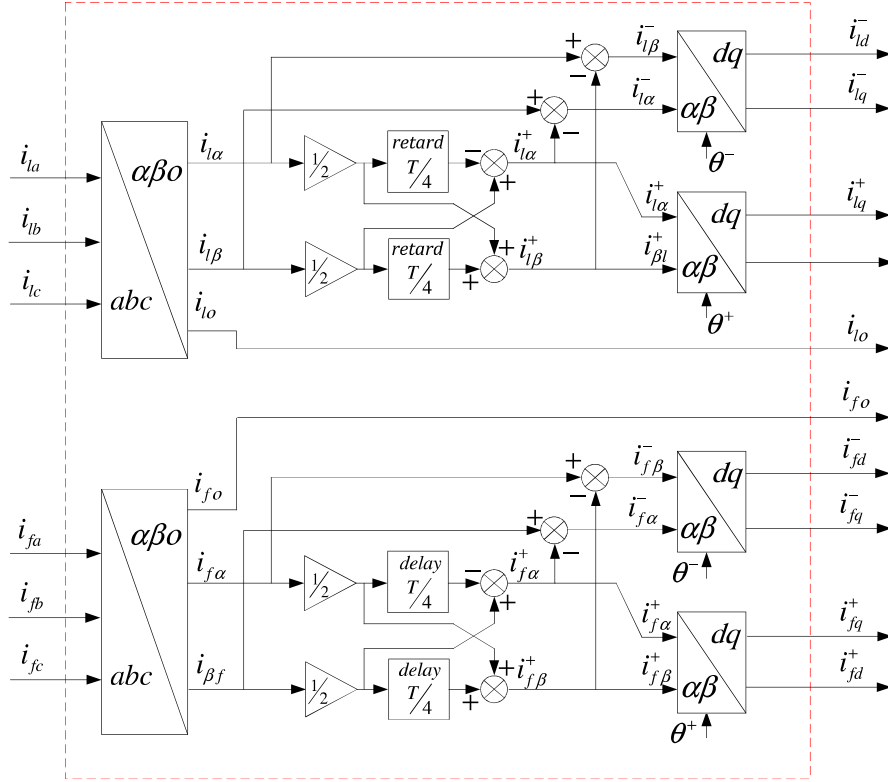


Figure 3.14: Génération des composantes directe, indirecte et homopolaire des courants actif et réactif en utilisant la théorie des composantes symétriques

3.7.2 Contrôleur interne des courants

Le bloc de commande interne est responsable de la régulation des composantes directes et indirectes des courants du DSTATCOM ainsi que la composante homopolaire. Les puissances actives et réactives échangées entre le DSTATCOM et le réseau sont contrôlées par la régulation des composantes directes des courants actif et réactif (i_{fd}^+ et i_{fq}^+). Le contrôleur est chargé de réguler également les composantes indirectes (i_{fd}^- et i_{fq}^-) et la composante homopolaire (i_{f0}) dans le cas d'un fonctionnement déséquilibré. Les composantes v_{fd} , v_{fq} , v_{fd} et v_{fq} sont les variables de contrôle où v_{ld} et v_{lq} sont des variables de perturbation.

L'équation (3.1) peut être alors découplée par le changement de variables suivantes :

$$\begin{aligned}
 v_{fd}^+ &= v_d^+ - L_f \omega i_{fq}^+ + v_{Ld} \\
 v_{fq}^+ &= v_q^+ + L_f \omega i_{fd}^+ \\
 v_{fd}^- &= v_d^- - L_f \omega i_{fq}^+ \\
 v_{fq}^- &= v_q^- + L_f \omega i_{fd}^+ \\
 v_{f0} &= v_0
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Où : v_{fd}^+ , v_{fd}^- , v_{fq}^+ , v_{fq}^- et v_0 sont les nouvelles variables de contrôle obtenues par quatre régulateurs PI. En comparant les équations (3.21) et (3.1), on déduit les relations de v_d^+ , v_q^+ , v_d^- , v_q^- et v_0 comme suit :

$$\begin{aligned}
 v_d^+ &= R_f i_{fd}^+ + L_f \frac{di_{fd}^+}{dt} \\
 v_q^+ &= R_f i_{fq}^+ + L_f \frac{di_{fq}^+}{dt} \\
 v_d^- &= R_f i_{fd}^- + L_f \frac{di_{fd}^-}{dt} \\
 v_q^- &= R_f i_{fq}^- + L_f \frac{di_{fq}^-}{dt} \\
 v_0 &= R_f i_{f0} + L_f \frac{di_{f0}}{dt}
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

À partir de l'équation (3.22), les systèmes du premier ordre découplés sont définis par :

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{fd}^+}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fd}^+ + \frac{1}{L_f} v_d^+ \\
 \frac{di_{fd}^-}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fd}^- + \frac{1}{L_f} v_d^- \\
 \frac{di_{fq}^+}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fq}^+ + \frac{1}{L_f} v_q^+ \\
 \frac{di_{fq}^-}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fq}^- + \frac{1}{L_f} v_q^- \\
 \frac{di_{f0}}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{f0} + \frac{1}{L_f} v_0
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

L'équation (3.23) représente cinq sous-systèmes découplés de premier ordre dont les tensions v_d^+ , v_d^- , v_q^+ , v_q^- et v_0 et sont les nouveaux signaux de commande générés par des régulateurs PI indépendants.

Les régulateurs PI sont définis par :

$$\begin{aligned}
 v_d^+ &= K_{dp}^+ e_d^+ + K_{di}^+ \int_0^t e_d^+ dt \\
 v_d^- &= K_{dp}^- e_d^- + K_{di}^- \int_0^t e_d^- dt \\
 v_q^+ &= K_{qp}^+ e_q^+ + K_{qi}^+ \int_0^t e_q^+ dt \\
 v_q^- &= K_{qp}^- e_q^- + K_{qi}^- \int_0^t e_q^- dt \\
 v_0 &= K_0 e_0 + K_{0i} \int_0^t e_0 dt
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Où :

$$\begin{aligned}
 e_d^+ &= i_d^{+*} - i_d^+ \\
 e_d^- &= i_d^{-*} - i_d^- \\
 e_q^+ &= i_q^{+*} - i_q^+ \\
 e_q^- &= i_q^{-*} - i_q^- \\
 e_d^+ &= i_d^{+*} - i_d^+ \\
 e_0 &= i_0^* - i_0
 \end{aligned}$$

Avec $K_{d(p,q)}^{+,-}$, $K_{d(p,q)}^{+,-}$ sont les gains des régulateurs. Le schéma bloc du régulateur des courants est présenté sur la figure (3.15).

La fonction de transfert du système en boucle ouverte pour la composante directe du courant i_{fd} est donnée par :

$$J(s) = \frac{K_{pd}^+ s + K_{id}^+}{L_f s^2 + R_f s} \tag{3.25}$$

Sa fonction de transfert en boucle fermée est :

$$H(s) = \frac{K_{pd}^+ s + K_{id}^+}{L_f s^2 + (R_f + K_{pd}^+) s + K_{id}^+} \tag{3.26}$$

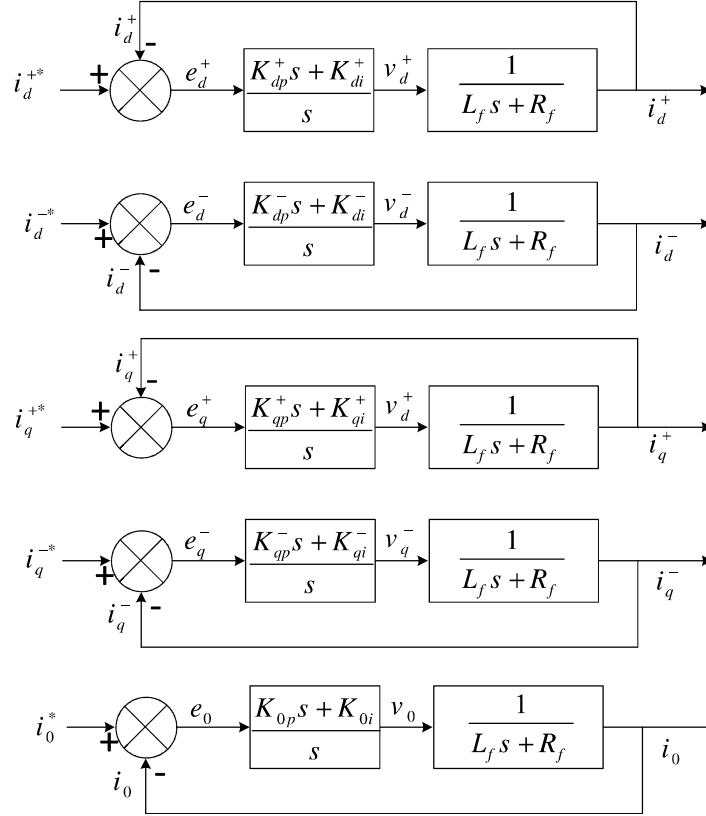


Figure 3.15: Le schéma bloc du régulateur des courants

Soit la fonction de transfert d'un système désiré du deuxième ordre en boucle fermée est caractérisée par :

$$F(s) = \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\xi_{ni}\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2} \quad (3.27)$$

Alors, par analogie entre les expressions (3.26) et (3.27) on trouve :

$$\begin{aligned} K_{pd}^+ &= 2\xi_{ni}\omega_{ni}L_k - R_k \\ K_{id}^+ &= L_k\omega_{ni}^2 \end{aligned} \quad (3.28)$$

D'une manière similaire on calcule les gains des autres régulateurs internes des courants.

La figure 3.16 représente le schéma bloc du contrôleur interne des courants.

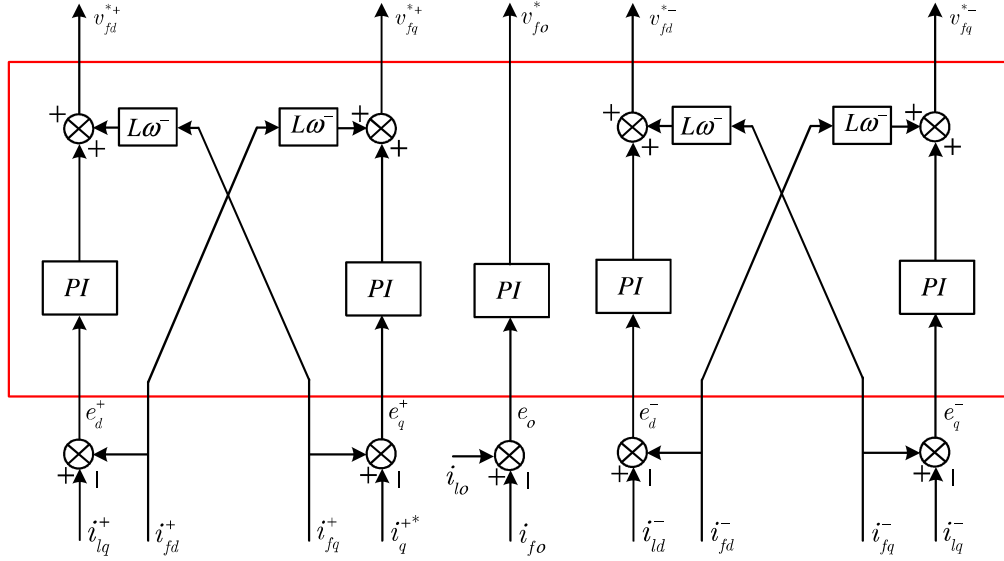


Figure 3.16: Contrôleurs interne des courants du DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux

Les tensions de référence requises pour le bloc de modulation vectorielle qui donne les signaux d'ouverture et de fermeture des IGBT sont obtenues par la boucle interne des courants.

3.8 Résultats de simulation et interprétations

Dans cette partie, on vérifiera l'aptitude de la stratégie de contrôle proposée dans la compensation d'énergie réactive pour la régulation de la tension ou dans la correction du facteur de puissance d'un DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux. On testera aussi l'efficacité de la technique 3DSVM dotée d'une stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs aussi bien dans les conditions de fonctionnement équilibrés que déséquilibrés.

Les paramètres du système étudié sont donnés par le tableau 3.1.

1. Mode de correction du facteur de puissance

1.a. Cas de charges équilibrées et déséquilibrées

Initialement, une charge inductive équilibrée est alimentée par le système de distribution, la figure 3.17 montre les résultats de simulation du DSTATCOM fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance.

Comme le montre la figure 3.17.c, le DSTATCOM injecte un courant réactif afin de compenser la puissance réactive nécessaire pour la charge et rendre ainsi les tensions et les courants du PCC en phase figure 3.17.h.

Table 3.1: Parameters de Simulation

Paramètre	Valeur
Tension simple du réseau	220V
Fréquence du réseau f	50Hz
Résistance de la ligne R_s	0.2 Ω
Inductance de la ligne L_s	3mH
Résistance du filtre du DSTATCOM R_f	0.01 Ω
Inductance du filtre du DSTATCOM L_f	8mH
Tension du bus continu v_{dc}	700V
Capacités des condensateurs du bus continu $C = C_1 = C_2$	4mF
Fréquence de commutation de l'onduleur f_s	9kHz
Résistance de la charge équilibrée $R_{l1} = R_{l2} = R_{l3}$	10 Ω
Inductance de la charge équilibrée $L_{l1} = L_{l2} = L_{l3}$	0.01H
Résistance de la charge déséquilibrée $R_{l1} = R_{l3}, R_{l2}$	10 $\Omega, 5\Omega$
Inductance de la charge déséquilibrée $L_{l1} = L_{l3}, L_{l2}$	0.01H, 0.05H

À $t=0,20$ s, la charge devient déséquilibrée, le DSTATCOM injecte plus de courant réactif pour compenser la composante directe du courant réactif figure 3.17.c requise par la charge déséquilibrée. De plus, le DSTATCOM compense aussi la composante indirecte des courants actif figure 3.16.b et réactif figure 3.17.d ainsi que la composant homopolaire figure 3.17.e. La Figure 3.17 montre que la tension du bus continu est réguler proche de sa valeur de référence figure 3.17.f. La figure 3.17.g montre ainsi que les tensions des condensateurs sont équilibrées, ce qui démontre l'efficacité de la stratégie d'équilibrage proposée à la fois dans des conditions équilibrées et déséquilibrées. On peut observer aussi que la tension du bus continu et les composantes directe, indirecte et homopolaire du courant présentes quelques oscillations lors le déquillage de charge.

1.b. Cas d'un défaut asymétrique

La figure 3.18 montre les performances du DSTATCOM en cas de défaut asymétrique. Initialement, le système de distribution alimente une charge inductive équilibrée, à 0.15s, un défaut asymétrique dans la phase b se produit à proximité de la charge pendant une durée de 0.05s.

Pendant la période de défaut, le DSTATCOM corrige le courant déséquilibré en délivrant des composantes indirectes du courants actif figure 3.18.b et réactif figure 3.18.d du courant de charge. En outre, on peut remarquer que la tension du bus continu présente quelques oscillations durant le défaut et puis elle rejoint sa valeur de référence figure 3.18.e. La même observation pour les composantes directe et indirecte du courant. D'autre part, les tensions de condensateurs du bus continu figure 3.18.f démontrent l'efficacité de la stratégie d'équilibrage proposée même en cas de défaut.

Les résultats de simulation montrent une bonne performance du DSTATCOM fonc-

tionnant en mode de correction du facteur de puissance. Les tensions et les courants du point de couplage commun sont en phase et les tensions des condensateurs du bus continu sont équilibrées même pendant la période de défaut.

2. Mode de régulation de tension

Les mêmes tests effectués pour le mode de correction du facteur de puissance seront également effectués pour le mode de régulation de tension.

2.a. cas d'une charge équilibrée et déséquilibrée

La figure 3.19 montre les résultats de la simulation du DSTATCOM pour la mise sous tension d'une charge. 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 3.19.g même dans des conditions déséquilibrées où composantes indirect du courant actif figure 3.19.b, réactif figure 3.19.d et homopolaire figure 3.19.e sont délivrées par le DSTATCOM pour compenser les courants déséquilibrés causés par la charge déséquilibrée.

La figure 3.19.g montre une bonne performance de la stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs du bus continu lorsque le DSTATCOM fonctionne en mode de régulation de tension figure.3.19.h dans des conditions de déséquilibrage.

2.b. Cas de défaut asymétrique

La figure 3.20 montre les résultats de simulation du DSTATCOM sous un défaut asymétrique. Pendant le défaut, les composant indirect des courants actif figure 3.20.b et réactif figure 3.20.d et la composante homopolaire figure 3.20.e sont délivrés par le DSTATCOM pour compenser les courants déséquilibrés dans le bus de point de couplage commun. Les résultats de simulation montrent une bonne performance de DSTATCOM fonctionnant en mode de régulation de tension.

La figure 3.20 montre que la tension du point de couplage commun est régulée à sa valeur de référence figure 3.20.h ainsi que la tension du bus continu figure 3.20.f. Les tensions des condensateurs du bus figure 3.20.g continu sont équilibrées même pendant la durée du défaut.

A travers différentes conditions de fonctionnements, il est possible d'observer l'efficacité du système de contrôle pour compenser la puissance réactive nécessaire à la charge afin d'assurer un facteur de puissance unitaire ou pour réguler de tension. De plus, une bonne performance de la stratégie d'équilibrage des tensions de la liaison continue est constaté dans différentes cas conditions de fonctionnement.

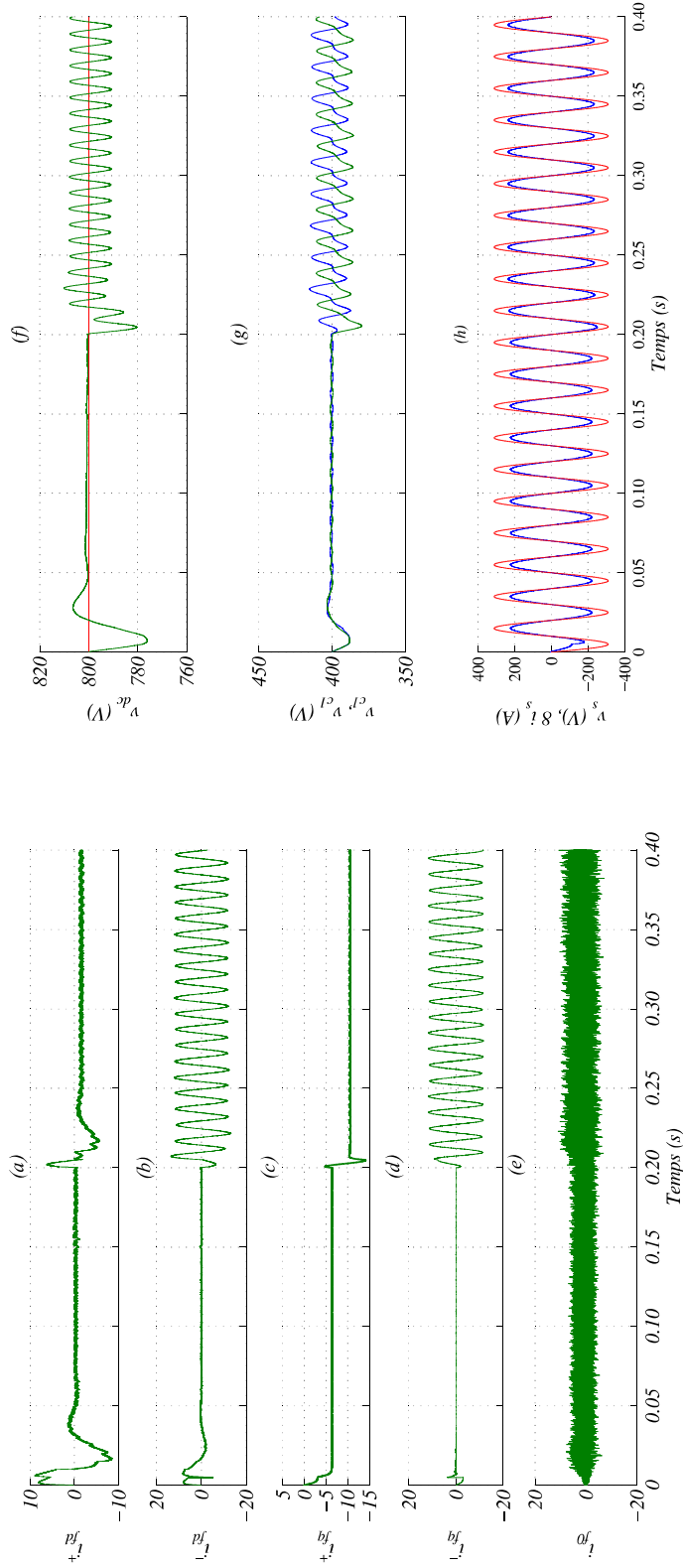


Figure 3.17: Réponse dynamique du système DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'une alimentation de charges équilibrés et déséquilibrés : (a) Composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) Composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) Composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) Composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) Courant de neutre (i_{f1}^0) (f) Tension continue v_{dc} et (g) Tensions des condensateurs du bus continu. (h) Tension et courant de source de la phase b

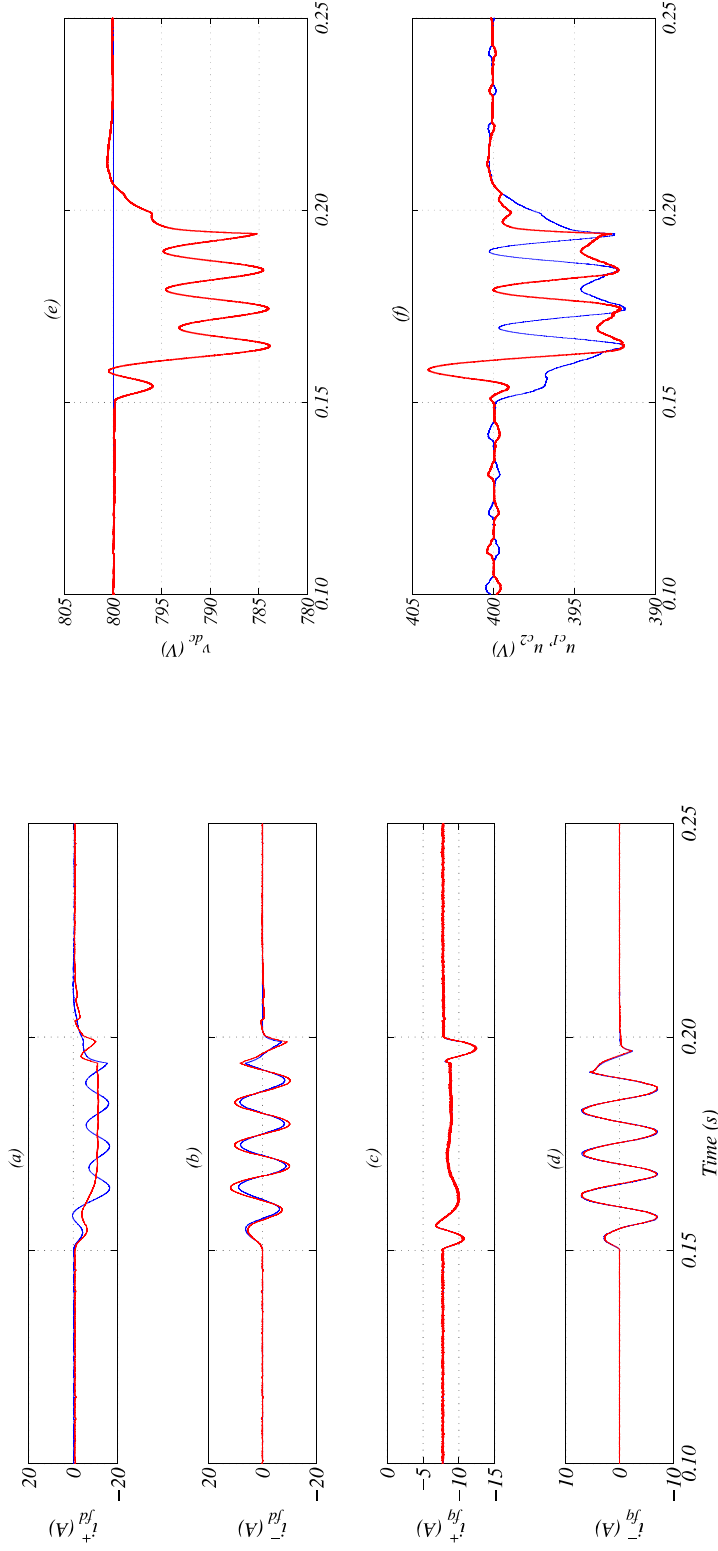


Figure 3.18: Réponse dynamique du système DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'un défaut asymétrique : (a) Composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) Composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) Composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) Composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) Tension continue v_{dc} et (f) Tension des condensateurs du bus continu.

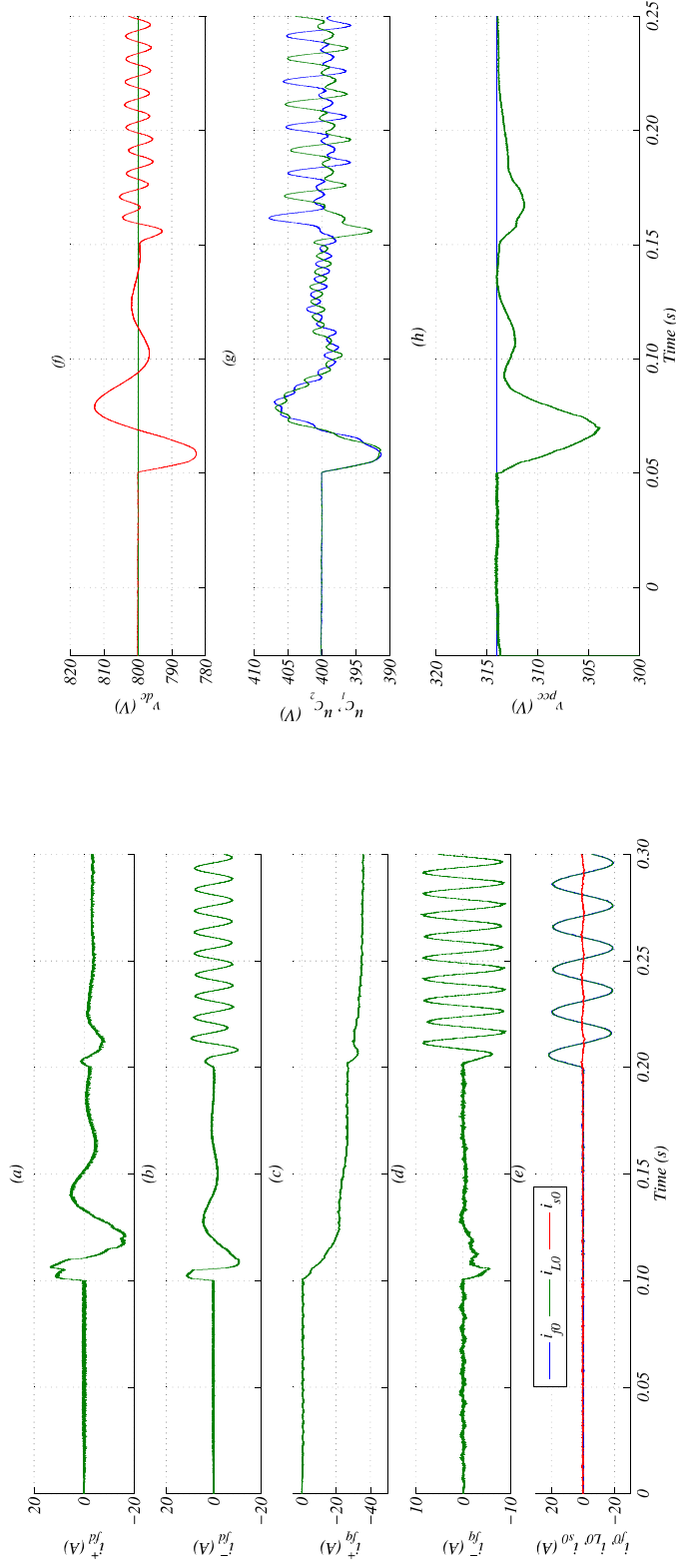


Figure 3.19: Réponse dynamique du système DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'une alimentation de charge équilibré et déséquilibré : (a) Composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) Composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) Composante directe du courant réactif (i_{fd}^0), (d) Composant indirecte du courant réactif (i_{fd}^-), (e) courants de neutre (f) Tension continue v_{dc} (g) Tension des condensateurs du bus continu (h) Tension de bus PCC.

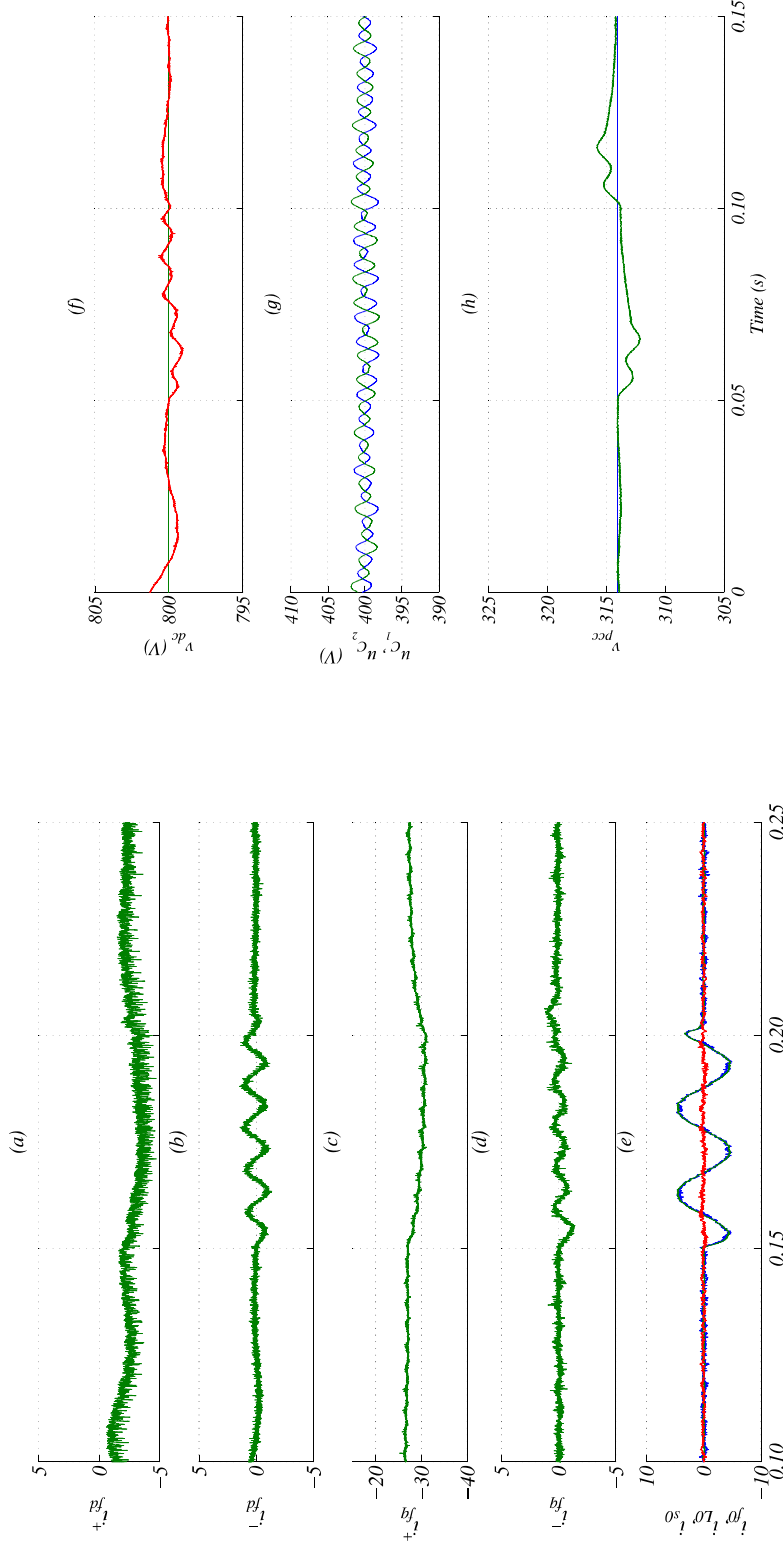


Figure 3.20: Réponse dynamique du système DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'un défaut asymétrique : (a) Composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) Composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) Composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) Composant indirect du courant réactif (i_{fq}^-), (e) Courant de neutre (i_{fn}), (f) Tension continue v_{dc} (g) Tension des condensateurs du bus continu (h) Tension du bus PCC.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une brève présentation des topologies de DSTATCOM pour les systèmes de distribution triphasés à quatre fils. Les caractéristiques de la topologie à base d'un convertisseur de tension à quatre bras font de cette topologie la plus appropriée pour réaliser un DSATCTCOM capable de compenser la puissance réactive dans un système de distribution à quatre fils dans des conditions équilibrées et d'équilibrées.

Nous avons appliqués la stratégie de modulation vectorielle tridimensionnelle pour l'équilibrage des tensions du bus continu du DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux. Cette stratégie présente beaucoup d'avantages par rapport aux autres méthodes de modulation particulièrement en terme du maintien de la stabilité du bus continu. Enfin, le système de contrôle du DSTATCOM à quatre bras trois niveaux basé sur la théorie des composantes symétriques a été vérifié à travers un ensemble de tests relatifs à plusieurs conditions de fonctionnement équilibrées et déséquilibrées.

Modélisation et commande d'un DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux couplé à une unité SMES

Sommaire

4.1	Introduction	90
4.2	Modélisation du système DSTATCOM-SMES quatre bras à trois niveaux	90
4.3	Principe de fonctionnement du hacheur bidirectionnel du DSTATCOM- SMES	93
4.4	Équilibrage des tensions des condensateurs et stratégie de com- mutation du hacheur	95
4.5	Contrôle du système DSTATCOM-SMES basé sur la théorie des composants symétriques	101
4.5.1	Contrôleur externe des tensions	101
4.5.2	Contrôleur interne des courants	104
4.6	Résultats de simulation et interprétations	105
4.7	Conclusion	108

4.1 Introduction

Le DSTATCOM triphasé à quatre bras est un compensateur de puissance réactive très efficace utilisé pour la stabilité de la tension ou à des fins de correction du facteur de puissance. L'efficacité de ce compensateur est d'autant plus meilleure quand il est couplé à un dispositif de stockage d'énergie où il peut compenser à la fois les puissances active et réactive simultanément et indépendamment. Divers dispositifs de stockage d'énergie couplés à des équipements DFACTS ont été cités dans la littérature [27-34]. Parmi eux, on trouve le SMES dont les caractéristiques font de lui le dispositif le plus approprié qui peut être couplé avec le DSTATCOM via un convertisseur DC-DC bidirectionnel.

L'analyse de la littérature montre que la plupart des DSATACOM-SMES à base de convertisseurs multiniveaux sont connectées à des systèmes de distribution à trois fils [29,32,47]. Cependant, jusqu'à présent, les DSATCOM-SMES à base d'onduleurs multiniveaux à quatre bras connectés aux systèmes de distribution à quatre fils dans des conditions déséquilibrées n'ont pas encore été étudiés.

Ce chapitre sera focalisé sur la conception de la commande d'un DSTATCOM-SMES à quatre bras à trois niveaux basée sur la théorie des composantes symétriques pour contrôler non seulement les fluctuations dues aux charges ou aux défauts, mais aussi pour assurer un contrôle indépendant des puissances active et réactive. On traitera également une nouvelle stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs du bus continu en utilisant un hacheur bidirectionnel faisant partie du système DSTATCOM-SMES.

4.2 Modélisation du système DSTATCOM-SMES quatre bras à trois niveaux

La figure 4.1 représente le schéma d'un DSTATCOM-SMES quatre bras à trois niveaux relié à un système de distribution à quatre fils via un filtre $R_f L_f$. Le DSTATCOM-SMES est connecté en shunt en tant que compensateur à proximité d'un ensemble de charges à facteurs de puissance non unitaires et déséquilibrés. Comme on peut le voir sur la figure, l'ensemble du système consiste en un onduleur de tension quatre bras à trois niveaux relié à un SMES par l'intermédiaire d'un hacheur bidirectionnel trois niveaux. Le bus continu intermédiaire est constitué de deux condensateurs identiques $C_1 = C_2 = C$.

Dans la figure 4.1, $v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}, v_a, v_b, v_c$ et v_{fa}, v_{fb}, v_{fc} représentent respectivement les tensions de la ligne, du point de couplage commun et de sortie de l'onduleur, $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}, i_{sn}, i_{la}, i_{lb}, i_{lc}, i_{ln}$ et $i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}, i_{fn}$ sont respectivement les courants de ligne, de charge et de DSTATCOM-SMES.

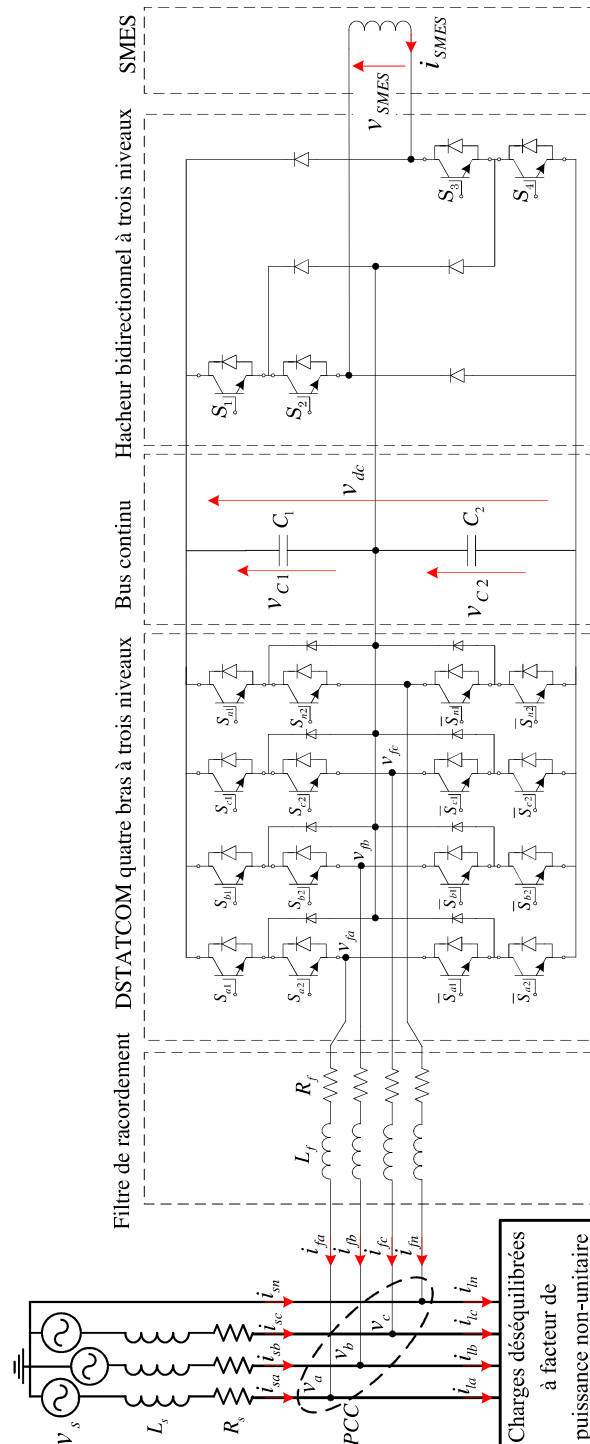


Figure 4.1: schéma de DSTATCOM-SMES à quatre bras à trois niveaux connecté à un système de distribution à quatre fils

Les équations du circuit côté alternatif en termes des tensions et des courants instantanés sont données par :

$$\begin{aligned}
 L_f \frac{di_{fa}}{dt} &= -R_f i_{fa} + v_{fa} - v_a \\
 L_f \frac{di_{fb}}{dt} &= -R_f i_{fb} + v_{fb} - v_b \\
 L_f \frac{di_{fc}}{dt} &= -R_f i_{fc} + v_{fc} - v_c
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Les équations du circuit côté alternatif dans le repère dqo peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{fd}}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fd} + \omega i_{fq} + \frac{v_{fd} - v_d}{L_f} \\
 \frac{di_{fq}}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fq} - \omega i_{fd} + \frac{v_{fq}}{L_f} \\
 \frac{di_{fo}}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fo} + \frac{v_{fo}}{L_f}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

D'autre part, l'équation des courants dans le bus continu intermédiaire est donnée par :

$$i_{dc}^{eq} = i_1^{eq} - C_{eq} \frac{dv_{dc}}{dt} - \frac{v_{dc}}{R_{dc}} \tag{4.3}$$

Où $C_{eq} = C/2$ est la capacité équivalente, i_1^{eq} est le courant d'entrée équivalent du côté continu de l'onduleur, et i_{dc}^{eq} est le courant d'entrée du hacheur. R_{dc} représente l'estimation des pertes de commutation.

Les équations (4.2) et (4.3) représentent le modèle mathématique du DSTATCOM-SMES à quatre bras qui sera utilisé dans la conception de la commande.

4.3 Principe de fonctionnement du hacheur bidirectionnel du DSTATCOM-SMES

Dans le système DSTATCOM-SMES, la bobine SMES est considérée comme une source de courant continu. Le hacheur bidirectionnel assure la bidirectionnalité du flux de puissance en contrôlant la tension aux bornes de la bobine SMES. La tension aux bornes du SMES est liée à la tension du circuit continu intermédiaire par un rapport cyclique D (dite rapport cyclique fondamental), comme suit :

$$v_{SMES} = (2D - 1)v_{dc} \quad (4.4)$$

Où : v_{SMES} et v_{dc} sont respectivement les valeurs moyennes des tensions aux bornes de la bobine SMES et du bus continu.

À partir des figures 4.2, 4.3 et 4.4, trois modes de fonctionnement peuvent être distingués : modes de charge, de décharge et de veille.

- Lorsque $D > 0,5$, le système fonctionne en mode de charge. La valeur moyenne de la tension aux bornes du SMES est positive, ce qui signifie que la puissance est positive et que la bobine SMES absorbe un courant durant sa phase de charge.

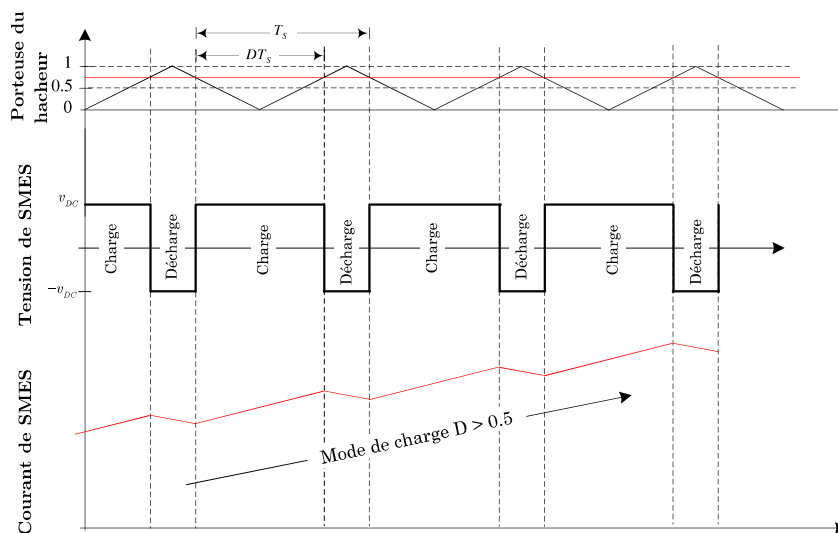


Figure 4.2: Fonctionnement du système en mode de charge, lorsque $D > 0,5$

- Lorsque $D < 0,5$, le système fonctionne en mode de décharge. La valeur moyenne de la tension aux bornes du SMES est négative, ce qui signifie que la puissance est négative la bobine SMES fournit un courant durant sa phase de décharger.

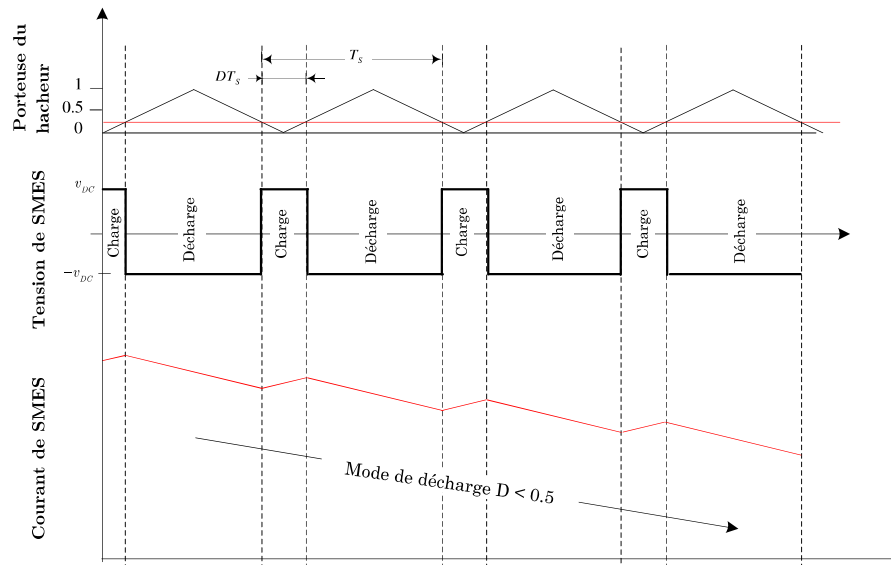


Figure 4.3: Fonctionnement du système en mode de décharge, lorsque $D < 0,5$

- Lorsque $D = 0,5$, le système fonctionne en mode du veille. La valeur moyenne de la tension aux bornes du SMES est nulle, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'échange d'énergie et que le courant i_{SMES} reste constant, à l'exception d'une petite variation nécessaire pour compenser les pertes de commutation.

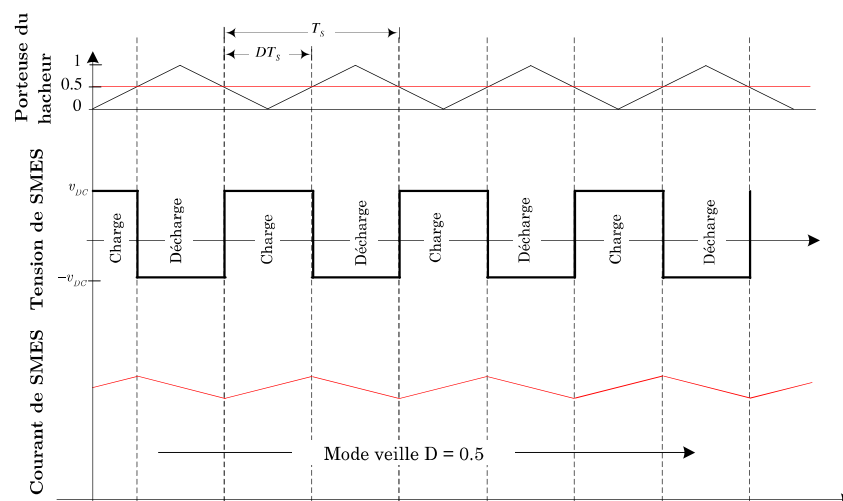


Figure 4.4: Fonctionnement du système en mode veille, lorsque $D = 0,5$

4.4 Équilibrage des tensions des condensateurs et stratégie de commutation du hacheur

Le recoure à une commande appropriée du hacheur bidirectionnel couplant le SMES au DSTATCOM est nécessaire pour éviter le problème de déséquilibre des tensions des condensateurs de la liaison continue. L'approche que nous avons adopté ne nécessite qu'une boucle de contrôle d'équilibrage de tension combinée au système de contrôle principal.

Le tableau 4.1 représente les états de commutation du hacheur bidirectionnel à trois niveaux pour les trois modes. Les états de commutation sont sélectionnés afin de minimiser la fréquence de commutation et garantir une perte de puissance aussi faible que possible.

Table 4.1: Etats de commutation du hacheur bidirectionnel à trois niveaux

Etat	S_1	S_2	S_3	S_4	v_{SMES}	v_{dc}
1	1	1	1	1	$+v_{dc}$	$v_{c1} + v_{c2}$
2	0	0	0	0	$-v_{dc}$	$-(v_{c1} + v_{c2})$
3	0	1	1	1	$+v_{dc}/2$	v_{c1}
4	1	1	1	0	$+v_{dc}/2$	v_{c2}
5	0	1	0	0	$-v_{dc}/2$	$-v_{c1}$
6	0	0	1	0	$-v_{dc}/2$	$-v_{c2}$
7	0	0	1	1	0	0
8	1	1	0	0	0	0

De ce tableau, on définit les différents voies des courant du hacheur pour différents mode de fonctionnement figure 4.5.

Les tensions des condensateurs étant liés aux courants qui les traversant, et en prenant l'état 1 du tableau 4.1, qui est représenté par la sequence de la figure 4.1.a.1 , le courant au point mulieu O est donné par :

$$i_0 = i_{c1} - i_0^{dc} - i_{c2} \quad (4.5)$$

En supposant que v_{dc} est constante , $v_{dc} = v_{c1} + i_{c2}$ et les capcités sont identiques, les courants des condensateurs sont liés par :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{dv_{c1}}{dt} + \frac{dv_{c2}}{dt} = 0 \quad (4.6a)$$

$$i_{c1} + i_{c2} = 0 \quad (4.6b)$$

Chapitre 4. Modélisation et commande d'un DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux couplé à une unité SMES

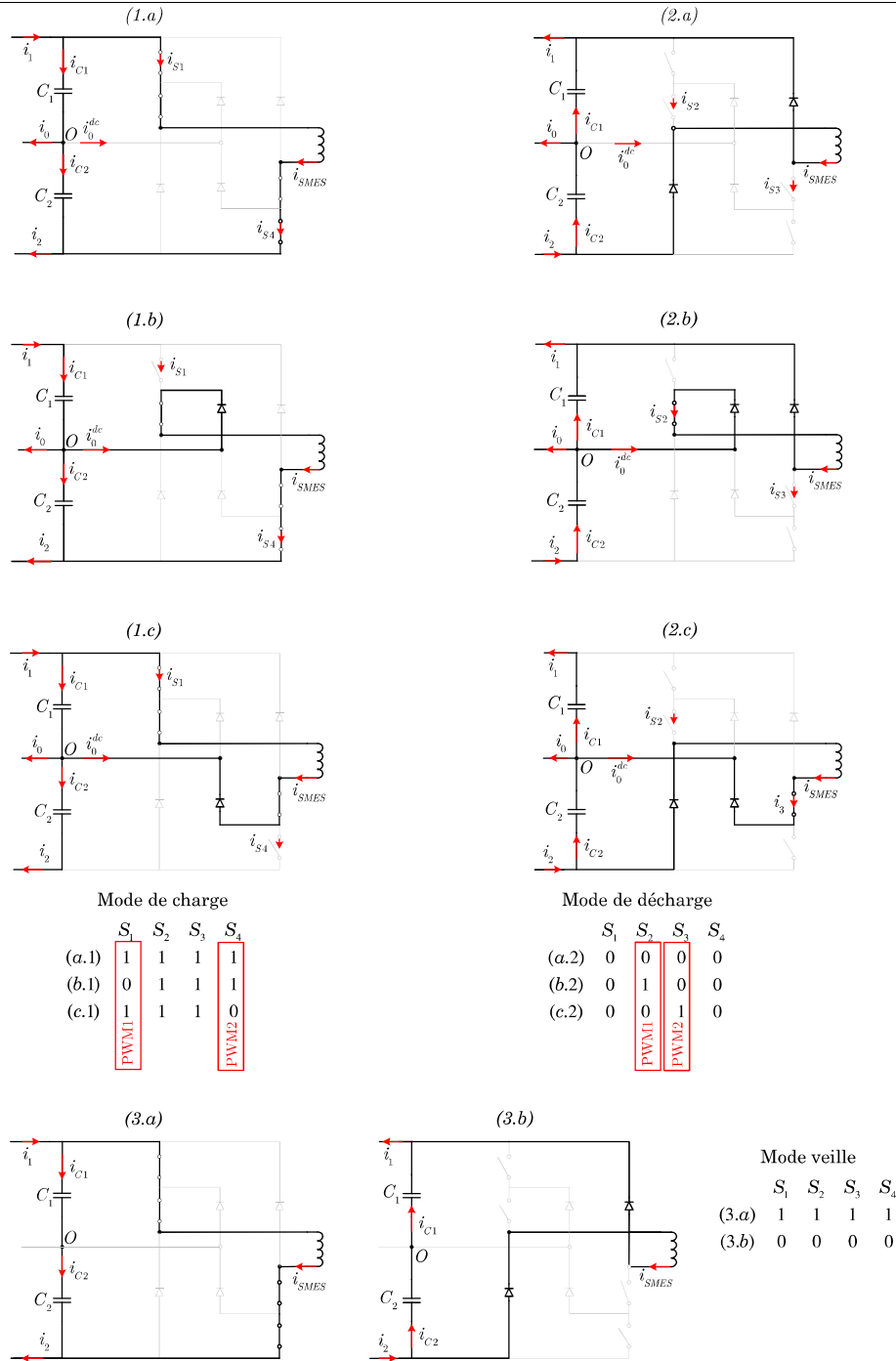


Figure 4.5: Voies des courants du hacheur bidirectionnel à trois niveaux pour différents cas

De cette équation une tension v_{dc} constante signifie que la somme des intensités des condensateurs doit être égale à zéro. Pour remplir cette condition, des fonctions de commutation reliant les courants des condensateurs au courant de SMES doivent être définies.

En substituant i_{c1} de (4.6b) dans (4.5), i_0 peut être réécrit comme suit :

$$i_0 = -i_0^{dc} - 2i_{c2} \quad (4.7)$$

Pour l'état 1, les courants i_2 et i_1 sont donnés par :

$$i_1 = i_{c1} + i_{S1} \quad (4.8a)$$

$$i_2 = i_{c2} + i_{S4} \quad (4.8b)$$

Où i_{S1}, i_{S4} sont respectivement les courants dans les commutateurs S_1, S_4

a noter que chaque courant d'un commutateur peut être écrit comme :

$$i_{Sn} = d_{Sn}i_{SMES}, \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.9)$$

Où d_{Sn} est le rapport cyclique du commutateur S_n ,

De la figure 4.5.a.1, i_0 s'exprimera également en fonction de i_1 et i_2 comme suit :

$$i_0 = i_{c1} - i_{c2} \quad (4.10)$$

De l'équation (4.8) :

$$i_{S4} = i_2 - i_{c2} \quad (4.11a)$$

$$i_{S1} = i_1 - i_{c1} \quad (4.11b)$$

On observe que les courants i_{S4} et i_{S1} sont égaux, alors :

$$i_1 - i_2 = i_{c1} - i_{c2} \quad (4.12)$$

De (4.10) et (4.12), le courant i_0 peut s'écrire en fonction de i_1 et i_2 comme suit :

$$i_0 = i_1 - i_2 \quad (4.13)$$

En substituant (4.6b) et (4.8) dans (4.13), on obtient :

$$i_0 = -2i_{c2} + (d_{S1} - d_{S4})i_{SMES} \quad (4.14)$$

À partir des équations (4.7) et (4.14), i_0^{dc} peut-être écrit comme :

$$i_0^{dc} = (d_{S4} - d_{S1})i_{SMES} \quad (4.15)$$

D'après l'équation (4.15), il est évident que le courant i_0^{dc} dépend de la différence des rapports cycliques (d_{S4} et d_{S1}). Donc, en ajoutant ou en soustrayant une petite perturbation Δd_S du rapport cyclique fondamental (D), il est possible de contrôler le courant de la branche médiane et de faire en sorte que les condensateurs soient équilibrés.

Cette perturbation est responsable de la régulation de la tension à travers l'un des condensateurs du bus continu intermédiaire alors que le rapport cyclique fondamental (D) est responsable de la régulation de la tension continue global du bus intermédiaire. Les nouveaux rapports cycliques sont donnés comme suit :

$$\begin{aligned} d_{S1} &= D + \Delta d_S \\ d_{S4} &= D - \Delta d_S \end{aligned} \quad (4.16)$$

Comme mentionné sur la figure 4.5 et selon le mode de fonctionnement, les deux interrupteurs S_1 et S_4 fonctionnent avec les rapports cycliques d_1 correspondant au PWM1 et d_4 correspondant au PWM4.

La même analyse peut être faite pour le mode de décharge où les interrupteurs S_2 et S_3 fonctionnent avec les rapports cycliques d_1 correspondant au PWM2 et d_3 correspondant au PWM3.

Les figures 4.6, 4.7 et 4.8 représentent des signaux de commutation pendant une période de commutation pour différents modes de fonctionnement. La figure 4.6 illustre le cas du mode de charge où les interrupteurs S_2 et S_3 sont toujours activés, alors que S_1 et S_4 sont commutés en fonction de leurs rapports cycliques d_1 et d_4 , respectivement. On observe que la petite perturbation ΔD_S ajoutée au rapport cyclique D pour l'interrupteur S_1 conduit à l'augmentation de son t_{ON} et par conséquent à la diminution de son t_{OFF} par la même

quantité.

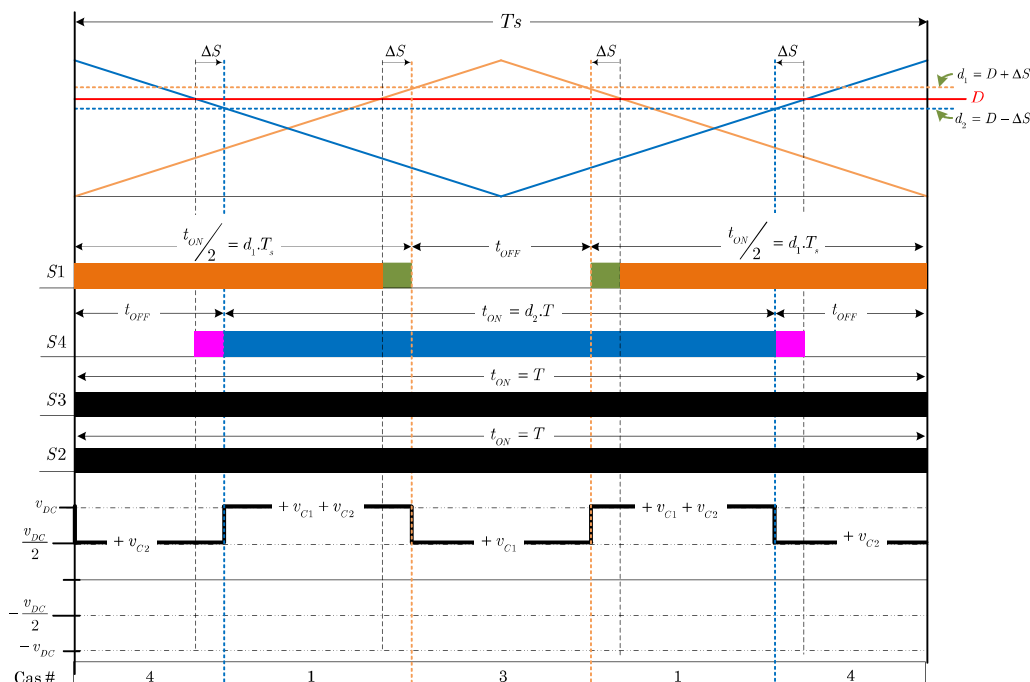


Figure 4.6: Signaux de commande des interrupteurs du hacheur pendant une période de commutation pour le mode de charge $D > 0.5$

Par contre pour S_4 la perturbation Δd_S est soustraite du rapport cyclique D , ce qui conduit à la diminution de t_{ON} de l'interrupteur S_4 et par conséquent à l'augmentation de son t_{OFF} par la même quantité de perturbation. La même analyse peut être faite pour le mode de décharge comme l'illustre la figure 4.7. Dans ce cas, S_1 et S_4 sont toujours OFF alors que S_2 et S_3 sont commutées en fonction de leurs rapports cycliques d_2 et d_3 correspondant respectivement au PWM2 et PWM3.

Le mode veille est représenté par la figure 4.8 où les interrupteurs S_1, S_2, S_3, S_4 sont alternés par le même rapport cyclique D . On remarque que le courant i_0^{dc} en mode veille (états 7 et 8) est égal à zéro, ce qui signifie que leurs rapports cycliques restent les mêmes sans changement.

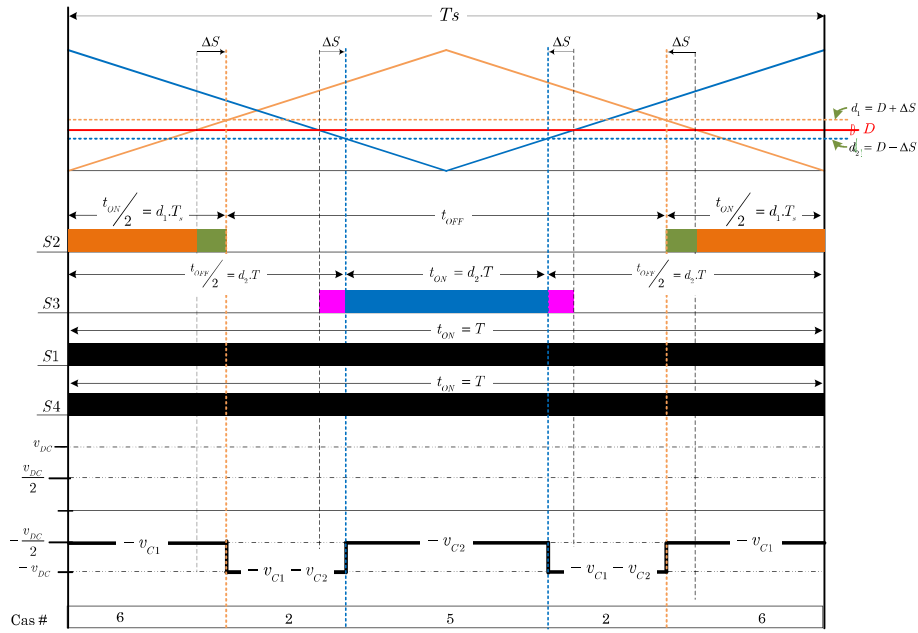


Figure 4.7: Signaux de commande des interrupteurs du hacheur pendant une période de commutation pour le mode de décharge $D < 0.5$

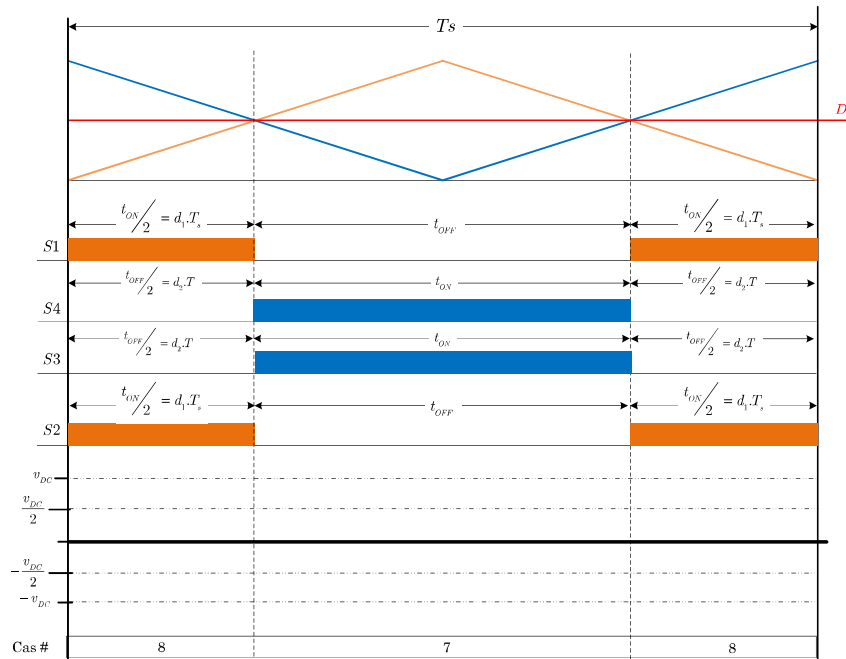


Figure 4.8: Signaux de commande des interrupteurs du hacheur pendant une période de commutation pour le mode veille $D = 0.5$

4.5 Contrôle du système DSTATCOM-SMES à quatre bras à trois niveaux basé sur la théorie des composants symétriques

Le système DSTATCOM-SMES possède un degré de liberté supplémentaire par rapport au DSTATCOM seul et, ceci grâce à sa capacité de compenser la puissance active puisque le SMES est capable de stocker de l'énergie électrique dans le champ magnétique généré par le courant continu qui le traverse [29,30]. De plus, le DSTATCOM-SMES à quatre bras peut compenser les composantes indirectes des courants déséquilibrés en présence de charges déséquilibrées ou défauts asymétriques dans le système d'alimentation et réguler également le courant neutre en utilisant le quatrième bras de l'onduleur.

La figure 4.9 montre le schéma de commande du DSTATCOM-SMES quatre bras à trois niveaux basé sur les composantes symétriques. La stratégie de contrôle est conçue dans le référentiel synchrone ; elle se compose de deux blocs de commande imbriqués, l'un externe pour le contrôle des tensions, l'autre, internes pour le contrôle des courants.

Le bloc de commande externe génère les composantes directes, indirectes et homopolaire des courants. En outre, il régule la tension PCC à sa valeur de référence et assure la régulation de la tension continue du circuit intermédiaire ainsi que l'équilibrage des tensions des condensateurs par la stratégie de commutation du hacheur bidirectionnel. Le bloc de commande interne est responsable de la régulation des composantes directes et indirectes des courants du compensateur ainsi que la composante homopolaire.

4.5.1 Contrôleur externe des tensions

Le contrôleur des tensions du circuit intermédiaire continu est responsable de la génération du rapport cyclique fondamental D ainsi que de la génération de la variation du rapport cyclique Δd_S nécessaire pour équilibrer les tensions des condensateurs du bus continu. Le rapport cyclique fondamental est donné par :

$$D = \frac{i_{dc}^{eq}}{i_{SMES}} \quad (4.17)$$

À partir de l'équation (4.3), la fonction de transfert de la tension du circuit intermédiaire peut s'écrire comme suit :

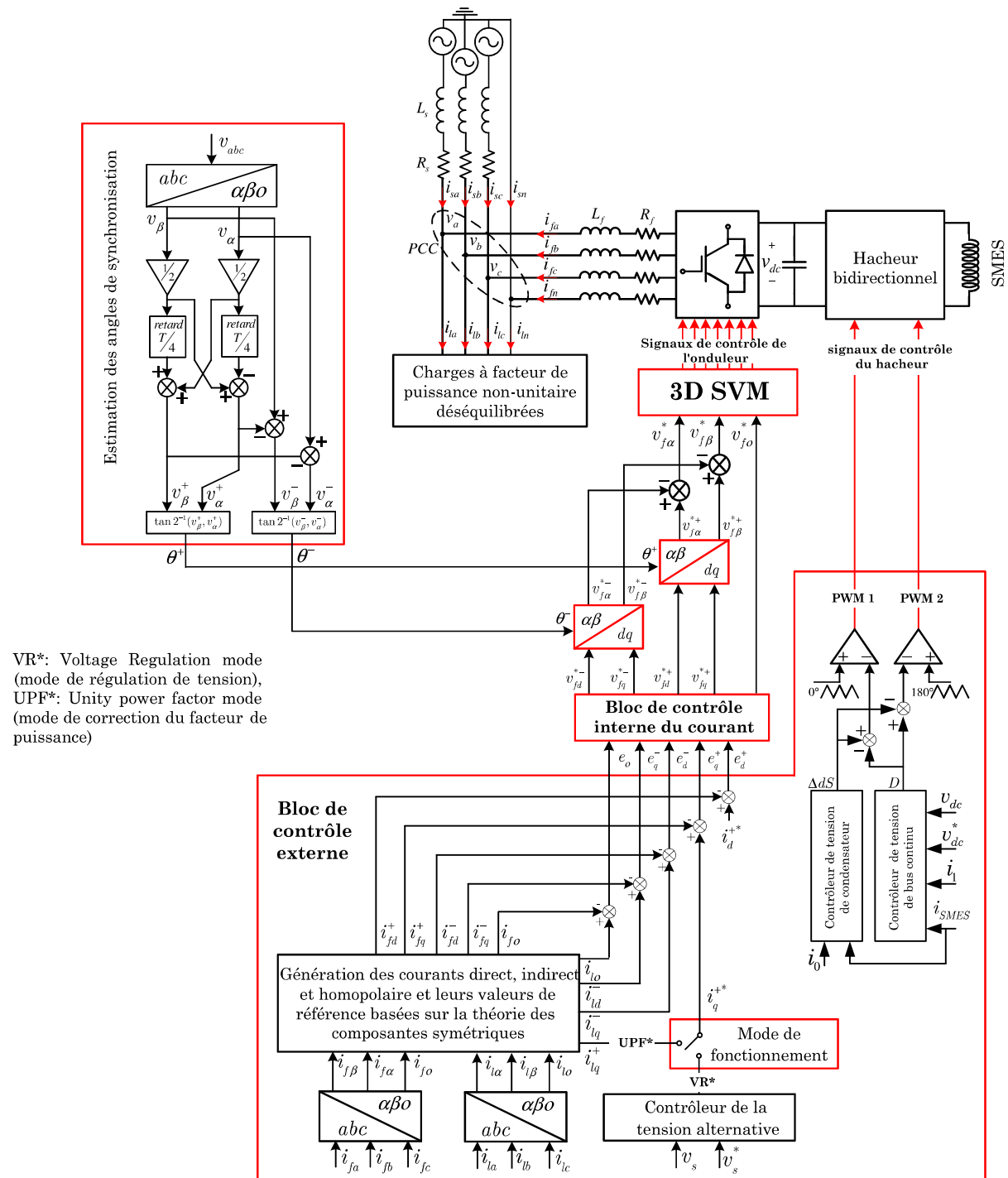


Figure 4.9: Schéma de commande du DSTATCOM-SMES à quatre bras à trois niveaux

$$G_{BO_{v_{dc}}} = \frac{v_{dc}(s)}{\Delta i(s)} = \frac{1}{-C_{eq}s - 1/R_{dc}} \quad (4.18)$$

Où $\Delta i = i_{eq}^{dc} - i_1^{eq}$.

Comme on peut le constater, la fonction de transfert en boucle ouverte du bus de la liaison continue est affectée par le courant i_1^{eq} . Pour éviter cet effet, un terme de compensation doit être ajouté. La figure 4.10 montre le schéma fonctionnel de la régulation de la tension du circuit intermédiaire en utilisant un régulateur PI.

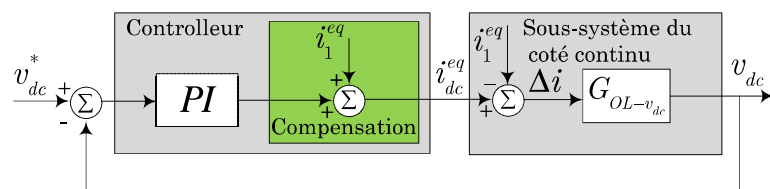


Figure 4.10: Contrôleur de la tension du bus continu du système DSTATCOM-SMES

De l'équation (4.7), il vient :

$$\Delta i_0 = -2i_{c2} \quad (4.19)$$

où : $\Delta i_0 = i_0^{dc} - i_0$.

La fonction de transfert en boucle ouverte de la tension du condensateur C_2 de la liaison continue est donnée par :

$$G_{BO_{v_c}} = \frac{v_{C_2}(s)}{\Delta i_0(s)} = -\frac{1}{2C_2s} \quad (4.20)$$

En substituant l'équation (4.16) dans (4.15), la variation Δd_S peut s'écrire comme suit :

$$\Delta d_S = \frac{-i_0^{dc}}{2i_{SMES}} \quad (4.21)$$

D'après les équations (4.19) et (4.21), il est clair que la boucle de régulation des tensions du bus continu est affectée par les courants i_{SMES} et i_0 . De même, pour annuler les effets

des courants i_{SMES} et i_0 , une compensation est nécessaire en ajoutant i_0 à la variable de contrôle Δi_0^* puis le résultat obtenu est divisé par l'inverse de i_{SMES} . Le contrôleur de tension du condensateur C_2 de la liaison continue est résumé dans la figure 4.11.

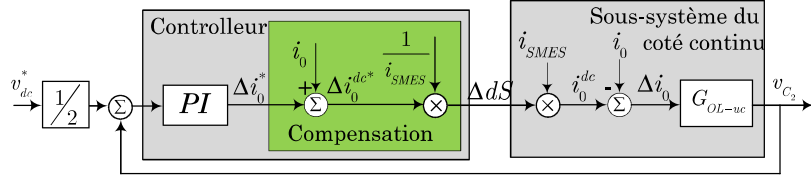


Figure 4.11: Contrôleur de la tension du condensateur C_2 du bus continu du DSTATCOM-SMES

Le contrôleur externe des tensions régule aussi le niveau de tension du point de couplage commun en contrôlant la puissance réactive échangée entre le DSTATCOM-SMES et le réseau. un contrôleur PI est proposé pour générer un signal de référence pour la composante directe du courant réactif du DSTATCOM i_q^+ .

4.5.2 Contrôleur interne des courants

Le système DSATCTOM-SMES quatre bras à trois niveaux est proposé pour fonctionner même dans des conditions déséquilibrées. Donc, les séquences directes, indirectes et homopolaire dans le repère synchrone doivent être régulées pour assurer un courant de la source équilibré et une compensation complète du courant de neutre. D'après la figure 4.9, si la séquence directe de la composante q du courant de charge (i_{lq}^+) est considérée comme la valeur de référence pour la séquence directe de la composante q du courant du compensateur, dans ce cas, le DSTATCOM-SMES compensera la puissance réactive nécessaire à la charge et maintient donc la puissance réactive absorbée du système d'alimentation à zéro. Lorsque la sortie du régulateur de tension est adoptée comme la valeur de référence i_q^+ , le DSTATCOM-SMES fonctionne maintenant en mode régulateur de tension.

Afin, d'assurer une valeur nulle du courant dans le quatrième fil du système de distribution dans des conditions déséquilibrées, le courant du neutre est régulé en prenant la séquence homopolaire i_{l0} de la charge comme une valeur de référence. Un contrôleur PI sera utilisé pour réguler chaque séquence de courant où un contrôle indépendant des composantes des courants d et q est requis.

4.6 Résultats de simulation et interprétations

Afin de tester les performances du DSTATCOM-SMES et de montrer l'effet des contrôleurs utilisés, un ensemble de tests de simulation sera effectué dans cette partie, ceci pour montrer l'efficacité de la régulation indépendante des puissances active et réactive et la compensation du courant de neutre ainsi que de la performance de la stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs du bus continu proposé en régimes permanent et transitoire. Les simulations ont été effectuées pour différentes situations de charges équilibrées, déséquilibrées et de défauts asymétriques dans le réseau. Les paramètres du système DSTATCOM, SMES et des charges sont donnés dans le tableau 4.2.

Table 4.2: Parameters de simulation

Paramètre	Valeur
Tension du réseau	220 V
Fréquence du réseau f	50 Hz
Résistance de ligne R_s	0.2 Ω
Inductance de ligne L_s	3 mH
Résistance du DSTATCOM R_f	0.01 Ω
Inductance du DSTATCOM L_f	8 mH
Tension du bus continu v_{dc}	700 V
Capacités des condensateurs $C = C_1 = C_2$	4 mF
Fréquence de commutation de l'onduleur f_s	9 kHz
Fréquence de commutation du hacheur f_{cs}	9 kHz
Inductance de la SMES L_{SMES}	1 H
Résistance de la charge équilibrée $R_{l1} = R_{l2} = R_{l3}$	10 Ω
Inductance de la charge équilibrée $L_{l1} = L_{l2} = L_{l3}$	0.01 H
Résistance de la charge déséquilibrée $R_{l1} = R_{l2}, R_{l3}$	10 Ω , 5 Ω
Inductance de la charge déséquilibrée $L_{l1} = L_{l2}, L_{l3}$	0.01 H , 0.05 H

1. Mode de correction du facteur de puissance

1.a. Alimentation des charges équilibrées et déséquilibrées

Initialement, le système de distribution n'est pas chargé. A $t=0,05s$, une charge équilibrée est connectée au système, elle est maintenue jusqu'à $t=0,25s$, figure 4.12. Les résultats de simulation montrent que le DSTATCOM-SMES fonctionne en mode de correction du facteur de puissance. En effet, sur la figure 4.12.b le DSTATCOM-SMES injecte 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 dans la même phase figure 4.12.g.

À $t=0,25 s$, la charge devient déséquilibrée, le DSTATCOM-SMES injecte plus de courant réactif pour compenser la composante directe du courant réactif requise par

la charge déséquilibrée figure 4.12.b. De plus, le DSTATCOM-SMES compense la composante indirecte des courants actifs (figure 4.12.c) et réactifs figure 4.12.d ainsi que la séquence homopolaire figure 4.12.e. La Figure 4.12.g montre que les tensions des condensateurs sont équilibrées et proches de leurs valeurs de référence, ce qui démontre l'efficacité de la stratégie d'équilibrage proposée dans des conditions équilibrées et déséquilibrées.

1.b. Cas de défaut asymétrique

La figure 4.13 montre les performances du DSTATCOM-SMES en cas de défaut asymétrique. Initialement, le système de distribution alimente une charge équilibrée, à $t=0.15s$, un défaut asymétrique dans la phase b se produit à proximité de la charge pendant $0.05s$. Durant cette période de défaut, le DSTATCOM-SMES corrige le courant déséquilibré en délivrant les composantes indirectes des courants actif figure 4.13.a et réactif 4.13.b et la composante homopolaire figure 4.13.c du courant.

Les résultats de simulation montrent une bonne performance de système DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de où la tension et le courant sont en phase puissance pendant le défaut figure 4.13.g et h. les condensateurs du circuit intermédiaire sont aussi équilibrées même pendant la période de défaut figure 4.13.e.

1.c. Cas d'échange de puissance active entre le réseau et le DSTATCOM-SMES

Le système DSTATCOM-SMES a également la capacité de délivrer la puissance active. En effet, la figure 4.14 montre les performances de l'échange d'énergie active entre le DSTATCOM-SMES et le système de distribution lors des trois modes de fonctionnement : les modes de charge, de décharge et de veille. Initialement, le système fonctionne en mode veille la puissance active consommée ou fournie au système d'alimentation est nulle, à $t=0.2s$, un changement du courant actif de 20 A pendant 0.2 s est effectué, pendant cette durée, le système fonctionne en mode de charge et l'énergie passe du système de distribution à l'unité SMES pour la charger.

À $t=0.4s$, on effectuera un autre changement du courant actif mais cette fois ci égale $-20A$ afin d'inverser le flux de puissance active du SMES vers le système de distribution. Dans ce cas, le système fonctionne en mode de décharge. À $t=0.6s$, le système revient en mode veille.

2. Mode de régulation de tension

Dans cette partie, les mêmes tests adoptés pour le mode de correction du facteur de puissance seront également appliqués pour le mode de régulation de tension.

2.a. Alimentation de charges équilibrées et déséquilibrées

La figure 4.15 montre les résultats de simulation du DSTATCOM-SMES avec variation de la nature de la charge d'une charge équilibrée (de $t=0.05s$ à $t=0.25s$) à

une charge déséquilibrée (à partir de $t=0.25s$). L'analyse de ces résultats montre une bonne performance de la compensation de la puissance réactive (figure 4.15.b) nécessaire pour réguler la tension du bus PCC (figure 4.15.h). Ce réglage est maintenu même dans des conditions déséquilibrées. Dans ce cas, des composantes indirectes du courant actif (figure 4.15.c) et réactif (figure 4.15.d) et homopolaire (figure 4.15.e) du courant sont délivrées par le système DSTATCOM-SMES pour compenser les courants déséquilibrés causés par la charge déséquilibrée. La figure 4.15.g montre une bonne performance de la stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs de liaison continue lorsque le DSTATCOM-SMES fonctionne en mode de régulation de la tension dans des conditions déséquilibrés.

2.b. Cas de défaut asymétrique

La figure 4.16 montre les résultats de simulation du DSTATCOM-SMES en présence de défaut asymétrique. Pendant le défaut, de $t=0.15s$ jusqu'à $t=0.25s$, les composantes indirectes des courants actifs (figure 4.16.a) et réactifs (figure 4.16.b) et la composante homopolaire (figure 4.16.c) sont délivrées par les DSTATCOM-SMES pour compenser les courants déséquilibrés dans le bus du point de couplage commun. Les résultats de la simulation montrent une bonne performance du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation où la tension du point de couplage commun est régulée à sa valeur de référence (figure 4.16.f) et les tensions des condensateurs du circuit intermédiaire sont équilibrées même pendant la durée du défaut (figure 4.16.e).

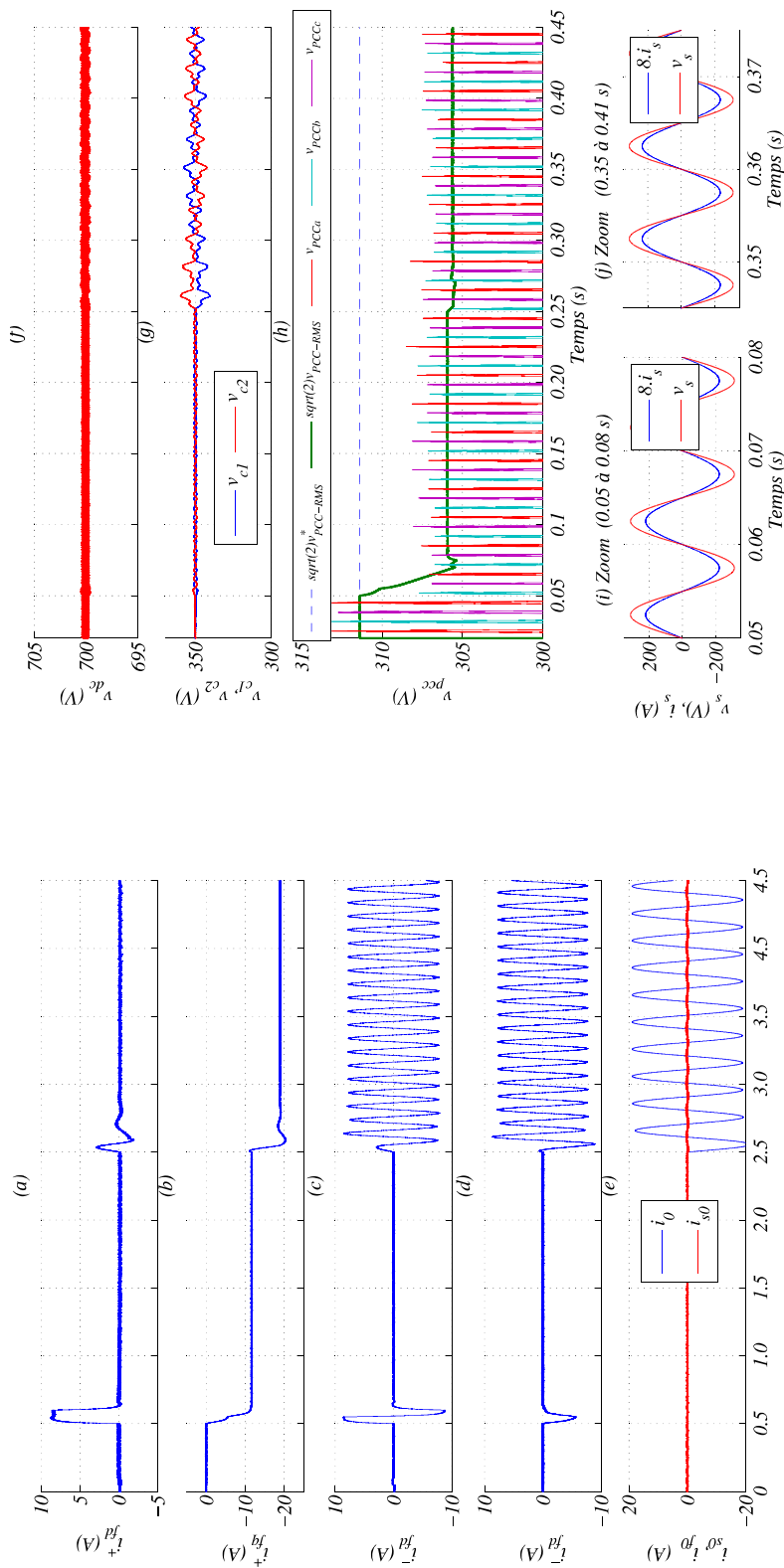
1.c. Cas d'échange de puissance active entre le réseau et le DSTATCOM-SMES

Les résultats de simulation montrent que le DSTATCOM-SMES a la capacité de contrôler simultanément les puissances active (figure 4.17.a) et réactive (figure 4.17.b) et de maintenir la tension du point de couplage commun dans la valeur de référence désirée (figure 4.17.f). La stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs de liaison continue proposée donne des bonnes performances (figure 4.17.e) lorsque DSTATCOM-SMES fonctionne dans le mode de régulation de tension, ce qui valide également l'efficacité de la technique proposée dans ce mode de fonctionnement.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, le DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux couplé à une unité SMES a été étudié et simulé dans différentes conditions. Le système est connecté en tant que compensateur shunt au système de distribution à quatre fils, et la stratégie de contrôle est conçue dans le repère synchrone basée sur la théorie des composantes symétriques. On a proposé également une stratégie d'équilibrage des tensions des condensateurs de la liaison continue intermédiaire en utilisant un algorithme simple combiné avec la boucle de commande du contrôleur de tension continue. De nombreuses simulations ont été effectuées pour des charges équilibrées, déséquilibrées ainsi que pour un défaut asymétrique dans le réseau.

À travers les différents tests effectués, il est possible d'observer l'efficacité du système de contrôle pour compenser la puissance active ainsi que la puissance réactive nécessaire pour la charge afin d'assurer un facteur de puissance unitaire ou de stabiliser la tension du point de couplage commun. De plus, le système est capable également d'assurer l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs de l'onduleur multiniveaux indépendamment des conditions de fonctionnement.



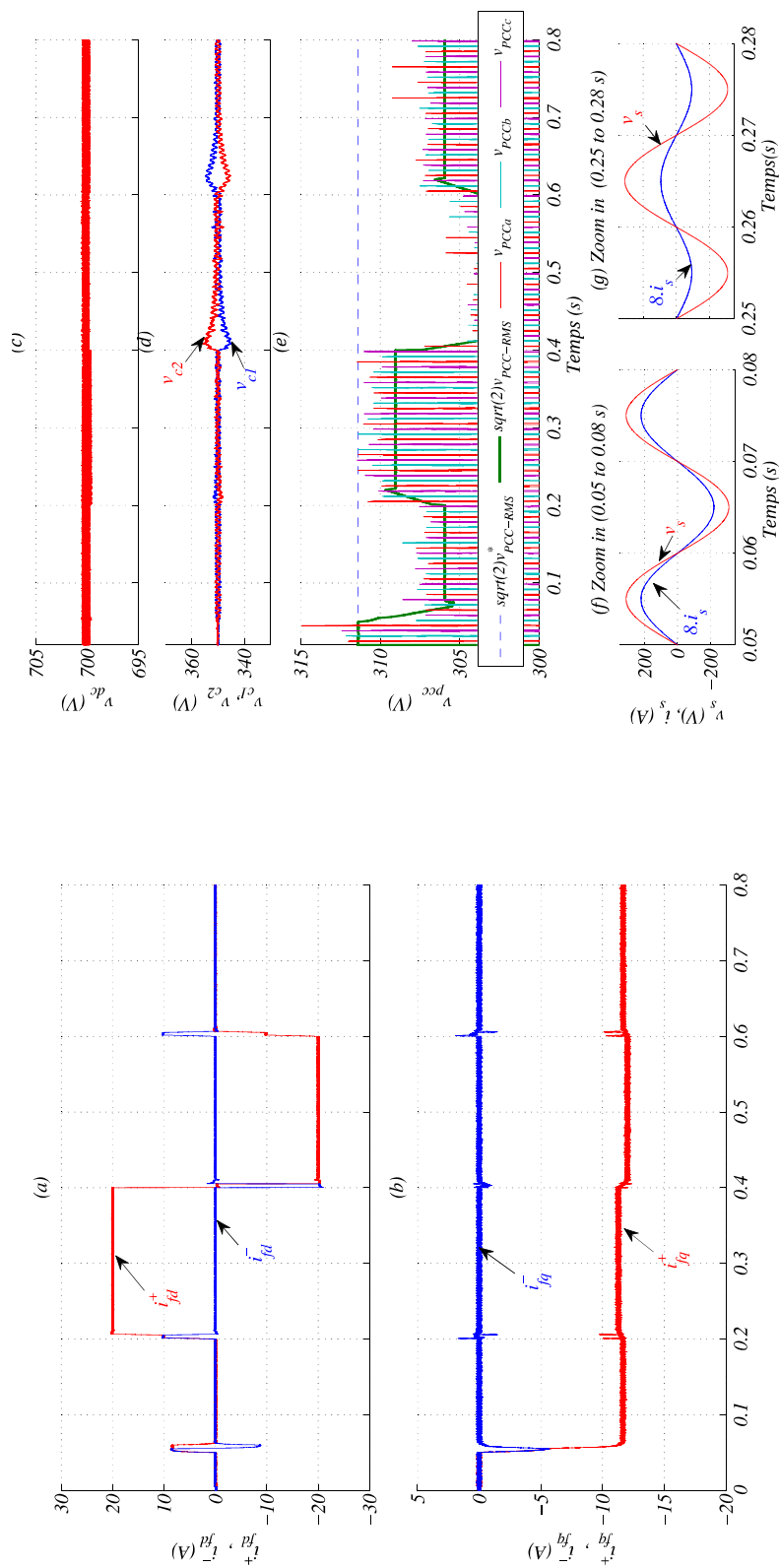


Figure 4.13: Résultats de simulation du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors l'échange d'énergies active et réactive : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+) et composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (b) composante directe du courant réactif (i_{fd}^+), et composante indirecte du courant réactif (i_{fd}^-), (c) tension du bus continu, (d) tensions des condensateurs de bus continu, (e) tensions triphasées de bus PCC, (f) (g) zoom sur la tension et le courant de la première phase

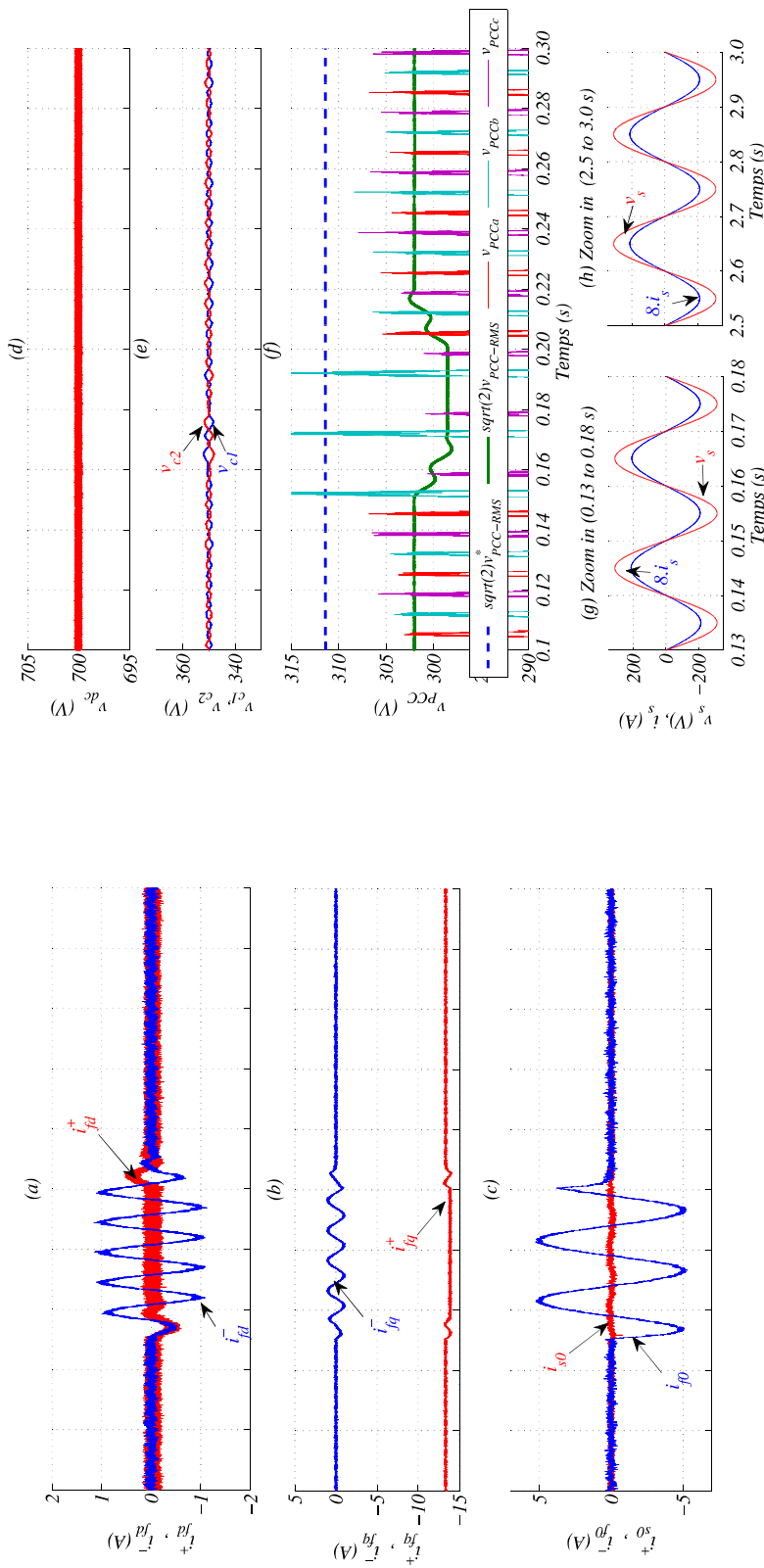


Figure 4.14: Résultats de simulation du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance durant d'un défaut asymétrique : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+) et composante indirecte d'un courant actif (i_{fd}^-), (b) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), et composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (c) tension du bus continu, (d) tensions des condensateurs du bus continu, (e) tensions triphasées de bus PCC, (f) (g) zoom sur la tension et le courant de première phase

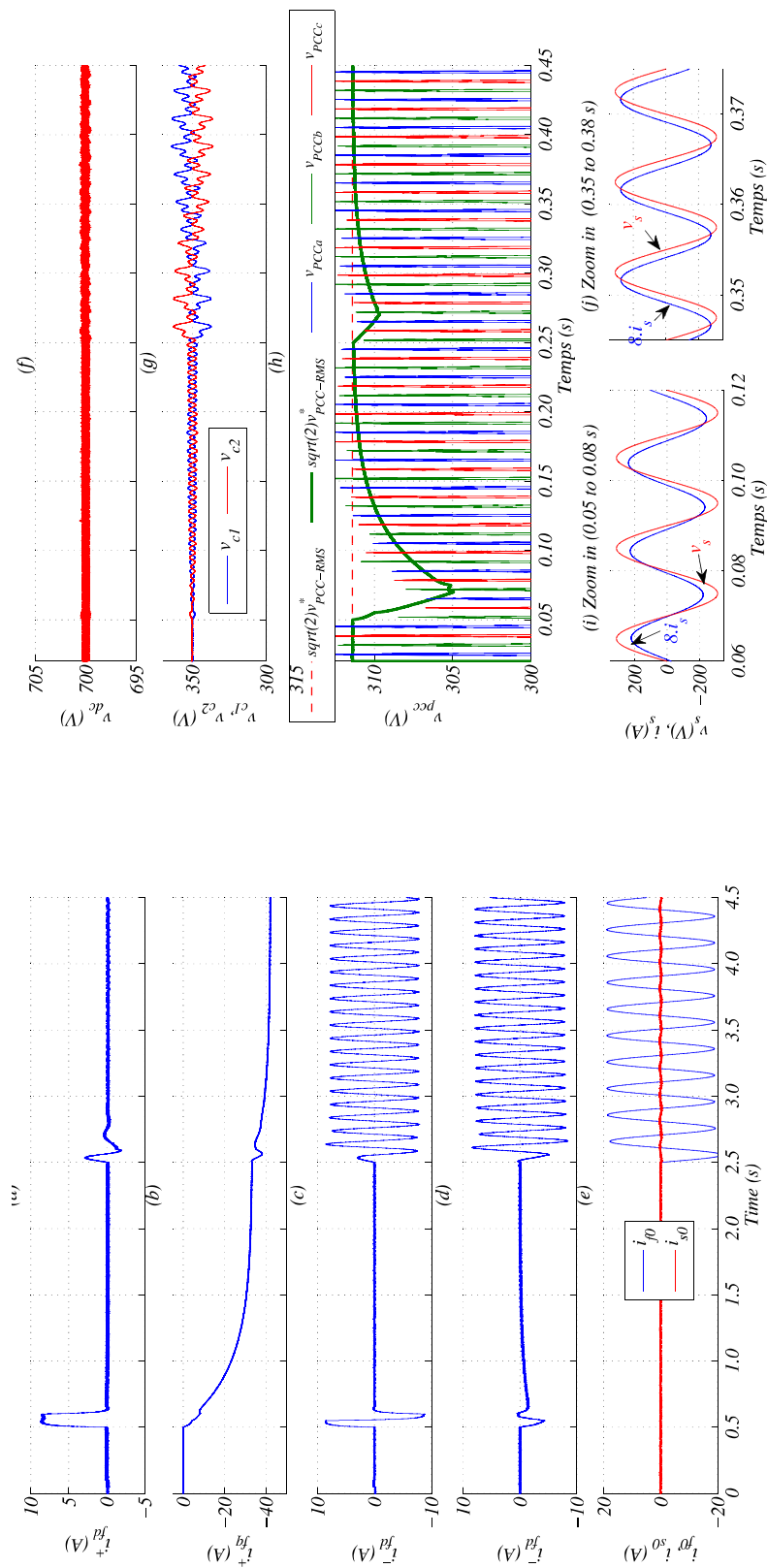


Figure 4.15: Résultats de simulation du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'une alimentation de charges équilibrés et déséquilibrés : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) composante homopolaire du courant, (f) tension du bus continu, (g) tensions des condensateurs de bus continu, (h) tensions triphasées de bus PCC, (i) (j) zoom sur la tension et le courant de première phase

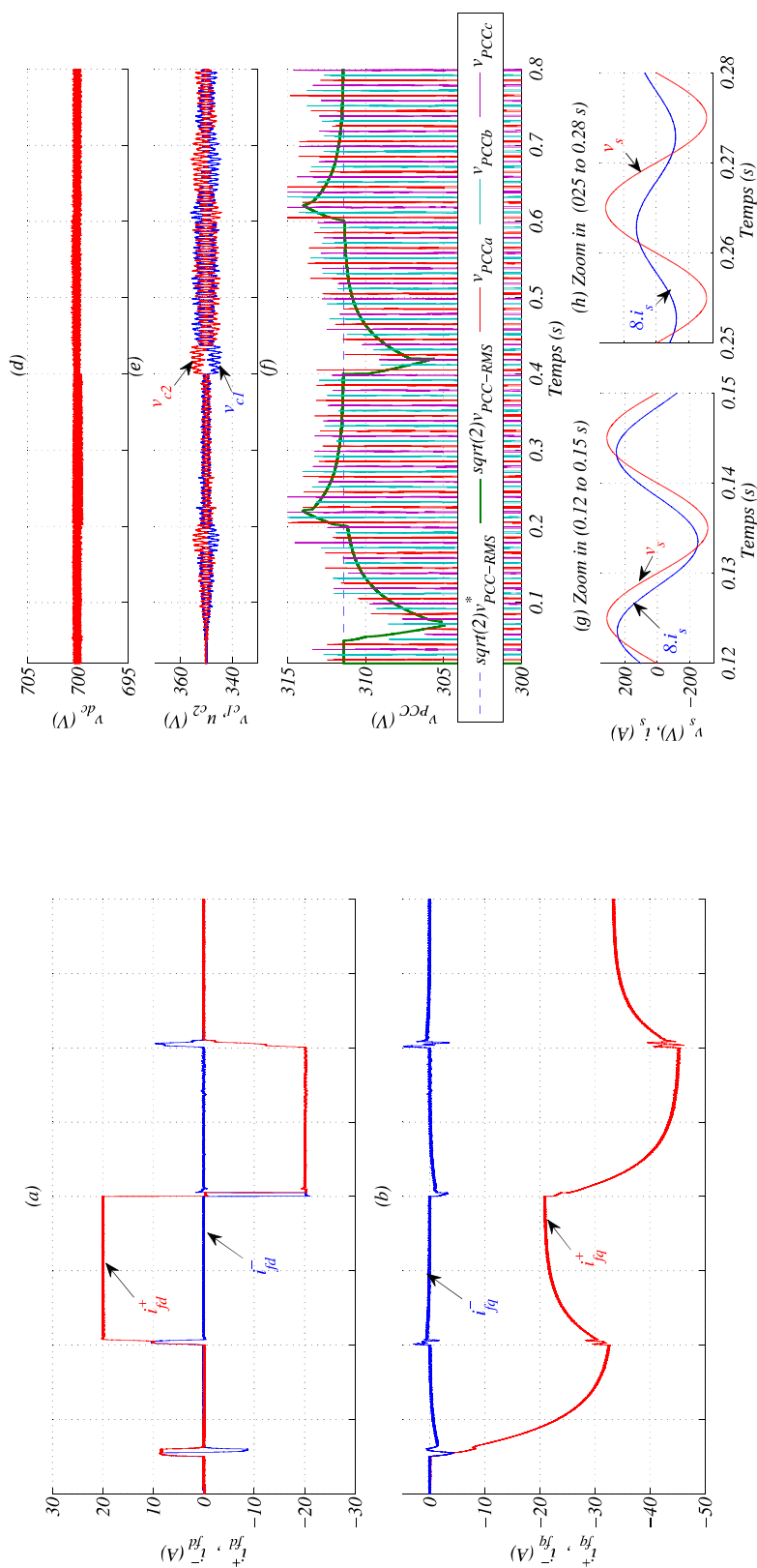


Figure 4.16: Résultats de simulation du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension lors l'échange d'énergies active et réactive : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+) et composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (b) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), et composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (c) tension du bus continu, (d) tensions des condensateurs du bus continu, (e) tensions triphasées de bus PCC, (f) (g) zoom sur la tension et le courant de première phase

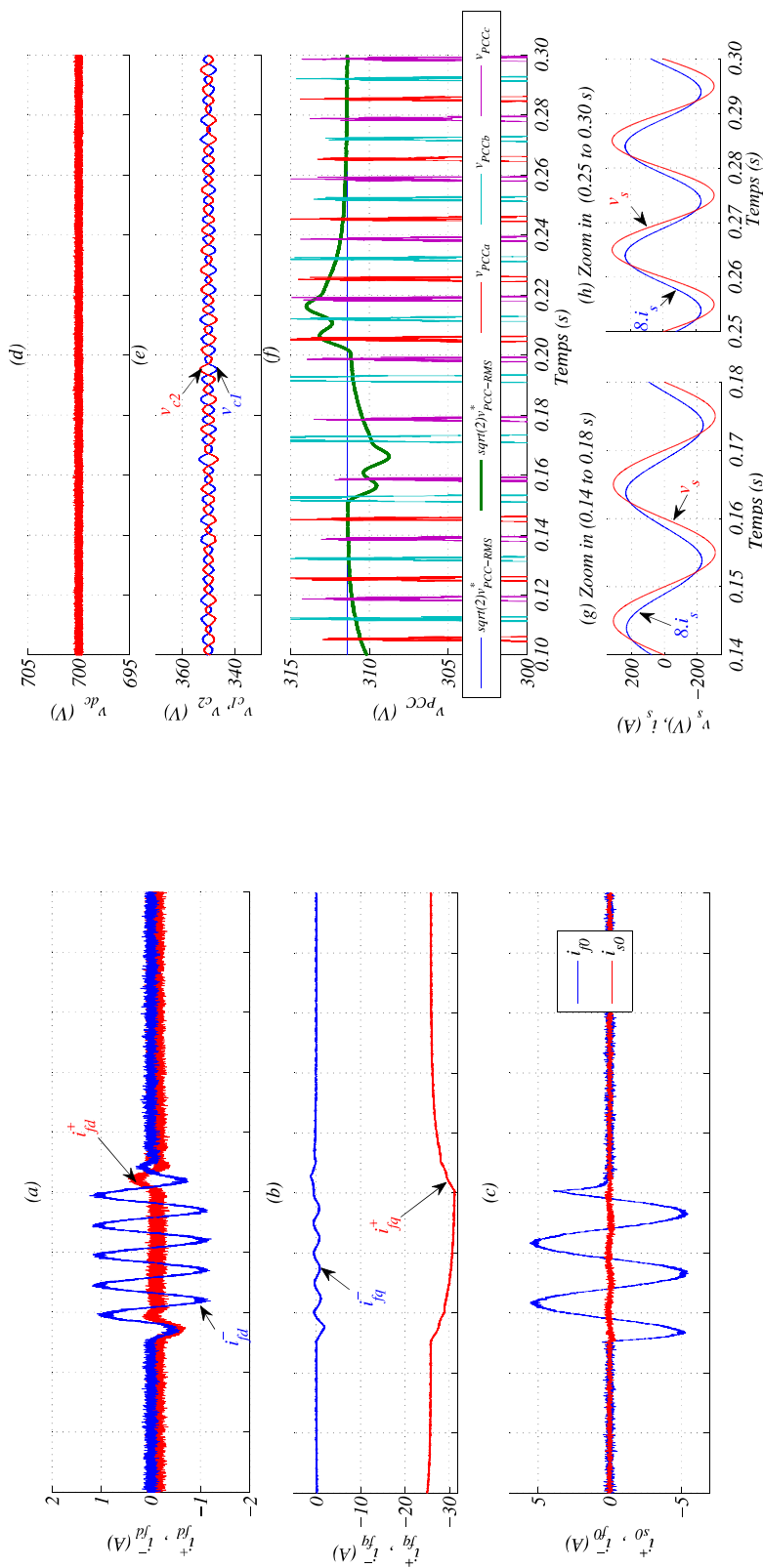


Figure 4.17: Résultats du simulation de DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension durant défaut asymétrique (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+) et composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (b) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), et composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (c) tension du bus continu, (d) tensions des condensateurs du bus continu, (e) tensions triphasées de bus PCC, (f) (g) zoom sur la tension et le courant de première phase

Commande par mode glissant d'un système DSTATCOM-SMES

Sommaire

5.1	Introduction	116
5.2	Présentation des contrôleurs non linéaires	116
5.3	Aperçu sur les commandes non linéaires des systèmes DSTAT-COM et SMES	117
5.4	Commande par mode glissant	119
5.4.1	Historique	119
5.4.2	Concept général de la commande par mode glissant	119
5.5	Commande par mode glissant du premier ordre	120
5.5.1	Conception de la commande	120
5.5.2	Phénomène de chattering et ses solutions	124
5.6	Commande par mode glissant d'ordre supérieur	128
5.7	Application de la commande par mode glissant sur le DSTAT-COM quatre bras à trois niveaux	136
5.7.1	Commande par mode de glissant de premier ordre	137
5.7.2	Commande par mode glissant du second ordre	139
5.7.3	Résultats de simulation	143
5.8	Application de commande par mode glissant sur le système DSTATCOM-SMES à quatre bras trois niveaux	155
5.8.1	Commande par mode glissant du premier ordre	155
5.8.2	Commande par mode glissant de second ordre	157
5.8.3	Résultats de simulation et interprétations	158
5.9	Étude comparative entre les différentes méthodes de commande	175
5.10	Conclusion	180

5.1 Introduction

De nombreuses incertitudes internes et perturbations externes peuvent affecter le système de commande de DSTATCOM-SMES. Les méthodes de commande linéaire sont conçues sur l'hypothèse de validité d'un modèle linéaire sur une plage de fonctionnement suffisamment large. Quand cette hypothèse n'est pas satisfaite, le contrôleur linéaire est susceptible de fonctionner très mal et peut être instable, puisque les non-linéarités du système peuvent ne pas être correctement compensées [49].

En revanche, les contrôleurs nonlinéaires peuvent prendre en compte des non-linéarités du système si elles sont connues et conduire à des lois de commande dont la performance et la robustesse sont peu sensibles, voire indépendantes du point de fonctionnement considéré. Par conséquent, les techniques de contrôle robuste des systèmes incertains sont un domaine de recherche important dans la littérature [50,51]. Une approche particulière à la conception du contrôleur robuste est la technique dite de la commande par mode glissant. Cette technique a connue un essor important durant les dernières décennies et c'est dû surtout à la propriété de la rapidité de convergence en temps fini, de plus, la grande robustesse par rapport aux erreurs de modélisation et perturbations internes et externe [51].

Ce chapitre sera subdivisé en deux parties, la première partie est consacrée à la présentation théorique de la commande par mode glissant du premier et du second ordre. La deuxième partie est dédiée à l'application du contrôle du mode glissant du premier ordre et de second ordre au système DSTATCOM-SMES à quatre bras trois niveaux.

5.2 Présentation des contrôleurs non linéaires

À partir des années 1930 aux années 1940, tant de savants tels que Nyquist, Bode, Weiner, Nichols, Routh et Hurwitz se sont efforcés de construire la théorie classique de contrôle basée sur la méthode de domaine fréquentiel et de la technique du lieu des racines. Cependant, il y avait encore plusieurs limitations évidentes dans la théorie du contrôle classique. En effet, il était très difficile de les appliquer dans les systèmes non linéaires, ce qui a favorisé la théorie des approches non linéaires [50,51].

Depuis les années 1970, la recherche dans le domaine de la théorie des systèmes de contrôle non linéaires et ces applications ont atteint un développement révolutionnaire. L'application réussie d'outils mathématiques modernes tels que la géométrie différentielle et la théorie algébrique différentielle a joué un rôle clé dans ce domaine. Slotine, Khalil, Isidori et d'autres ont adopté une approche à base de retour d'état et ont utilisé l'algèbre de Lie pour linéariser la réponse d'entrée et de sortie d'un système non linéaire avec précision

[50,51].

La linéarisation par retour d'état est une autre approche non linéaire. L'idée de base est d'utiliser la transformation algébrique pour convertir les caractéristiques non linéaires d'un système totalement ou partiellement non linéaire en caractéristiques dynamiques linéaires. En conséquence, il peut être analysé par une théorie de contrôle linéaire. La linéarisation par retour d'état peut être considérée comme une méthode qui transforme le modèle du système original en un modèle équivalent relativement simple et linéaire. Cependant, cette méthode de conception présente également certaines limites, puisqu'il ne s'applique pas à tous les systèmes non linéaires, lorsqu'il s'applique uniquement à un système non linéaire avec un modèle mathématique précis. En outre, lorsque les paramètres sont incertains ou que les caractéristiques dynamiques du modèle ne sont pas créées, la robustesse du système ne sera pas garantie. Deux approches sont étudiées en littérature pour cette technique, la linéarisation entrée-état et la linéarisation entrée-sortie [51,56] .

En revanche, une grande attention a été accordée à la conception de contrôle pour les systèmes non linéaires et incertains en utilisant la théorie des systèmes de structure variable (Variable Structure Systems ,VSS) [51]. La caractéristique principale de la commande VSS est le mode glissant, qui se produit lorsque l'état du système traverse plusieurs sous-espaces à plusieurs reprises de haute fréquence. La conception de la surface de glissement détermine complètement les performances du système en boucle fermée. Le contrôleur basé sur le concept de glissement à commutation haute fréquence force la trajectoire du système en boucle fermée à rester sur une variété dite surface de glissement [51,52].

5.3 Aperçu sur les commandes non linéaires des systèmes DSTATCOM et SMES

De nombreuses approches de contrôle linéaire proposées pour contrôler les systèmes DSTATCOM ont donné de bons résultats [52-] . La plupart de ces approches sont basées sur des contrôleurs PI [25] ou construites sur un modèle linéarisé autour d'un certain point de fonctionnement. La commande à base du régulateur quadratique linéaire (Linear quadratic regulator , LQR) et à placement de pôles a été également proposée comme approche linéaire. Le DSTATCOM était un système hautement non linéaire et fortement couplé, ces approches de contrôle linéaire ne mènent évidemment pas à de meilleures performances dynamiques [23,25].

En effet, lorsque le système fonctionne loin de son point d'équilibre tel que lors des défauts ou des conditions de déséquilibre, le système ne peut pas fonctionner avec de bonnes performances. Contrairement aux commandes linéaires, les approches non linéaires offrent

de meilleures performances lors régimes transitoires. De plus, ils peuvent rester stables et robustes sur une plage d'opération plus large que les approches de contrôle linéaire [23,51].

Afin d'améliorer les performances et la robustesse du système STATCOM, plusieurs approches non linéaires ont été proposées dans la littérature tels que : la technique $H\infty$ [52], la technique de linéarisation par retours d'état partiel [53], la technique loop-shaping [54], linéarisation hybride adaptative multivariable [55], la commande par passivité [56], la stabilité semi-globale utilisant la méthode de Lyapunov [57], la commande par passivité utilisant la forme Euler-Lagrange [58] et méthode de contrôle backstepping adaptative [59].

L'article [60] présente une étude comparative entre la commande par mode glissant et le contrôle par retour d'état linéarisant appliqué à un STATCOM. D'autre comparaison entre deux techniques d'optimisation de la méthode des algorithmes génétiques (GA) et l'optimisation par des essaims particulaire (PSO) a été présentée dans [61].

Comme le DSTATCOM, les systèmes de contrôle de DSTACOM-SMES sont basés généralement sur des stratégies classiques. Cependant, ces stratégies pourraient ne pas présenter suffisamment de robustesse en raison de la non-linéarité de système DSTATCOM-SMES. En plus ces contrôleurs ne considéreraient pas le contrôle indépendant de la puissance active et réactive pour assurer la régulation de la tension et la stabilité des transitoires indépendamment. Néanmoins, il n'existe pas beaucoup de travaux concernant les commandes non linéaires des systèmes STATCOM couplés aux dispositifs de stockage d'énergie.

Les auteurs de [62] ont présentés un contrôleur de tension PI découplé pour améliorer la stabilité transitoire du STATCOM et la batterie de stockage pour l'amortissement des oscillations. [63] propose un contrôleur STATCOM non linéaire à base de Lyapunov multiobjectif intégré avec un système de stockage d'énergie basé sur des batteries (Battery Energy Storage System, BESS). Une évaluation expérimentale du contrôle robuste non linéaire d'un SMES afin d'améliorer la stabilité transitoire des systèmes électriques est proposée et discutée dans [64]. Le travail [65] présente un analyse et contrôle d'un système d'alimentation multimachine avec des unités SMES via la méthode de fonction Hamiltonian en utilisant un contrôle par retour d'état.

L'article [66] propose une méthode de backstepping étendue pour les systèmes d'alimentation à bus infini avec une seule machine et SMES. En [67] un contrôleur non linéaire a été proposé basé sur la technique « Immersion Invariance » pour contrôler un système SMES. Dans [68], une méthode de contrôle PI robuste basée sur $H\infty$ afin d'ajuster les paramètres de contrôleur PI.

5.4 Commande par mode glissant

En théorie de contrôle, la commande par mode glissant est une méthode de contrôle non linéaire qui modifie la dynamique d'un système non linéaire en appliquant un signal de contrôle discontinu qui force le système à "glisser" le long d'une section transversale du comportement normal du système [50,51,71-74].

La conception du contrôleur par mode glissant fournit une approche systématique au problème de maintien de la stabilité et de performances constantes face à l'imprécision de la modélisation. En fait, le contrôle par mode glissant des systèmes non linéaires a reçu une attention considérable dans le domaine industriel, l'aéronautique, l'aérospatiale, la robotique et la commande des moteurs électriques [74].

5.4.1 Historique

Le concept de contrôle par mode glissant est apparu pour la première fois dans la littérature russe dans les années vingt. L'ancien expert de l'Union Soviétique Emelyanov a d'abord proposé le concept de structure variable par mode glissant. En 1932, V. Kulebakin utilisait le contrôle de structure variable pour contrôler un générateur de courant continu pour un avion. En 1934 ; Nikolski a utilisé la commande par mode glissant dans un relais pour contrôler la trajectoire d'un navire [51].

Ensuite, plusieurs chercheurs ont participé à l'évolution de la théorie du contrôle par mode glissant pour en faire d'elle une branche de recherche indépendante. Elle a fait l'objet d'une étude approfondie dans les travaux de Edwards en 1998, Utkin en 1992 et 1999 et DeCarlo où, il a conçu le contrôleur de mode glissant pour un système non linéaire multivariable en 1988 [69,71].

5.4.2 Concept général de la commande par mode glissant

La caractéristique commune de toutes les techniques basées sur le mode glissant est qu'aucune information précise sur la dynamique du système n'est demandée. Le système contrôlé étant traité comme un objet "boîte noire" complètement incertain. La commande par mode glissant utilise des lois de contrôle de retour d'état discontinu pour forcer l'état du système à atteindre, et ensuite à rester sur une surface spécifiée dans l'espace d'état appelé surface de glissement ou surface de commutation [71], comme l'illustre la figure 5.1 où la trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes (mode d'accès, mode glissant, point d'équilibre).

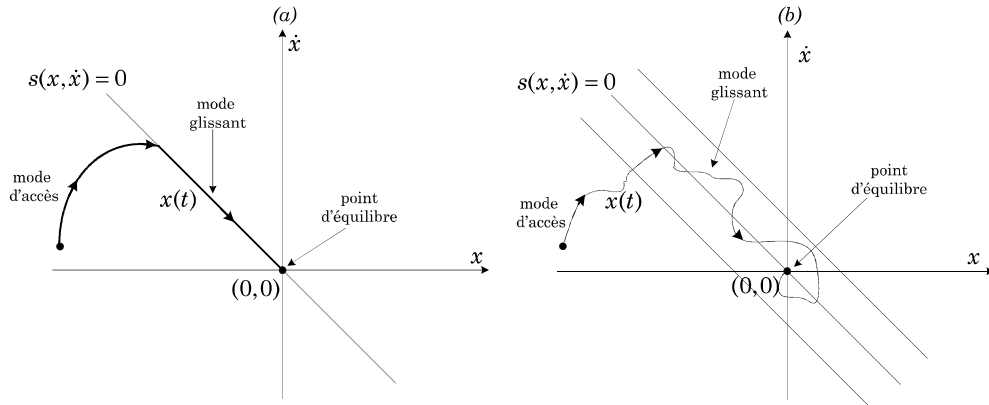


Figure 5.1: Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase (a) glissement idéal, (b) glissement réel

Le contrôle par mode glissant présente deux avantages principaux : le comportement dynamique du système qui peut être adapté par le choix particulier de la fonction de glissement, et la réponse en boucle fermée qui devient totalement insensible à certaines incertitudes particulières. Ce principe s'étend aux incertitudes des paramètres du modèle, à la perturbation et à la non-linéarité supposée bornée [73,75]. Dans ce travail, on étudie le contrôle de structure variable en tant que contrôle à retour d'état commuté à haute fréquence, ce qui entraîne un mode de glissement. Dans ce cas les gains dans chaque chemin du retour basculent entre deux valeurs selon une règle qui dépend de la valeur de l'état à chaque instant.

Le but de la loi de commande de commutation est de conduire la trajectoire d'état du modèle non linéaire sur une surface de glissement présélectionnée (choisie par l'utilisateur) dans l'espace d'état et de maintenir la trajectoire de l'état sur cette surface. Dans les applications d'ingénierie, on choisit couramment l'erreur entre la grandeur à contrôler et sa référence ajoutée à la dérivée de l'erreur pour former la surface de glissement [74]. La tâche la plus importante consiste à concevoir la commande en mode glissant qui conduira l'état d'un système à la surface de glissement et le maintenir sur la surface lors de l'interception. Généralement, l'approche de Lyapunov est utilisée pour caractériser cette tâche [72].

5.5 Commande par mode glissant du premier ordre

5.5.1 Conception de la commande

Soit un système non linéaire défini par :

$$x^{(n)}(t) = f(x, t) + g(x, t)u(t) \quad (5.1)$$

Ou, $x(t)$ est le vecteur d'état, $u(t)$ est l'entrée de contrôle et x est l'état de sortie. L'exposant n de $x(t)$ montre l'ordre de différenciation. $f(x, t)$ et $g(x, t)$ sont des fonctions non linéaires de temps et d'états. La fonction $f(x, t)$ n'est pas exactement connue, mais l'étendue de l'imprécision sur $f(x, t)$ est bornée par une fonction connue et continue de x ; de même, la fonction $g(x, t)$ n'est pas exactement connue, mais de signe connu et bornée par une fonction continue connue de x .

Le problème de contrôle consiste à amener l'état x à suivre un état désiré x^* en présence d'une imprécision de modèle sur $f(x, t)$ et $g(x, t)$. Une surface de glissement variante dans le temps $s(x, t)$ doit être défini dans l'espace d'états $R(n)$ en mettant $s(x, t)$ à zéro.

La conception de la loi de contrôle par mode glissant peut être divisée en trois phases [51,71] :

1. Choix de la surface de glissement,
2. Établissement des conditions d'existence de la convergence.
3. Détermination de la loi de commande.

La première étape consiste à choisir la surface de glissement de sorte que les trajectoires du système satisfassent un certain nombre de spécifications de performance :

Le but du contrôle est de rendre la variable de sortie y pour suivre un profil désiré y^* , c'est-à-dire que la variable d'erreur de sortie $e = y^* - y$ tend vers un petit voisinage de zéro après un transitoire de durée acceptable.

Souvent, la surface de glissement dépend de l'erreur e avec un certain nombre de ses dérivés :

$$S(x, t) = h(e, \dot{e}, \dots, e^{(k)}) \quad (5.2)$$

Généralement, le choix le plus typique pour la surface de glissement est une combinaison linéaire du type suivant :

$$\begin{aligned} S(x, t) &= e(x) \\ S(x, t) &= \dot{e}(x) + c_x e(x) \\ S(x, t) &= \ddot{e}(x) + 2c_x \dot{e}(x) + c_x^2 e(x) \\ S(x, t) &= \left(\frac{\partial}{\partial t} + c_x\right)^{r-1} e(x) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Avec : r , le degré relatif du système par rapport à la sortie $y(t)$. Il représente le nombre minimum de fois qu'il faut dériver la sortie $y(t)$ par rapport au temps, pour y voir apparaître l'entrée.

c_x est une constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

La deuxième phase de la conception de la commande par mode glissant consiste à l'établissement des conditions d'existence de la convergence. Elle permet aux dynamiques du système de converger vers les surfaces de glissement. Deux conditions proposées pour assurer le mode de convergence, à savoir : la fonction directe de commutation et celle de Lyapunov [50,51].

La fonction directe de commutation :

Elle est proposée et étudiée par Emilianov et Utkin [51,71]. La condition d'existence du mode de glissement est l'attractivité de la surface de commutation convergente vers zéro, la fonction directe de commutation est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{S}(x, t) &> 0 & \text{si} & S(x, t) < 0 \\ \dot{S}(x, t) &< 0 & \text{si} & S(x, t) > 0 \end{aligned} \quad (5.4)$$

Cette fonction peut être formulée à la condition suivante :

$$\dot{S}(x, t)S(x, t) < 0 \quad (5.5)$$

La fonction de Lyapunov :

La méthode de Lyapunov est utilisée pour déterminer les propriétés de stabilité d'un point d'équilibre sans résoudre l'équation d'état. Soit $V(x)$ une fonction scalaire continuellement différentiable définie dans un domaine D contenant l'origine. $V(x)$ est dite définie positive si $V(0) = 0$ et $V(x) > 0$. Il est définie négatif si $V(0) = 0$ et $V(x) < 0$. La méthode de Lyapunov consiste à assurer que la fonction est définie positive quand sa dérivée est négative et que la fonction est définie positive si sa dérivée est positive. De cette façon, la stabilité est assurée.

La fonction de Lyapunov généralisée qui caractérise le mouvement de la trajectoire d'état vers la surface de glissement est définie en termes de la surface. Pour chaque structure de contrôle choisie, on choisit les gains pour que la dérivée de cette fonction de Lyapunov soit définie négative, garantissant ainsi le mouvement de la trajectoire d'état à la surface.

Si la fonction de Lyapunov est choisie comme suit :

$$V(x, t) = \frac{1}{2}S^2(x, t) \quad (5.6)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{V}(x, t) = S(x, t)\dot{S}(x, t) \quad (5.7)$$

Pour que la fonction $V(x, t)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative. L'équation (5.6) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprimé par $S^2(x, t)$ diminue tout le temps à condition que la dérivée de la fonction de Lyapunov reste toujours négative, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir des deux côtés de cette dernière.

Par conséquent, la condition de convergence peut être exprimée par :

$$S(x, t)\dot{S}(x, t) < 0 \quad (5.8)$$

La troisième phase dans la conception de commande par mode glissant après le choix de la surface de glissement et l'établissement des conditions d'existence de convergence est la détermination de la loi de commande. Elle permet de ramener la variable à contrôler vers la surface de glissement et ensuite vers son point d'équilibre.

La structure de la loi de commande par mode glissant comporte deux parties, une première partie discontinue. Cette partie a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité pour rejeter les perturbations externes. La deuxième partie est continue et concerne la linéarisation exacte représentée par la commande équivalente. Cette dernière réduit autant que nous voulons l'amplitude de la partie discontinue. La loi de commande par mode glissant est donnée par :

$$u = u_{dis} + u_{eq} \quad (5.9)$$

La partie discontinue est généralement donnée par :

$$sign(S(x, t)) = \begin{cases} +1 & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ -1 & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (5.10)$$

Donc la partie discontinue s'exprime comme :

$$u_{dis} = -K \text{sign}(S(x, t)) \quad (5.11)$$

Avec K est un gain positif.

La commande équivalente proposée par Filipov et Utkin [50,51,78] est considérée comme la plus directe et la plus simple.

Du système (5.1), on déduira le vecteur de commande équivalent en posant la dérivée de la surface de glissement égale à zéro. Ce qui se traduit par les équations suivantes :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (5.12)$$

En remplaçant (5.1) et (5.9) dans (5.12) :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} (f(x, t) + g(x, t)u_{eq}(t)) + \frac{\partial S}{\partial x} u_n(t) \quad (5.13)$$

Pendant le régime de glissement, la surface est nulle, ainsi que sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles, par conséquent, l'expression de la commande par mode glissant est décrit par :

$$u_{eq}(t) = \left(\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \right)^{-1} + \frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \quad (5.14)$$

Avec la condition d'existence de : $\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \neq 0$.

5.5.2 Phénomène de chattering et ses solutions

Le contrôle par mode glissant permet aux systèmes de contrôle d'avoir une certaine capacité d'adaptation aux variations internes des paramètres et aux perturbations externes, de sorte que les performances du système atteignent les objectifs souhaités. Théoriquement, l'application de contrôle par mode glissant nécessite une commutation infiniment rapide. Dans les systèmes réels, il y a des imperfections présentes telles que le retard, l'hystérésis, etc., qui forcent la commutation à se produire à une fréquence finie. L'état du système oscille alors dans un voisinage de la surface de commutation. Cette oscillation est appelée chattering [73-75].

Si la fréquence de la commutation est très élevée par rapport à la réponse dynamique du système, les imperfections et les fréquences finies de commutation pas toujours négligeables [73].

En effet, le phénomène de chattering est le plus grand obstacle devant les applications de la commande par mode glissant. Afin de réduire ou d'éliminer le chattering dans différents domaines, les chercheurs ont proposés plusieurs approches. L'approche la plus commune est le contrôle dit «couche limite» [73] dans lequel la fonction *sign* est remplacée par d'autres approximations lorsque la trajectoire d'état se trouve dans une couche limitant la surface de commutation. Dans ce cas, elles pourraient être principalement par [73,75,79] :

a) La fonction saturation

La fonction $sign(S)$ est remplacée par une droite de pente $1/\xi$ à l'intérieur d'une bande de largeur située de part et d'autre de la surface de glissement. La discontinuité est conservée à l'extérieur de cette bande. Son expression est donnée par :

$$sat(S, \xi) = \begin{cases} sign(S) & \text{si } |S| > \xi \\ S/\xi & \text{si } |S| \leq \xi \end{cases} \quad (5.15)$$

et représentée par figure (5.2) :

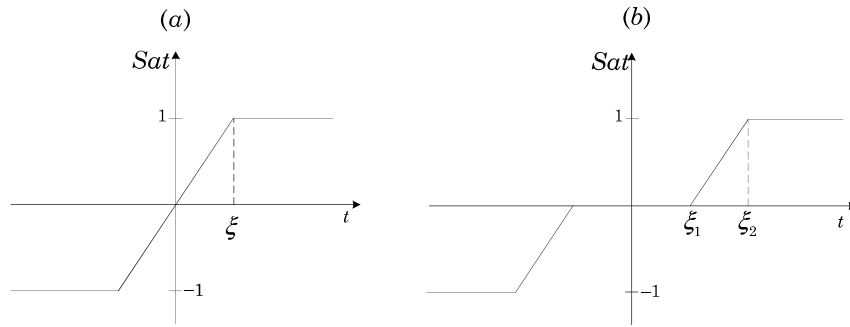


Figure 5.2: Fonctions Sat avec un seuil et deux seuils

b) La loi d'interpolation de puissance

Cette fonction est donnée par :

$$v(S, \xi) = \begin{cases} sign(S) & \text{si } |S| > \xi \\ (\xi/|S|)^{(q-1)} & \text{si } |S| < \xi \\ 0 & \text{si } |S| = 0 \end{cases} \quad (5.16)$$

avec $q \in [0, 1[$

et représentée par la figure (5.3) :

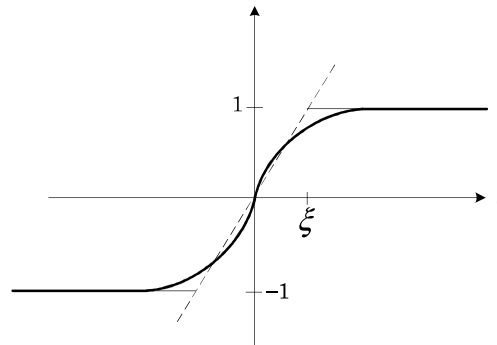


Figure 5.3: Fonction d'interpolation

c) La fonction pseudo-signe

Cette fonction est donnée par :

$$v(S, \xi) = \frac{S}{|S| + \xi} \quad (5.17)$$

et représentée par figure (5.4) :

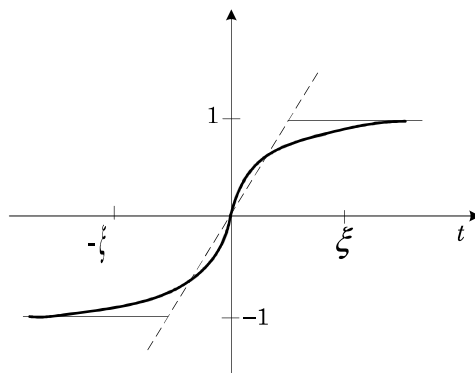


Figure 5.4: Fonction pseudo-signe

d) La fonction arctangente

Cette fonction est donnée par :

$$v(S, \xi) = \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{S}{\xi} \right) \quad (5.18)$$

et représentée par figure (5.5) :

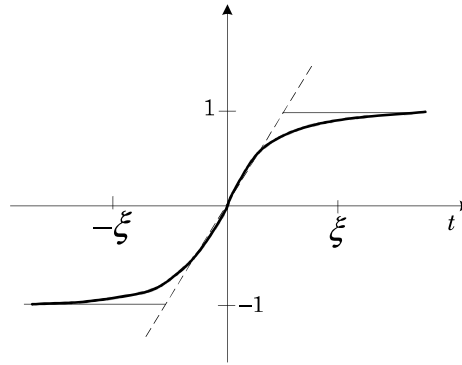


Figure 5.5: Fonction arctangente

e) La fonction tangente hyperbolique

Cette fonction est donnée par :

$$v(S, \xi) = \tanh \left(\frac{S}{\xi} \right) \quad (5.19)$$

et représentée par la figure (5.6) :

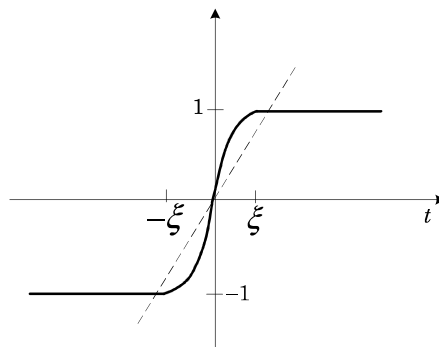


Figure 5.6: Fonction tangente hyperbolique

Ces approches ne sont efficaces que dans le cas où les incertitudes ne sont pas importantes [73,75]. De plus, ces fonctions ne peuvent pas fournir une convergence en temps fini

de la variable glissante à zéro en présence de la perturbation externe. Toutefois, l'application de ces fonctions, suit au détriment d'une perte de robustesse et par conséquent une perte de précision [78,79].

D'autres approches sont également présentes dans la littérature pour éviter ou réduire le phénomène de chattering, à savoir [73,78] :

- **Filtres** : grâce à l'utilisation de filtres, le lissage du signal de contrôle est un moyen efficace d'éliminer les chattering. un filtre passe-bas peut lisser la fonction de commutation, et donc élimine efficacement le chattering et supprime le bruit haute fréquence.
- **Observateur** : est une autre option pour résoudre le problème de chattering.
- **Mode glissant flou** : La conception de règles floues peut effectivement réduire le chattering dans le contrôle par mode glissant.
- **Mode glissant intégral** : est une approche utilisée pour éviter le chattering. Elle consiste à augmenter la dynamique du système contrôlé, en ajoutant des intégrateurs du côté de l'entrée.
- **Mode glissant d'ordre supérieur** : En utilisant le contrôle par mode glissant d'ordre supérieur, on élimine non seulement les problèmes de chattering existant dans le mode glissant classique, tout en conservant également les principaux avantages de l'approche glissant originale (robustesse, simplicité et convergence à temps fini). L'approche de la commande mode par glissant du second ordre est caractérisée par l'utilisation d'un signal discontinu agissant sur la seconde dérivée.

5.6 Commande par mode glissant d'ordre supérieur

La théorie de commande par modes glissant d'ordre supérieur conduit à des lois de commande relativement simples et permet de réduire le phénomène de chattering tout en conservant les performances du système [81]. La Figure 5.7 montre qu'en appliquant la commande par mode glissant d'ordre supérieur à un système, la surface de glissement est atteinte de manière plus lisse que la commande par mode glissant classique, ce qui réduit le chattering.

Ceci est caractérisé par une commande discontinue agissant sur les dérivées d'ordre supérieur de la surface de glissement tout en préservant les principaux avantages de la commande par mode glissant classique qui sont la robustesse et de la convergence en temps fini [79,80].

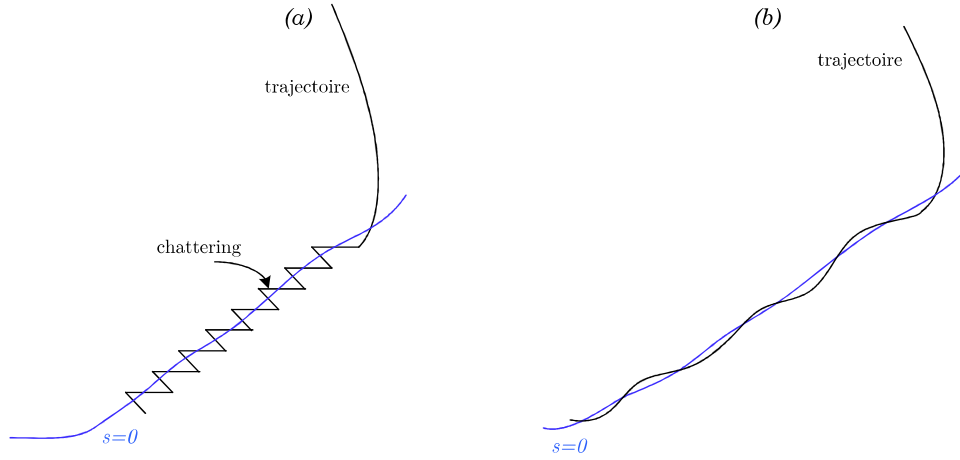


Figure 5.7: Régime glissant classique (a) et mode glissant d'ordre supérieur (b)

Considérons le système non linéaire (5.1), la surface de glissement choisie pour assurer une convergence en temps fini vers l'ensemble de glissement d'ordre n par rapport à la surface de glissement est donnée par :

$$S(x, t) = \dot{S}(x, t) = \ddot{S}(x, t) \dots = S^{n-1}(x, t) = 0 \quad (5.20)$$

Si le système est de degré relatif par rapport à la surface de glissement $r = n$ et $n > 1$, une commande en mode glissant d'ordre n permettra d'obtenir une convergence en temps fini vers la surface de glissement, en forçant les trajectoires d'état du système à être confinées dans l'ensemble de glissement. La figure 5.8 représente l'intersection de trois surface de commutation définissant le point de référence x_{ref} [79].

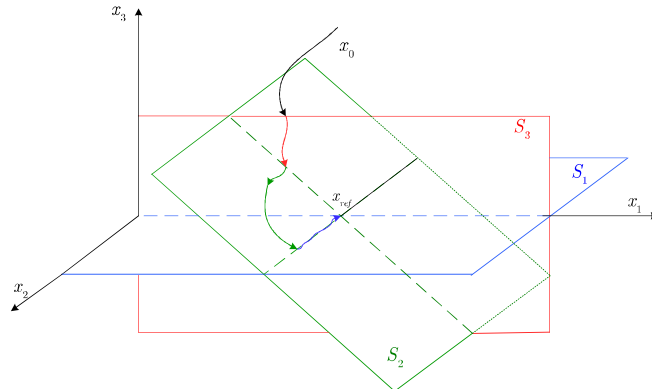


Figure 5.8: Intersection des 3 surfaces de commutation définit le point de référence x_{ref}

L'ordre de la commande par mode glissant est caractérisé en particulier par le degré de continuité des dynamiques du système au voisinage de la surface de glissement et correspond au nombre de dérivées continues de la surface de glissement. La synthèse de la loi de commande par mode glissant du second ordre dépend de fonctions incertaines, qui apparaissent dans la deuxième dérivée de la surface de glissement [79,81].

5.6.0.1 Commande par mode glissant du second ordre

L'objectif de la commande par mode glissant du second ordre est de forcer la variable de glissement et sa première dérivée à zéro. Pour établir un régime glissant du second ordre par rapport à $S(x, t)$, on impose aux trajectoires d'état du système à évoluer au bout d'un temps fini sur l'ensemble $\dot{S}(x, t)$ et à ne plus le quitter ensuite [75], ceci se traduit par :

$$\ddot{S} = \left\{ x \in X \mid S(x, t) = \dot{S}(x, t) = 0 \right\} x \in R^n \quad (5.21)$$

On définit donc un bouclage agissant sur la dérivée seconde de la surface de glissement. De manière générale, en commande par mode glissant du second ordre, deux cas sont possible et ce en fonction du degré relatif du système par rapport à la surface de glissement [75,79] :

A) Cas d'un système de degré relatif 1

Si le degré relatif du système par rapport à la surface de glissement est égal à 1, la commande u apparait dans la première dérivée de surface de glissement par rapport au temps. La formule de la dérivée de la surface de glissement est donné par :

$$\dot{S} = \frac{\partial}{\partial t} S(x, t) + \frac{\partial}{\partial t} S(x, t) [f(x, t) + g(x, t)u] \quad (5.22)$$

De l'expression de (5.22), dérivée seconde de la surface de glissement s'écrit comme suit :

$$\ddot{S} = \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(x, t) + \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(x, t) [f(x, t) + g(x, t)u] + \frac{\partial}{\partial u} \dot{S}(x, t) \dot{u} \quad (5.23)$$

qui peut se mettre sous la forme :

$$\ddot{S} = \varphi(x, t) + \eta(x, t)\dot{u} \quad (5.24)$$

où :

$$\begin{aligned}\varphi(x, t) &= \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(x, t) + \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(x, t) [f(x, t) + g(x, t)u] \\ \eta(x, t) &= \frac{\partial}{\partial u} \dot{S}(x, t)\end{aligned}$$

Avec $\varphi(x, t)$ et $\eta(x, t)$ fonctions incertaines bornées vérifiant dans le voisinage de la surface de glissement les inégalité suivantes :

$$\begin{aligned}0 < \Gamma_m \leq \eta(x, t) \leq \Gamma_M \\ |\varphi(x, t)| \leq \Phi\end{aligned}\tag{5.25}$$

avec : Γ_m, Γ_M et Φ sont des constantes positives .

B) Cas d'un système de degré relatif 2

Si le degré relatif du système est 2, la commande u apparait dans la deuxième dérivée de la surface de glissement. Celle-ci est donnée comme suit :

$$\ddot{S} = \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(x, t) + \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(x, t) [f(x, t) + g(x, t)u]\tag{5.26}$$

la deuxième dérivée de surface de glissement peut être écrite sous la forme suivante :

$$\ddot{S} = \varphi'(x, t) + \eta'(x, t)\dot{u}\tag{5.27}$$

$$\text{où : } \varphi'(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(x, t) + \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(x, t)f(x, t) \text{ et } \eta'(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(x, t)g(x, t)$$

avec : $\varphi'(x, t)$ et $\eta'(x, t)$ sont des fonctions incertaines bornées. De même que dans le cas précédent, il existe trois constantes positives Γ'_m, Γ'_M et Φ' telles que, dans un voisinage de la surface de glissement, on a :

$$\begin{aligned}0 < \Gamma'_m \leq \eta'(x, t) \leq \Gamma'_M \\ |\varphi'(x, t)| \leq \Phi'\end{aligned}\tag{5.28}$$

Les deux équations (5.25) et (5.28), sont très importantes pour l'étude de la robustesse de système [79].

5.6.0.2 Algorithmes de la commande par mode glissant du second ordre

Afin d'assurer la convergence de surface de glissement et sa dérivée vers zéro en temps fini, plusieurs algorithmes ont été introduits dans la littérature, à savoir : l'algorithme sous-optimal, du Twisting et du Super-Twisting [78-82]. Les deux premiers sont réservés aux systèmes de degré relatif 2 tandis que le Super-Twisting est dédié généralement aux systèmes de degré relatif 1.

NB : les algorithmes affectés aux systèmes de degré relatif 2 peuvent être accordés aux systèmes de degré relatif 1 par augmentation du degré relatif du système en agissant sur la dérivée par un intégrateur [79,82].

Algorithme sous-optimal

L'algorithme sous-optimal est dédiée aux systèmes de degré relatif 1 et 2 par rapport à la surface de glissement. Il est inspiré de la commande optimale de type bang-bang [79] et garantit la convergence de la surface de glissement et sa dérivée en temps fini vers zéro, en limitant les trajectoires par des arcs paraboliques y compris l'origine figure 5.9.

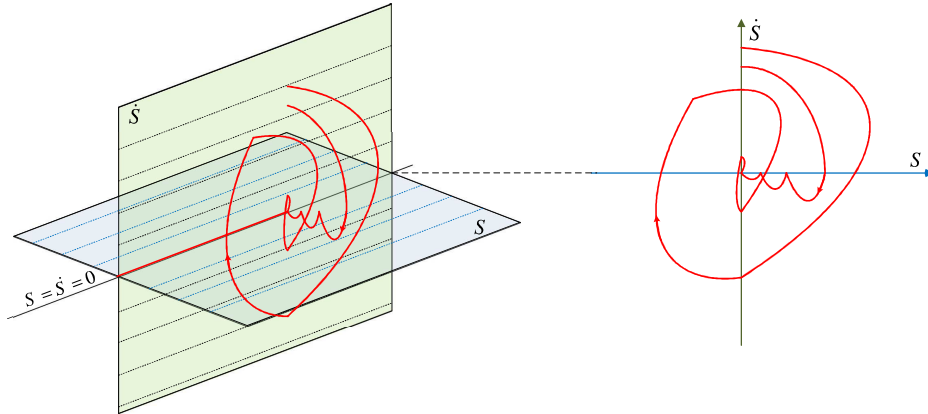


Figure 5.9: Trajectoires de phase de l'algorithme sous-optimal

Si le degré relatif du système est égale a 2 par rapport à la surface de glissement, la loi de commande basé sur l'algorithme sous-optimal est donnée par :

$$v(t) = -\alpha(t)V_M \text{sign} \left(S(x,t) - \frac{1}{2}S_M(x,t) \right) \quad (5.29)$$

où V_M est une constante positive.

et S_M est défini par :

$$S_M(t) = \begin{cases} S(0) & 0 \leq t < t_{M_1} \\ S(t_{M_i}) & t_{M_i} \leq t < t_{M_{i+1}} \end{cases} \quad (5.30)$$

$i = 1, 2, \dots$

Où t_{M_i} sont les instants où la dérivée de la surface de glissement est égale à zéro.

$\alpha(t)$ est défini par :

$$\alpha(t) = \begin{cases} \alpha^* & \text{si } \left[S(t) - \frac{1}{2}S_M \right] [S_M - S(t)] > 0 \\ 1 & \text{si } \left[S(t) - \frac{1}{2}S_M \right] [S_M - S(t)] \leq 0 \end{cases}$$

où : α^* est un constant positive.

Les conditions suffisantes correspondantes pour la convergence à temps fini sont :

$$\alpha^* \in]0, 1] \cap \left(0, \frac{3\Gamma_m}{\Gamma_M} \right) \quad (5.32)$$

$$V_M > \max \left(\frac{\Phi}{\Gamma_m \alpha^*}, \frac{4\Phi}{3\Gamma_m - \Gamma_M \alpha^*} \right)$$

Où Γ_m , Φ et Γ_M sont des constants positifs.

Suit à la NB, l'algorithme sous-optimal peut être aussi proposé pour les systèmes de degré relatif 1 par rapport à la surface de glissement, la loi de commande dans ce cas est donné par :

$$v(t) = \dot{u} = -\alpha(t)V_M \text{sign} \left(S(t) - \frac{1}{2}S_M(t) \right) \quad (5.33)$$

Algorithme du Twisting

Dans cet algorithme, outre la commutation du signe de la commande, l'amplitude sera commutée entre deux valeurs en fonction du quadrant dans lequel se trouve l'état du système. Cette commutation crée des trajectoires circulaires d'une manière spirale jusqu'à la convergence en temps fini à l'origine, figure 5.10.

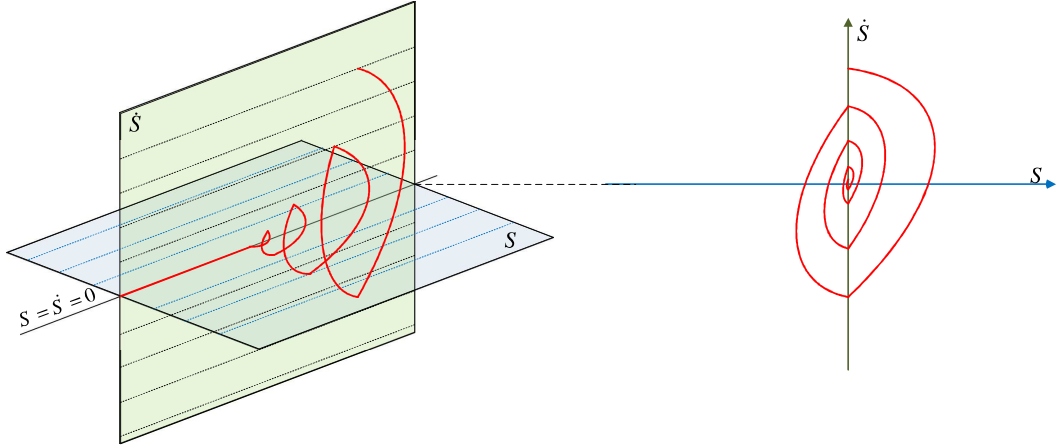


Figure 5.10: Trajectoires de phase de l'algorithme de Twisting

L'algorithme du Twisting pour un système de degré relatif 2 est donné par :

$$u = -r_1 \text{sign}(S(x, t)) - r_2 \text{sign}(\dot{S}(x, t)) \quad (5.34)$$

avec : $r_2 > r_1 > 1$

Sous les conditions décrites par (5.28), la trajectoire du système converge au point d'équilibre en temps fini sous les conditions suivantes :

$$\begin{cases} (r_1 - r_2)\Gamma'_m > \Phi' \\ \Gamma'_m(r_1 + r_2) - \Phi' > \Gamma'_M \end{cases} \quad (5.35)$$

L'algorithme du Twisting peut être appliqué aussi sur les systèmes de degré relatif 1 en augmentant le système d'un intégrateur c.-à-d. en contrôlant $\dot{u}$ au lieu de u directement.

Algorithme du Super Twisting

L'algorithme du Super Twisting est l'algorithme le plus utilisé pour la commande par mode glissant du second ordre [80,81,82]. Il est dédié au système ayant 1 degré relatif un dans le but de réduire le chattering.

En générale , la commande par mode glissant du second ordre nécessite l'information sur les dérivées d'ordre supérieur de la surface de glissement. Néanmoins, cette restriction pourrait être évitée en utilisant cet algorithme qui ne nécessite pas cette information supplémentaire. Cette caractéristique présente l'avantage principal de l'algorithme du Super Twisting. En outre, il n'est pas sensible au temps d'échantillonnage.

Comme le montre la figure 5.11, la trajectoire de l'algorithme dans le plan de phase et les intersections consécutives de celle-ci avec les axes du plan évoluent tout en se rapprochant de l'origine qui est atteinte en temps fini.

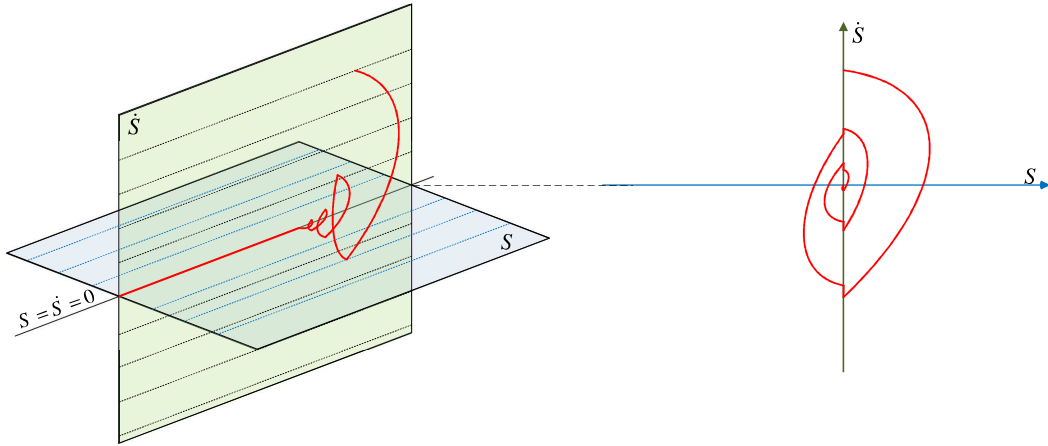


Figure 5.11: Trajectoires de phase de l'algorithme de Super Twisting

La loi de commande du Super-Twisting est composée de deux parties. Une partie discontinue u_1 et une partie continue u_2 . L'expression de l'algorithme de Super Twisting est donnée par [79] :

$$\begin{aligned} u_1 &= -\lambda |S_0|^\rho \text{sign}(S) + u_1 \\ \dot{u}_2 &= -K \text{sign}(S) \end{aligned} \quad (5.36)$$

Où, K, λ, S_0 et ρ sont des constantes positives.

La condition suffisante de la convergence de surface du mode glissant du second ordre dans un temps fini est donné par [79,82] :

$$\begin{aligned} K &> \frac{\Phi}{\Gamma_m} \\ \lambda^2 &\geq \frac{4\Phi}{\Gamma_m^2} \frac{\Gamma_M(K + \Phi)}{\Gamma_m(K - \Phi)} \\ 0 < \rho &\leq 0.5 \end{aligned} \quad (5.37)$$

Où : Γ_M, Γ_m et Φ sont des constantes positives.

5.7 Application de la commande par mode glissant sur le DSTATCOM quatre bras à trois niveaux

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'application de deux stratégies de commande afin d'améliorer les performances dynamique de notre système, la commande par mode glissant du premier ordre et celle du second ordre basé sur l'algorithme du Super Twisting.

Notons que dans le système de commande sera implanté, une boucle de contrôle externe des tension et une boucle de contrôle interne des courant, de plus le contrôleur nonlinéaire aura pour tâches de régulation des composantes symétrique du courant et de tension du bus continu et la tension du PCC.

Il en découlera ainsi sept sorties à contrôler, à savoir : la tension du bus continu, la tension du PCC, les composantes directe et indirecte des courants actifs et réactifs, en plus du courant homopolaire [80]. Pour atteindre cet objectif, le système représenté par les équations (3.2) et (3.3) sera divisé en deux sous-systèmes [80].

Le premier sous-système caractérisé par un seul état $x = v_{dc}$ et une seule entrée de contrôle $u = i_d$ est utilisé pour réguler la tension du bus continu afin de fournir la référence de la séquence directe du courant actif

Selon (3.3) le premier sous-système peut-être mis sous la forme :

$$\dot{v}_{dc} = f_{dc}(x) + g_{dc}(x) i_d \quad (5.38)$$

$$\text{où : } f_{dc}(x) = -\frac{v_{dc}}{R_{dc}C_{eq}} \text{ et } g_{dc}(x) = -\frac{v_d}{v_{dc}C_{eq}}$$

Le second sous-système est nécessaire pour contrôler les composantes des courants :

$$i_{fd}^+, i_{fd}^-, i_{fq}^+, i_{fq}^- \text{ et } i_o.$$

Il est caractérisé par :

$$\text{un vecteur d'état } x = i_f = [i_{fd}^+ \ i_{fd}^- \ i_{fq}^+ \ i_{fq}^- \ i_{fo}]^T$$

$$\text{et un vecteur d'entrée : } u = v_f = [v_{fd}^+ \ v_{fd}^- \ v_{fq}^+ \ v_{fq}^- \ v_{fo}]^T.$$

Selon (3.2), il est défini comme suit :

$$\dot{i}_f = f_f(x) + g_f(x) v_f \quad (5.39)$$

avec :

$$f_f(x_i) = \begin{pmatrix} f_d^+(x) \\ f_d^-(x) \\ f_q^+(x) \\ f_q^-(x) \\ f_0(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_f}{L_f}i_{fd}^+ + \omega^+i_{fq}^+ + v_d^+ \\ -\frac{R_f}{L_f}i_{fd}^- + \omega^-i_{fd}^- \\ -\frac{R_f}{L_f}i_{fq}^+ - \omega^+i_{fd}^+ \\ -\frac{R_f}{L_f}i_{fq}^- - \omega^-i_{fd}^- \\ -\frac{R_f}{L_f}i_{fo} \end{pmatrix}$$

et :

$$g_f(x_i) = \begin{pmatrix} g_d^+(x) \\ g_d^-(x) \\ g_q^+(x) \\ g_q^-(x) \\ g_0(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_f} \end{pmatrix}$$

5.7.1 Commande par mode de glissant de premier ordre

La conception de la commande par mode glissant du premier ordre est réalisée en deux étapes. La première consiste à définir la surface de glissement, puis la conception du contrôleur en deuxième étape en définissant une action de commande qui dirige les trajectoires d'état vers la surface de glissement [80].

5.7.1.1 Boucle de régulation externe des tensions

Le premier objectif est de réguler la tension du bus continu v_{dc} et d'assurer qu'elle suit sa référence v_{dc}^* . Par conséquent, la surface de glissement pour le premier sous-système est donnée par :

$$S_{dc} = k_{pdc}(v_{dc} - v_{dc}^*) + k_{idc} \int (v_{dc} - v_{dc}^*) dt \quad (5.40)$$

La dérivée temporelle de S_{dc} est donné par :

$$\dot{S}_{dc} = k_{pdc} \frac{d}{dt} (v_{dc} - v_{dc}^*) + k_{idc} (v_{dc} - v_{dc}^*) \quad (5.41)$$

Pour garantir la condition de convergence, la commande équivalente peut être calculée à partir de la formule $\dot{S}_{dc} = 0$, ce qui entraîne la loi de contrôle suivante :

$$i_{fd}^* = \frac{1}{g_{dc}(x)} \left(\left(-f_{dc}(x) + \frac{dv_{dc}^*}{dt} \right) - \frac{k_{idc}}{k_{pdc}} (v_{dc} - v_{dc}^*) \right) - k_{dc} \text{sign}(S_{dc}) \quad (5.42)$$

Où : k_{idc} , k_{pdc} et k_{dc} sont des constantes positives.

Le second objectif est la régulation de la tension du bus PCC. Dans ce cas, la surface de glissement est donnée par :

$$S_{vpcc} = k_{vpcc} (v_{pcc} - v_{pcc}^*) + k_{ipcc} \int (v_{pcc} - v_{pcc}^*) dt \quad (5.43)$$

Par conséquent, la loi de contrôle de la tension du bus PCC est définie comme :

$$i_{fq}^{*+} = -k_{vpcc} \text{sign}(S_{vpcc}) \quad (5.44)$$

où : k_{ipcc} , k_{ppcc} and k_{vpcc} sont des constantes positives.

5.7.1.2 Boucle de régulation interne des courants

Pour contrôler les composantes des courants du DSTATCOM i_{fd}^+ , i_{fd}^- , i_{fq}^+ , i_{fq}^- et i_o , les surfaces de glissement sont choisies comme suit [80] :

$$\begin{aligned} S_{id}^+ &= k_{pd} (i_{fd}^+ - i_d^*) + k_{id} \int (i_{fd}^+ - i_d^*) dt \\ S_{id}^- &= k_{pd} (i_{fd}^- - i_{ld}^-) + k_{id} \int (i_{fd}^- - i_{ld}^-) dt \\ S_{iq}^+ &= k_{pq} (i_{fq}^+ - i_{lq}^+) + k_{iq} \int (i_{fq}^+ - i_{lq}^+) dt \\ S_{iq}^- &= k_{pq} (i_{fq}^- - i_{lq}^-) + k_{iq} \int (i_{fq}^- - i_{lq}^-) dt \\ S_{oq} &= k_{po} (i_{fo} - i_{lo}) + k_{io} \int (i_{fo} - i_{lo}) dt \end{aligned} \quad (5.45)$$

Les dérivées temporelles de ces surfaces de glissement choisies sont données par :

$$\begin{aligned}
 \dot{S}_{id}^- &= k_{pd}^+ \frac{d}{dt} (i_{fd}^+ - i_{ld}^*) + k_{id}^- (i_{fd}^+ - i_{ld}^*) \\
 \dot{S}_{id}^- &= k_{pd}^- \frac{d}{dt} (i_{fd}^- - i_{ld}^-) + k_{id}^- (i_{fd}^- - i_{ld}^-) \\
 \dot{S}_{iq}^+ &= k_{pq}^+ \frac{d}{dt} (i_{fq}^+ - i_{lq}^+) + k_{iq}^+ (i_{fq}^+ - i_{lq}^+) \\
 \dot{S}_{iq}^- &= k_{pq}^- \frac{d}{dt} (i_{fq}^- - i_{lq}^-) + k_{iq}^- (i_{fq}^- - i_{lq}^-) \\
 \dot{S}_{io} &= k_{po} \frac{d}{dt} (i_{fo} - i_{lo}) + k_{io} (i_{fo} - i_{lo})
 \end{aligned} \tag{5.46}$$

Le contrôle équivalent est calculé à partir de la formule $\dot{S}_i = 0$ avec :

$$S_i = \begin{bmatrix} S_{id}^+ & S_{id}^- & S_{iq}^+ & S_{iq}^- & S_{io} \end{bmatrix}^T.$$

Par conséquent, la loi de contrôle des composantes du courant est :

$$\begin{aligned}
 v_{fd}^{+*} &= \frac{1}{g_d^+(x)} \left(\left(-f_d^+(x) + \frac{di_d^{+*}}{dt} \right) - \frac{k_{id}^+}{k_{pd}^+} (i_{fd}^+ - i_d^*) \right) - k_d^+ \text{sign}(S_{id}^+) \\
 v_{fd}^{-*} &= \frac{1}{g_d^-(x)} \left(\left(-f_d^-(x) + \frac{di_d^-}{dt} \right) - \frac{k_{id}^-}{k_{pd}^-} (i_{fd}^- - i_{ld}^-) \right) - k_d^- \text{sign}(S_{id}^-) \\
 v_{fq}^{+*} &= \frac{1}{g_q^+(x)} \left(\left(-f_q^+(x) + \frac{di_{lq}^+}{dt} \right) - \frac{k_{id}^-}{k_{pd}^-} (i_{fq}^+ - i_{lq}^+) \right) - k_q^+ \text{sign}(S_{iq}^+) \\
 v_{fq}^{-*} &= \frac{1}{g_q^-(x)} \left(\left(-f_q^-(x) + \frac{di_{lq}^-}{dt} \right) - \frac{k_{iq}^-}{k_{pq}^-} (i_{fq}^- - i_{lq}^-) \right) - k_q^- \text{sign}(S_{iq}^-) \\
 v_{fo}^* &= \frac{1}{g_o(x)} \left(\left(-f_o(x) + \frac{di_{fo}^*}{dt} \right) - \frac{k_{io}}{k_{po}} (i_{fo} - i_{fo}^*) \right) - k_o \text{sign}(S_{io})
 \end{aligned} \tag{5.47}$$

Où $K_{id,iq}^{+,-}$, $K_{pd,pq}^{+,-}$, $K_{d,q}^{+,-}$, K_{io} , K_{po} et K_o sont des constantes positives.

5.7.2 Commande par mode glissant du second ordre

5.7.2.1 Boucle de régulation externe des tensions

Pour rappel, les tâches des contrôleurs restant les même que précédemment, par conséquent, la surface de glissement pour la régulation de v_{dc} est définie par [80] :

$$S_{dc} = e_{dc} + K_{dc} \int e_{dc} \tag{5.48}$$

Avec : $e_{dc} = v_{dc}^* - v_{dc}$ et K_{dc} est une constante positive.

La première dérivée de la surface de glissement est :

$$\dot{S}_{dc} = \dot{v}_{dc}^* + \frac{v_{dc}}{R_{dc}C_{eq}} + K_{dc}e_{dc} + \left(\frac{v_d}{v_{dc}C_{eq}} \right) i_d \quad (5.49)$$

L'équation (5.49) peut être écrite sous la forme :

$$\begin{aligned} \dot{S}_{dc} &= F_{dc}(t) + G_{dc}(t) u_{dc}(t) \\ F_{dc}(t) &= \dot{v}_{dc}^* + \frac{v_{dc}}{R_{dc}C_{eq}} + K_{dc}e_{dc} \\ G_{dc}(t) &= \frac{v_d}{v_{dc}C_{eq}} \end{aligned} \quad (5.50)$$

Puisque la commande apparait dans la première dérivée de la surface de glissement, le premier sous-système a un degré relatif égal à 1. Par conséquent, l'algorithme Super Twisting pourra être appliqué pour réguler la tension du bus continu et donc qu'il existe des constants positifs b_{min} , b_{max} , C_0 , U_{max} permettant au sous-système (5.50) de remplir les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} |u_{dc}| &\leq U_{max} \\ 0 < b_{min} < |G_{dc}(x)| &\leq b_{max} \\ |F_{dc}(x)| &\leq C_0 \end{aligned} \quad (5.51)$$

L'algorithme Super Twisting est constitué de deux termes. Le premier est défini au moyen de sa dérivée temporelle discontinue, tandis que le second est une fonction continue de la surface de glissement. Ce qui se traduit dans notre cas par :

$$\begin{aligned} u_{dc}(t) &= u_{1dc} + u_{2dc} \\ u_{1dc} &= -\alpha_{dc}|S_{dc}|^\tau \text{sign}(S_{dc}) \\ \dot{u}_{2dc} &= -\beta_{dc}\text{sign}(S_{dc}) \end{aligned} \quad (5.52)$$

α_{dc} et β_{dc} des constantes positives assurant la convergence vers le surface de glissement en temps fini est défini par les conditions suivantes [42] :

$$\begin{aligned}\beta_{dc} &= \frac{C_{dc0}}{b_{dc\min}} \\ \alpha_{dc} &\geq \sqrt{\frac{4C_{dc0}(b_{dc\max}\beta_{dc} + C_{dc0})}{b_{dc\min}^2(b_{dc\min}\beta_{dc} + C_{dc0})}} \\ 0 &\leq \tau \leq 0.5\end{aligned}\tag{5.53}$$

Le contrôleur externe ayant aussi pour la fonction de réguler la tension du bus PCC. Dans ce cas, la surface de glissement est :

$$S_{vpcc} = e_{vpcc} + k_{vpcc}e_{vpcc}\tag{5.54}$$

avec : $e_{pcc} = v_{pcc} - v_{pcc}^*$

La loi de contrôle de la tension du bus PCC est donné par :

$$\begin{aligned}u_{vpcc}(t) &= u_{1vpcc} + u_{2vpcc} \\ u_{1vpcc} &= -\alpha_{vpcc}|S_{vpcc}|^\tau \text{sign}(S_{vpcc}) \\ \dot{u}_{2vpcc} &= -\beta_{vpcc}\text{sign}(S_{vpcc})\end{aligned}\tag{5.55}$$

Où α_{vpcc} et β_{vpcc} sont des constantes positives.

5.7.2.2 Boucle de régulation interne des courants

De la même manière, les surfaces de glissement pour les courants i_d^+ , i_d^- , i_q^+ , i_q^- et i_o du système DSTSTACOM sont données par :

$$\begin{aligned}S_{id}^+ &= e_{fd}^+ + K_d^+ \int e_{fd}^+ & e_{id}^+ &= i_{fd}^+ - i_{fd}^{*+} \\ S_{id}^- &= e_{fd}^- + K_d^- \int e_{fd}^- & e_{id}^- &= i_{fd}^- - i_{fd}^{*-} \\ S_{iq}^+ &= e_{fq}^+ + K_q^+ \int e_{fq}^+ & e_{iq}^+ &= i_{fq}^+ - i_{fq}^{*+} \\ S_{iq}^- &= e_{fq}^- + K_q^- \int e_{fq}^- & e_{iq}^- &= i_{fq}^- - i_{fq}^{*-} \\ S_{io} &= e_{fo} + K_o \int e_{fo} & e_{io} &= i_{fo} - i_{fo}^*\end{aligned}\quad \text{Où}\tag{5.56}$$

avec : $K_d^+, K_d^-, K_q^+, K_q^-$ et K_o des constantes positives.

Les dérivées des surfaces de glissement sont alors :

$$\begin{aligned}
 \dot{S}_{id}^+ &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fd}^{*+} + \omega^+ i_{fq}^+ + \frac{1}{L_f} v_d + \frac{1}{L_f} v_{fd}^+ + \frac{di_{fd}^{*+}}{dt} + K_d^+ e_{id}^+ \\
 \dot{S}_{id}^- &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fd}^{*-} + \omega^- i_{fq}^- + \frac{1}{L_f} v_{fd}^- + \frac{di_{fd}^{*-}}{dt} + K_d^- e_{id}^- \\
 \dot{S}_{iq}^+ &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fq}^{*+} - \omega^+ i_{fd}^+ + \frac{1}{L_f} v_{fq}^+ + \frac{di_{fq}^{*+}}{dt} + K_q^+ e_{iq}^+ \\
 \dot{S}_{iq}^- &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fq}^{*-} - \omega^- i_{fd}^- + \frac{1}{L_f} v_{fq}^- + \frac{di_{fq}^{*-}}{dt} + K_q^- e_{iq}^- \\
 \dot{S}_{io} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fo} + \frac{1}{L_f} v_{fo} + \frac{di_{fo}^*}{dt} + K_o^- e_{io}
 \end{aligned} \tag{5.57}$$

L'équation (5.57) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\dot{S}_f = F_f(x) + G_f(x) u_f \tag{5.58}$$

Où :

$$\begin{aligned}
 S_f(x) &= [S_{id}^+ \ S_{id}^- \ S_{iq}^+ \ S_{iq}^- \ S_{io}]^T \\
 F_f(x) &= [F_{id}^+ \ F_{id}^- \ F_{iq}^+ \ F_{iq}^- \ F_{io}]^T \\
 G_f(x) &= [G_{id}^+ \ G_{id}^- \ G_{iq}^+ \ G_{iq}^- \ G_{io}]^T \\
 u_f &= [u_{id}^+ \ u_{id}^- \ u_{iq}^+ \ u_{iq}^- \ u_{io}]^T
 \end{aligned}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 F_{id}^+ &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fd}^{*+} + \omega^+ i_{fq}^+ + \frac{1}{L_f} v_d + \frac{di_{fd}^{*+}}{dt} + K_d^+ e_{id}^+ \\
 F_{id}^- &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fd}^{*-} + \omega^- i_{fq}^- + \frac{di_{fd}^{*-}}{dt} + K_d^- e_{id}^- \\
 F_{iq}^+ &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fq}^{*+} - \omega^+ i_{fd}^+ + \frac{di_{fq}^{*+}}{dt} + K_q^+ e_{iq}^+ \\
 F_{iq}^- &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fq}^{*-} - \omega^- i_{fd}^- + \frac{di_{fq}^{*-}}{dt} + K_q^- e_{iq}^- \\
 F_{io} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fo} + \frac{di_{fo}^*}{dt} + K_o^- e_{io} \\
 G_d^+ &= G_d^- = G_q^+ = G_q^- = G_o = \frac{1}{L_f}
 \end{aligned}$$

Les fonctions $F_f(x)$, $G_f(x)$ et le vecteur de contrôle u_f doivent remplir les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} |u_f| &\leq U_{f\max} \\ 0 < b_{f\min} < |F_f(x)| &\leq b_{f\max} \\ |G_f(x)| &\leq C_{f0} \end{aligned} \quad (5.59)$$

Où $b_{f\min}$, $b_{f\max}$, C_{f0} et $U_{f\max}$ des constantes positives.

Puisque le vecteur de contrôle u_f apparait dans la première dérivée de la surface de glissement S_f , le second sous-système a un degré relatif égale à 1. Donc, la loi de commande des courants est définie par :

$$\begin{aligned} u_{iN}^M(t) &= u_{1N}^M + u_{2N}^M \\ u_{1N}^M &= -\alpha_N^M |S_N^M|^\tau \text{sign}(S_{iN}^M) \\ \dot{u}_{2N}^M &= -\beta_N^M \text{sign}(S_{iN}^M) \end{aligned} \quad (5.60)$$

où α_N^M et β_N^M ($M \in \{+, -\}$, $N \in \{d, q, o\}$) sont des constantes positives.

Les conditions ci-dessous garantissent la convergence vers la surface de glissement en temps fini :

$$\begin{aligned} \beta_N^M &= \frac{C_0}{b_{\min}} \\ \alpha_N^M &\geq \sqrt{\frac{4C_0(b_{\max}\beta + C_0)}{b_{\min}^2(b_{\min}\beta + C_0)}} \\ 0 &\leq \tau \leq 0.5 \end{aligned} \quad (5.61)$$

5.7.3 Résultats de simulation

Afin d'évaluer la performance de la commande par mode glissant du premier ordre et du seconde ordre appliqués au système DSTATCOM à quatre bras trois niveaux, un ensemble de simulations a été effectué dans les mêmes conditions que celle de la partie (3.6).

Les systèmes de contrôle de la commande par mode glissant du premier ordre et du seconde ordre sont représentés sur les figures 5.12 et 5.17, respectivement. Les paramètres des régulateurs utilisés sont regroupés dans le tableau B.1 de l'annexe B.

Cas d'une charge équilibrée et déséquilibrée

Les résultats de simulation du DSTATCOM quatre bras trois niveaux pour une charge équilibrée et déséquilibrée commandé par mode glissant du premier ordre et du second

ordre sont représenté respectivement par les figures 5.13, 5.15 et 5.18, 5.20.

Initialement, le système est en mode veille. À $t=0.05s$ on insère au réseau une charge inductive équilibrée. A son tour DSTATCOM injecte un courant réactif (figures 5.13.c et 5.18.c) afin de compenser l'énergie réactive requise par la charge et ce, pour la correction du facteur de puissance (figure 5.13.g, 5.18.g) comme il peut injecter un courant réactif (figure 5.15.c, 5.20.c) pour la régulation de tension du bus PCC (figure 5.15.g, 5.20.g) et ce suivant le mode de fonctionnement.

A $t=0.15s$ la charge devient déséquilibrée, le DSTATCOM compense alors le déséquilibre résultant dans le point de raccordement par compensation des composantes indirectes des courants actifs (figures 5.13.b, 5.15.b, 5.18.b et 5.20.b) et du courant réactifs (figures 5.13.d, 5.15.d, 5.18.d et 5.20.d).

On observe également une régulation de la tension du bus continu à sa valeur de référence (figures 5.13.e, 5.15.e, 5.18.e et 5.20.e). Les tensions des condensateurs du bus continu sont aussi équilibrées (figures 5.13.f, 5.15.f, 5.18.f et 5.20.f) dans le cas de fonctionnement sous charge équilibré que déséquilibré ce que montre l'efficacité de la stratégie d'équilibrage adoptée dans les deux modes de fonctionnement.

Cas d'un défaut asymétrique

Le comportement du système commandé par mode glissant premier ordre et du seconde ordre lors d'un défaut asymétrique est présenté par les figures 5.14, 5.16 et figures 5.19, 5.21, respectivement.

Initialement, le réseau alimente une charge équilibrée, Dans ce cas, le DSTATCOM va compenser l'énergie réactive par injection de la composante directe du courant réactive (figures 5.14.b et 5.19.b) pour la correction du facteur de puissance ou pour régule la tension au point de raccordement commun (figures 5.16.b et 5.21.b).

À $t=0.15s$ un défaut a été appliqué au niveau de la phase b pendant $0.2s$, ceci se manifeste par une oscillation au niveau de la tension du bus continu (figures 5.14.e, 5.16.e, 5.19.e et 5.21.e) ainsi qu'au niveau de tensions des condensateurs du bus continu (figures 5.14.f, 5.16.f, 5.19.f et 5.21.f).

A partir des simulations, on peut remarquer également que pendant la durée de défaut, le système de commande injecte la composante indirecte du courant actif (figure 5.14.b, 5.16.b, 5.19.b et 5.21.b) et du courant réactif (figure 5.14.d, 5.16.d, 5.19.d et 5.21.d) afin de compenser le déséquilibre du courant. Après la disparition du défaut, le système de contrôle réajuste chaque paramètre à sa valeur de référence.

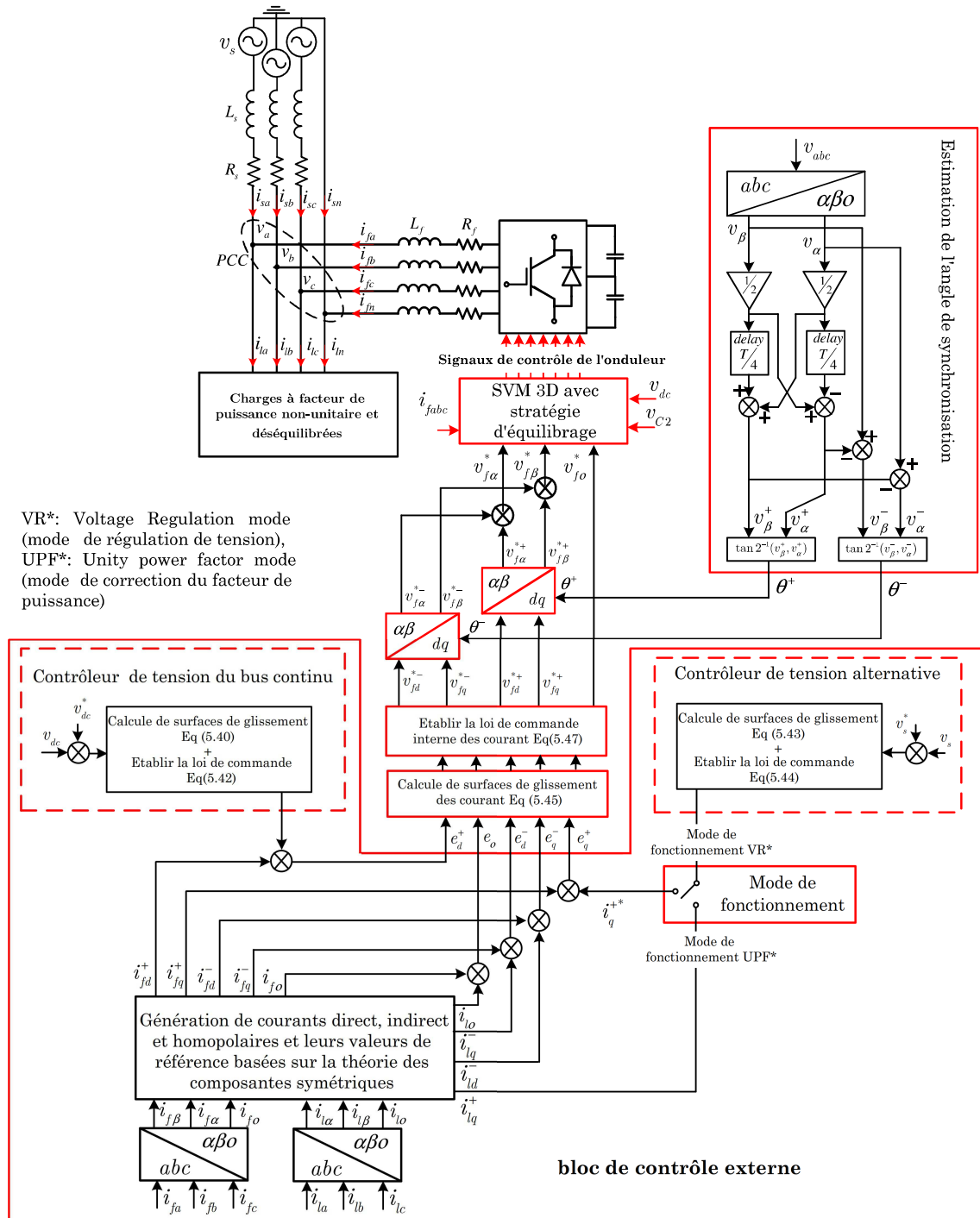


Figure 5.12: Commande par mode glissant du premier ordre d'un DSTATCOM quatre bras à trois niveaux

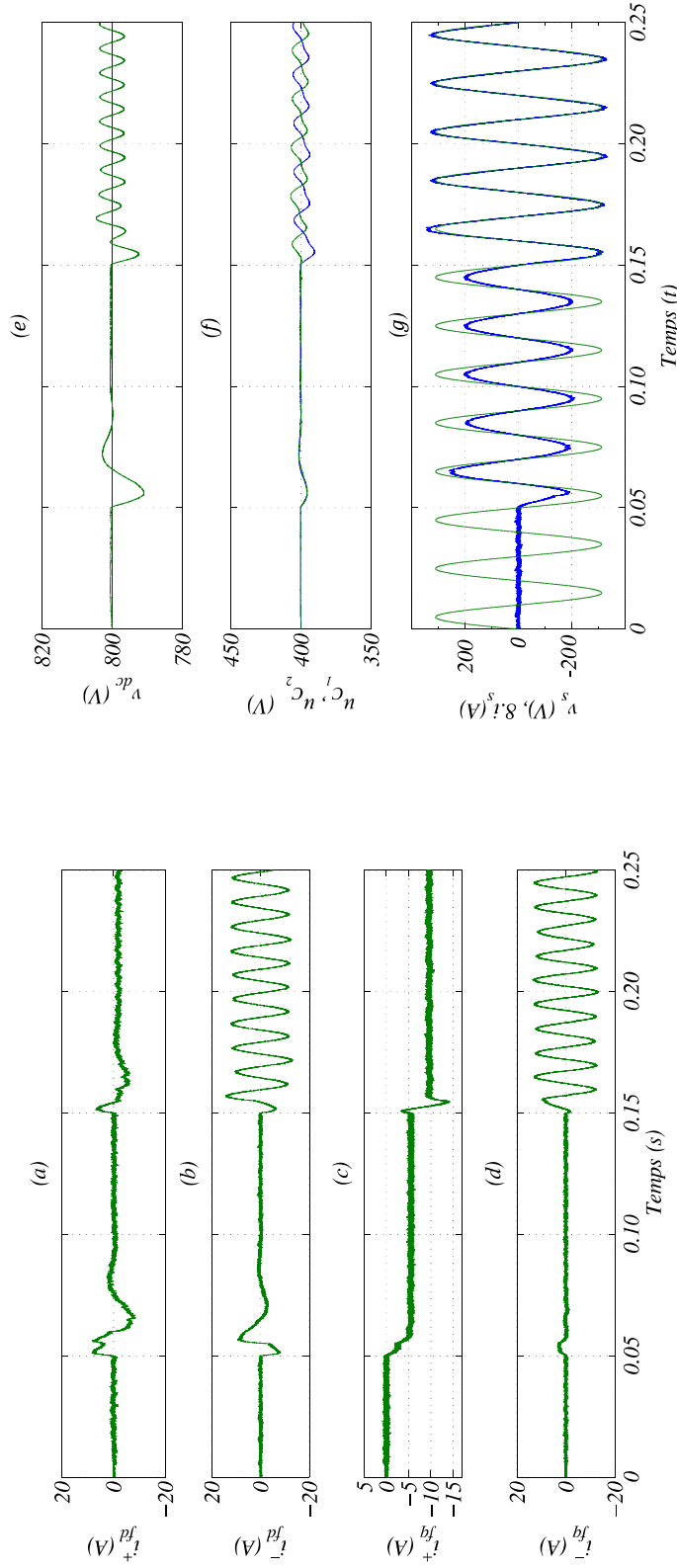


Figure 5.13: Comportement du système DSTATCOM à quatre bras trois niveaux fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'une alimentation d'une charge équilibrée et déséquilibrée (cas de commande par mode glissant du premier ordre) : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu v_{dc} et (f) tension des condensateurs du bus continu. (g) la tension et courant de phase b

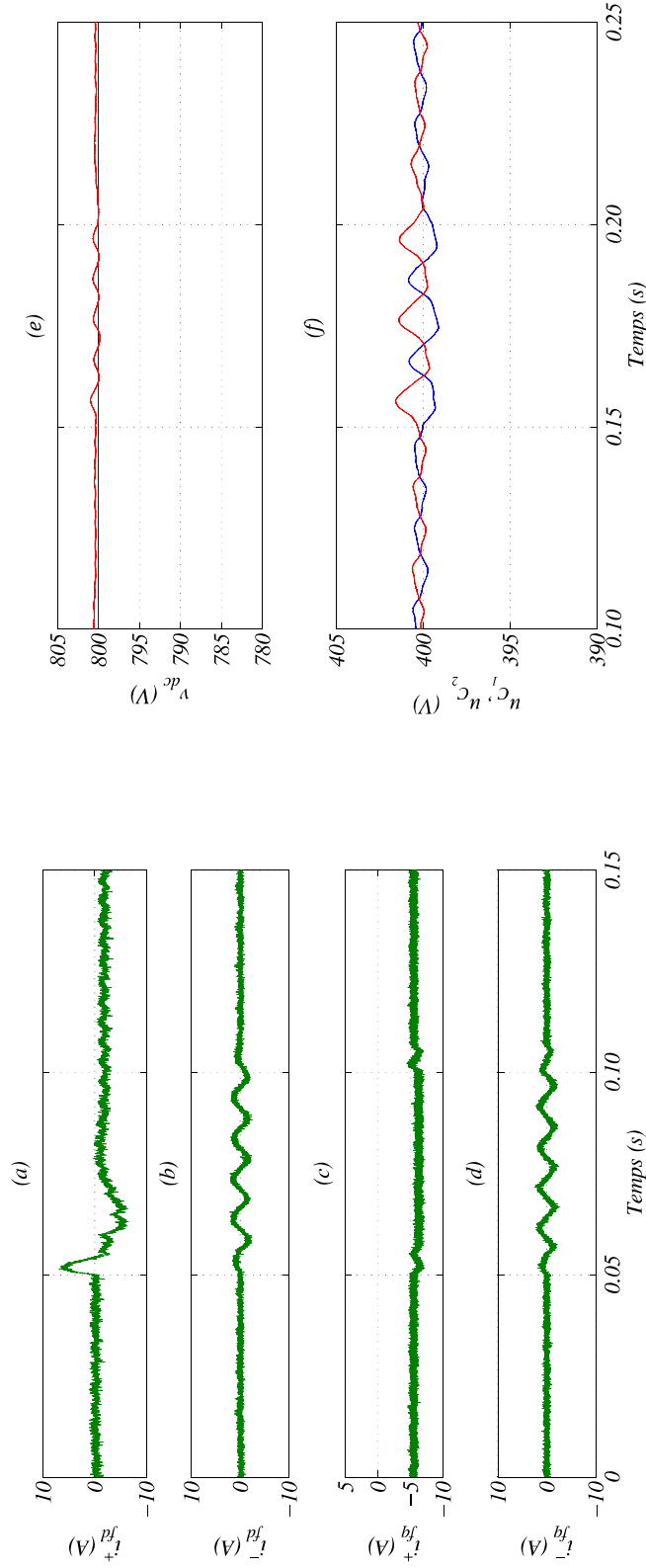


Figure 5.14: Comportement du système DSTATCOM à quatre bras trois niveaux fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance pendant un défaut asymétrique (cas de commande par mode glissant du premier ordre) (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu v_{dc} et (f) tension des condensateurs du bus continu.

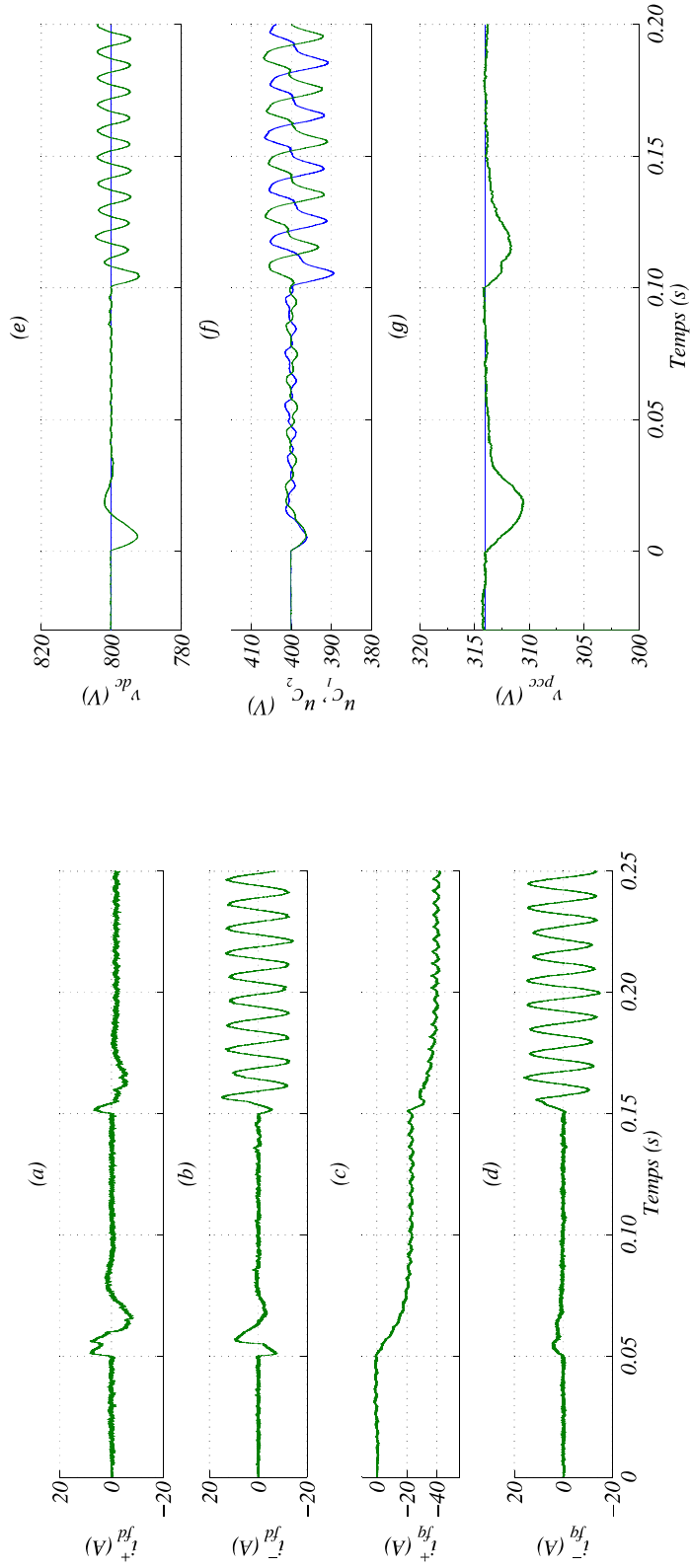


Figure 5.15: Comportement dynamique du système DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux fonctionné en mode de régulation de tension lors d'alimentation de charges équilibrée et déséquilibrée (cas de commande par mode glissant du premier ordre) : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu v_{dc} (f) tensions des condensateurs du bus continu (g) tension du bus PCC.

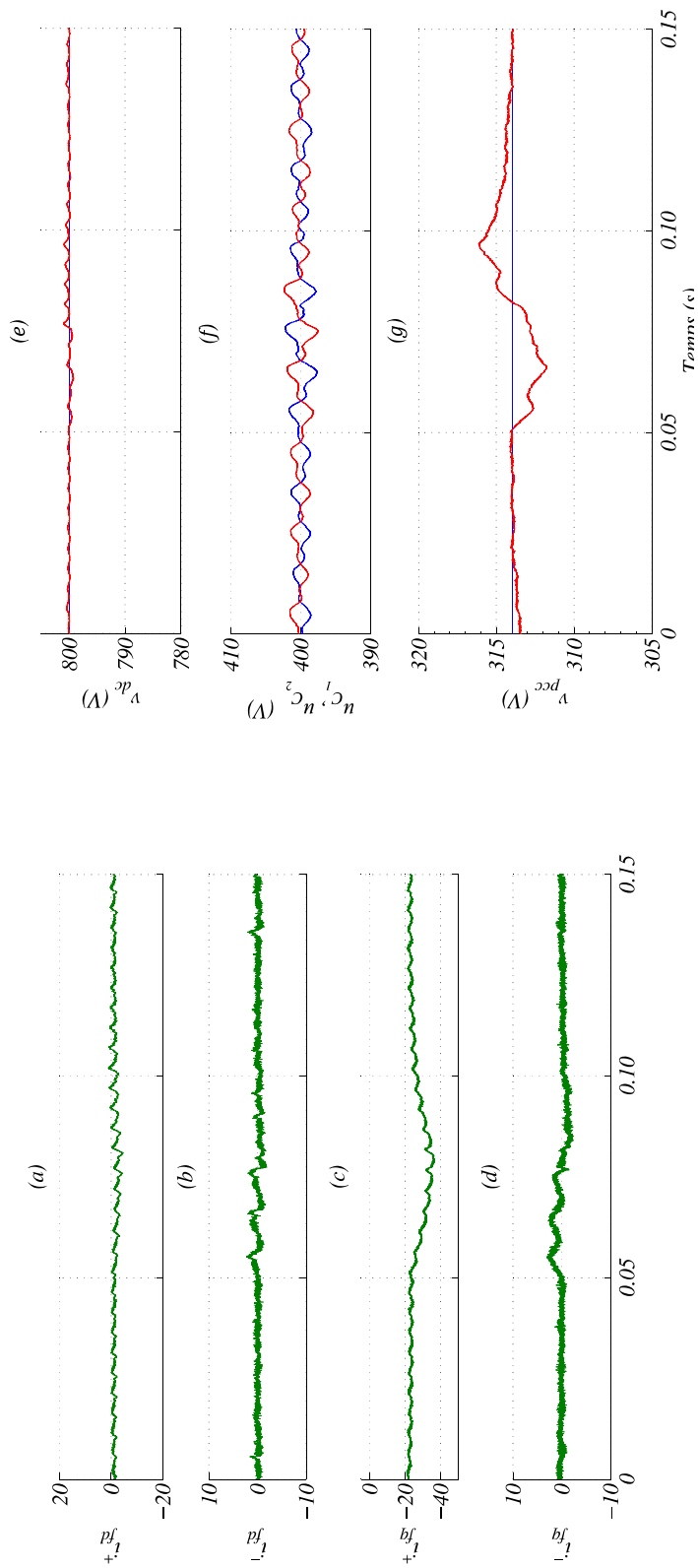


Figure 5.16: Comportement dynamique du système DSTATCOM à quatre bras à trois niveaux fonctionné en mode de régulation de tension lors d'alimentation de charges équilibrée et déséquilibrée (cas de commande par mode glissant du premier ordre) : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu v_{dc} (f) tensions des condensateurs du bus continu (g) tension du bus PCC.

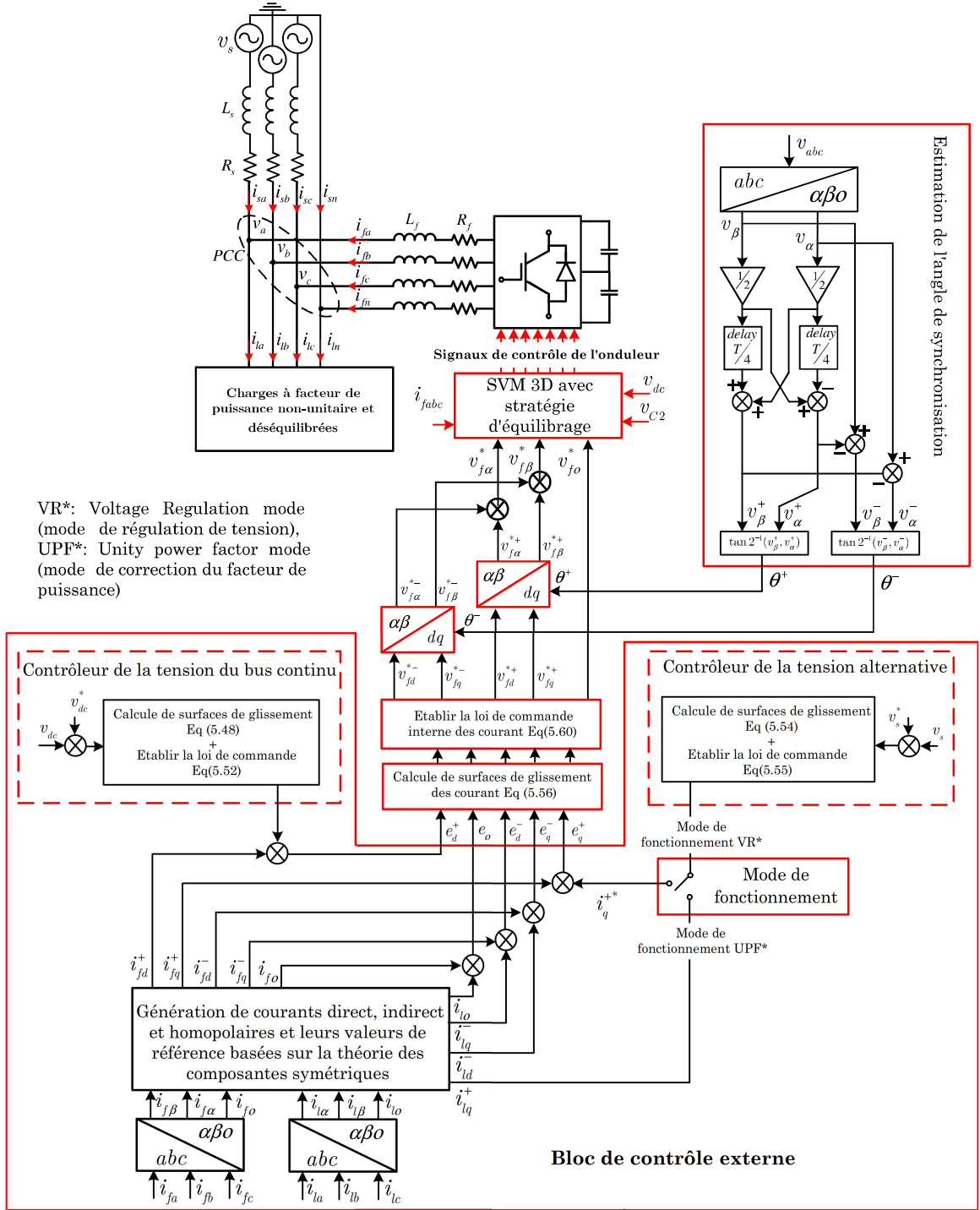


Figure 5.17: Commande par mode glissant du second ordre d'un DSTATCOM quatre bras à trois niveaux

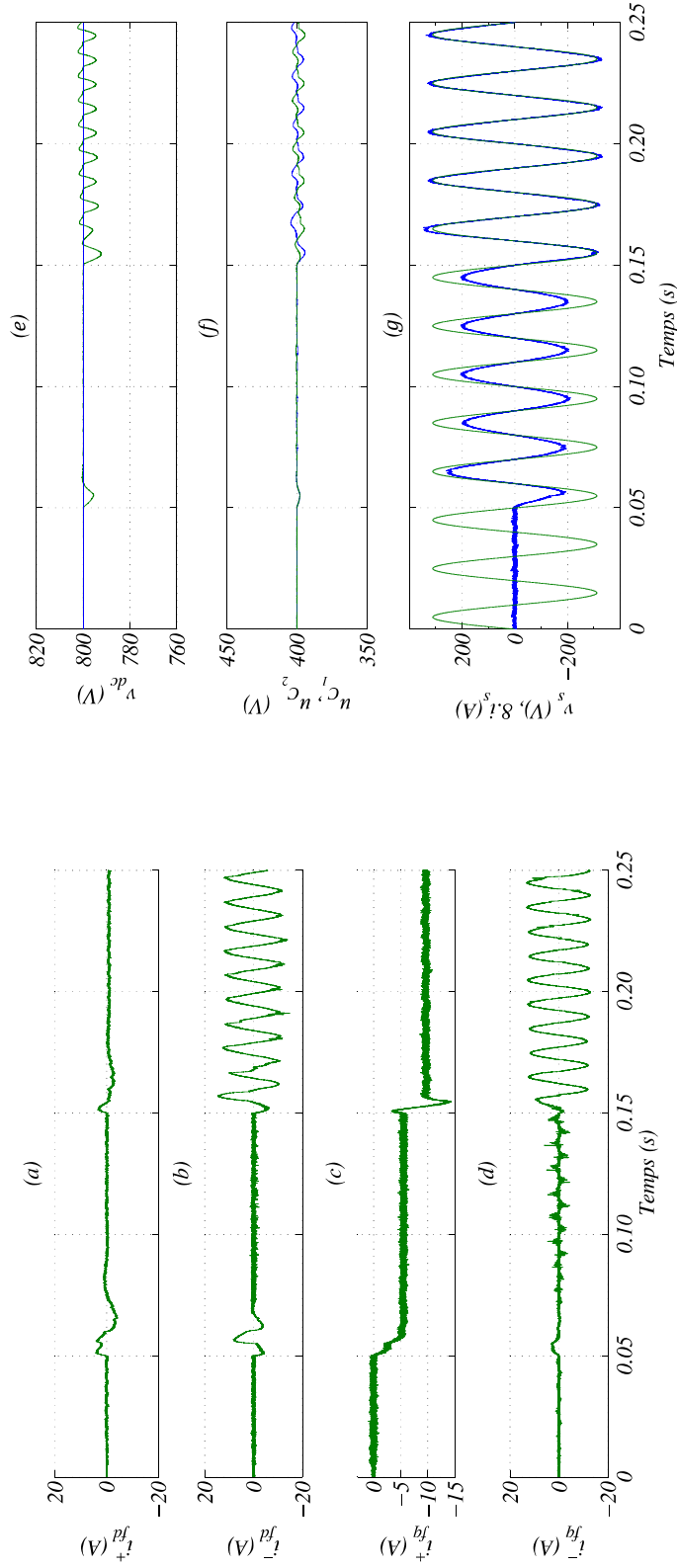


Figure 5.18: Comportement dynamique du système DSTATCOM à quatre bras trois niveaux fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'alimentation d'une charge équilibrée et déséquilibrée (cas de commande par mode glissant du seconde ordre) (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu v_{dc} et (f) tensions des condensateurs du bus continu (g) tension et courant de phase b

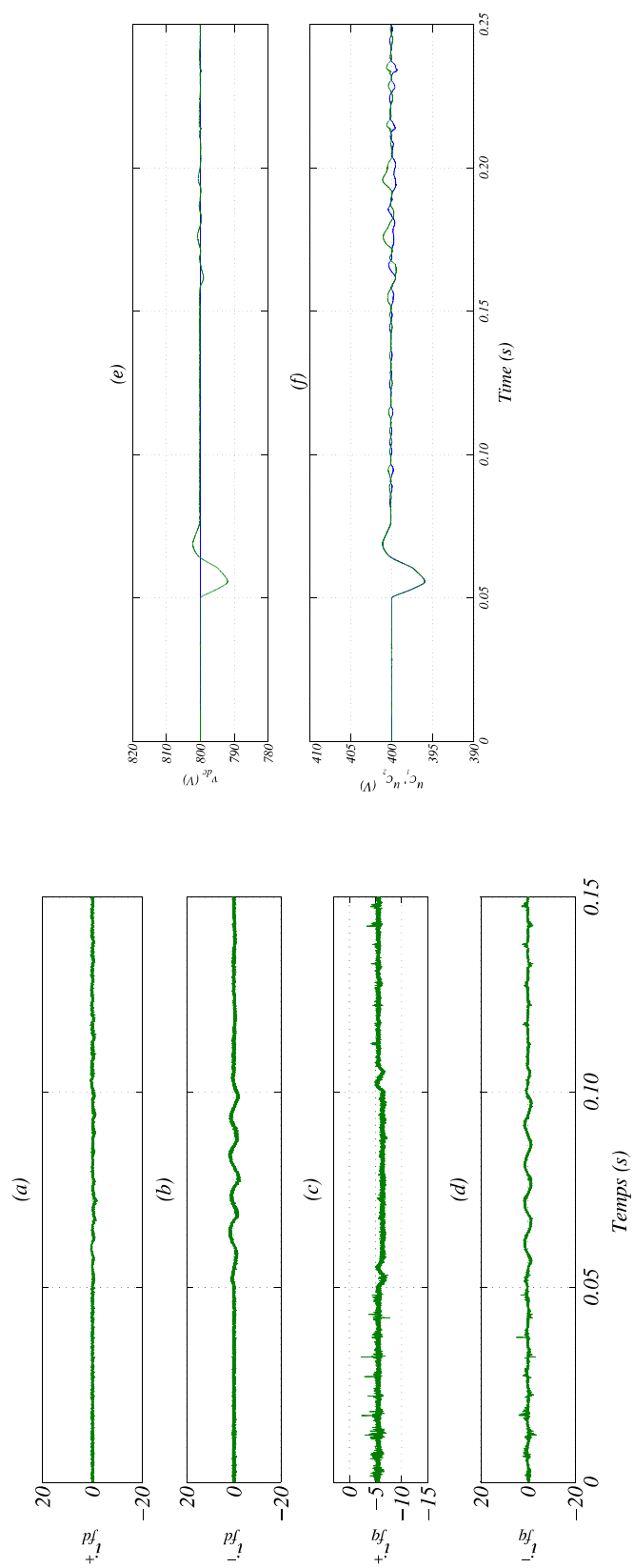


Figure 5.19: Comportement dynamique du système DSTATCOM à quatre bras trois niveaux fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance pendant d'un défaut asymétrique (cas de commande par mode glissant du second ordre) (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu v_{dc} et (f) tension des condensateurs du bus continu.

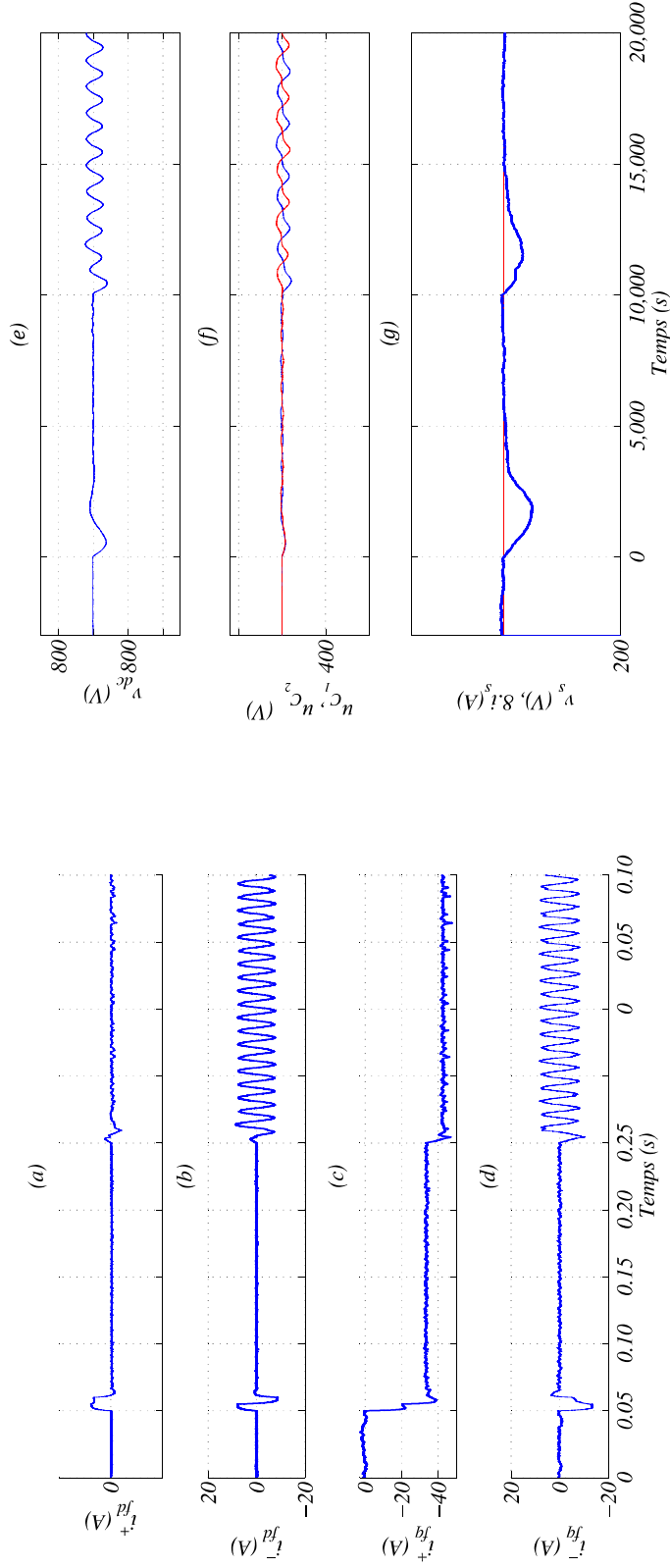


Figure 5.20: Comportement dynamique du système DSTATCOM à quatre bras trois niveaux fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'alimentation d'une charge équilibrée et déséquilibrée (cas de commande par mode glissant du second ordre) (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^{+}), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^{-}), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^{+}), (d) composant indirect du courant réactif (i_{fq}^{-}), (e) tension continue v_{dc} (f) tension des condensateurs du bus continu (g) tension du bus PCC.

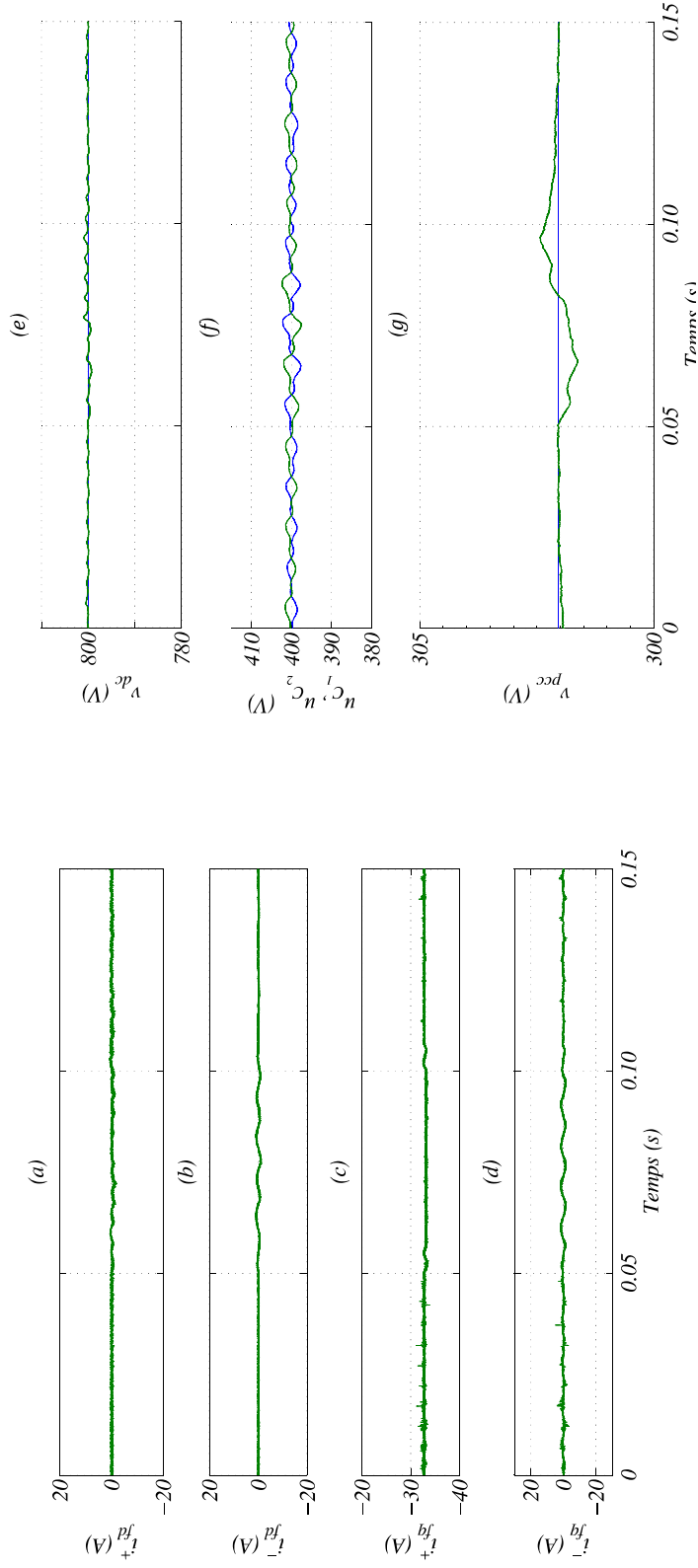


Figure 5.21: Comportement dynamique du système DSTATCOM quatre bras à trois niveaux fonctionné en mode de régulation de tension pendant d'un défaut asymétrique (cas de commande par mode glissant seconde ordre) (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composant direct du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu v_{dc} (f) tension des condensateurs du bus continu (g) tension du bus PCC.

5.8 Application de commande par mode glissant sur le système DSTATCOM-SMES à quatre bras trois niveaux

5.8.1 Commande par mode glissant du premier ordre

La conception du contrôle par mode glissant du premier ordre pour le système DSTATCOM-SMES est réalisée en deux étapes, la première consiste à définir les surfaces de glissement, puis en deuxième étape, on définit la commande qui dirige les trajectoires d'état vers la surface de glissement.

5.8.1.1 Boucle de régulation externe de la tension

L'objectif de ce contrôleur externe des tensions est d'assurer la régulation de la tension du bus continu ainsi que du bus PCC. Notons que le contrôleur de la tension du PCC utilisant la commande par mode glissant premier ordre du système DSTATCOM-SMES est identique à celle discutée dans la partie 5.8.1.1)). Cependant, la régulation de la tension du bus continu va être réalisée en utilisant le hacheur bidirectionnel du système. L'équation (4.3) peut être réécrite comme suit :

$$\dot{v}_{dc} = f_{dc}(x, t) + g_{dc}(x, t)u \quad (5.62)$$

$$\text{Ou : } f_{dc}(x) = \frac{i_1^{eq} R_{dc} - v_{dc}}{C_{eq}} \text{ et } g_{dc}(x) = \frac{1}{C_{eq}}$$

La surface de glissement pour la régulation de la tension continu est choisie comme :

$$S_{dc} = k_{pdc} (v_{dc} - v_{dc}^*) + k_{idc} \int (v_{dc} - v_{dc}^*) dt \quad (5.63)$$

la dérivée temporelle de S_{dc} est donnée par :

$$\dot{S}_{dc} = k_{pdc} \frac{d}{dt} (v_{dc} - v_{dc}^*) + k_{idc} (v_{dc} - v_{dc}^*) \quad (5.64)$$

La commande équivalente est calculée à partir de la condition $\dot{S}_{dc} = 0$. Le contrôle de stabilisation pour garantir la condition de convergence est donné par la loi de contrôle suivante :

$$i_{fd}^* = \frac{1}{g_{dc}(x)} \left(\left(-f_{dc}(x) + \frac{dv_{dc}^*}{dt} \right) - \frac{k_{idc}}{k_{pdc}} (v_{dc} - v_{dc}^*) \right) - k_{dc} \text{sign}(S_{dc}) \quad (5.65)$$

ou k_{idc} , k_{pdc} et k_{dc} sont des constantes positives.

La boucle externe régule également la tension aux bornes des condensateurs du bus continu. De l'équation (4.17), le sous-système pour le contrôleur des condensateurs s'écrit :

$$\dot{u}_c = f_{uc}(x, t) + g_{uc}(x, t)u \quad (5.66)$$

Où : $f_{uc}(x) = 0$ et $g_{uc}(x) = 1/2C_2$.

Par conséquent, la surface de glissement pour réguler la tension u_c est donnée par :

$$S_{uc} = k_{puc} \left(v_{uc2} - \frac{v_{dc}^*}{2} \right) + k_{idc} \int \left(v_{uc2} - \frac{v_{dc}^*}{2} \right) dt \quad (5.67)$$

La dérivée temporelle de S_{uc} est donnée par :

$$\dot{S}_{uc} = k_{puc} \frac{d}{dt} \left(v_{uc2} - \frac{v_{dc}^*}{2} \right) + k_{iuc} \left(v_{uc2} - \frac{v_{dc}^*}{2} \right) \quad (5.68)$$

La commande équivalente est calculée à partir de la formule $\dot{S}_{uc} = 0$, par conséquent la loi de contrôle est exprimée par :

$$\Delta i_0 = \frac{1}{g_{uc}(x)} \left(\frac{dv_{dc}^*}{2dt} - \frac{k_{iuc}}{k_{puc}} \left(v_{uc2} - \frac{v_{dc}^*}{2} \right) \right) - k_{uc} \text{sign}(S_{uc}) \quad (5.69)$$

où k_{iuc} , k_{puc} et k_{uc} sont des constantes positives.

5.8.1.2 Boucle de régulation interne des courants

La boucle de régulation interne des courants est utilisée pour contrôler les composants de courant de DSTATCOM-SMES i_{fd}^+ , i_{fd}^- , i_{fq}^+ , i_{fq}^- et i_o . La conception de ces contrôleurs basés sur le commande par mode glissant du premier ordre sont identiques à ceux discutés dans la partie (5.8.1.2).

5.8.2 Commande par mode glissant de second ordre

5.8.2.1 boucle de régulation externe de tension

L'objectif étant le même que précédemment. Toutefois, La surface de glissement pour le régulateur du bus continu sera choisie comme suit :

$$S_{dc} = e_{dc} + K_{dc} \int e_{dc} \quad (5.70)$$

Où, K_{dc} est une constant positive et $e_{dc} = v_{dc}^* - v_{dc}$.

La dérivée de la surface de glissement est :

$$\dot{S}_{dc} = \dot{v}_{dc}^* - \frac{v_{dc} + R_{dc}i_1^{eq}}{C_{eq}} + K_{dc}e_{dc} + \frac{1}{C_{eq}}i_{dc}^{eq} \quad (5.71)$$

L'équation (5.71) peut être écrite sous la forme :

$$\dot{S}_{dc} = F_{dc}(t) + G_{dc}(t) u_{dc}(t) \quad (5.72)$$

$$\text{Où : } F_{dc}(t) = \dot{v}_{dc}^* - \frac{v_{dc} + R_{dc}i_1^{eq}}{C_{eq}} + K_{dc}e_{dc} \text{ et } G_{dc}(t) = \frac{1}{C_{eq}}$$

De la même manière, la commande apparait dans la première dérivée de la surface de glissement, par conséquent, l'application de l'algorithme de Super Twisting est possible. Cependant, il doit y exister des constantes positives b_{min} , b_{max} , C_0 , U_{max} qui permettant au premier sous-système de remplir les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} |u_{dc}| &\leq U_{max} \\ 0 < b_{min} < |G_{dc}(x)| &\leq b_{max} \\ |F_{dc}(x)| &\leq C_0 \end{aligned} \quad (5.73)$$

Alors, la commande par mode glissant du second ordre du DSTATCOM-SMES de la tension continu est définie par la loi de commande suivante :

$$\begin{aligned} u_{dc}(t) &= u_{1dc} + u_{2dc} \\ u_{1dc} &= -\alpha_{dc}|S_{dc}|^\tau \text{sign}(S_{dc}) \\ \dot{u}_{2dc} &= -\beta_{dc}\text{sign}(S_{dc}) \end{aligned} \quad (5.74)$$

Où α_{dc} et β_{dc} sont des constantes positives, et la convergence vers le surface de glissement en temps fini est garantie par les conditions suivantes [42] :

$$\begin{aligned} \beta_{dc} &= \frac{C_{dc0}}{b_{dc\min}} \\ \alpha_{dc} &\geq \sqrt{\frac{4C_{dc0}(b_{dc\max}\beta_{dc} + C_{dc0})}{b_{dc\min}^2(b_{dc\min}\beta_{dc} + C_{dc0})}} \\ 0 &\leq \tau \leq 0.5 \end{aligned} \quad (5.75)$$

5.8.2.2 Boucle de régulation interne des courants

La boucle de régulation interne des courants est utilisée pour contrôler les composantes de courant de DSTATCOM-SMES i_{fd}^+ , i_{fd}^- , i_{fq}^+ , i_{fq}^- et i_o . La conception de ces contrôleurs est identique à ceux discutés dans la partie (5.8.2.2).

5.8.3 Résultats de simulation et interprétations

Afin d'évaluer les performances de la commande par mode glissant du premier ordre et du second ordre d'un DSTATCOM-SMES à quatre bras trois niveaux, on a procédé à des tests en simulation effectués dans les mêmes conditions que celle de section (4.6).

Les configurations de contrôle de la commande par mode glissant du premier ordre et du second ordre sont représentés, respectivement sur les figures 5.22 et 5.29. Les paramètres des régulateurs utilisés sont regroupés dans le tableau B.1 de l'annexe B.

Cas d'une charge équilibré et déséquilibré

Les résultats de simulation du DSTATCOM-SMES quatre bras à trois niveaux pour une charge équilibrée et déséquilibrée commandée par mode glissant du premier ordre et du seconde ordre sont présentés, respectivement dans les figures 5.23, 5.26 et 5.30, 5.33.

Initialement, le système est en mode veille. A $t=0.05s$, on insère une charge inductive dans le réseau. Le système DSTATCOM-SMES injecte un courant réactif (figures 5.23.c et 5.30.c) afin de compenser l'énergie réactive requise par la charge pour la correction du facteur de puissance ou pour la régulation de tension du bus PCC figure 5.26.g, 5.33.g.

A $t=0.15s$ la charge devient déséquilibrée. Le système DSTATCOM-SMES compense alors les composantes indirectes des courants actifs (figures 5.23.b, 5.26.b, 5.30.b et 5.33.b) et du courant réactifs (figures 5.23.d, 5.26.d, 5.30.d et 5.33.d).

Le système de commande régule également la tension du bus continu à sa valeur de référence (figures 5.23.e, 5.26.e, 5.30.e et 5.33.e). Les tensions des condensateurs sont aussi équilibrées (figures 5.23.f, 5.26.f, 5.30.f et 5.33.f) dans les deux cas de fonctionnement ce que justifier l'efficacité de la stratégie d'équilibrage pour le cas de la commande par mode glissant du premier ordre et du seconde ordre.

Cas d'échange de puissance active

La réponse dynamique du système DSTATCOM-SMES lors de l'échange de la puissance active entre le compensateur et le réseau de distribution est représenté dans les figures 5.24 et 5.27 pour le cas de commande par mode glissant du premier ordre et figures 5.31 et 5.34 pour le cas de commande par mode glissant du second ordre.

Initialement, le système de distribution alimente la charge, le compensateur injecte alors la composante directe du courant réactif afin de compenser l'énergie réactive requise par la charge pour la correction de puissance (figures 5.24.c, 5.31.c) ou la régulation de la tension (figures 5.27.c, 5.34.c).

À $t=0.1s$, pour des exigences données, le DSTATCOM-SMES injecte la composante directe du courant actif dans le sens positif, du DSTATCOM-SMES vers le réseau, à $t=0.2s$, on effectue un changement dans le sens négatif de transfert de puissance active du réseau vers DSTATCOM-SMES, à $t=0.3s$ le système retourne à son régime initial sans échange de la puissance active entre les deux coté distribution (figures 5.24.a, 5.27.a, 5.31.a et 5.34.a). Par contre, le DSTATCOM-SMES continue la compensation d'énergie réactive requise par la charge (figures 5.24.c, 5.27.c, 5.31.c et 5.34.c).

On observe également que durant les différents échanges de la puissance active et réctive, la tension du bus continu est régulé à sa valeur de référence (figures 5.24.e, 5.27.e, 5.31.e et 5.34.e) et les tensions des condensateurs de bus continu sont équilibrés (figures 5.24.f, 5.27.f, 5.31.f et 5.34.f).

Cas d'un défaut dissymétrique

Les figures 5.25, 5.28 et 5.32, 5.35 représentent respectivement le comportement du DSTATCOM-SMES pour le mode de glissant du premier ordre et du second ordre durant un défaut.

Initialement, le DSTATCOM injecte la composante directe du courant réactif lors d'une charge équilibré afin de compenser l'énergie réactive requise par la charge pour la correction de facteur de puissance (figures 5.25.b, 5.32.b) ou régler la tension au PCC (figures 5.28.b, 5.35.b).

A $t=0.15s$ un défaut a été appliqué au niveau de la phase b pendant $0.2s$, ceci se manifeste par une oscillation au niveau de la tension du bus continu (figures 5.25.e, 5.28.e,

5.32.e et 5.35.e). On peut remarquer également que pendant la durée de défaut, le système de commande injecte la composante indirecte du courant actif (figure 5.25.b, 5.28.b, 5.32.b et 5.35.b) et du courant réactif (figure 5.25.d, 5.28.d, 5.32.d et 5.35.d) afin de compenser le déséquilibre.

On constate aussi que les tensions des condensateurs du bus continu présentent quelque oscillation durant le défaut (figures 5.25.f, 5.28.f, 5.32.f et 5.35.f). En fin de défaut, le système de commande corrigera chaque paramètre en l'amenant chaque paramètre à sa référence.

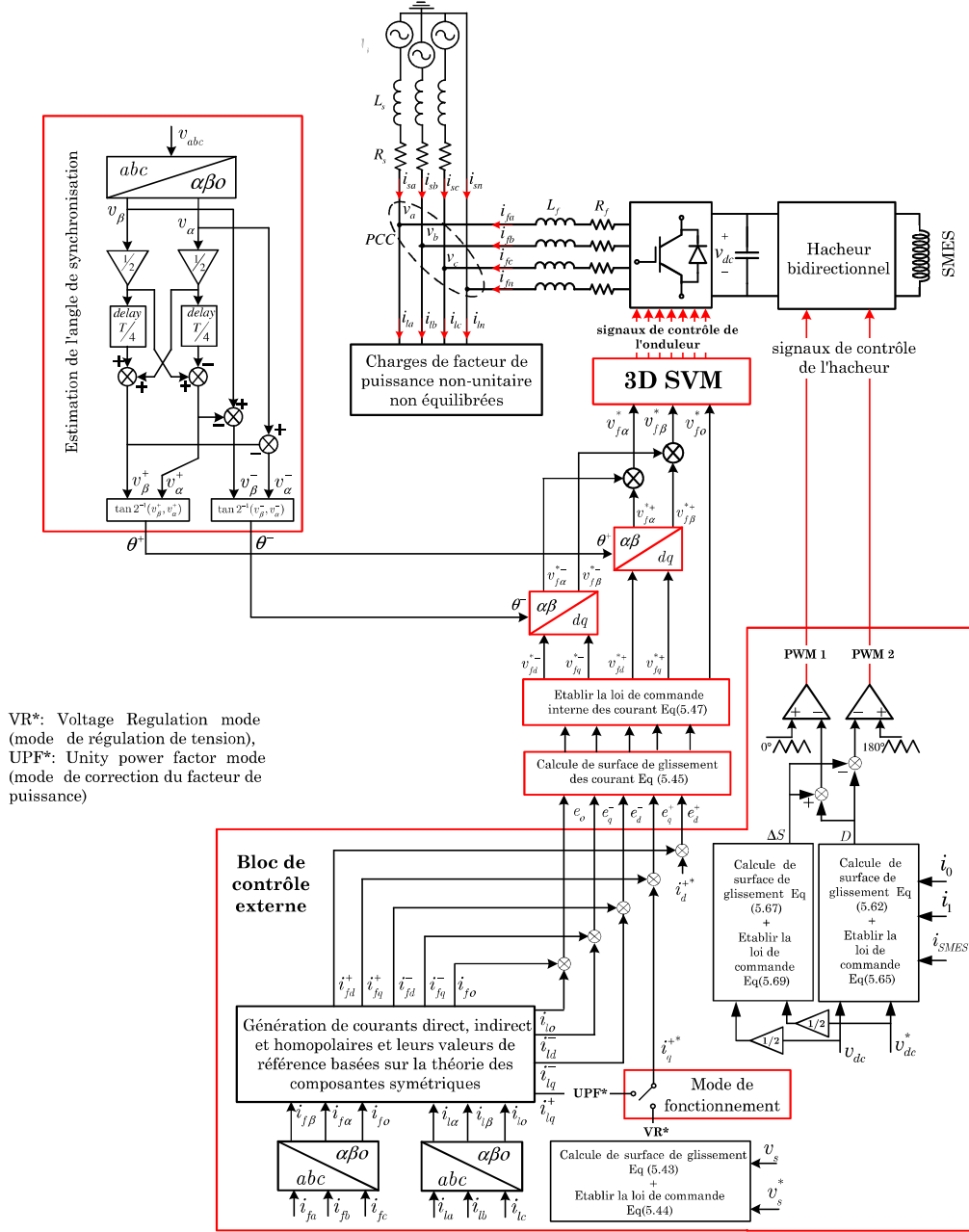


Figure 5.22: Commande par mode glissant du premier ordre d'un DSTATCOM-SMES quatre bras à trois niveaux

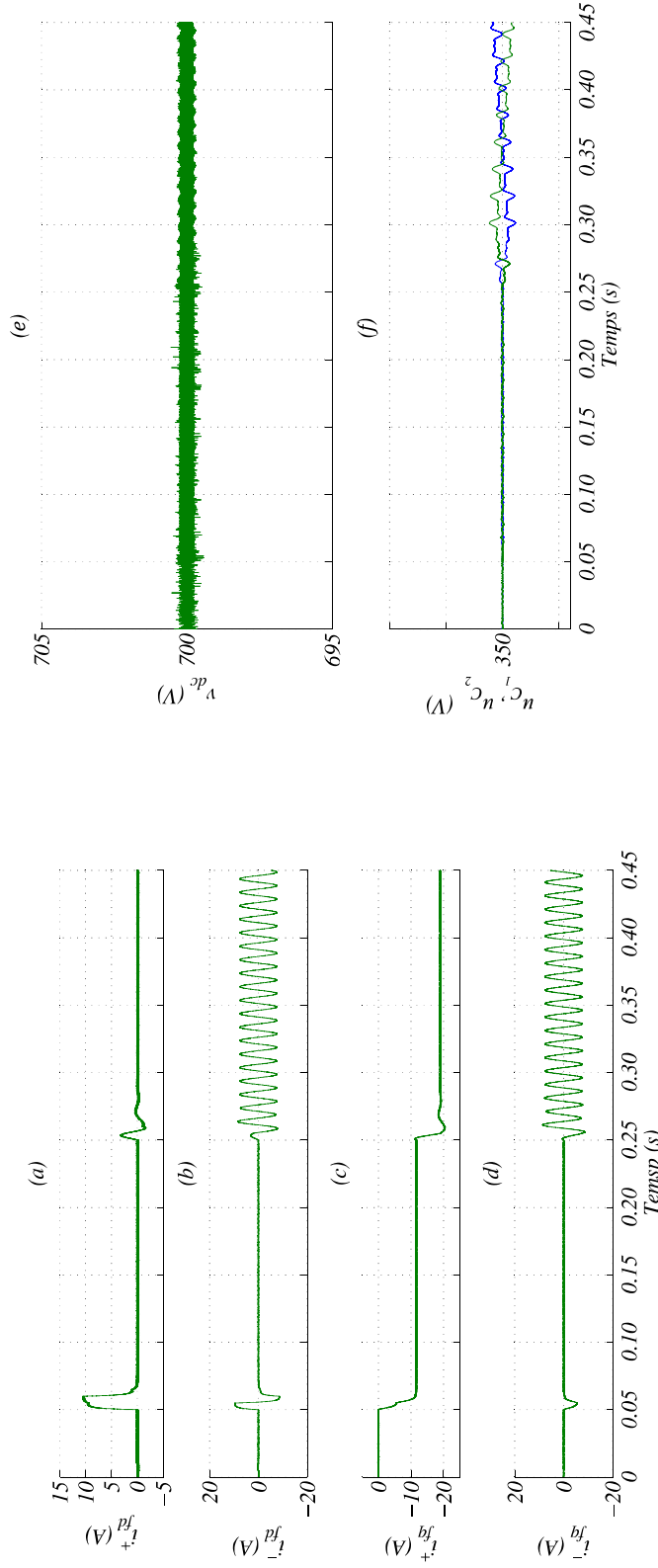


Figure 5.23: Comportement dynamique du système DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'alimentation d'une charge équilibré et déséquilibré, (cas de commande par mode glissant premier ordre) : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu, (f) les tensions des condensateurs du bus continu

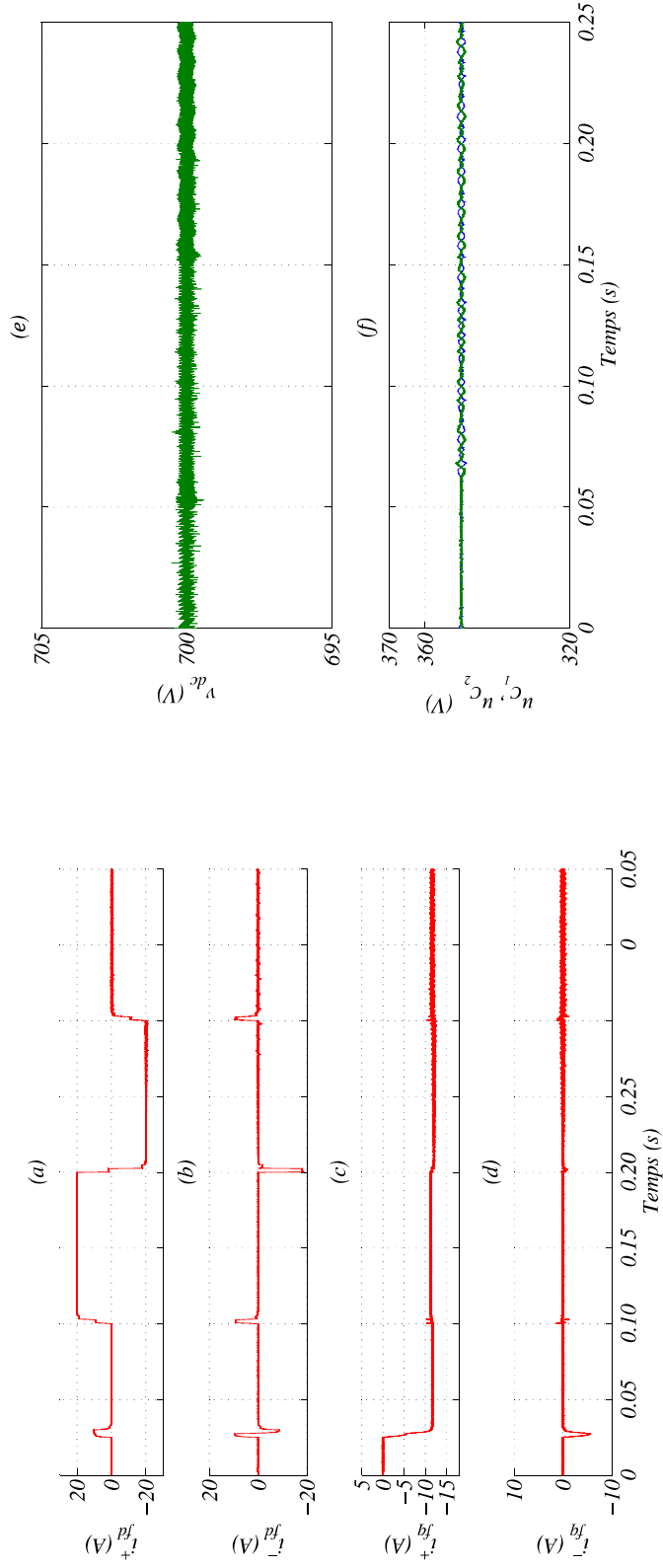


Figure 5.24: Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors de d'échange d'énergie active et réactive, (cas de commande par mode glissant du premier ordre) : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^{+}) (b) composante indirecte de courant active (i_{fd}^{-}), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^{+}), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^{-}), (e) tension de de bus continu, (f) les tensions des condensateurs du bus continu,

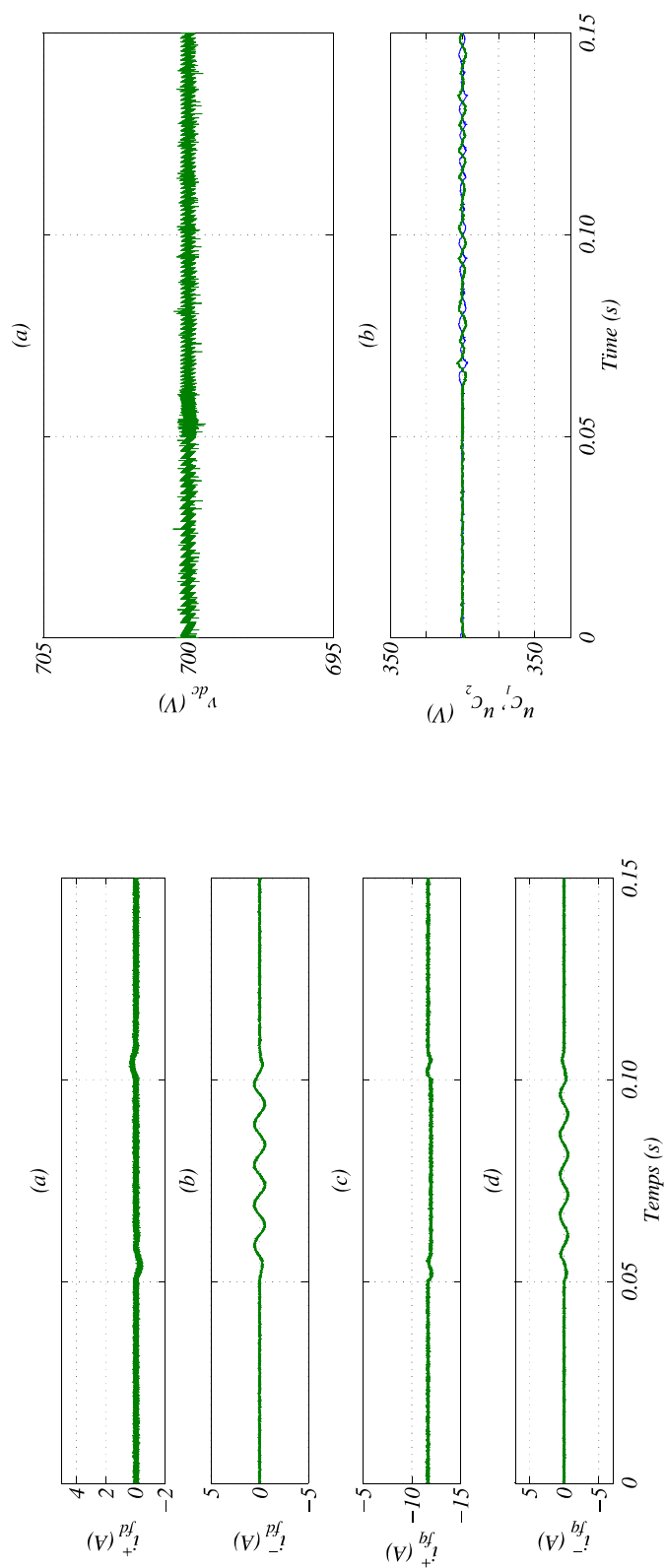


Figure 5.25: comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance pendant un défaut asymétrique, (cas de commande par mode glissant du premier ordre) : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu, (f) les tensions des condensateurs de bus continu

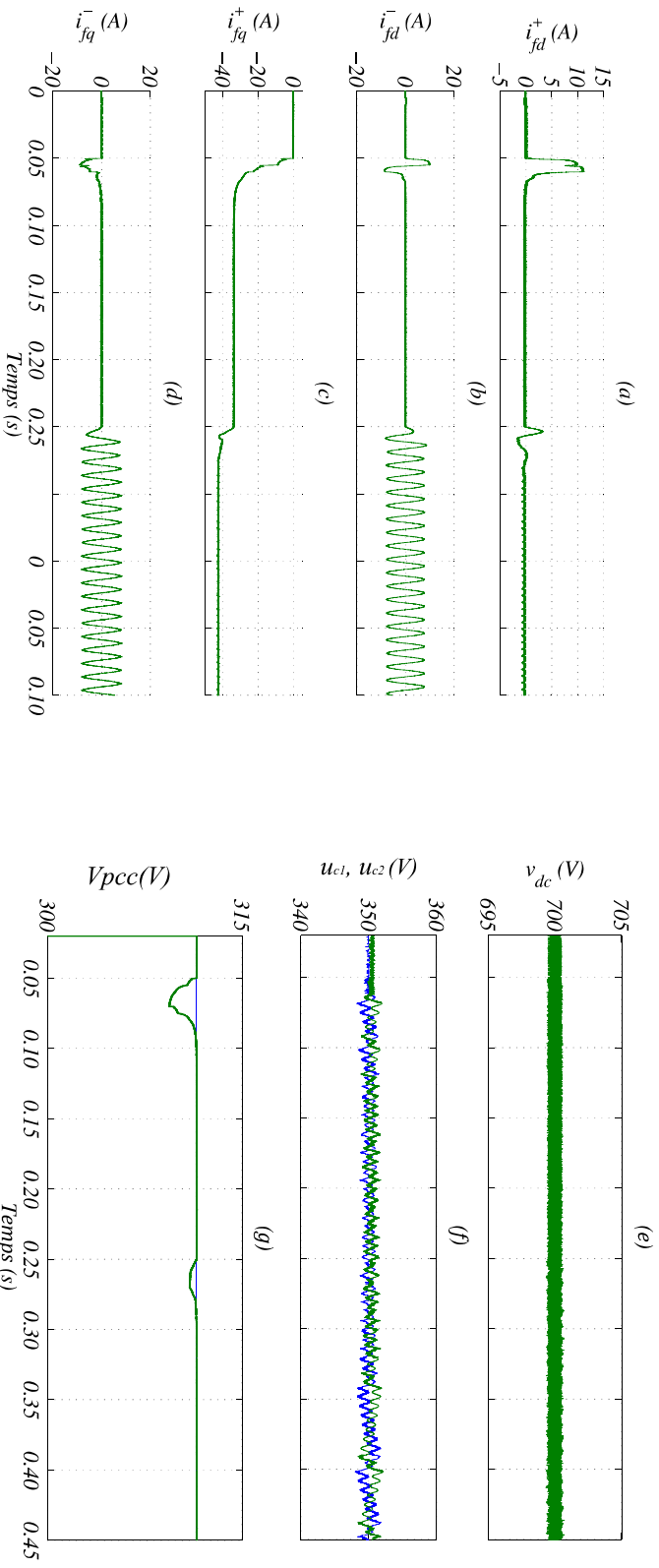


Figure 5.26: Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'alimentation d'une charge équilibrée et déséquilibrée, (cas de commande par mode glissant du premier ordre) : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu, (f) les tensions des condensateurs du bus continu, (g) tension du bus PCC.

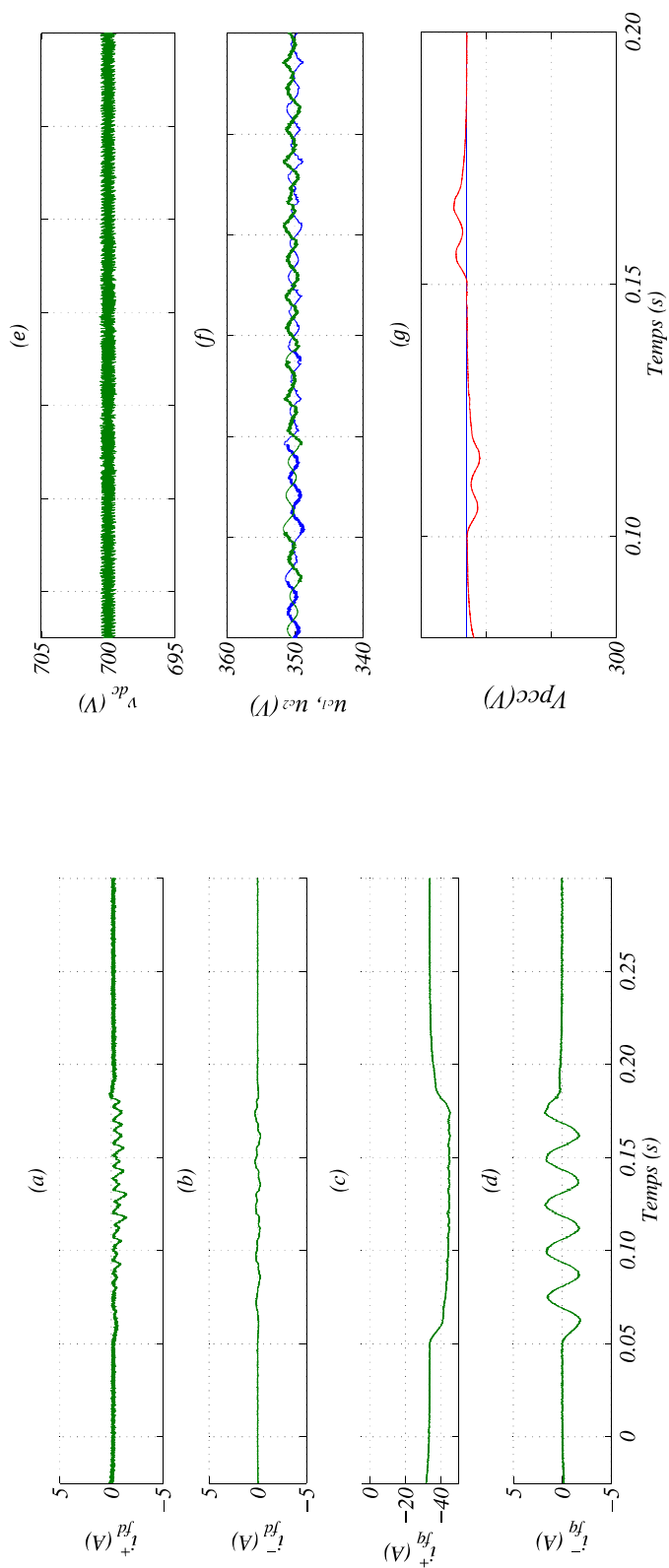


Figure 5.27: Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'échange d'énergie active et réactive, (cas de commande par mode glissant du premier ordre) : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+) (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu, (f) tensions des condensateurs de bus continu, (g) tensions du bus PCC.

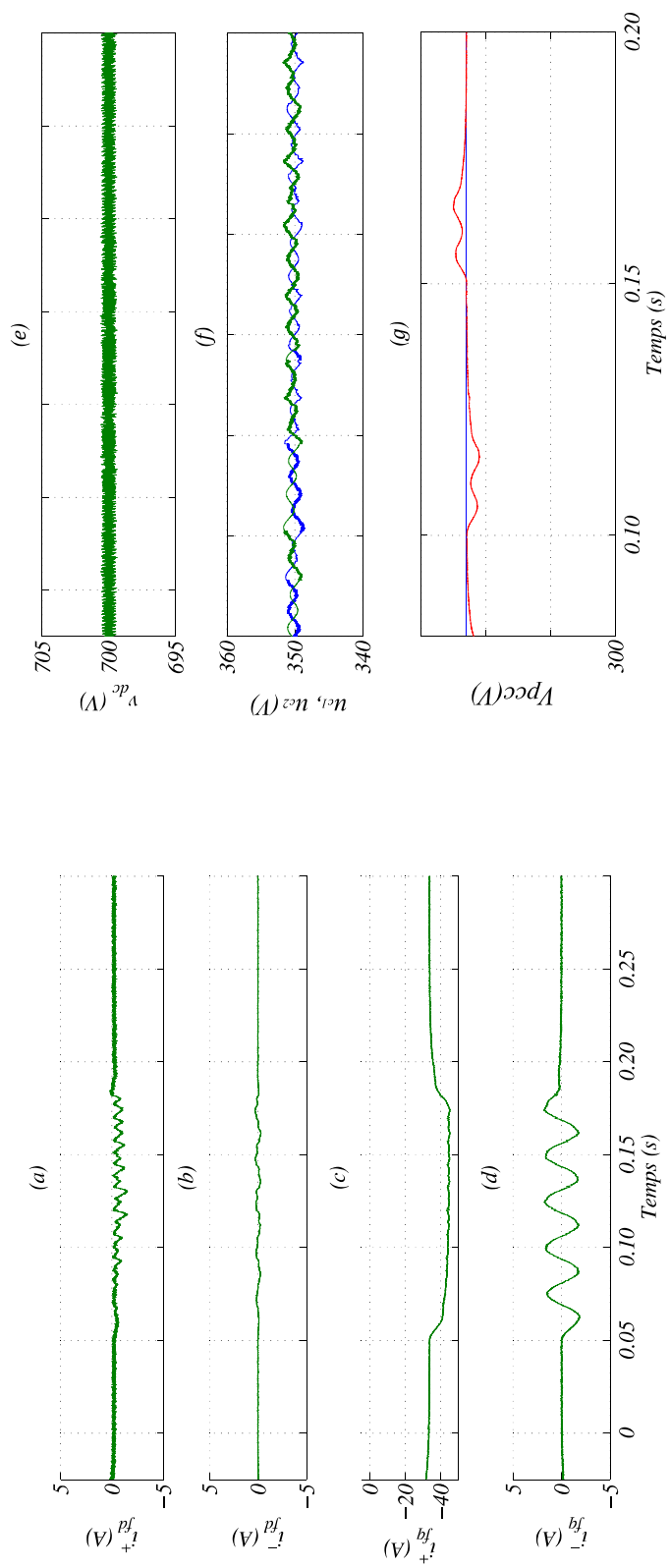


Figure 5.28: Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension durant défaut, (cas de commande par mode glissant du premier ordre), (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu, (f) tensions des condensateurs du bus continu, (g) tensions du bus PCC

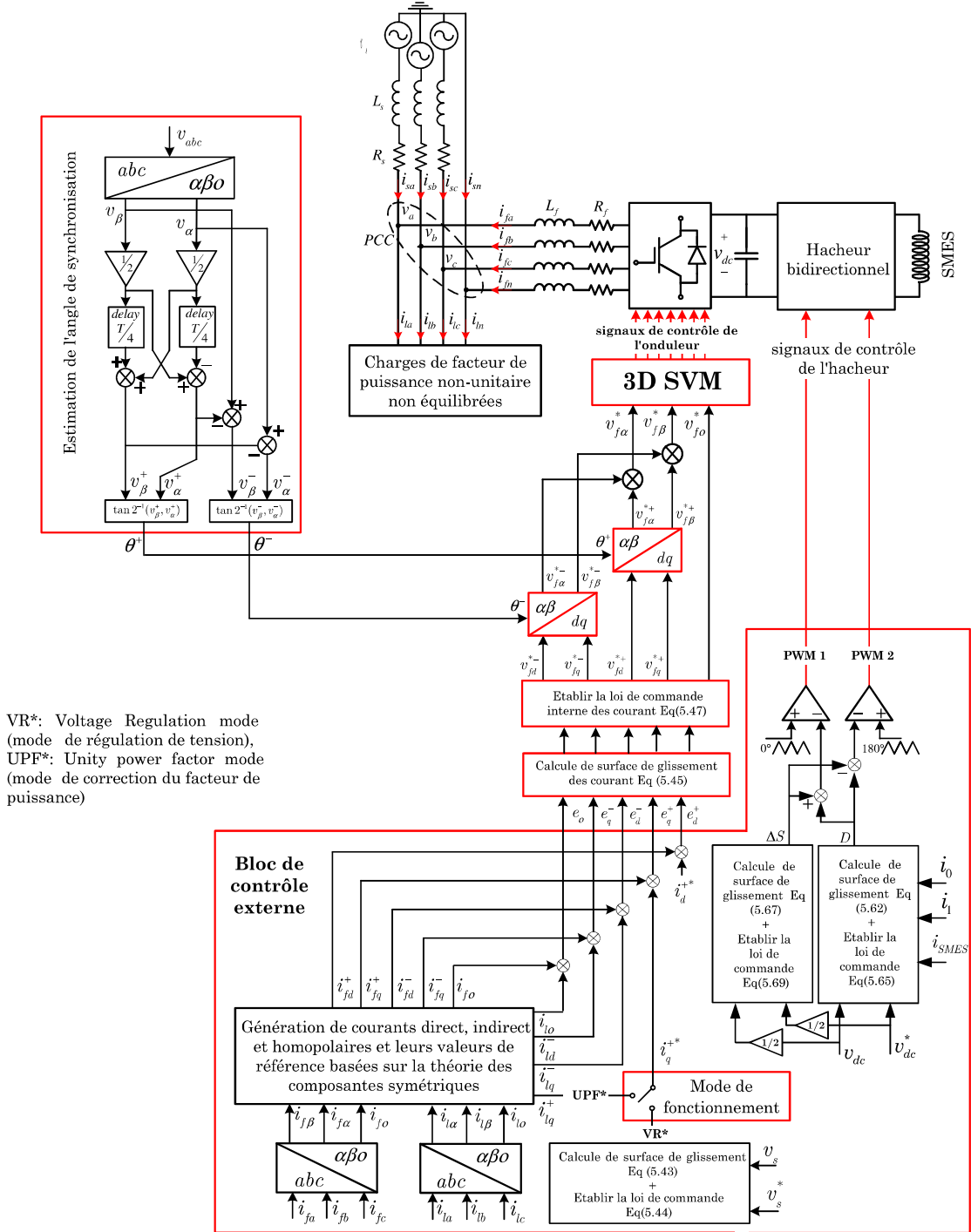


Figure 5.29: Commande par mode glissant du seconde ordre d'un DSTATCOM-SMES quatre bras à trois niveaux

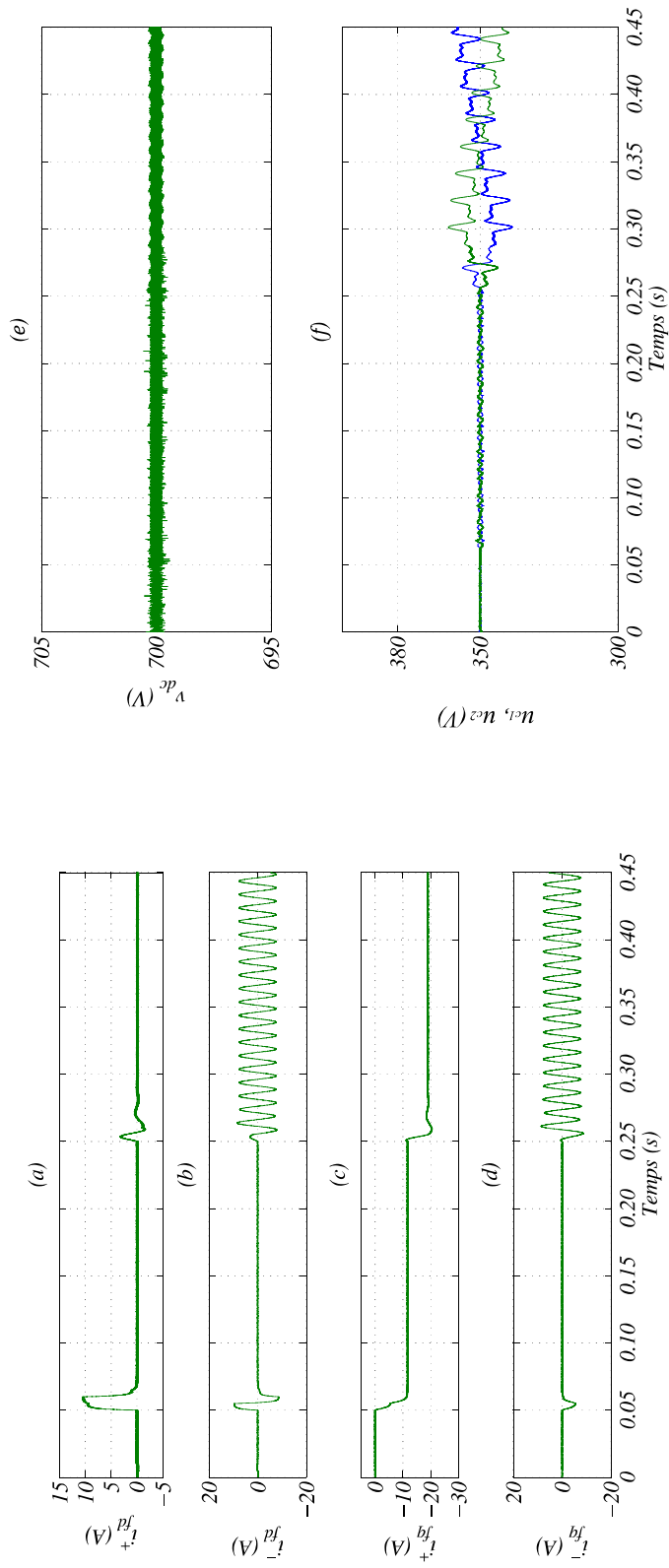


Figure 5.30: Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'alimentation d'une charge équilibré et déséquilibré, (cas de commande par mode glissant du second ordre) : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu, (f) les tensions des condensateurs du bus continu.

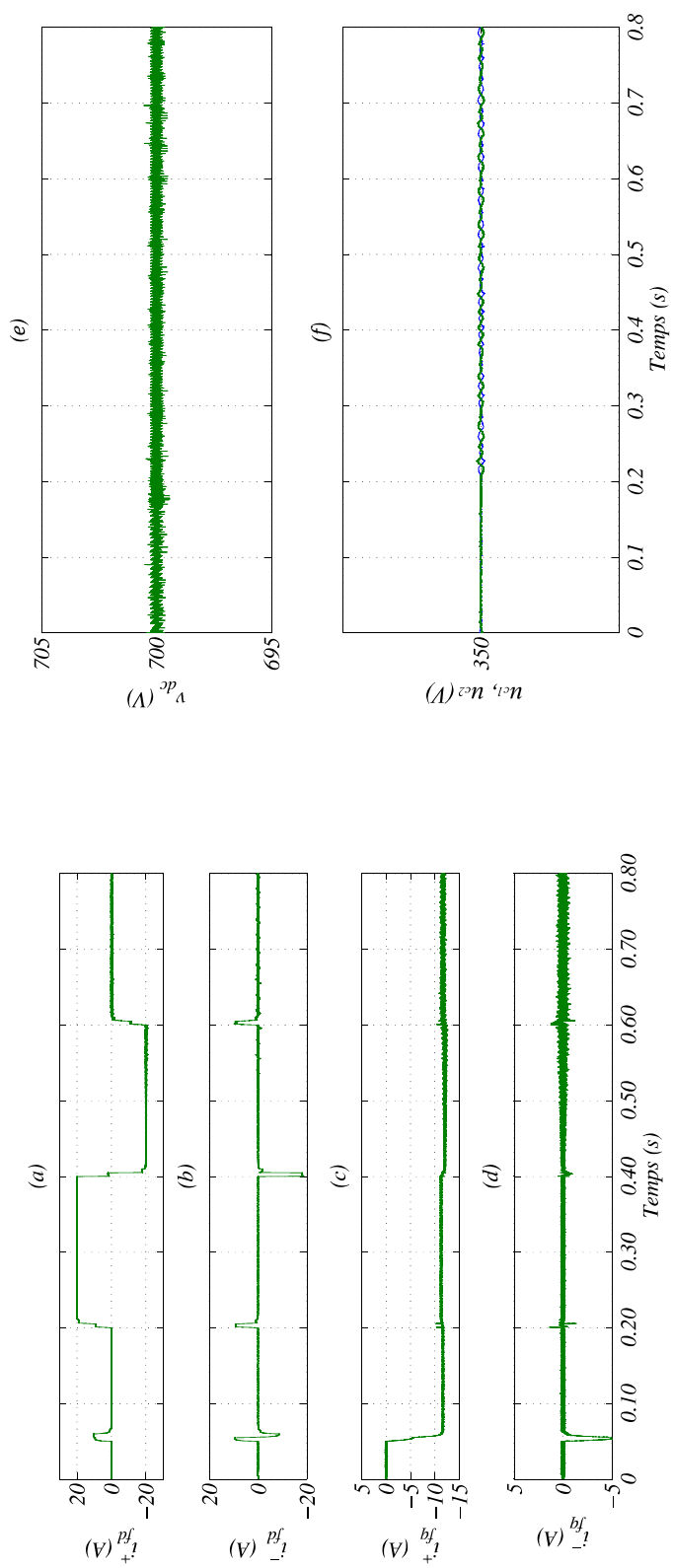


Figure 5.31: Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance lors d'échange d'énergie active et réactive, (cas de commande par mode glissant du second ordre) : (a) composante directe de courant active (i_{fd}^+) (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension de bus continu, (f) les tensions des condensateurs de bus continu.

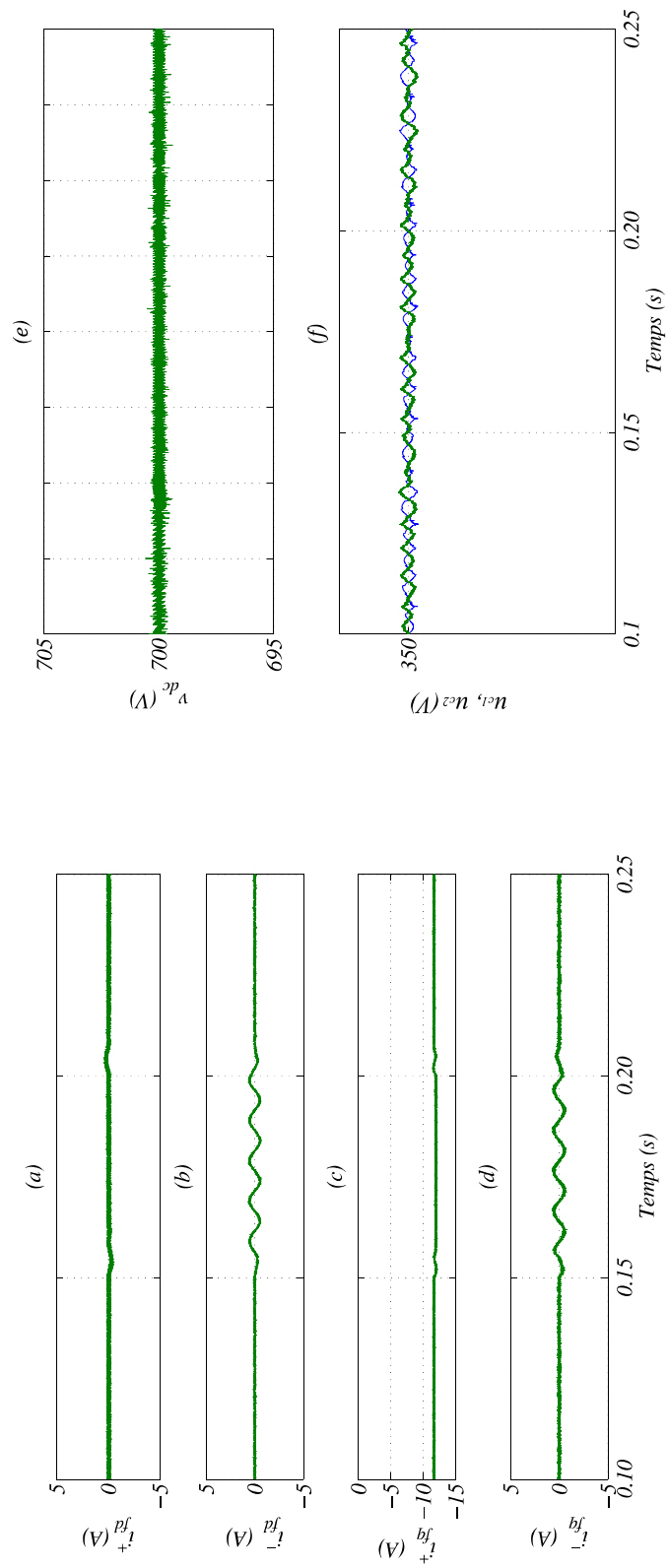


Figure 5.32: Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de correction du facteur de puissance durant défaut, (cas de commande par mode glissant du seconde ordre) : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+) (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu, (f) les tensions des condensateurs du bus continu

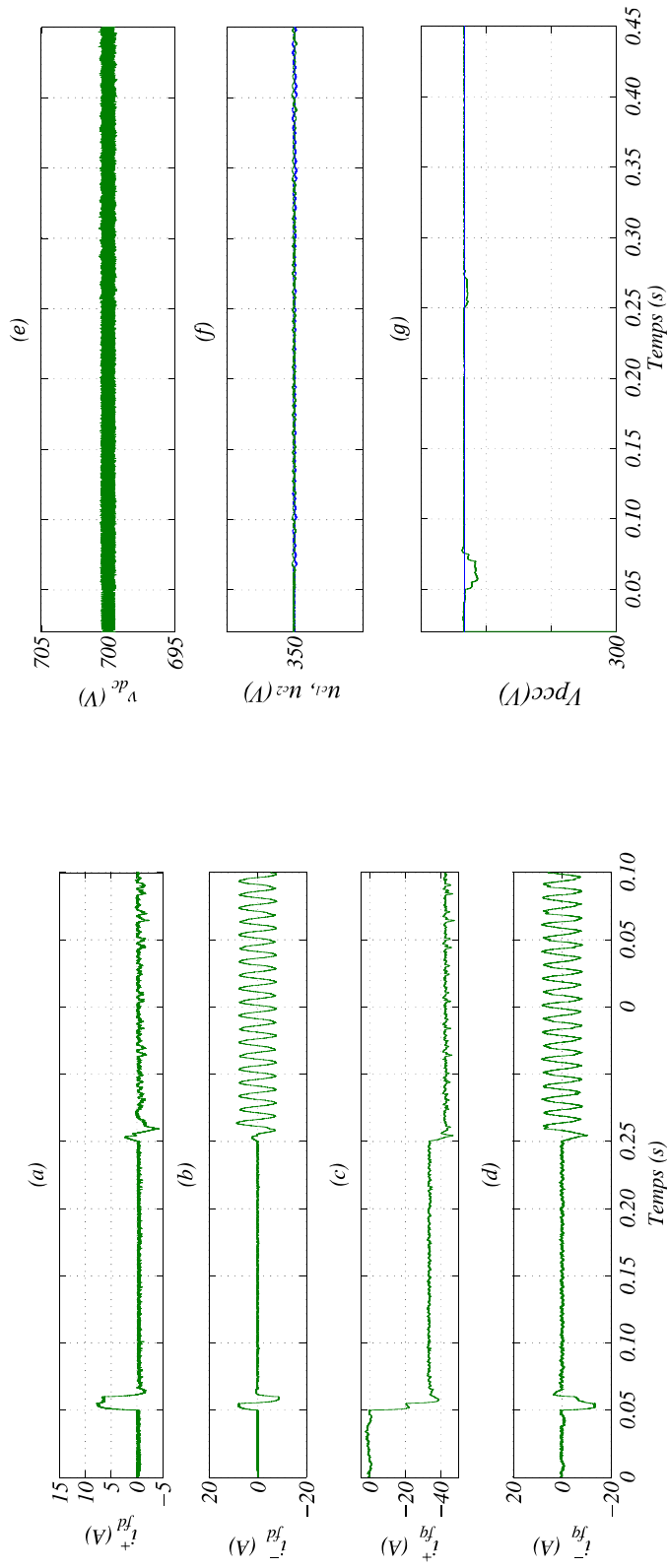


Figure 5.33: Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'alimentation d'une charge équilibrée et déséquilibrée, (cas de commande par mode glissant du second ordre) : (a) composante directe de courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte de courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu, (f) les tensions des condensateurs du bus continu, (g) tensions du bus PCC

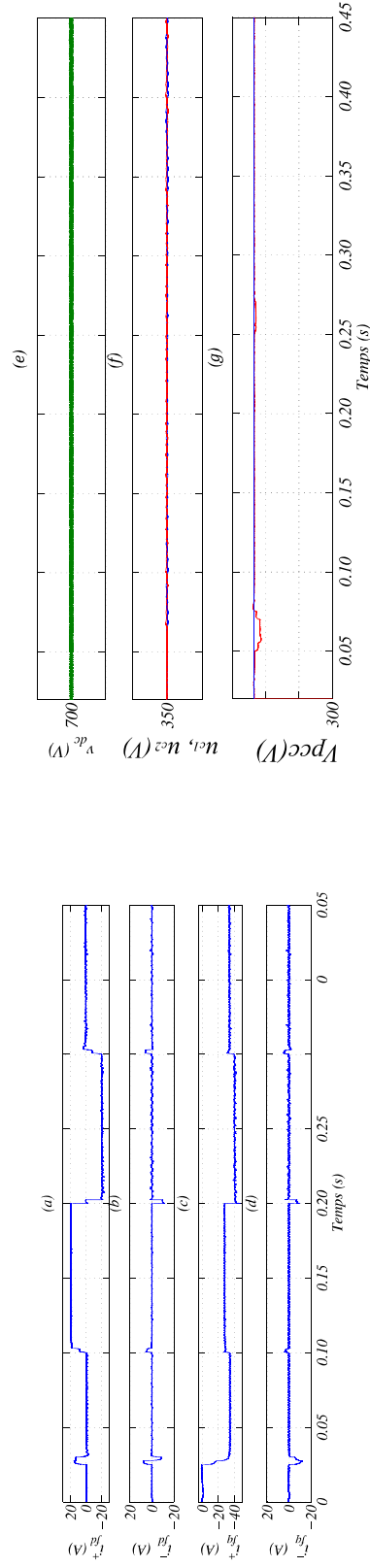


Figure 5.34: Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension lors d'échange d'énergie active et réactive, (cas de commande par mode glissant du second ordre) : (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+) (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fd}^+), (d) composante indirecte de courant réactif (i_{fd}^-), (e) tension du bus continu, (f) tensions des condensateurs du bus continu, (g) tensions du bus PCC

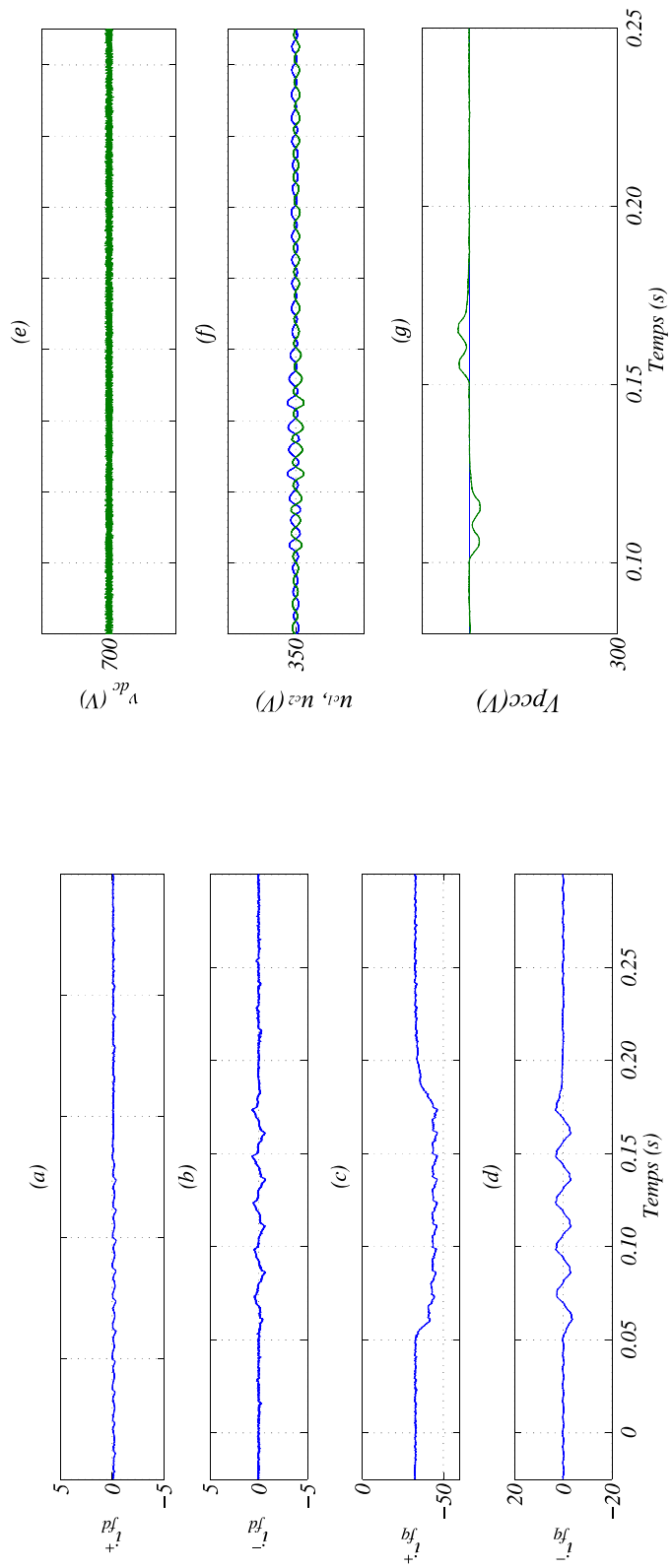


Figure 5.35: Comportement dynamique du DSTATCOM-SMES fonctionnant en mode de régulation de tension durant défaut, (cas de commande par mode glissant du second ordre), (a) composante directe du courant actif (i_{fd}^+), (b) composante indirecte du courant actif (i_{fd}^-), (c) composante directe du courant réactif (i_{fq}^+), (d) composante indirecte du courant réactif (i_{fq}^-), (e) tension du bus continu, (f) tensions des condensateurs du bus continu, (g) tensions du bus PCC

5.9 Étude comparative entre les différentes méthodes de commande

En se basant sur les résultats de simulations obtenus, il nous est apparu nécessaire de procéder à une comparaison globale entre les régulateurs PI, la commande par mode glissant du premier ordre, et du second ordre. La comparaison est réalisée pour les deux modes de fonctionnement sous des charges équilibrées, déséquilibrées et pendant un défaut asymétrique dans le réseau. L'étude comparative est présentée dans le Tableau (5.1) ainsi que par les figures 5.36, 5.37, et 5.38. Lors de cette étude, les critères visés sont :

- Poursuite de la référence ;
- Découplage ;
- Temps de réponse et la qualité du courant ;
- Performance durant les défauts ;
- Performance en cas d'alimentation des charges déséquilibrée.

Les données du tableau 5.1 et les figures 5. 36 à 5.38 montrent que les trois stratégies de contrôle garantissent un facteur de puissance unitaire, une régulation de la tension PCC et une régulation de la tension du bus continu intermédiaire. Comparé aux commandes par mode glissant de premier ordre et au contrôleur PI, la stratégie de commande par mode glissant du second ordre montre une supériorité en termes de dépassement, d'erreur statique, de temps de réponse et de valeurs du THD des courants de la source.

Les résultats montrent également que la commande par mode glissant du premier ordre provoque en plus d'une erreur statique qu'avec un contrôleur PI classique en raison de la conception du contrôleur basée sur les fonctions discontinues. Dans le cas d'une charge déséquilibrée, la commande par mode glissant du second ordre présente une bonne performance pour la régulation des composantes des courants inverse et homopolaire avec une faible oscillation de la tension du circuit continu intermédiaire par rapport au mode glissant de premier ordre et au régulateur PI.

Dans le cas de défaut asymétrique, tous les contrôleurs présentent de bonnes performances pour maintenir un courant et une tension équilibrées dans le bus PCC en régulant les composantes inverse et homopolaire. La supériorité de la commande par mode glissant du second ordre comparé à la commande par mode glissant du premier ordre et le contrôleur PI est due à sa capacité d'atteindre l'état d'équilibre très rapidement après avoir éliminé le défaut. De plus, en cas de défaut asymétrique, l'oscillation de la tension du bus continu est réduite de 95% par rapport au régulateur PI, ce qui explique la faible valeur du THD et la valeur élevée du facteur de puissance.

Table 5.1: Étude comparative entre les trois contrôleurs du système DSTATCOM-SMES (commande par mode glissant du premier ordre : CMGPO, commande par mode glissant du seconde ordre :CMGSO)

Paramètre de comparaison		Algorithme de commande		
		PI	CMGPO	CMGSO
Charge inductive équilibrée	Tension du bus continu	Dépassement	2.25%	1.75%
		Erreur statique	0.5 V	0.8 V
		Temps de réponse	100 ms	50ms
	THD (%)	i_{sa}	0.78	0.56
		i_{sb}	0.78	0.55
		i_{sc}	0.81	0.54
	Valeur efficace (A)	i_{sa}	14.49	14.33
		i_{sb}	14.49	14.35
		i_{sc}	14.46	14.32
	Tension du bus PCC (en mode VR)	Dépassement	3.22	1.27
		Erreur statique	0.5V	1.0V
		Temps de réponse	105ms	55ms
	Facteur de puissance (en mode UPF)		0.99	1.0
Charge inductive déséquilibrée	Oscillation maximale de la tension continue		5.30V	4.0V
	Oscillation maximale des tensions de condensateurs		7.8V	5.4V
	Pic de composant indirect de courant de source		1.52A	1.10A
	Pic de composant homopolaire de courant de source		0.15A	0.13A
	THD (%)	i_{sa}	2.93	2.81
		i_{sb}	2.45	2.64
		i_{sc}	3.00	2.95
	Tension du bus PCC (en mode VR)	Dépassement	0.82	0.60
		Erreur statique	0.4V	0.8V
		Temps de réponse	70ms	50ms
	Facteur de puissance (en mode UPF)		0.99	0.99
Cas d'un défaut	Chute de la tension continue maximale		16V	9V
	Chute des tensions des condensateurs maximale		8V	4.5V
	Pic de la composante indirecte du courant de la source		0.16A	0.11A
	Pic de la composante homopolaire du courant de la source		0.15A	0.13A
	THD (%)	i_{sa}	4.61	5.30
		i_{sb}	3.49	4.98
		i_{sc}	3.78	5.74
	Facteur de puissance		0.30	0.70

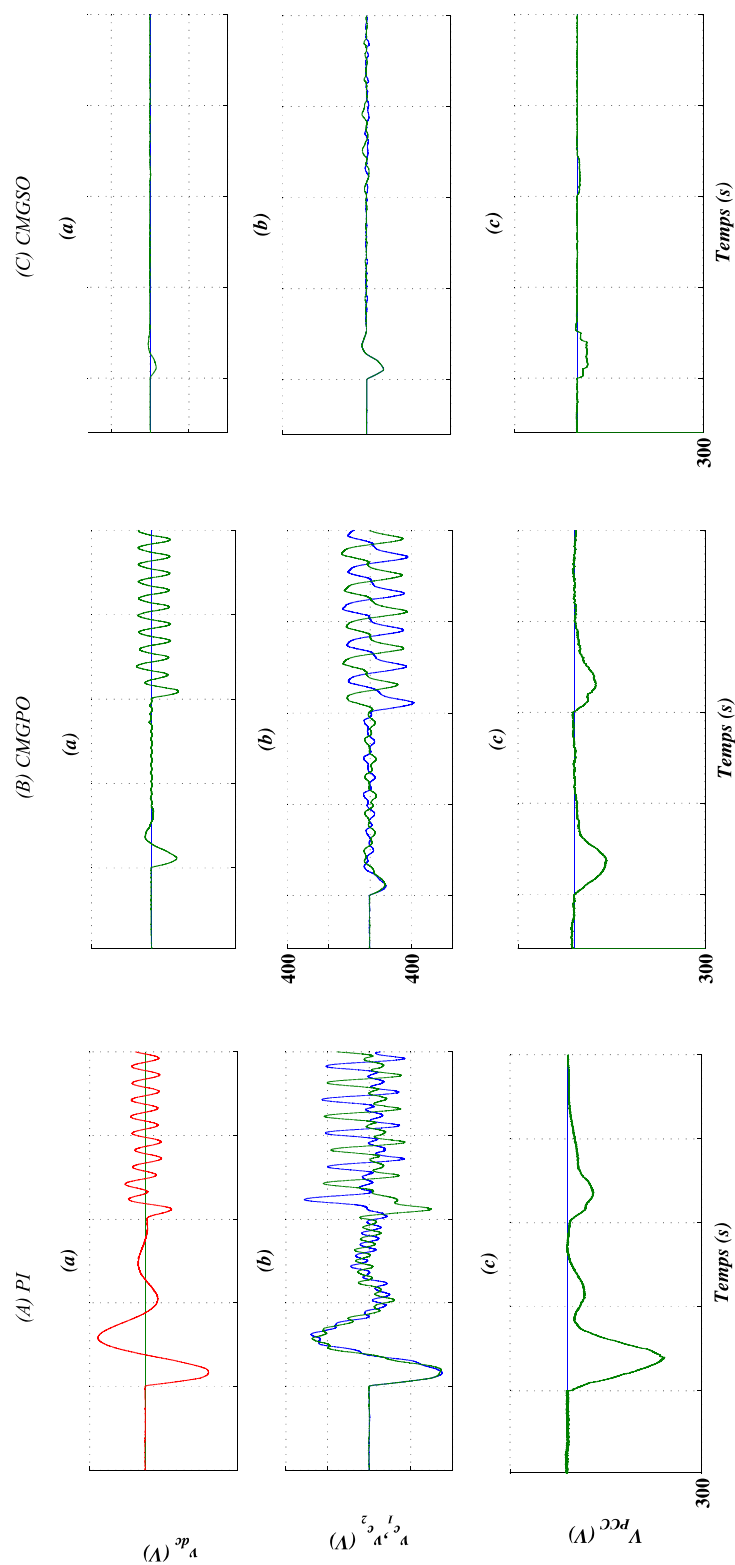


Figure 5.36: Étude comparative entre les régulateurs PI, la commande par mode glissant du premier ordre (CMGPO), et du second ordre (CMGSO) en cas d'alimentation des charge équilibrée et déséquilibrée : (a) tension du bus continu, (b) tension des condensateurs de bus continu, (c) tension du bus PCC

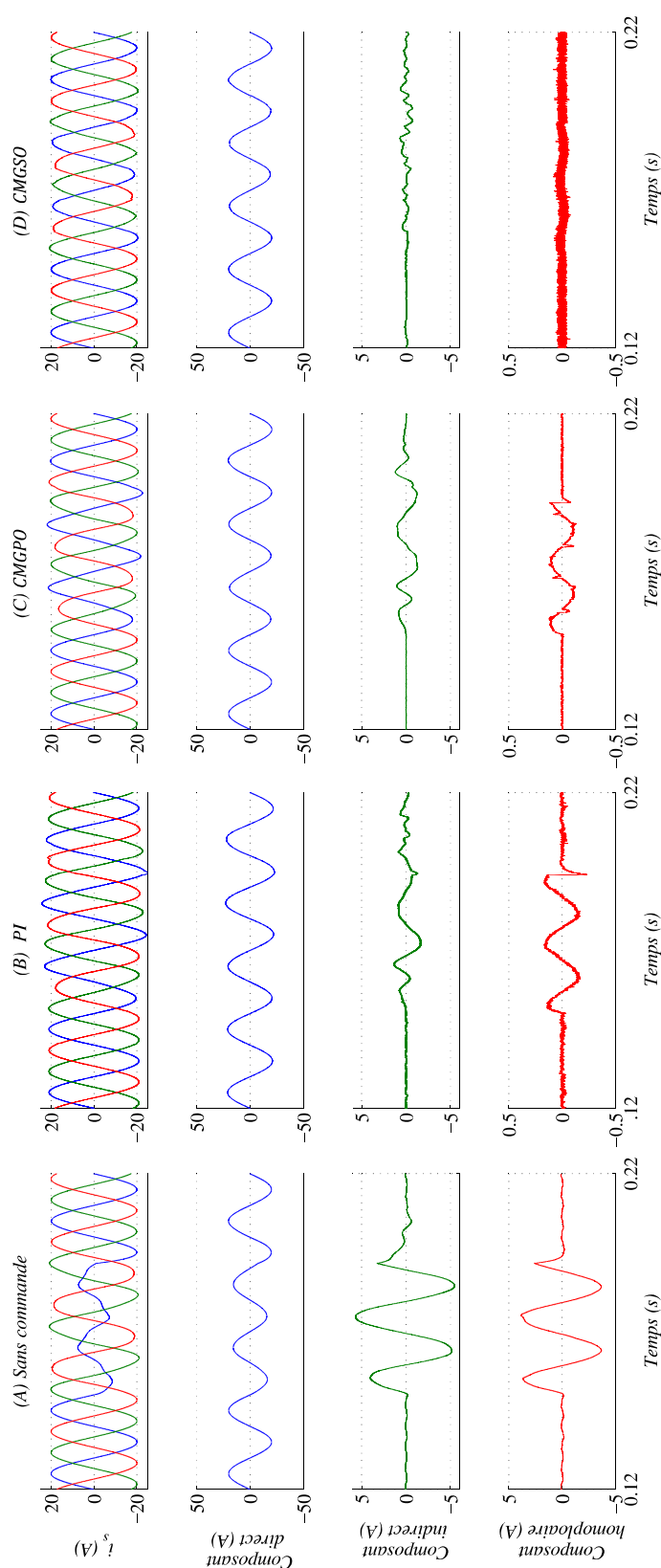


Figure 5.37: Étude comparative entre les régulateurs PI, la commande par mode glissant du premier ordre (CMGPO), et du second ordre (CMGSO) en cas d'un défaut (a) courant triphasé de source, (b) composante directe du courant de source, (c) composante indirecte du courant de source, (d) composante homopolaire du courant de source.

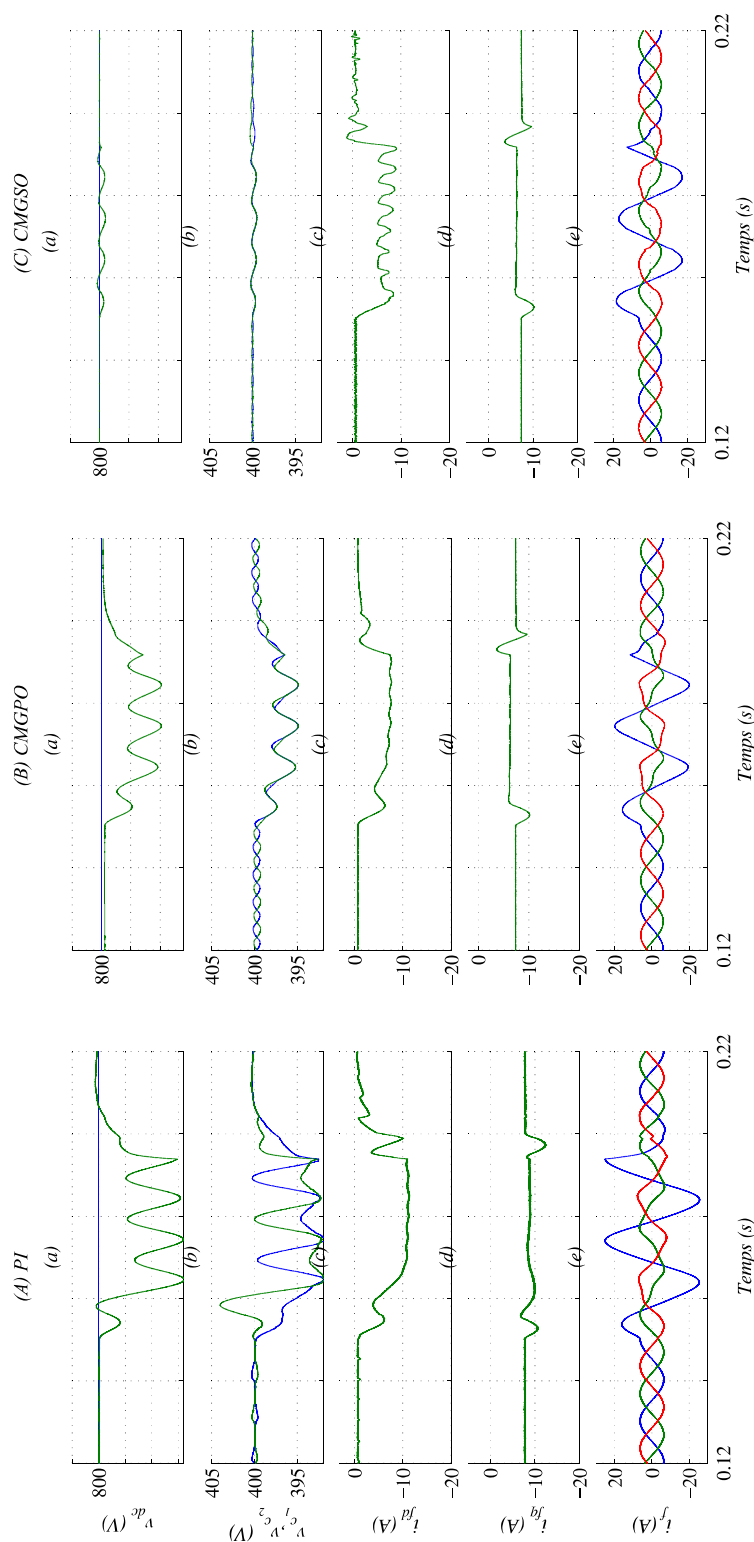


Figure 5.38: Étude comparative entre les régulateurs PI, la commande par mode glissant du premier ordre (CMGPO), et du second ordre (CMGSO) en présence d'un défaut : (a) tension du bus continu, (b) tensions des condensateurs du bus continu, (c) composante directe du courant actif, (d) composant direct du courant réactif, (e) courant triphasé

5.10 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'appliquer deux stratégies de commande par mode glissant de premier ordre et de second ordre à un DSTATCOM quatre bras trois niveaux seul puis couplé à un SMES et alimentant des charges tantôt équilibrés tantôt déséquilibrées à travers un système de distribution quatre fils. La stratégie de commande par mode glissant de second ordre proposée est basée sur un algorithme Super-Twisting. Sa conception est réalisée dans le repère synchrone en utilisant la théorie des composantes symétriques.

En vu d'examiner les performances des commandes proposées, différents tests ont été effectués par simulation. Ceci nous a permis de constater que les deux commandes par mode glissant étaient nettement meilleures que celle obtenue par la méthode classique (PI). En outre, dans le cas de charge déséquilibrée ou d'un défaut asymétrique, les stratégies de commande proposées ont prouvés leur capacité à réguler les composantes inverse et homopolaire du courant perturbé.

Enfin, une étude comparative entre les différentes commandes a été établie. Les résultats obtenus montrent de bonnes performances de la commande par mode glissant de second ordre par rapport à celle du premier ordre ainsi que du contrôleur PI conventionnel. Cette supériorité est observée dans les modes de régulation de tension ainsi que dans la correction du facteur de puissance.

Conclusion générale

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'intégration d'un dispositif DSTATCOM/SMES à un système de distribution quatre fils afin d'améliorer la qualité d'énergie. Le travail porte sur la commande non linéaire basé sur le mode glissant d'un DSTATCOM quatre bras à trois niveaux et couplé à l'unité de stockage d'énergie supraconductrice. L'objectif principal étant d'une part de compenser la puissance réactive consommée par la charge afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire ou pour la régulation de la tension au point PCC et d'autre part d'assurer un control indépendant de la puissance active et réactive dans le cas d'équilibre et de déséquilibre de la charge.

Pour cela, dans un premier temps, on a présenté les systèmes de distribution triphasés à quatre fils et ses problèmes liés à la qualité d'énergie, y compris la variation de l'amplitude de tension, de fréquence, problème d'harmonique et le déséquilibre des tensions et des courants. Ces problèmes présentent des inconvénients importants qui peuvent conduire jusqu'à la destruction totale des équipements électriques.

Afin d'éliminer ou de réduire les effets de la plupart de ces problèmes, différentes techniques et solutions ont été discutés, tel que : les filtres classiques, les machines synchrones, les solutions basées sur les transformateurs, les filtres actifs triphasés et les systèmes FACTS. De la bibliographie, on a constaté que les FACTS sont considérés parmi les solutions les plus efficaces pour atténuer les perturbations dans les systèmes de distribution triphasée à quatre fils. La deuxième partie a été consacrée à l'analyse des systèmes triphasés déséquilibrés sur la base de la théorie des composantes symétriques dans le repère abc et dqo .

Suite à cela, nous avons abordé dans la première partie du deuxième chapitre une analyse sur les dispositifs FACTS en présentant deux types de classifications, l'une basée sur la technologie de l'électronique de puissance, l'autre basée sur la configuration de connexion au réseau. Ensuite on a présenté le principe de fonctionnement du DSTATCOM, ses applications dans le système d'alimentation pour finir avec une comparaison avec le SVC.

La deuxième partie a été consacrée aux périphériques de stockage d'énergie pour les systèmes FACTS. Par comparaison à d'autres dispositifs de stockage d'énergie, les dispositifs basés sur les unités de stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES) présentaient plus d'avantages à savoir : un rendement élevé, un temps de réponse très rapide et une décharge rapide. C'est dans ce cadre que le SMES a été choisi dans notre travail pour le coupler avec le DSTATCOM.

Après avoir présenté les différentes topologies de DSTATCOM pour les systèmes de distribution triphasés quatre fils, on a opté pour une topologie basée sur les convertisseurs

de tension quatre bras trois niveaux. Pour son contrôle, nous avons appliqué la technique de la modulation tridimensionnelle (3DSVM) simplifié basé sur l'utilisation de deux secteurs au lieu de six, ainsi que quelque tétraèdre au lieu de tous les tétraèdres.

Cette technique a l'avantage d'équilibrer les tensions des condensateurs du bus continu, en utilisant états redondants appropriés qui peuvent jouer un rôle dans la minimisation de la fonction coût. À travers les résultats de simulations, le système de commande du DSTATCOM proposé montre une capacité de compenser les composantes directe, inverse et homopolaire du courant aussi bien en mode de correction de facteur de puissance qu'en mode de régulation de tension.

En quatrième chapitre, on a proposé l'ensemble DSTATCOM/SMES comme un compensateur d'énergie réactive plus de l'énergie active. Le SMES est considéré comme une unité de stockage d'énergie et un contrôleur le flux de puissance active via un hacheur bidirectionnel. La technique de stabilisation des tensions des condensateurs du bus continu intermédiaire dans ce cas a été effectuée en utilisant la stratégie de commutation du hacheur trois niveaux bidirectionnel. Cette dernière n'a pas besoin d'un circuit supplémentaire, mais seulement d'une boucle de contrôle d'équilibrage de tension combinée au système de contrôle principal. A partir des résultats de simulation, il en découle le bon fonctionnement de la stratégie proposée ainsi que l'avantage d'assurer un contrôle indépendant d'énergie active et réactive et ce dans les deux modes fonctionnement et quelque soit la condition d'équilibre ou de déséquilibre

Pour de meilleurs performances de notre système, deux approches non linéaires de commande à base de mode glissant ont été proposés en cinquième chapitre. Après un état d'art sur les commandes nonlinéaires proposées et leurs applications sur les DSTATCOM et SMES, la commande par mode glissant du premier ordre et du second ordre à base de l'algorithme du Super Twisting ont été sélectionnés. En effet, le Super Twisting n'utilise pas d'informations sur la surface de glissement et ceci peut être vu comme un avantage. En plus, il n'est pas sensible au temps d'échantillonnage.

Finalement, une comparaison a été réalisée entre les trois commandes adoptées en terme de : poursuite de la référence, de découplage, de temps de réponse, de qualité de courant et performance durant les défauts et en cas d'existence de charges déséquilibrées. Les résultats de simulations ont montrés une amélioration considérable dans les performances de notre système.

Comme perspectives, Il y a plusieurs sujets qui pourraient être approfondis dans l'utilisation de DSTATCOM/SMES. Certains d'entre eux sont :

- Intégration de DSTATCOM/SMES dans les systèmes d'énergie renouvelables (micro-grid par exemple) afin d'améliorer la qualité de l'énergie générée par la minimisation des fluctuations dans tels sources.

- Utilisation d'autres méthodes de commandes non linéaires.
- Implémentation expérimentale des algorithmes de commande.
- Etude de la robustesse du système vis à vis des incertitudes dynamiques et paramétriques.

Échange d'états de commutation entre les secteurs

Table A.1: Identification du prisme dans chaque secteur

Prisme	I_1	I_2	Condition
1	1	0	-
2	0	0	si $U_1^{*N} + U_2^{*N} \geq 0$
3	0	1	-
4	0	0	si $U_1^{*N} + U_2^{*N} < 0$

Table A.2: Échange d'états de commutation dans les secteurs paires.

Secteur 1	Secteur 3	Secteur 5
a	$a \rightarrow b$	$a \rightarrow c$
b	$b \rightarrow c$	$b \rightarrow a$
c	$c \rightarrow a$	$c \rightarrow b$
n	$n \rightarrow n$	$n \rightarrow n$

Table A.3: Échange d'états de commutation dans les secteurs impairs.

Secteur 1	Secteur 3	Secteur 5
a	$a \rightarrow b$	$a \rightarrow c$
b	$b \rightarrow c$	$b \rightarrow a$
c	$c \rightarrow a$	$c \rightarrow b$
n	$n \rightarrow n$	$n \rightarrow n$

Table A.4: Échange d'états de commutation de chaque tétraèdre dans chaque prisme du secteur 1

$$TeT_m^{S,P}(S=1)(P=1, 2, 3, 4)(m=1, 2, \dots, 9, 10)$$

Prisme 1		Prisme 3		Prisme 4	
$TeT_1^{1,1}$	$TeT_2^{1,1}$	$TeT_1^{1,3}$	$TeT_2^{1,3}$	$TeT_3^{1,4}$	$TeT_8^{1,4}$
a	$a \rightarrow a$	a	$a \rightarrow a$	a	$a \rightarrow n$
b	$b \rightarrow c$	b	$b \rightarrow b$	b	$b \rightarrow a$
c	$c \rightarrow n$	c	$c \rightarrow n$	c	$c \rightarrow b$
n	$n \rightarrow c$	n	$n \rightarrow c$	n	$n \rightarrow c$
$TeT_6^{1,1}$		$TeT_5^{1,1}$	$TeT_7^{1,1}$	$TeT_4^{1,4}$	$TeT_9^{1,4}$
a	$a \rightarrow n$	$a \rightarrow a$	$a \rightarrow n$	a	$a \rightarrow a$
b	$b \rightarrow b$	$b \rightarrow n$	$b \rightarrow a$	b	$b \rightarrow n$
c	$c \rightarrow c$	$c \rightarrow c$	$c \rightarrow c$	c	$c \rightarrow b$
n	$n \rightarrow a$	$n \rightarrow b$	$n \rightarrow b$	n	$n \rightarrow c$
aucune correspondance entre : $TeT_4^{1,1}$ et $TeT_5^{1,1}$		aucune correspondance entre : $TeT_3^{1,3}$ et $TeT_4^{1,3}$		aucune correspondance entre : $TeT_1^{1,4}, TeT_2^{1,4}, TeT_9^{1,4}$ et $TeT_{10}^{1,4}$	
Prisme 2					
$TeT_1^{1,2}$	$TeT_8^{1,2}$	$TeT_2^{1,2}$	$TeT_3^{1,2}$	$TeT_5^{1,2}$	$TeT_7^{1,2}$
a	$a \rightarrow n$	a	$a \rightarrow a$	$a \rightarrow a$	$a \rightarrow n$
b	$b \rightarrow a$	b	$b \rightarrow b$	$b \rightarrow n$	$b \rightarrow b$
c	$c \rightarrow b$	c	$c \rightarrow n$	$c \rightarrow c$	$c \rightarrow c$
n	$n \rightarrow c$	n	$n \rightarrow c$	$n \rightarrow b$	$n \rightarrow a$

Table A.5: Échange d'états de commutation de chaque tétraèdre dans chaque prisme du secteur 2

$$TeT_m^{S,P}(S=1)(P=1, 2, 3, 4)(m=1, 2, \dots, 9, 10)$$

Prisme 1		Prisme 3		Prisme 4	
$TeT_1^{2,1}$	$TeT_2^{2,1}$	$TeT_1^{2,3}$	$TeT_2^{2,3}$	$TeT_3^{2,4}$	$TeT_8^{2,4}$
a	$a \rightarrow a$	a	$a \rightarrow a$	a	$a \rightarrow b$
b	$b \rightarrow b$	b	$b \rightarrow b$	b	$b \rightarrow n$
c	$c \rightarrow n$	c	$c \rightarrow n$	c	$c \rightarrow a$
n	$n \rightarrow c$	n	$n \rightarrow c$	n	$n \rightarrow c$
aucune correspondance entre : $TeT_4^{2,1}$ et $TeT_3^{2,1}$		aucune correspondance entre : $TeT_5^{2,3}$ et $TeT_4^{2,3}$		aucune correspondance entre : $TeT_1^{2,4}$, $TeT_2^{2,4}$, $TeT_9^{2,4}$ et $TeT_{10}^{2,4}$	
$TeT_5^{2,1}$	$TeT_6^{2,1}$	$TeT_6^{1,1}$	$TeT_7^{1,1}$	$TeT_4^{2,4}$	$TeT_7^{2,4}$
a	$a \rightarrow a$	a	$a \rightarrow a$	a	$a \rightarrow b$
b	$b \rightarrow c$	b	$b \rightarrow n$	b	$b \rightarrow n$
c	$c \rightarrow n$	c	$c \rightarrow c$	c	$c \rightarrow a$
n	$n \rightarrow c$	n	$n \rightarrow b$	n	$n \rightarrow c$
Prisme 2					
$TeT_2^{2,2}$	$TeT_3^{2,2}$	$TeT_4^{2,2}$	$TeT_5^{2,2}$	$TeT_7^{2,2}$	$TeT_8^{2,2}$
a	$a \rightarrow a$	a	$a \rightarrow n$	$a \rightarrow a$	$a \rightarrow b$
b	$b \rightarrow b$	b	$b \rightarrow b$	$b \rightarrow n$	$b \rightarrow n$
c	$c \rightarrow c$	c	$c \rightarrow c$	$c \rightarrow c$	$c \rightarrow a$
n	$n \rightarrow n$	n	$n \rightarrow a$	$n \rightarrow b$	$n \rightarrow c$

Table A.6: Les surfaces de limitation de chaque tétraèdre dans les prismes 1 et 2 du secteur 1

$$TeT_m^{S,P}(S=1)(P=1,2)(m=1,2,...,9,10)$$

Secteur 01, Prisme 01			
	$TeT_1^{1,1}$	$TeT_2^{1,1}$	$TeT_3^{1,1}$
Surface 01	$-v_\alpha + \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$
Surface 02	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}v_{dc}$
	$TeT_5^{1,1}$	$TeT_6^{1,1}$	$TeT_7^{1,1}$
Surface 01	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}v_{dc}$
Surface 02	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-v_\alpha$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$
Secteur 01, Prisme 02			
	$TeT_1^{1,2}$	$TeT_2^{1,2}$	$TeT_3^{1,2}$
Surface 01	$-v_\alpha + \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$
Surface 02	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}v_{dc}$
	$TeT_5^{1,2}$	$TeT_6^{1,2}$	$TeT_7^{1,2}$
Surface 01	$-\frac{1}{2}v_\alpha - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}v_{dc}$
Surface 02	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-v_\alpha$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$

Table A.7: Les surfaces de limitation de chaque tétraèdre dans les prismes 3 et 4 du secteur 1

$$TeT_m^{S,P}(S=1)(P=3,4)(m=1,2,...,9,10)$$

Secteur 01, Prisme 03				
	$TeT_1^{1,3}$	$TeT_2^{1,3}$	$TeT_3^{1,3}$	$TeT_4^{1,3}$
Surface 01	$-v_\alpha + \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{8}v_\beta$
Surface 02	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{8}v_\beta$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$
	$TeT_5^{1,3}$			$TeT_7^{1,3}$
Surface 01	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$		$-v_\alpha$
Surface 02	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$-v_\alpha$		$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$

Secteur 01, Prisme 04				
	$TeT_1^{1,4}$	$TeT_2^{1,4}$	$TeT_3^{1,4}$	$TeT_4^{1,4}$
Surface 01	$-\frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$
Surface 02	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$
	$TeT_6^{1,4}$			$TeT_8^{1,4}$
Surface 01	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$-v_\alpha$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{8}v_{dc}$
Surface 02	$-v_\alpha$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$

Table A.8: Les surfaces de limitation du chaque tétraèdre dans les prismes 1 et 2 du secteur 02

$$TeT_m^{S,P}(S=2)(P=1,2)(m=1,2,...,9,10)$$

Secteur 02, Prisme 01			
	$TeT_1^{2,1}$	$TeT_2^{2,1}$	$TeT_4^{2,1}$
Surface 01	$-\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$-\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$
Surface 02	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$-\frac{1}{2}v_\alpha - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$
$TeT_7^{2,1}$			
Surface 01	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$	$-v_\alpha$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$
Surface 02	$-v_\alpha$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$
Secteur 02, Prisme 02			
	$TeT_1^{2,2}$	$TeT_2^{2,2}$	$TeT_4^{2,2}$
Surface 01	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\frac{1}{2}v_\alpha + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$
Surface 02	$-\frac{1}{2}v_\alpha + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-v_\alpha$
$TeT_5^{2,2}$			
Surface 01	$-v_\alpha$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\frac{1}{2}v_\alpha - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$
Surface 02	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$

Table A.9: Les surfaces de limitation de chaque tétraèdre dans les prismes 3 et 4 du secteur 02

$$TeT_m^{S,P}(S=2)(P=3,4)(m=1,2,...,9,10)$$

Secteur 02, Prisme 03			
	$TeT_1^{2,3}$	$TeT_2^{2,3}$	$TeT_3^{2,3}$
Surface 01	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$-\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$
Surface 02	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$-\frac{1}{2}v_\alpha$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$
	$TeT_5^{2,3}$		
Surface 01	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\frac{1}{2}v_\alpha - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$
Surface 02	$-\frac{1}{2}v_\alpha - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$
Secteur 02, Prisme 04			
	$TeT_1^{2,4}$	$TeT_2^{2,4}$	$TeT_3^{2,4}$
Surface 01	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$
Surface 02	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\frac{1}{2}v_\alpha + \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$
	$TeT_6^{2,4}$		
Surface 01	$-\frac{1}{2}v_\alpha$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$-\frac{1}{2}v_\alpha - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$
Surface 02	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta$	$\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \sqrt{\frac{3}{2}}v_{dc}$

Les paramètres des régulateurs

Table B.1: Les paramètres des régulateurs : PI, commande par mode glissant premier ordre et de seconde ordre

Régulateur	PI	Commande par mode du glissant premier ordre	Commande par mode glissant du seconde ordre
Régulateur de la tension du bus continu	$k_{pdc} = 2$	$k_{pdc} = 0.1$	$k_{dc} = 0.55$
	$k_{ide} = 100$	$k_{ide} = 25$	$a_{dc} = 50$
		$k_{ide} = 0.1$	$\beta_{dc} = 200$
Régulateur de la tension du bus PCC	$k_{pac} = 0.1$		$k_{vpcc} = 0.1$
	$k_{iac} = 300$	$k_{vpcc} = 150$	$a_{vpcc} = 1$
			$\beta_{vpcc} = 10$
Régulateur interne des courants	$k_{pd}^+ = k_{pq}^+ = 1 \times 10^3$	$k_{pd}^+ = 10$	$k_d^+ = 10$
	$k_{id}^+ = k_{iq}^+ = 1 \times 10^3$	$k_{pd}^- = 10$	$k_d^- = 1$
	$k_{pd}^- = k_{pq}^- = 0.5 \times 10^3$	$k_{pd}^+ = 0.5$	$a_d^- = 5 \times 10^3$
	$k_{id}^+ = k_{iq}^+ = 0.5 \times 10^3$	$k_{pd}^- = 0.5$	$\beta_d^- = 5 \times 10^3$
	$k_{id}^- = k_{iq}^- = 0.5 \times 10^3$	$k_{pq}^+ = 10$	$a_q^+ = 0.7 \times 10^3$
	$k_{pd}^+ = k_{pq}^+ = 0.5 \times 10^3$	$k_{pq}^- = 10$	$\beta_q^+ = 10 \times 10^3$
	$k_{id}^+ = k_{iq}^+ = 0.5 \times 10^3$	$k_{pq}^+ = 10$	$a_q^- = 3 \times 10^3$
	$k_{id}^- = k_{iq}^- = 0.5 \times 10^3$	$k_{pq}^- = 10$	$\beta_q^- = 3 \times 10^3$
	$k_{po} = k_{pro} = 0.8 \times 10^3$	$k_{io} = 10$	$\alpha_0 = 8 \times 10^3$
		$k_{io} = 0.3$	$\beta_0 = 10 \times 10^3$
Régulateur de la tension du bus continu	$k_{pac} = 10$, $k_{iac} = 500$	$k_{pdc} = 5$	$k_{dc} = 10$
	$k_{pdc} = 2$, $k_{ide} = 100$	$k_{ide} = 10$	$a_{dc} = 1000$
		$k_{ide} = 1$	$\beta_{dc} = 1000$
Régulateur de la tension du bus PCC	$k_{pac} = 0.1$		$k_{vpcc} = 0.1$
	$k_{iac} = 300$	$k_{vpcc} = 120$	$a_{vpcc} = 1$
			$\beta_{vpcc} = 10$
Régulateur interne des courants	$k_{pd}^+ = k_{pq}^+ = 1.5 \times 10^3$	$k_{pd}^+ = 10$	$k_d^+ = 10$
	$k_{id}^+ = k_{iq}^+ = 1.5 \times 10^3$	$k_{pd}^- = 10$	$k_d^- = 1$
	$k_{pd}^- = k_{pq}^- = 0.7 \times 10^3$	$k_{pd}^+ = 0.5$	$a_d^- = 5 \times 10^3$
	$k_{id}^+ = k_{iq}^+ = 0.7 \times 10^3$	$k_{pd}^- = 0.5$	$\beta_d^- = 5 \times 10^3$
	$k_{id}^- = k_{iq}^- = 0.7 \times 10^3$	$k_{pq}^+ = 10$	$a_q^+ = 0.7 \times 10^3$
	$k_{pd}^+ = k_{pq}^+ = 0.7 \times 10^3$	$k_{pq}^- = 10$	$\beta_q^+ = 10 \times 10^3$
	$k_{id}^+ = k_{iq}^+ = 0.7 \times 10^3$	$k_{pq}^+ = 10$	$a_q^- = 3 \times 10^3$
	$k_{id}^- = k_{iq}^- = 0.7 \times 10^3$	$k_{pq}^- = 10$	$\beta_q^- = 3 \times 10^3$
	$k_{po} = k_{pro} = 0.8 \times 10^3$	$k_{io} = 10$	$\alpha_0 = 8 \times 10^3$
		$k_{io} = 0.3$	$\beta_0 = 10 \times 10^3$

Bibliographie

- [1] C. R. Bayliss and B. J. Hardy, “Transmission and Distribution Electrical Engineering”. Elsevier, 2012.
- [2] W. H. Kersting, “Distribution System Modeling and Analysis”, CRC Press, 2002.
- [3] P. Ferracci, “La qualité de l’énergie électrique” , Schneider Electric, cahier technique N°. 199, Mai 2000.
- [4] Bouafia Saber, Benaissa Abdelkader, Bouzidi Mansour, Barkat Said, “Reactive power compensation in three-phase four-wire distribution system using four-leg DSATATCOM based on symmetrical components”, Electrical Engineering (ICEE), 4th International Conference on, 2015
- [5] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, “Harmonic elimination, reactive power compensation and load balancing in three-phase, four-wire electric distribution systems supplying non-linear loads,” Electr. Power Syst. Res., vol. 44, no. 2, pp. 93–100, Feb. 1998.
- [6] Sylvain GIRINON, “Étude de la Stabilité et de la Qualité des Réseaux Distribués de Puissance », thèse de Doctorat, Université De Toulouse, 2010.
- [7] D. Sreenivasarao, P. Agarwal, and B. Das, “Neutral current compensation in three-phase, four-wire systems: A review,” Electr. Power Syst. Res., vol. 86, pp. 170–180, May 2012.
- [8] Roland CALVAS, “Les perturbations électriques en BT », Schneider Electric, cahier technique n° 141, mai 2001
- [9] Wilfried Frelin, Impact de la pollution harmonique sur les matériels de réseau. Energie électrique. Université Paris Sud - Paris XI, 2009. Français.
- [10] Sami Ammari , Interaction des dispositifs FACTS avec les charges dynamiques dans les réseaux de transport et d'interconnexion Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2000.
- [11] IEEE Recommended Practice and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power systems. IEEE Std. 519-1996.
- [12] C.L.Fortescue newblock “Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks”, Trans. AIEE volume 37, pp. 1027–1140, 1918.
- [13] Lyon, W.V., "Transient Analysis of Alternating Current Machinery," John Wiley & Sons, New York, USA. 1954,
- [14] N. G. Hingorani and V. President, “High Power Electronics and Flexible AC Transmission System North American Electric Reliability Council News,” no. July, pp. 3–4, 1988.

- [15] Abdelaali Alibi, “Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS : (Flexible AC Transmission Systems)”, Mémoire de Magister, Université de Batna, Juin 2009.
- [16] X. P.Zhang, C. Rehtanz, and B. Pal, “ Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control”, Springer, 2012
- [17] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. Piscataway, NJ, IEEE Press, 2000.
- [18] 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.
- [19] Jean-Christophe Passelergue , Interactions des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques Thèse de Doctorat de Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1998.
- [20] Yvon Besanger, Etude des FACTS (Flexible AC Transmission System) et de leur comportement dans les réseaux de transport et d'interconnexion Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996.
- [21] Chebabhi Ali, “Contribution à la dépollution harmonique et à la compensation de l’énergie réactive par l’étude et la commande avancée de filtres actifs parallèles”, Thèse de Doctorat, université de Djilali Liabes, Sidi bel Abess Algérie 2015.
- [22] Mario-Alberto Rios, Modélisation pour Analyses Dynamiques des Réseaux Electriques avec Compensateurs de Puissance Réactive, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1998
- [23] Ali BOUZIDI, Mohammed BOUCHAREB, “ Commande par mode glissant floue d’un D-STATCOM multiniveaux”, Mémoire de Fin d’Etudes, Université de M’sila, 2011.
- [24] Q. Yu, P. Li, W. Liu, M. Ieee, and X. Xie, “Overview of STATCOM Technologies”, IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. pp. 4–9, Apr.2004.
- [25] K. Al-Haddad, R. Saha, a. Chandra, and B. Singh, “Static synchronous compensators (STATCOM): a review,” IET Power Electron., vol. 2, no. 4, pp. 297–324, Jul. 2009.
- [26] Patrice Petitclair Modélisation et Commande de structures FACTS : (Flexible Alternative CUITent Transmission System) Application au STATCOM (STATic COMPensator) , Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1997.
- [27] X. Tan, Q. Li, and H. Wang, “Advances and trends of energy storage technology in Microgrid,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 44, no. 1, pp. 179–191, Jan. 2013.
- [28] N. S. Hasan, M. Y. Hassan, M. S. Majid, and H. A. Rahman, “Review of storage schemes for wind energy systems,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 21, pp. 237–247, May 2013.
- [29] M. H. Ali, B. W. Bin Wu, and R. a. Dougal, “An overview of SMES applications in power and energy systems,” IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 1, no. 1, pp. 38–47, 2010.
- [30] J. Shi, Y. J. Tang, L. Ren, J. D. Li, and S. J. Chen, “Application of SMES in wind farm to improve voltage stability,” vol. 468, pp. 2100–2103, 2008.

- [31] Seyed Mohammad Sadeghzadeh Amélioration de la stabilité transitoire et de l'amortissement des oscillations d'un réseau électrique à l'aide de SMES et de SSSC , Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1998.
- [32] 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.
- [33] M. R. I., Muyeen, S. M., Takahashi, R. and Tamura, J. (2011), “Smoothing control of wind generator output fluctuations by PWM voltage source converter and chopper controlled SMES” Euro. Trans. Electr. Power, 21: 680–697.
- [34] Khalid Mazouz , Stockage supraconducteur d'énergie magnétique pour alimentation impulsionnnelle Thèse de doctorat , Université de Franche-comté. UFR des Sciences, Techniques et Gestion de l'Industrie,1995
- [35] M.A.alali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques) », Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Strasbourg 12 Septembre 2002.
- [36] J. Rodríguez, S. Member, and J. Lai, “Multilevel Inverters: A Survey of Topologies , Controls , and Applications,” vol. 49, no. 4, pp. 724–738, 2002.
- [37] J. Lai, S. Member, and F. Z. Peng, “Multilevel Converters-A New Breed of Power Converters,” vol. 32, no. 3, pp. 509–517, 1996.
- [38] Omar Bouhali. Contribution Des Convertisseurs Multiniveaux Au Raccordement De La Production D'origine Eolienne Sur Un Reseau Electrique. Autre. Ecole Centrale De Lille, 2007.
- [39] M. Bouzidi, a. Benaissa, and S. Barkat, “Hybrid direct power/current control using feedback linearization of three-level four-leg voltage source shunt active power filter,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 61, pp. 629–646, Oct. 2014.
- [40] J. Rodríguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, S. Kouro, and S. Member, “Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives,” vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945, 2007.
- [41] Tarak Ghennam. Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation. Autre. Ecole Centrale de Lille, 2011.
- [42] Thi Thuy Linh Pham. Contribution à l'étude de nouveaux convertisseurs sécurisés à tolérance de panne pour systèmes critiques à haute performance. Application à un PFC Double- Boost 5 Niveaux. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2011. Français.
- [43] Alexandre Leredde. Etude, Commande et Mise en Oeuvre de Nouvelles Structures Multiniveaux. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2011.
- [44] Bouzidi Mansour, “Nonlinear direct power control of a multilevel Diode-Clamped Four-leg Shunt Active Power Filter”, Thèse de Doctorat, Université El Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2016.

- [45] N. Hatano and T. Ise, "Control scheme of cascaded H-bridge STATCOM using zero-sequence voltage and negative-sequence current," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 2, pp. 543–550, 2010.
- [46] B. Chong, L. Zhang, and M. J. Waite, "Three-phase four-leg flying-capacitor multi-level inverter-based active power filter for unbalanced current operation," *IET Power Electron.*, vol. 6, no. 1, pp. 153–163, 2013.
- [47] Bouafia Saber, Benaissa Abdelkader, Bouzidi Mansour, Barkat Said, "DC-link capacitor voltage balancing strategy for three-level four-leg DSTATCOM-SMES system", 6th International Conference on Systems and Control (ICSC'17), Batna May 2017.
- [48] Bouafia Saber, Benaissa Abdelkader, Bouzidi Mansour, Barkat Said, "Simplified Algorithm of Three-Level Three Dimensional Space Vector Modulation for Three-Phase Four-Leg Diode-Clamped inverter" International Conference on Electrical Engineering, Boumerdès, December 2015.
- [49] Lamia Kartobi, "Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essais Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Décembre 2006.
- [50] Alberto Isidori , "Nonlinear Control Systems" ,Springer-Verlag London, 1992.
- [51] Hassan K. Khalil , " Nonlinear Systems " , Prentice Hall Edition, 2001
- [52] M.M. Farasangi, Y.H. Song, Y.Z. Sun, Supplementary control design of SVC and STATCOM using H8 optimal robust control, *Proceedings of the International Conference on Electric Utility Deregulation 2000*, City University London, April, 2000, pp. 355-360.
- [53] H. Chen, R. Zhou, Y. Wang, Analysis of voltage stability enhancement by robust nonlinear STATCOM control, *Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting, 2000*, vol. 3, pp. 1924- 1929.
- [54] RAHIM, A. H. M. A. et KANDLAWALA, M. F. Robust STATCOM voltage controller design using loop-shaping technique. *Electric Power Systems Research*, 2004, vol. 68, no 1, p. 61-74.
- [55] MISHRA, S., PANIGRAHI, B. K., et TRIPATHY, M. A hybrid adaptive-bacterial-foraging and feedback linearization scheme based D-STATCOM. In : *Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. 2004 International Conference on*. IEEE, 2004. p. 275-280.
- [56] TSAI, Hung-Chi, CHU, Chia-Chi, et LEE, Sheng-Hui. Passivity-based nonlinear STATCOM controller design for improving transient stability of power systems. In : *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES*. IEEE, 2005. p. 1-5.
- [57] Y. O. Lee, Y. Han, and C. C. Chung, "Output tracking control with enhanced damping of internal dynamics and its output boundedness," in *Proc. IEEE Conf. Dec. Contr.*, 2010, pp. 3964–3971.
- [58] GUI, Yonghao, LEE, Young Ok, HAN, Young seong, et al. Passivity-based control with nonlinear damping for STATCOM system. In : *Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on*. IEEE, 2012. p. 1715-1720.
- [59] ZHANG, Chao, AIMIN, Zhang, HANG, Zhang, et al. An advanced adaptive backstepping control method for STATCOM. In : *Control and Decision Conference (2014 CCDC), The 26th Chinese*. IEEE, 2014. p. 1822-1827.

- [60] BOUZID, A. M., CHÉRITI, Ahmed, DOUMBIA, Mamadou Lamine, et al. Comparative study between decoupled control with sliding mode & feedback linearization control applied to STATCOM. In : Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2014 IEEE 27th Canadian Conference on. IEEE, 2014. p. 1-6.
- [61] N. Farokhnia, R. Khoraminia and G.B. Gharehpetian, " Optimization of PI Controller Gains in Nonlinear Controller of STATCOM Using PSO and GA", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), Granada (Spain), 23rd to 25th March, 2010.
- [62] Z.Yang, C.Shen, L.Zhang, M.L.Crow, and S.Atcitty. Integration of a statcom and battery energy storage. IEEE Transactions On Power Systems, 16(2):254–260, May 2001
- [63] BAROS, Stefanos et ILIĆ, Marija D. Multi-objective Lyapunov-based Control of a STATCOM/BESS. In : Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2015 IEEE Power & Energy Society. IEEE, 2015. p. 1-5.
- [64] LIU, Feng, MEI, Shengwei, XIA, Deming, et al. Experimental evaluation of nonlinear robust control for SMES to improve the transient stability of power systems. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, vol. 19, no 4, p. 774-782.
- [65] WANG, Yuzhen, FENG, Gang, CHENG, Daizhan, et al. Adaptive L2 disturbance attenuation control of multi-machine power systems with SMES units. Automatica, 2006, vol. 42, no 7, p. 1121-1132.
- [66] WAN, Yong et ZHAO, Jun. Extended backstepping method for single-machine infinite-bus power systems with SMES. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, vol. 21, no 3, p. 915-923.
- [67] Adirak Kanchanaharuthai, Vira Chankong, and Kenneth A. Loparo, "Nonlinear generator excitation and superconducting magnetic energy storage control for transient stability enhancement via immersion and invariance," Transactions Of The Institute Of Measurement And Control, vol. 37, no. 10, pp. 1217–1231, 2015.
- [68] VACHIRASRICIRIKUL, Sitthidet et NGAMROO, Issarachai. Improved H_2/H_∞ control-based robust PI controller design of SMES for suppression of power fluctuation in microgrid. In : Electrical Engineering Congress (iEECON), 2014 International. IEEE, 2014. p. 1-4.
- [69] Utkin, Sliding Mode Control and Optimization. Springer, 1992.
- [70] A. Levant, "Introduction To High-Order Sliding Modes", Springer, 2003.
- [71] Utkin, "Sliding Modes their application in variable structure systems". Mir, Moscow, 1978.
- [72] K. D. Young, V. I. Utkin, and Ü. Özgüner, "A control engineer's guide to sliding mode control," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 7, no. 3, pp. 328–342, 1999.
- [73] V.Utkin, and HoonLee, "Chattering problem in Sliding Modes Control Systems", pp 346-350, Alghero Italy, 2007.
- [74] Bouafia Saber, Benaissa Abdelkader, Bouzidi Mansour, Barkat Said, Integral sliding mode control of four-leg DSTATCOM coupled with SMES unit, 2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes, October 2017.

- [75] I.Boiko, L. Fridman, A. Pisano, and Usai. "Analysis of chattering in system with second order sliding modes", IEEE Transactions on Automatic Control, vol 52, no, 11, pp, 2085-2102, 2007.
- [76] Imad Matraji. Contribution à la commande non linéaire robuste des systèmes d'alimentation en air des piles à combustible de type PEM. Autre. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2013.
- [77] I. Matraji, S. Laghrouche, S. Jemei, and M. Wack. Robust control of the PEM fuel cell air-feed system via sub-optimal second order sliding mode. Applied Energy, 104:945 – 957, 2013.
- [78] M. Taleb, A. Levant, and F. Plestan. Pneumatic actuator control : "Solution based on adaptive twisting and experimentation". Control Engineering Practice, 21(5) :727– 736, 2013.
- [79] Vincent Bregeault. "Quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants". Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2010.
- [80] Bouafia Saber, Benaissa Abdelkader, Bouzidi Mansour, Barkat Said, "Second order sliding mode control of three-level four-leg DSTATCOM based on instantaneous symmetrical components theory", Energy System, 9: 79 , Springer, 2018.
- [81] A. D´avila, J.A. Moreno, and L. Fridman. Variable gains super-twisting algorithm : a lyapunov based design. In American Control Conference (ACC), 2010, pages 968–973, 2010.
- [82] Y. Shtessel, M. Taleb, and F. Plestan. A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller : methodology and application. Automatica, 48(5) :759–769, 2012.
- [83] H. K. Chiang, W. B. Lin, Y. C. Chang, and C. C. Fang, "Super-twisting second-order sliding mode control for a synchronous reluctance motor," Artif. Life Robot., vol. 16, no. 3, pp. 307–310, 2011.

ملخص - تؤدي الأحمال غير المتوازنة في أنظمة توزيع الطاقة ثلاثية الأطوار ذات الأربعة أسلاك إلى العديد من الاضطرابات والمشاكل المتعلقة بجودة الطاقة . إذ أنها تسبب إضطرابات في الفولطية، تقلبات في التردد، تيارات محايدة مفرطة وتيارات غير متوازنة للنظام ثلاثي الطور . للتعامل مع هذه الإضطرابات، يعتبر **DSTATCOM** (المعوض المتزامن الثابت) أحد أجهزة **FACTS** (أنظمة النقل المرنة) التي حظيت بإهتمام كبير لتحسين أداء أنظمة الطاقة و الاستقرار الديناميكي وتنظيم الجهد وضمان جودة أفضل للطاقة. تم تصميم **DSTATCOM** ذو الأربع أذرع خصيصاً لأنظمة توزيع الطاقة ذات الأربعة أسلاك وذلك لتعويض تيار الحياد بالإضافة إلى تعويض الطاقة غير الفعالة، تنظيم الجهد وموازنة الأحمال. من ناحية أخرى، تسمح إمكانية دمج **DSTATCOM** مع أجهزة تخزين الطاقة الجديدة بتبادل الطاقة الفعالة وكذلك غير الفعالة مع الشبكة الكهربائية.

تقدم هذه الأطروحة نظام **DSTATCOM** رباعي الأذرع ذو ثلاث مستويات موصول بوحدة تخزين الطاقة المغناطيسية فائقة التوصيل (**SMES**). نقترح في هذه الأطروحة نموذج كامل ومفصل وأيضاً خوارزمية تحكم بالاستناد إلى استراتيجية الفصل بين التيارات وأيضاً تحسين موازنة الفولتية للكثفات وذلك باستخدام التشكيل الثلاثي المتجهات متعدد المستويات (**3DSVM**) بالإضافة إلى تقنية أخرى تستخدم القاطعة المتناوبة ثنائية الاتجاه . لتحسين أداء نظام التحكم في **DSTATCOM/ SMES** ، تم إقتراح تقنيتين غير خطيتين تعتمدان على تقنية الأسلوب الانزلاقي. تقنية التحكم المعتمدة على الأسلوب الانزلاقي من الدرجة الأولى والدرجة الثانية. أثبتت هذه الطرق فعاليتها من حيث الحد من تشوه التوافقيات الكلية، زمن الاستجابة، والحد من التجاوز في الفولتية. وفي الختام تم إجراء دراسة مقارنة على النتائج التي تم الحصول عليها من تقنيات التحكم المقترحة.

كلمات مفتاحية : **DSTATCOM, SMES , 3DSVM** ، نظام التحكم الإنزلاقي - أنظمة توزيع الطاقة ذات الأربعة أسلاك.

Abstract –

In a three-phase four-wire distribution system, unbalanced loads lead to many problems affecting power quality. Indeed, they cause variations in the amplitude of the voltage, fluctuations in the frequency, excessive neutral current and unbalanced currents. To deal with these problems, the **DSTATCOM** (Static Synchronous Compensator) is one of the most popular **FACTS** (Flexible AC Transmission Systems) devices for improving power system performance.

The four-leg **DSTATCOM** is a version specifically dedicated to the four-wire systems generally used for neutral current compensation, reactive power compensation and AC voltage regulation. Moreover, the possibility of coupling **DSTATCOM** with an energy storage device enables the compensator to exchange not only the reactive power but also the active power with the electricity network. In this context, this thesis is realized. The modeling and control of a four-leg three-level **DSTATCOM** coupled to a Superconducting Magnetic Energy Storage (**SMES**) device will be presented. The decoupled control of the proposed **DSTATCOM / SMES** system is carried out based on symmetrical component theory. In addition, DC-link capacitors voltage balancing is provided either with three-dimensional space vector modulation (**3DSVM**) or with an appropriate chopper control strategy.

In order to improve the performance of the **DSTATCOM / SMES** control system, two sliding mode control approaches will be proposed. The first order and second order sliding mode control based on the Super-Twisting algorithm. These methods have proven effective in reducing total harmonic distortion, response time, and reducing overshoot of the DC bus and common coupling point voltages. Finally, a comparative study is carried out on the performances obtained by the controllers proposed.

Keywords: Four-wire distribution system, **DSTATCOM**, **SMES**, **3DSVM**, sliding mode control, Super Twisting algorithm.

Résumé –

Dans un système de distribution triphasé à quatre fils, les charges déséquilibrées conduisent à de nombreux problèmes affectant la qualité d'énergie. En effet, elles provoquent des variations de l'amplitude de la tension, des fluctuations de la fréquence, un courant de neutre excessif et des courants déséquilibrés. Pour faire face à ces problèmes, le **DSTATCOM** (compensateur synchrone statique) est l'un des dispositifs **FACTS** (systèmes de transmission flexibles) les plus répandus pour améliorer les performances du système d'alimentation.

Le **DSTATCOM** quatre bras est une version dédiée particulièrement au système à quatre fils utilisé généralement pour la compensation du courant de neutre, la compensation de la puissance réactive ainsi que la régulation de la tension alternative. Par ailleurs, la possibilité d'associer le **DSTATCOM** avec un dispositif de stockage d'énergie permet au compensateur d'échanger avec le réseau électrique non seulement de la puissance réactive mais aussi de la puissance active. C'est dans ce contexte que cette thèse est réalisée. La modélisation et la commande d'un **DSTATCOM** quatre bras trois niveaux couplé à un dispositif de stockage d'énergie magnétique supraconducteur (**SMES**) sera présentée. Le contrôle découplé du système **DSTATCOM/SMES** proposé est réalisé sur la base de la théorie des composantes symétriques. En outre, l'équilibrage des tensions des condensateurs du bus DC est assuré soit à l'aide de la modulation vectorielle tridimensionnelle à trois niveaux (**3DSVM**) soit à base d'une stratégie appropriée de contrôle du hacheur.

Afin d'améliorer les performances du système de contrôle du **DSTATCOM/SMES**, deux approches de commande par mode glissant seront proposées. Il s'agit des commandes par mode glissant du premier ordre et du second ordre basée sur l'algorithme du Super-Twisting. Ces méthodes ont prouvé leur efficacité en termes de réduction de la distorsion harmonique totale, du temps de réponse et de réduction du dépassement des tensions du bus continu et du point de couplage commun. Enfin, une étude comparative est réalisée sur les performances obtenues par les contrôleurs proposés.

Mots-clés : Système de distribution à quatre fils, **DSTATCOM**, **SMES**, **3DSVM**, Commande par mode glissant, Algorithme Super Twisting.