

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité :

Automatisation et contrôle des systèmes industriels

THÈME

Etude et simulation d'un STATCOM à base d'un onduleur à cinq niveaux

Préparé par :

BOUMAAZA Khaled

DEMNI Khadidja

Devant le Jury :

| Nom et prénoms | Grade | Qualité |
|-----------------------|--------------|----------------|
| L.BESSOLTANE | MAA | Président |
| A.BERKANI | MAA | Examinateur |
| B.BELABBAS | MAA | Examinateur 1 |
| R. OUARED | MAA | Encadreur |

PROMOTION 2016 /2017

Remerciement

De prime abord, nous remercions Allah pour nous avoir donné la santé, le courage et la patience nécessaires pour l'aboutissement de ce travail.

Ce mémoire a été réalisée au niveau du département de génie électrique de l'université d'IBN KHALDOUN Tiaret

Nous tenons à remercier Monsieur OUARED Rahal, pour sa rigueur scientifique et ses qualités humaines. Ses conseils et ses critiques ont grandement contribué à la réalisation de ce travail nous sommes également profondément reconnaissant envers lui pour sa direction, sa disponibilité.

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur, L.BESOLTANE, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant d'être président du jury.

C'est un agréable plaisir pour nous d'exprimer nos remerciements à messieurs A.BERKANI et B.BELLABBAS pour avoir accepté d'examiner et de rapporter ce travail.

Nous sommes aussi reconnaissant des aides ponctuelles et efficaces de Monsieur M.GUERROU, pour l'aide et les conseils qu'il nous a fourni durant la réalisation de Ce mémoire

Enfin, nous remercies ma grande famille et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de ma mère.

Khadidja

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mon frère, Adda

A mes sœurs

A ma grande famille

A mes chers amis, Khaled, Adda et Medah

A mon binôme qui réalise avec moi ce travail.

A tous les amis (es) d'études.

Khaled

Liste de figure

CHAPITRE 1

| | | |
|--|---|----|
| Figure .I. 1 : Schéma du TCR | Figure .I.2: Schéma du TSC | 11 |
| Figure .I. 3: Schéma du SVC | Figure .I. 4: Caractéristique d'un SVC..... | 12 |
| Figure.I. 5: Structure d'un SVC, schéma équivalen | | 13 |
| <i>Figure .I. 6:</i> Schéma du SVC et TCBR | | 13 |
| <i>Figure .I.7:</i> Schéma de base d'un STATCOM..... | | 14 |
| Figure .I. 8: Ligne de transmission avec | Figure .I. 9 : Diagramme de frensel système de | 15 |
| Figure .I. 10: Structure d'un TCSC..... | | 16 |
| Figure.I. 11: Structure d'un TCSR..... | | 16 |
| Figure .I. 12 : Schéma de base du SSSC..... | | 17 |
| <i>Figure .I. 13:</i> Caractéristique statique du SSSC | | 18 |
| Figure .I. 14: Schéma de base d'un TCPAR | | 14 |
| Figure.I.15: Diagramme vectoriel du TCPAR..... | | 20 |
| Figure .I. 16: Schéma de base d'un IPFC | | 21 |
| Figure .I. 17: schéma de base d'un UPFC | | 22 |

CHAPITRE 2

| | | |
|---|--|----|
| <i>Figure II. 1:</i> Profils de THD produits par l'augmentation des niveaux pour une fréquence d'échantillonnage, 1250 Hz | | 25 |
| FigureII:2 Topologie des onduleurs NPC a) –NPC trois niveaux, b)-NPC cinq niveaux | | 26 |
| <i>Figure II:3</i> Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoïdale..... | | 28 |
| Figure II:4 Schéma d'un onduleur usuel à 2 niveaux..... | | 30 |
| Figure II:5 Séquences de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à deux niveaux..... | | 31 |
| Figure II:6 Onduleur à trois niveaux à structure NPC..... | | 32 |
| Figure II :7 Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux | | 33 |
| Figure II:8: Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé trois niveau de type NPC | | 34 |
| Figure II:9 Interrupteur bidirectionnel équivalent au pair transistor – diode | | 35 |
| Figure II:10 Structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC | | 36 |

| | |
|--|----|
| Figure II:11 Structure d'un bras d'onduleur à cinq niveaux | 37 |
| Figure II:12 Réseau de pétri d'un bras d'onduleur à cinq niveaux..... | 40 |
| Figure II:13 Réseau de pétri réduit d'un bras | 42 |
| Figure II:14 Schéma du modèle de simulation de l'onduleur à deux niveaux..... | 45 |
| Figure II:15 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur | 45 |
| Figure II:16 Le spectre d'harmonique de tension VA | 46 |
| Figure II :17 Le spectre d'harmonique de tension VA | 46 |
| Figure II:18 Le spectre d'harmonique de tension VA | 47 |
| Figure II:19 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur | 47 |
| Figure II:20 Le spectre d'harmonique de tension VA | 47 |
| Figure II:21 Le spectre d'harmonique de tension VA | 48 |
| Figure II:22 Le spectre d'harmonique de tension VA | 48 |
| Figure II:23 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur | 49 |
| Figure II:24 Le spectre d'harmonique de tension VA | 49 |
| Figure II:25 Le spectre d'harmonique de tension VA | 49 |
| Figure II:26 Le spectre d'harmonique de tension VA | 50 |
| Figure II:27 Schéma du modèle de simulation de l'onduleur à trois niveaux | 50 |
| Figure II:28 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur | 51 |
| Figure II:29 Le spectre d'harmonique de tension VA | 51 |
| Figure II:30 Le spectre d'harmonique de tension VA | 52 |
| Figure II:31 Le spectre d'harmonique de tension VA | 52 |
| Figure II:32 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur | 53 |
| Figure II:33 Le spectre d'harmonique de tension VA | 53 |
| Figure II:34 Le spectre d'harmonique de tension VA | 53 |
| Figure II:35 Le spectre d'harmonique de tension VA | 54 |
| Figure II:36 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur | 54 |
| Figure II:37 Le spectre d'harmonique de tension V | 54 |

| | |
|---|----|
| Figure II:38 Le spectre d'harmonique de tension VA | 55 |
| Figure II:39 Schéma du modèle de simulation de l'onduleur à cinq niveaux | 56 |
| Figure II:40 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur | 56 |
| Figure II:41 Le spectre d'harmonique de tension VA | 57 |
| Figure II:42 Le spectre d'harmonique de tension VA | 57 |
| Figure II:43 Le spectre d'harmonique de tension VA | 58 |
| Figure II:44 le spectre d'harmonique de tension Voa | 58 |
| Figure II:45 Le spectre d'harmonique de tension VA | 59 |
| Figure II:46 Le spectre d'harmonique de tension VA | 59 |
| Figure II:47 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur | 59 |
| Figure II:48 Le spectre d'harmonique de tension Voa | 60 |
| Figure II:49 Le spectre d'harmonique de tension Voa | 60 |
| Figure II:50 Le spectre d'harmonique de tension Voa | 61 |

CHAPITRE 3

| | |
|---|----|
| Figure III. 1: <u>structure de base d'un STATCOM couplé au réseau</u> | 65 |
| Figure III. 2: <u>STATCOM (Static Synchronous Compensator)</u> | 66 |
| Figure III. 3: <u>Circuit équivalent du STATCOM</u> | 68 |
| Figure III. 4: <u>Circuit monophasé équivalent du STATCOM</u> | 69 |
| Figure III.5: <u>Réponse en boucle ouverte</u> | 74 |
| Figure III. 6: <u>Réponse en boucle fermée</u> | 75 |
| Figure III. 7: <u>Circuit de commande du compensateur</u> | 75 |
| Figure III. 8: <u>Schéma de Simulink du SATATCOM</u> | 76 |
| Figure III. 9 : <u>régulation de l'énergie réactive</u> | 77 |
| Figure III.10: <u>tension de la sortie de l'onduleur</u> | 77 |
| Figure III. 11: <u>tension de l'onduleur avec tension du réseau</u> | 78 |
| Figure III. 12: <u>déphasage entre tension et courant dans le réseau</u> | 79 |

Liste des tableaux

Chapitre II

| | |
|---|----|
| Tableau II:1 États possibles de l'onduleur usuel à 2 niveaux | 32 |
| Tableau II.2 états possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux. | 35 |
| Tableau II:3 Grandeurs électriques pour chacune des configurations d'un bras k..... | 38 |
| Tableau II:4 Table d'excitation des Interrupteurs de l'onduleur triphasé à cinq niveaux..... | 42 |
| Tableau II:5 Résultats de simulation des deux modèles d'onduleur pour $m = 0.25$ | 62 |
| Tableau II.6 Résultats de simulation des deux modèles d'onduleur pour $m = 0.5$ | 63 |
| Tableau II:7 Résultats de simulation des deux modèles d'onduleur pour $m = 0.95$ | 63 |

chapitre III

| | |
|---|----|
| Tableau III. 1: Pramaitre du circuit | 73 |
|---|----|

Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I : compensation de l'énergie réactive et les systèmes FACTS | |
| I.1.Introduction..... | 3 |
| I.2.1.Energie active, réactive, apparente | 3 |
| I.2.2.La problématique de l'énergie réactive en milieu industriel..... | 3 |
| I.2.3.Objectifs | 4 |
| I.2.4.Amélioration du facteur de puissance..... | 4 |
| I.3.1.Différents types de compensation | 5 |
| I.3.1.1Compensation globale..... | 5 |
| I.3. 1.2 Compensation partielle | 5 |
| I.3. 1.3 Compensation locale | 5 |
| I.3.2 Les moyens classiques de compensation réactive et de réglage de tension..... | 6 |
| I.3.2.1 Condensateurs et inductances fixes : | 6 |
| I.3.2.2.Compensateurs synchrones | 7 |
| I.3.2.3. Compensateurs statiques | 7 |
| I.3.2.4. Transformateurs avec prises réglables en charge..... | 8 |
| I.4.1 Compensateur à éléments passifs..... | 8 |
| I.4.2 Compensateur parallèle..... | 8 |
| I.4.3 Compensateur série | 8 |
| I.4.4 Transformateur Régulateur | 8 |
| I.4.5 Transformateur Déphaseur..... | 9 |
| I.5.1 Définition et le rôle d'un dispositif FACTS : | 9 |
| I.5.2 Nécessité des systèmes FACTS | 9 |
| I.5.3 Classification des systèmes FACTS : | 10 |
| I.5.3 .1 Compensateurs parallèles..... | 10 |

| | |
|---|----|
| I.5.3.2 Compensateurs séries..... | 15 |
| I.5.3.3 Compensateurs hybrides (série – parallèle) | 18 |
| I.6 Conclusion | 23 |
| Chapitres II : les onduleurs multiniveaux | |
| II.1 Introduction..... | 24 |
| II.2 L'intérêt des onduleurs multi niveaux | 24 |
| II.3 Les avantages des onduleurs multiniveaux | 25 |
| II.4 Les différentes topologies des onduleurs multiniveaux | 25 |
| II.5 Onduleur multi niveaux à diode de bouclage(NPC) | 26 |
| II.6 Stratégie de commande de l'onduleur triphasé a N niveaux..... | 28 |
| II.7 Le principe de la technique triangulaire sinusoïdale..... | 28 |
| II.8 Les onduleurs multiniveaux | 29 |
| II.8.1 Onduleur à deux niveaux de tension de type NPC | 29 |
| II.8.1.1 Structure..... | 30 |
| II.8.2 Onduleur à trois niveaux de tension de type NPC..... | 31 |
| II.8.2.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux..... | 31 |
| II.8.2.2 Principe de fonctionnement..... | 33 |
| II.8.3 Onduleur à cinq niveaux de tension de type NPC | 35 |
| II.8.3.1 Structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux | 35 |
| II.8.3.2 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à cinq niveaux | 36 |
| II.8.3.3 Réseau de Pétri d'un bras d'onduleur à cinq niveaux | 39 |
| II.8.3.4 Modèle de commande de l'onduleur à cinq niveaux..... | 41 |
| II.9 Simulation des onduleurs multiniveaux à structure NPC | 44 |
| II.9.1 Onduleur à deux niveaux | 44 |
| II.9.1.1 Résultats de simulation | 45 |
| II.9.2 Onduleur à trois niveaux..... | 50 |
| II.9.2.1 Résultats de simulation | 51 |
| II.10 Développement d'un modèle de simulation d'onduleur NPC à 5 niveaux | 56 |

| | | |
|--|--|----|
| II.10.1 | Résultats de simulation | 56 |
| II.11 | Tableau de l'étude comparative entre deux onduleurs deux, trois et cinq niveaux..... | 61 |
| II.12 | Conclusion..... | 63 |
| | | |
| RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE | | |
| III.1. | Introduction | 64 |
| III.2. | Static Synchronous Compensator (STATCOM)..... | 64 |
| III.2.1. | Description..... | 64 |
| III.2.2. | Le STATCOM présente plusieurs avantages | 65 |
| III.2.3. | Principe de Fonctionnement | 66 |
| III.3. | Circuit principal du STATCOM..... | 67 |
| III.4. | Modélisation du STATCOM..... | 69 |
| III.4.1. | Modèle du compensateur sur les axes d-q | 70 |
| III.4.2. | Modèle linéaire | 71 |
| III.5. | Synthèse des Réglages du STATCOM | 72 |
| III.5.1. | Réglage proportionnel-Intégral (PI) | 72 |
| III.5.2. | Détermination des paramètres du régulateur PI..... | 73 |
| III.6. | Conclusion..... | 79 |
| Conclusion générale | | 80 |
| Annexe A..... | | 81 |
| Annexe B..... | | 83 |
| Annexe C..... | | 87 |
| Annexe D..... | | 88 |
| Annexe E..... | | 92 |
| Bibliographie..... | | 93 |