

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 :

ABDELOUAHED Touhami

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat 3^{ème} Cycle : Haute tension/Réseaux électriques

Option : Réseaux Électriques

Intitulé de la thèse :

Amélioration du flux de puissance dans un réseau électrique par l'UPFC (Unified Power Flow Controller)

Présentée devant le jury composé de :

Pr. Mohammed Fellah Karim	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Président
Pr. ZIDI Sid Ahmed	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Directeur de thèse
Pr. HADJERI Samir	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Examineur
Pr. KHATIR Mohamed	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Examineur
Pr. LAKDJA Fatiha	Professeur (Université de Saida)	Examineur

Soutenu le : 27/02/2019

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents

Mes frères et mes sœurs

Toute ma famille « *ABDELOUAHED* »

Ainsi qu'à tous mes amis

Et, tous ceux qui me sont chers.

ABDELOUAHED TOUHAMI

Le 17/11/2019

"Choisis un travail que tu aimes, et tu n'auras pas à travailler un seul jour de ta vie"

Confucius.

Avant-propos

Avant-propos

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du laboratoire ICEPS rattaché à la faculté de génie électrique de l'Université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès.

Mes premiers remerciements vont sans équivoque à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces années d'études.

Je tiens d'abord à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur **ZIDI Sid Ahmed** (Directeur de thèse), Professeur à l'Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, pour la qualité du sujet de recherche qu'il m'a proposé, pour le temps qu'il m'a accordé tout au long de cette thèse, pour ses grandes compétences scientifiques, pour ses conseils, ses remarques toujours constructives et ses remarquables qualités humaines jusqu'à l'aboutissement de ce travail. Ses encouragements m'ont poussé, vraiment, à m'améliorer et à me guider vers le succès. Ainsi, sans oublier mon collaborateur le martyr de la cause Palestinienne **Dr : FADI. Albatsh** qui nous a quitté très tôt, ce dernier ma orienté en me donnant des conseils précieux. Celui-ci considéré parmi les meilleurs chercheurs en ce domaine (UPFC).

Mes plus vifs remerciements vont à Monsieur **FELLAH Mohamed Karim**, Professeur à l'Université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Il m'est agréable de pouvoir exprimer mes remerciements aux membres du jury examinateurs pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail, je cite :

Monsieur **HADJERI Samir**, Professeur à l'Université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès, Monsieur **KHATIR Mohamed**, Professeur à l'Université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès, Monsieur **LAKDJA Fatiha**, Professeur à l'Université Tahar Moulay de Saida.

Je tiens à remercier le docteur Djilani Kobibi Youcef Islam, mon collègue pour son soutien dans la préparation de la soutenance.

Ma gratitude va aussi à tous mes enseignants et enseignantes tout le long de mon cursus d'études soit à l'université de Bechar où j'ai achevé mes études du cycle MASTER ainsi que ceux et celles de l'université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès pour leur disponibilité et le savoir qu'ils m'ont fidèlement transmis.

Je ne peux terminer ce propos sans penser à ma famille, mes proches, mes amis et toutes les personnes qui m'ont apporté aide, assistance et soutien de quelle nature qu'il soit pour l'aboutissement de ce travail en pensant particulièrement à mes parents (Mohamed et FATIMA), pour leur soutien indéfectible, pour tous les sacrifices occasionnés et pour tout ce qu'ils m'ont accordé afin d'arriver à ce stade de réussite. Je tiens vraiment à leur exprimer ma profonde gratitude. A vous tous, je dis merci.

Table de matières

Table de matières

Table des matières	i
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	xi
Liste des acronymes et symboles	xiii
Liste des travaux de recherches et stages	xvi
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Les Systèmes FACTS

I.1. Introduction	6
I.2. Besoin des FACTS au marché	6
I.3. Classification des dispositifs FACTS	8
I.4. Équipements de FACTS	10
I.4.1. TCR et TSR.....	10
I.4.1.1. Principes de fonctionnement du TCR	11
I.4.1.2. Le TCT	11
I.4.1.3. Le TSC	12
I.4.2. Convertisseur de source de tension (VSC)	13
I.4.2.1. VSC monophasé.....	13
I.4.2.2. VSC triphasé	13
I.4.3. Système de stockage d'énergie	14
I.5. Structure des principaux dispositifs FACTS	15
I.5.1. Compensateurs parallèles	15
I.5.1.1. SVC (Static Var Compensator).....	16
I.5.1.2. TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor).....	17
I.5.1.3. STATCOM (Static Compensator)	18
I.5.2. Compensateurs séries.....	20
I.5.2.1. TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor).....	21
I.5.2.2. TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor).....	22
I.5.2.3. SSSC (Static Synchronous Series Compensator)	23
I.5.3. Compensateurs hybrides (série-shunt)	24
I.5.3.1. SPS (Support Statique de Phase)	24
I.5.3.2. DPFC (Dynamic Power Flow Controller)	25
I.5.3.3. UPFC (Compensateur de flux de puissance associé).....	26
I.5.3.4. IPFC (Interline Power Flow Controller)	27
I.5.3.5. GUPFC (Generalized Unified Power Flow Controller).....	28
I.5.3.6. DISPOSITIFS DOS- À -DOS (BACK-TO-BACK)	28
I.6. Applications des dispositifs FACTS	30
I.7. Conclusion	31

Chapitre II: Modélisation, commande et réglage d'un UPFC

II.1. Introduction	32
II.2. Première invention de l'UPFC	32
II.3. Section 1 : Description schématique du système	34
II.3.1. Structure de base de l'UPFC	34
II.3.2. Présentation des différents blocs constituant l'UPFC	35
II.3.2.1. Partie shunt de l'UPFC	35
II.3.2.2. Partie série de l'UPFC	37
II.3.2.3. Circuit de liaison à courant continu (DC link)	37
II.3.2.4. Bloc de commande	38
II.3.3. Analyse fonctionnelle de l'UPFC	39
II.3.4. Contribution des deux convertisseurs shunt et série à la réalisation de la fonction de l'UPFC	43
II.3.4.1. Modes de fonctionnement du convertisseur shunt	43
II.3.4.2. Modes de fonctionnement du convertisseur série	44
II.4. Section 2 : Modélisation du système UPFC	45
II.4.1. Modélisation de la partie série d'UPFC (SSSC)	46
II.4.2. Modélisation de la partie shunt d'UPFC (STATCOM)	47
II.4.3. Modélisation de la partie continue de l'UPFC	49
II.5. Section 3. Structure de réglage globale de l'UPFC	49
II.5.1. Schéma fonctionnel de la commande des convertisseurs série et shunt de l'UPFC ...	51
II.5.2. Commande appliquée au l'onduleur VSC de l'UPFC	53
II.5.2.1. Commande par hystérésis appliquée au VSC	53
II.5.2.2. Commande MLI appliquée au VSC	54
II.6. Section 4 : Régulateurs utilisés pour la commande de l'UPFC	55
II.6.1. Littérature sur les systèmes de commande pour l'UPFC	55
II.6.1.1. Contrôleurs linéaire de l'UPFC	55
II.6.1.2. Contrôleurs non linéaire de l'UPFC	56
II.6.1.3. Contrôleur Intelligent Artificiel de l'UPFC	56
II.7. Conclusion	57

Chapitre III: Simulation d'un UPFC doté d'un régulateur classique

III.1. Introduction	58
III.2. Simulations et résultats	59
III.2.1. Scénario 1 : Comportement du système UPFC dans un RE en fonction des variations possibles dans le réseau	59
III.2.1.1. Test d'application 1	59
III.2.1.1.1. Cas 01 : Fonctionnement de l'UPFC en mode contrôle du flux de puissance	60
III.2.1.1.2. Cas 02: Fonctionnement de l'UPFC en mode contrôle de tension	65
III.2.1.2. Test d'application 02	70
III.2.1.2.1. Cas 01 : Poursuite d'une référence de puissance	71
III.2.1.2.2. Cas 02 : Réseau perturbé	73
III.2.2. Scénario 2 : Apport de l'UPFC pour l'amélioration de flux de puissance dans un réseau multi machine	79
III.2.2.1. Topologie du réseau multi-machine simulé	80

III.2.2.2. Model UPFC développé (circuit de puissance).....	81
III.2.2.3. Méthodologie de recherche et essais de simulation	82
III.2.2.4. Résultats de simulation et discussions	84
a. Cas de Test I: Analyse dynamique de système test IEEE-14 sans l'UPFC	84
b. Cas de test II: Performance dynamique de système test IEEE-14 avec l'UPFC	86
III.3. Conclusion.....	94

Chapitre IV: Présentation des techniques intelligentes et Typologies d'optimisation

IV.1. Introduction	95
IV.2. Logique floue	96
IV.2.1. Notions fondamentales de la théorie floue.....	96
IV.2.1.1. Notions fondamentales de la théorie floue.....	96
IV.2.1.1. Apparition de la logique floue	96
IV.2.1.2. Bases de la logique floue.....	96
IV.2.1.2.1. Variables linguistiques	97
IV.2.1.2.2. Fonctions d'appartenances	98
IV.2.1.2.3. Univers de discours	99
IV.2.1.2.4. Opérateurs de la logique floue	99
IV.2.2. Réglage, et commande par la logique floue	101
IV.2.2.1. Choix du régulateur flou (Etape 1)	101
IV.2.2.2. Interface de Fuzzification (Etape 2).....	103
IV.2.2.3. Bases de règle (Etape 3).....	103
IV.2.2.4. Moteur ou Mécanisme d'inférences (Etape 4).....	104
IV.2.2.5. Interface de Défuzzification (Etape 5)	105
IV.3. Technique d'optimisation	106
IV.3.1. Théorie de la méta-heuristique.....	106
IV.3.1.1. Optimisation par l'essaim de particulaire	107
IV.3.1.1.1. Algorithme de base	109
IV.3.1.2. Optimisation par génétique	112
IV.3.1.2.1. Algorithme de base	113
IV.3.1.3. Optimisation par colonies de fourmis	114
IV.3.1.3.1. Algorithme de base	115
IV.3.1.3.2. Paramètres optimaux des algorithmes de colonies de fourmis	119
IV.3.1.4. Méthodes d'optimisation hybride	119
IV.3.1.4.1. Hybridation de PSO _ SQP	120
IV.4. Conclusion	120

Chapitre V: Simulations d'un UPFC doté des régulateurs intelligents

V.1. Introduction	121
V.2. Résultat de simulation et discussion.....	121
V.2.1. Test d'application 1	122
V.2.1.1. Cas 01 : Fonctionnement de l'UPFC en mode contrôle du flux de puissance)..	122
a. Résultats de simulation en logique flou (type Mamdani et Sugeno).....	122
b. Résultats de simulation en méta-heuristique	126
c. Comparaison des résultats et discussions.....	130
V.2.1.2. Cas 02: Fonctionnement de l'UPFC en mode contrôle de tension.....	132

V.2.2. Test d'application 02	135
V.2.2.1. Cas 01 : Cas de poursuite d'une référence de puissance	135
a. Résultats de simulation en logique flou	135
b. Résultats de simulation en méta-heuristique (PI_ACO)	137
c. Comparaison des résultats et discussions	139
V.2.2.2. Cas 02 : Cas de réseau perturbé.....	140
V.4. Conclusion.....	145
Conclusion Générale	146
Perspectives	147
Annexe A.....	148
Annexe B.....	155
Références bibliographiques	158

Liste des Figures

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1: Un schéma simplifié d'un réseau interconnecté	6
Figure I.2: Diagramme d'une ligne de transport	7
Figure I.3: Différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques	9
Figure I.4: Diagramme schématique pour l'application des FACTS	10
Figure I.5: La représentation de base d'un TCR	11
Figure I.6: Le compensateur TCT	12
Figure I.7: Représentation d'un TSC triphasé	12
Figure I.8: Convertisseur de source de tension monophasé	13
Figure I.9: Convertisseur de source de tension triphasé à six commutateurs	14
Figure I.10: Schéma fonctionnel de base d'un système de stockage	15
Figure I.11: Représentation: (a) principe d'une compensation shunt, (b) Schéma unifilaire équivalent	15
Figure I.12: Représentations schématiques d'un SVC	16
Figure I.13: Caractéristique d'un SVC caractéristique d'un SVC	17
Figure I.14: Schéma du SVC et TCBR	18
Figure I.15: Raccordement d'un STATCOM au système à courant alternatif	18
Figure I.16: Diagramme vectoriel de STATCOM	19
Figure I.17: Caractéristique statique d'un STATCOM	20
Figure I.18: Représentation: (a) principe d'une compensation série, (b) Schéma unifilaire équivalent	20
Figure I.19: Représentations schématiques d'un TCSC	21
Figure I.20: Réactance équivalente du TCSC $X(\alpha)$	22
Figure I.21: Structure du TCSR	22
Figure I.22: Schéma de raccordement d'un SSSC au système d'alimentation	23
Figure I.23: Caractéristique Statique du SSSC	24
Figure I.24: Structure schématique d'un SPS	24
Figure I.25: Configuration de DPFC	25
Figure I.26: Schéma représentatif d'un UPFC placé dans un système d'alimentation	26
Figure I.27: Schéma de principe d'un IPFC	27
Figure I.28: Configuration d'un GUPFC	28
Figure I.29: Configuration schématique de VSC HVDC Back-to-Back	29

Chapitre II :

Figure II.1: Vue aérienne de l'UPFC installé à AEP Inez, USA	33
Figure II.2: Structure de base d'un UPFC connecté au réseau électrique	34
Figure II.3: Circuit de la partie shunt, et son schéma unifilaire équivalent (redresseur à absorption sinusoïdale de courant)	36
Figure II.4: Répartition des puissances actives et réactives au nœud de connexion shunt	36
Figure II.5: Circuit de la partie série, et son schéma unifilaire équivalent (redresseur à absorption sinusoïdale de courant)	37
Figure II.6: Schéma du bus continu	38
Figure II.7: Réseau d'interconnexion reliant deux régions	39

Figure II.8: Concept d'un UPFC dans un réseau à deux machines	40
Figure II.9: Diagramme vectoriel de tension ($V=V'$).....	40
Figure II.10: Diagramme vectoriel de tensions ($V\neq V'$)	41
Figure II.11: Schéma fonctionnelle d'un UPFC.....	42
Figure II.12: Modes de fonctionnement des convertisseurs shunt et série d'un UPFC.....	43
Figure II.13: Modèle mathématique de l'UPFC et de la ligne de transport	45
Figure II.14: Structure globale de commande de l'UPFC.....	50
Figure II.15: Configuration du circuit de réglage du convertisseur série.....	52
Figure II.16: Configuration du circuit de réglage du convertisseur shunt.....	52
Figure II.17: Association des configurations parallèle et série	53
Figure II.18: Contrôle de courant par hystérésis	54
Figure II.19: (a) signale triphasé sinusoïdal, (b) signale triangulaire, (c) train d'impulsion.....	55
Figure II.20: Représentation des trois signaux pour commander les interrupteurs	55

Chapitre III :

Figure III.1: Blocs Simulink d'un UPFC relie au réseau (Test 1, Cas N°.1).....	60
Figure III.2: Contrôle de la puissance transité active (a) et réactive (b) par l'UPFC (Cas A).....	62
Figure III.3: Figuration en zoom de variation de la puissance active (temps pris entre (0– 0.15s, et 0.25– 0.35s), la puissance réactive (temps pris entre (0– 0.15s ,et 0.23– 0.33s).....	62
Figure III.4: Contrôle de la puissance transité active (a) et réactive (b) par l'UPFC (Cas B).....	63
Figure III.5: Figuration en zoom de variation de la puissance active (temps pris entre (0– 0.15s ,et 0.45– 0.6s), Puissance réactive (temps pris entre (0– 0.15s ,et 0.45– 0.6s)	63
Figure III.6: Contrôle de la puissance transité active (a) et réactive (b) par l'UPFC (Cas C).....	64
Figure III.7: Figuration en zoom de variation de puissance active (temps pris entre (0– 0.15s, 0.25– 0.35s et 0.45– 0.6s), la puissance réactive (temps pris entre (0– 0.15s , 0.23– 0.33s et 0.45– 0.65s)	64
Figure III.8: Blocs Simulink d'un UPFC relie au réseau (Test 1, Cas N°.2).....	65
Figure III.9: Forme d'onde RMS de tension au bus 2 sans l'UPFC (phase a)	66
Figure III.10: Formes d'ondes de la puissance active (a), la puissance réactive (b), le courant I_{sh} (c) échangé avec le dispositif UPFC et le réseau au différents cas de compensation (Capacitif, et inductif), et la forme RMS de tension au bus 2 avec l'UPFC.....	67
Figure III.11: Courbes de tension (V_{sh}) et courant (I_{sh}) d'onduleur VSC en fonction de temps (temps pris entre (0.15 – 0.3)	68
Figure III.12: Courant ($I_{q m}$, $I_{q ref}$) d'onduleur VSC en fonction de temps	69
Figure III.13: Courbes de tension (V_{sh}) et courant (I_{sh}) d'onduleur VSC en fonction de temps (temps pris entre (0.45 – 0.6)	69
Figure III.14: Tension (V_{dc}) en fonction de temps (s).....	70
Figure III.15: Blocs Simulink d'un UPFC relie au réseau (test 2)	71
Figure III.16: Variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI.....	71
Figure III.17: Courant générer par le convertisseur parallèle de l'UPFC.....	72
Figure III.18: Tension injectée par le convertisseur série de l'UPFC	72
Figure III.19: Formes d'ondes de courant coté amont (a), et au côté aval (b) du réseau	73
Figure III.20: Tension du réseau amont V_s (cas de creux de tension)	74
Figure III.21: Tension injectée par le SSSC.....	74
Figure III.22: Formes d'ondes de courant coté amont (a), et au côté aval (b) du réseau (cas de creux de tension).....	75
Figure III.23: Formes d'ondes de courant injecté par le STATCOM	75

Figure III.24: Variation de puissances réactive (a) et active (b), avec PI (cas de creux de tension)	76
Figure III.25: Tension Vs du réseau amont (cas de surtension)	77
Figure III.26: Formes d'ondes de courant coté amont (a), et au côté aval (b) du réseau (cas de surtension)	78
Figure III.27: Courant généré par le convertisseur parallèle	78
Figure III.28: Variation de puissances réactive (a) et active (b), avec PI (cas de surtension)	79
Figure III.29: Blocs Simulink d'un UPFC relie au réseau IEEE_14 nœuds (test 3, avec UPFC)	81
Figure III.30: Modèle dynamique de l'UPFC	82
Figure III.31: Méthodologie de la recherche	83
Figure III.32: Résultats de l'analyse dynamique de réseau IEEE-14 Nœuds sans FACTS, a)- le flux de puissance, b)- Perte de puissance, et c)- le profil de tension	85
Figure III.33: Réponse dynamique du flux de puissance (active et réactive) dans la ligne N°17.	87
Figure III.34: Réponse dynamique du flux de puissance (active et réactive) dans la ligne N°20	88
Figure III.35: (a)- Tension traverse dans les deux nœuds de la ligne 9-14, (b)- La différence d'angle ($\theta_{vs} - \theta_{vr}$) entre les deux extrémités de la ligne 9-14	89
Figure III.36. Variation de l'amplitude de la tension injectée (V_{inj}), et le courant de ligne (I_L) de la phase « a »	89
Figure III.37: Tension du condensateur du circuit intermédiaire de l'UPFC (V_{dc})	90
Figure III.38: Profil de la tension sans UPFC et avec l'UPFC installé dans la ligne n°17	91
Figure III.39: Flux de la puissance active/réactive sans UPFC, et avec l'UPFC installé dans la ligne n°17	91
Figure III.40: Flux de puissance active des lignes où nous avons enregistré une amélioration important, du réseau IEEE-14 nœuds avec compensation (UPFC)	92
Figure III.41: Pertes des puissances (active et réactive) dans les deux cas de fonctionnement (sans, et avec UPFC)	93

Chapitre IV :

Figure IV.1: Classification des personnes selon la logique booléenne	96
Figure IV.2: Classification des personnes selon la logique floue	97
Figure IV.3: Fonctions d'appartenance de forme trapézoïdale avec 2 cas spéciaux	98
Figure IV.4: Quelques différentes formes de fonctions d'appartenance	98
Figure IV.5: Univers de discours d'une variable linguistique	99
Figure IV.6: L'intersection (min), L'union (max) et le complément	101
Figure IV.7: Configuration et structure interne d'un système flou	101
Figure IV.8: Contrôleur Mamdani	102
Figure IV.9: Contrôleur Sugeno	102
Figure IV.10: Principe de defuzzification par centre de gravité	105
Figure IV.11: Principe de base d'une méthodologie d'optimisation	106
Figure IV.12: Déplacement d'une particule	108
Figure IV.13: Graphe d'influence d'un essaim de particules. (a) Graphe complètement connecté, (b) Graphe circulaire	110
Figure IV.14: Concepts de base d'un algorithme génétique	112
Figure IV.15: Des fourmis suivant une piste de phéromone	114
Figure IV.16: Expérience de sélection des branches les plus courtes par une C.F.	115
Figure IV.17: Problème du voyageur de commerce optimisé par l'algorithme AS	117

Chapitre V:

Figure V.1: Contrôle de la puissance transité active (a) et réactive (b) par l'UPFC (Cas A).....	123
Figure V.2: Figuration en zoom de variation de puissance active (a), et la puissance réactive (b).....	123
Figure V.3: Contrôle de la puissance transité active (a) et réactive (b) par l'UPFC (Cas B).....	124
Figure V.4: Figuration en zoom de variation de puissance active (a), et la puissance réactive (b).....	124
Figure V.5: Contrôle de la puissance transité active (a) et réactive (b) par l'UPFC (Cas C).....	125
Figure V.6: Figuration en zoom de variation de puissance active (P), et la puissance réactive (Q)	125
Figure V.7: Variation de puissances active (a) et réactive (b), avec Sugeno/ Sugeno PSO	127
Figure V.8: Variation de puissances active (a) et réactive (b), avec Sugeno/PSO et PSO hybride.....	128
Figure V.9: Variation de puissances active (a) et réactive (b) , avec Sugeno et Sugeno/GA.....	129
Figure V.10: Comparaison entre les régulateurs utilisés dans le contrôle de variation de puissances active (a) et réactive (b)	130
Figure V.11: Formes d'ondes de la puissance active (a), la puissance réactive (b), le courant Ish (c), et la forme RMS de tension au bus 2 avec l'UPFC basé sur PI analogique, et CLF.....	133
Figure V.12: Courant (Iq m, Iq ref) d'onduleur VSC en fonction de temps	134
Figure V.13: Tension (Vdc) en fonction de temps (s).....	134
Figure V.14: Variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI et CLF.....	136
Figure V.15: Figuration en zoom de variation de la puissance réactive (a) (temps pris entre (0– 0.1s ,et 0.2– 0.3s), et active (b) (temps pris entre (0– 0.1s, et 0.3– 0.4s).....	136
Figure V.16: Caractéristique de convergence par l'algorithme ACO	137
Figure V.17: Variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI et ACO	138
Figure V.18: Figuration en zoom de variation de la puissance réactive (a) (temps pris entre (0– 0.1s ,et 0.18– 0.34s), et active (b) (temps pris entre (0– 0.1s, et 0.28– 0.4s).....	138
Figure V.19: Variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI ,ACO et CLF	139
Figure V.20: Figuration en zoom de variation de la puissance réactive (a) (temps pris entre (0– 0.1s ,et 0.18– 0.34s), et active (b) (temps pris entre (0– 0.1s, et 0.28– 0.4s).....	139
Figure V.21: Formes d'ondes de courant injecté par le STATCOM (cas de creux de tension).....	141
Figure V.22: Variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI et CLF(cas de creux de tension).	142
Figure V.23: Figuration en zoom de variation de puissance réactive (a) (temps pris entre (0– 0.1sec, et 0.2– 0.3 sec)) , et active (b) (temps pris entre(0– 0.1sec, 0.3– 0.4sec, 0.4– 0.5sec, et 0.5– 0.6sec)) ...	142
Figure V.24: Formes d'ondes de courant généré par le convertisseur parallèle (cas de surtension)....	143
Figure V.25: Variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI et CLF(cas de surtension)...	144
Figure V.26: Figuration en zoom de variation de la puissance réactive (a) (temps pris entre (0– 0.1sec, et 0.2– 0.3sec)) , et active (b) (temps pris entre (0– 0.1sec, 0.3– 0.4sec, 0.4– 0.5sec, et 0.5– 0.6sec)).....	144

Annexe A

Figure A.1: Sous blocs Simulink de commande d'UPFC : a) commande de signal V_d , et b) commande de signal V_q	148
Figure A.2: Sous blocs Simulink de commande de la partie DC	149
Figure A.3: Sous blocs Simulink de commande du UPFC série: a) La commande classique par PI, et b) La commande par la logique floue	150
Figure A.4: Sous blocs Simulink de commande du UPFC shunt : a) La commande classique par PI, et b) La commande par la logique floue.....	150
Figure A.5: Schéma visuel de l'intégration de circuit UPFC avec le réseau.....	151
Figure A.6: Schéma du convertisseur triphasé série.....	152
Figure A.7: Algorithme de contrôle proposé pour l'onduleur série de l'UPFC.....	152
Figure A.8: Configuration de circuit de réglage du SSSC réalisés avec des blocs Simulink.....	153
Figure A.9: Schéma du convertisseur triphasé shunt	153
Figure A.10: Algorithme de contrôle proposé pour l'onduleur shunt de l'UPFC.....	154
Figure A.11: Configuration de circuit de réglage du STATCOM réalisés avec des blocs Simulink ...	154

Annexe B

Figure B.1: Profile de la tension sans compensation (Sans UPFC).....	155
Figure B.2: Résultats du flux de puissance sans compensation (Sans UPFC)	155
Figure B.3: Profile de la tension avec compensation (Avec UPFC)	156
Figure B.4: Résultats du flux de puissance avec compensation (Avec UPFC).....	156

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I :

Tableau I.1: Les différents interrupteurs commandés dans les applications des FACTS.....	14
Tableau I.2: Contribution des systèmes FACTS dans les réseaux électriques	29
Tableau I.3: Mise en œuvre pratique des dispositifs FACTS dans différents pays	30

Chapitre II :

Tableau II.1: Nombre d'UPFC installés dans le monde et leur puissance installée	33
Tableau II.2: Résumé des différents contrôleurs UPFC et leurs limites	56

Chapitre III :

Tableau III.1: Analyse des performances de l'UPFC dans le réseau IEEE-14 nœud	93
---	----

Chapitre IV :

Tableau IV.1: Exemple de normalisation.....	99
Tableau IV.2: Matrice d'inférence	104
Tableau IV.3 : Les paramètres standard de l'algorithme ACO	119

Chapitre V :

Tableau V.1: Variation de consigne de puissance en fonction de temps.....	122
Tableau V.2: Paramètres de simulation adoptée pour les deux méthodes GA et PSO.....	126
Tableau V.3: Caractéristiques des régulateurs utilisé dans le contrôle de variation de puissances active (P).....	131
Tableau V.4: Caractéristiques des régulateurs utilisé dans le contrôle de variation de puissances réactive (Q)	130
Tableau V.5: Paramètres de simulation adoptée pour la méthode ACO	137
Tableau V.6: Caractéristiques et comparaison entre les contrôleurs (PI, PI_ACO et CLF).....	140

Annexe A :

Tableau A.1: Valeurs des paramètres principaux du réseau électrique associé à un UPFC.....	149
Tableau A.2: Valeurs des paramètres principaux de l'UPFC.....	151

Annexe B :

Tableau B.1: Résultat du flux de puissance dans le réseau IEEE_14 nœuds	156
Tableau B.2: Résultat du profil de tension dans le réseau IEEE_14 nœuds	157
Tableau B.3: Résultat des pertes des puissances dans le réseau IEEE_14 nœuds.....	157

Liste des Acronymes
&
Symboles

Liste des Acronymes et Symboles

La liste ci-dessous donne un aperçu de la notation fréquemment utilisée dans cette thèse, accompagnée d'une brève explication.

Acronymes

AC:	Alternating Current
AI :	Artificial Intelligence
ANFIS :	Adaptive Network-based Fuzzy Inference
ANN :	Artificial Neural Networks
ASVC:	Advanced Static Var Compensator
GA :	Généétique Algorithmes
ACO:	Ant Colony Optimization
BT :	Base Tension
CA ou AC:	Courant Alternatif
CC ou DC:	Courant continu
CCHT :	Courant Continu Haute Tension
CSC:	Current Source Converter
CSI:	Current Source Inverter
DPFC:	Dynamic Power Flow Controller
D-FACTS:	Distributed Flexible AC Transmission System
EPRI:	Electric Power Research Institute
FACTS:	Flexible Alternating Current Transmission Systems
FLC:	Fuzzy Logique Control
GUPFC:	Generlized Unified Power Flow Controller
GTO:	Gate Turn Off
HVDC:	High Voltage Direct Current
IPFC:	Interline Power Flow Controller
IGBT:	Insulated Gate Bypolar Transistor
IEEE:	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IGCT:	Integrated Gate Commutated Thyristors
PTC:	Power Transfert Capapility
PCC:	Point of Common Coupling
PLL:	Phase Locked Loop
PWM:	Pulse width Modulation
PI:	Régulateur Proportionnel Intégral
PSO:	Particle Swarm Optimization
RMS:	Root Mean Square (valeur efficace)
MT:	Moyenne Tension
SSSC:	Static Synchronous Series Compensator
SVC:	Static Var Compensator
STATCOM:	Static Compensator
SPS:	Static Phase Shifter
SSR:	Sub-Synchronous Resonance
SVD:	Singular Value Decomposition
TCBR:	Thyristor Control Breaking Resistor
TCR :	Thyristor Controlled Reactor
TSR:	Thyristor Switched Reactor
TSC:	Thyristor Switched Capacitor

TCSC:	T hyristor C ontrolled S eries C apacitor
TSSC:	T hyristor S witched S eries C apacitor
TCSR:	T hyristor C ontrolled S eries R eactor
TSSR:	T hyristor S witched S eries R eactor
TCPAR:	T hyristor C ontrolled P hase A ngle R egulator
THT:	T rès H aute T ension
UPFC:	U nified P ower F low C ontroller
MLI:	M odulation de L argeur d' I mpulsion
VSC :	V oltage S ource C onverter

Symboles

$V (V_s)$:	Tension au point de départ (génération)
$V' (V_r)$:	Tension au point d'arrivée (le récepteur)
$V_s (V_c)$:	Tension générée par le compensateur série (SSSC)
V_{sd} :	La composante directe de la tension générée par le compensateur série
V_{sq} :	La composante quadrature de la tension générée par le compensateur série
$V_p (V_{sh})$:	Tension générée par le compensateur shunt (STATCOM)
V_{pd} :	La composante directe de la tension générée par le compensateur shunt
V_{pq} :	La composante quadrature de la tension générée par le compensateur shunt
V_m :	Tension mesuré
$V^*(V_{ref})$:	Tension de référence
V_t :	Tension au nœud de connexion shunt,
V_{dc} :	Tension continu aux bornes du condensateur
i :	Courant dans une phase dans le point de départ (génération)
i_d :	Composante du courant i selon l'axe d
i_q :	Composante du courant i selon l'axe q
i' :	Courant dans une phase dans le point d'arrivée (le récepteur)
i'_d :	Composante du courant i selon l'axe d
i'_q :	Composante du courant i selon l'axe q
i_p :	Courant fournit par le compensateur shunt
i_{pd} :	Composante directe du courant fournit par le STATCOM
i_{pq} :	Composante quadrature du courant fournit par le STATCOM
I_{dc} :	Courant dans le circuit continu
P :	Puissance active fournit par le générateur
Q :	Puissance réactive fournit par le générateur
P' :	Puissance active au point d'arrivée (le récepteur)
Q' :	Puissance réactive au point d'arrivée (le récepteur)
P_s :	Puissance active fournit par le compensateur série (SSSC)
P_p :	Puissance active fournit par le compensateur shunt (STATCOM)
Q_s :	Puissance réactive fournit par le compensateur série (SSSC)
Q_p :	Puissance réactive fournit par le compensateur shunt (STATCOM)
δ :	Angle de charge entre V et V'
θ :	Déphasage du courant de ligne
$X(t)$:	Position de la particule
$V(t)$:	Vitesse de la particule
$iter$:	Itération
$itermax$:	Nombre maximale de l'itération

Paramètres

R :	Résistance de la ligne de transport
X :	Réactance de la ligne de transport
R_s :	Résistance d'une phase du transformateur de couplage série
L_s :	Inductance d'une phase du transformateur de couplage série
X_s :	Réactance totale d'une phase du transformateur de couplage série
R_p :	Résistance d'une phase du transformateur de couplage shunt
L_p :	Inductance d'une phase du transformateur de couplage shunt
X_p :	Réactance totale d'une phase du transformateur de couplage shunt
C :	Capacité du circuit continu commun DC
L :	Self inductance,
W :	Coefficient d'inertie
C_1, C_2 :	Coefficients d'accélération

Liste des Publications / Stages

Liste des Publications/ Stages issues de ce travail

Les travaux de recherche consignés par la présente thèse ont été concrétisés par plusieurs publications, Stages, communications nationales et internationales valorisant ainsi l'établissement qui m'a accueilli durant toute ma scolarité, on peut le site comme suite:

Stages (02)

- **45 jours** (01 aout -12 Septembre 2016) à l'institut de BMI (British Malaysien Institute), Université de Kuala Lumpur (UniKL), Malaysia. (Sous la direction de **Dr : FADI Albatsh**)
- **15 jours** (25 October-09 Novembre 2017) au laboratoire des Technologies Innovantes de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Tanger (ENSA), Université Abdelmalek Essaadi, Royaume du Maroc (Sous la direction de **Pr: Haddi Ali**).

Publications internationals (02)

1. **Abdelouahed Touhami, Zidi Sid Ahmed, Fadi M. Albatsh**, "Performance Evaluation of Fuzzy-Logic Controller applied to a UPFC Transmission System", in *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 2018, vol. 66, no. 1, pp 122-131, ISSN 1582-5175.
2. **ABDELOUAHED Touhami , ZIDI sid ahmed , and HADDI ali**, "Enhancement of Active and Reactive Power Flow Control over the Transmission Line using UPFC", in *international journal of computer science communication & information technology (CSCIT)*,2018, Vol.6 pp.1-8, ISSN 2356-5608.

Conférences Internationales (05)

1. **ABDELOUAHED Touhami and Zidi Sid Ahmed**, "Modeling and transient simulation of Unified Power Flow Controllers (UPFC) in power system". Published in: *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2015)*, Boumerdes, December 13th – 15th, ©2015IEEE .<http://ieeexplore.ieee.org/>, **DOI: 10.1109/INTEE.2015.7416851**
2. **ABDELOUAHED Touhami, Zidi Sid Ahmed , and HADJERI Samir**, "Control of a wind energy conversion system equipped by a STACOM for power quality improvement" Published in: *Proceedings of the 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC-2016)* Algiers, November 15-17, 2016 978-0-9567157-6-0 © IEEE 2016 pp 115-121
DOI: 10.1109/ICMIC.2016.7804283
3. **ABDELOUAHED TOUHAMI and Zidi Sid Ahmed**, "Control Design and Simulations of Unified Power Flow Controllers (UPFC) in Power System- Modeling and Case Study ",Published in: *Proceedings of the Mechanical Engineering and Technologies Conference (MECHATECH 16)*, May 17- 18, 2016 in Istanbul, Turkey.
4. **ABDELOUAHED Touhami, Zidi Sid Ahmed, HADJERI Samir and TANDJAOUI .Med Nasser**"Apport des éoliennes dans les réseaux électriques - Utilisation d'un STATCOM –", *Première Conférence Internationale sur les Réseaux Électriques Intelligents (CIREI 2019)*, Mars 17-18, 2019, ENP- Oran – Algérie.
5. **ABDELOUAHED Touhami, Zidi Sid Ahmed, HADJERI Samir and Djilani Kobibi Y.I.** "Control system design of UPFC for power flow management in transportation system using Fuzzy system and GA algorithm", *Première Conférence Internationale sur les Réseaux Électriques Intelligents (CIREI 2019)*, Mars 17-18, 2019, ENP- Oran – Algérie.

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Problématique de la thèse

Ces dernières années, les réseaux électriques ont connu un développement considérable et devenus de plus en plus complexes [1]. Ces systèmes électriques qui doivent conduire de grandes quantités de l'énergie en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats beaucoup de problèmes peuvent survenir et leur exploitation se fait près de leurs limites de stabilité et de sécurité (limites thermiques) [2]. La situation actuelle dans beaucoup de pays au monde est caractérisée par les tendances suivantes:

- Augmentation de la consommation d'électricité due à l'industrialisation, à l'urbanisation et à la croissance de la population : Avec l'augmentation des transits de puissance, les réseaux deviennent plus compliqués à gérer en raison de la complexité de contrôler les paramètres de la ligne [3], ceci diminue leur niveau de sécurité.

- Contraintes écologiques et administratives : Le respect de l'environnement joue un rôle important dans la société actuelle. Il est en particulier de plus en plus difficile d'obtenir des permis de construire des nouvelles lignes ou l'implantation de nouvelles centrales. En pratique, cela demande plusieurs années.

- Contraintes opérationnelles : la demande de puissance a une croissance constante mais géographiquement irrégulière. Les centrales qui génèrent l'énergie sont souvent éloignées des charges importantes et la localisation des nouvelles centrales dépend essentiellement d'autorisations administratives et du respect de l'environnement, comme nous l'avons vu ci-dessus. Pour satisfaire la demande d'énergie sous ces conditions contradictoires, les compagnies gérant les réseaux de transport font de plus en plus appel aux échanges internationaux de puissance, en raison des problèmes économiques et d'amélioration de la sécurité, ce qui demande une interconnexion de systèmes. L'interconnexion croissante des réseaux de transport peut être à l'origine de l'apparition d'oscillations de puissance entre les réseaux interconnectés. Or ces oscillations, dans certains cas, persistent sur de longues périodes, rendant nécessaire la séparation des réseaux interconnectés [3]. Cette situation de fonctionnement engendre des problèmes d'exploitation, notamment pour le contrôle des flux de puissance, le maintien d'un profil de tension acceptable (qualité de l'énergie), la surveillance des variations de charge... etc. A cet effet, l'aspect sécurité prend une grande importance et des recherches sont affiliées dans différents pays pour trouver des moyens susceptibles d'améliorer la sécurité et rendre l'exploitation des réseaux plus flexible. Considérant que les réseaux de transport électrique représentent une grande valeur économique et compte tenu des limites actuelles, il faut essayer d'aller dans les directions suivantes:

- ❖ Améliorer l'utilisation des équipements existants en augmentant leur capacité de transfert de puissance. D'un point de vue financier, cela peut se révéler avantageux.

- ❖ Améliorer la flexibilité des réseaux car pouvoir changer rapidement leur configuration permet une meilleure répartition de la puissance, particulièrement en cas de perturbations ou de transferts de puissance imprévus.

Au cours des dernières années, les moyens classiques de contrôle des réseaux tel que : les transformateurs changeurs de prises, les transformateurs déphaseurs, les compensateurs séries ou parallèles (les condensateurs et inductances, etc...) sont proposés dans l'industrie pour améliorer l'utilisation des équipements existants. La compensation shunt agit sur le profil de la tension, la compensation série quant à elle modifie la réactance de la ligne et le déphaseur modifie l'écart angulaire entre les tensions. La plupart des dispositifs compensateurs actuels sont traditionnels, malgré l'utilisation de la microélectronique, des ordinateurs et des moyens rapides de télécommunication dans le contrôle des réseaux, la dernière action dans ces systèmes est prise avec des dispositifs mécaniques ou électromécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long [3],[4] et s'avèrent parfois insuffisants à répondre efficacement aux perturbations du réseau (nouvelles exigences), donc la recherche sur les solutions devient un enjeu stratégique et incontournable pour tous les compagnies d'électricité. En 1988, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute), qui représente une société dédiée à la recherche dans les réseaux électriques et regroupant des compagnies d'électricité américaines [3], a lancé des études à long terme qui vise à rendre les réseaux plus modernes et flexibles par des systèmes de contrôle rapide utilisant les ressources offertes par l'électronique de puissance et la microélectronique de commande. Parmi eux, les dispositifs FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems). Selon le IEEE, le terme FACTS désigne les systèmes de transport et de distribution d'énergie électrique, en courant alternatif, qui font appel à l'électronique de puissance pour améliorer leur flexibilité d'exploitation et leur capacité de transport [5]. Le terme flexible fait référence à la capacité du réseau à s'ajuster automatiquement en fonction des conditions d'exploitation pour garder une bonne marge de sécurité statique et dynamique [4]. Ces dispositifs, selon leur connexion aux réseaux électriques, peuvent être de type série, de type parallèle, de type hybride [6].

Aujourd'hui, l'implantation des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques est un sujet de recherche important. Récemment, nombreux types de FACTS ont été implantés avec succès dans les réseaux électriques, certains sont encore au stade pilote et beaucoup sont proposés dans la recherche et le développement [6], [7]. Le choix de l'UPFC dans cette thèse parmi les autres dispositifs est principalement dû à ses avantages supérieurs, il offre beaucoup de flexibilité et des capacités de contrôle incomparables qui ne peuvent pas être obtenues par l'utilisation d'autres types de FACTS. Ce dispositif permet de combiner l'application du contrôle de flux de puissance avec la compensation série et la compensation shunt de la puissance réactive en un seul dispositif. En plus du contrôle simultanément et indépendamment du flux de puissance active et réactive, il permet d'ajuster la tension, l'impédance de la ligne et l'angle de transport. Il présente aussi d'autres fonctionnalités telles que l'amélioration de la stabilité transitoire du réseau face aux événements, l'amortissement des oscillations dynamiques et l'augmentation de la capacité de transport.

En réalité, le nombre d'implémentations de l'UPFC dans l'industrie reste limité en raison de son prix élevé. Autrement, la complexité dans la conception de ce dispositif et leur stratégie de commande complexe peuvent être l'une des autres raisons de l'utilisation limitée de l'UPFC [4], [8],[9]. L'un des défis dans la conception d'un système de contrôle pour l'UPFC est la complexité du contrôleur UPFC car elle implique un contrôle multi-variable simultané, une mauvaise conception du système de contrôle va certainement conduire à une instabilité [4]. Il dispose de quatre aptitudes de contrôle différentes et toutes nécessitent un réglage approprié pour éviter toute défaillance des fonctions du contrôleur [10]. La principale fonction d'un convertisseur série de l'UPFC est de contrôler le flux de puissance dans la ligne de transmission en injectant une tension contrôlable en série avec la ligne. Ainsi, le convertisseur série de l'UPFC échange la puissance active et réactive avec ligne de transmission [4], [9]. Le condensateur de liaison CC alimente le convertisseur série de l'UPFC pour échanger la puissance active avec la ligne de transmission. Mais, cela peut causer une augmentation ou diminution de la tension du condensateur CC. En conséquence, le fonctionnement de l'UPFC sera instable [10], [11]. La tension du condensateur CC doit être réglée à la valeur de référence pour assurer un bon fonctionnement de l'UPFC. Le but du convertisseur shunt est de conserver le niveau de tension du condensateur du circuit intermédiaire à sa valeur de référence en tirant le courant de la ligne et en maintenant la tension de la ligne de transmission à sa valeur de référence en contrôlant la puissance réactive dans la ligne de transmission. Si le convertisseur shunt ne répond pas à la demande de puissance active requise par le convertisseur série, la tension du condensateur du circuit intermédiaire peut s'effondrer et l'UPFC échouera dans le contrôle de flux de puissance à travers la ligne de transmission [9]. Un autre défi du contrôle du flux de puissance avec UPFC est le moment où le flux de puissance réactive change dans la ligne de transmission, ce qui affectera à son tour la tension du bus UPFC et tous les autres paramètres [9],[12], [13].

Objectif, et contribution

Dans le cadre de cette problématique de recherche, nos travaux sont focalisés sur l'implantation des dispositifs FACTS notamment l'UPFC dans les réseaux électriques. En premier lieu nous nous intéressons d'étudier les modèles UPFC disponibles dans la littérature tel que les modèles UPFC disponibles dans la bibliothèque de Matlab/Simulink et de développer d'autres modèles qui peuvent être facilement incorporé dans un réseau électrique, pour voir leur impact en variant les conditions de fonctionnement et la complexité des réseaux tests. En second lieu, nous développerons des techniques de commande non linéaires, pour évaluer les performances de l'UPFC en commande d'écoulement de puissance à travers une interconnexion.

Contenu de la thèse

De ce fait, la présente thèse est subdivisée en Cinq chapitres dont le contenu est brièvement résumé ci-dessous : après cette introduction,

Le premier chapitre présente des généralités sur les systèmes FACTS (constitution, équipement, et leur classification) en tant que solutions des problèmes mentionnés à l'introduction. Nous introduisons quelques dispositifs FACTS et citons le rôle important qu'ils jouent dans l'exploitation et la gestion des réseaux électriques, en donnant pour chacun d'entre eux sa configuration, son principe de fonctionnement et ses applications.

Le deuxième chapitre a été consacré pour présenter d'une façon approfondie le concept UPFC. Dans la première partie de ce chapitre nous allons fournir les détails sur l'UPFC (présentation des différents blocs constitutifs de l'UPFC), suivi par une enquête sur les principes de fonctionnement de l'UPFC, ses aptitudes de contrôle, et ses divers modes de fonctionnement. La seconde partie de ce chapitre est concentrée à la modélisation dynamique de l'UPFC, ensuite la troisième partie de cette étude a été menée concernant l'état de l'art de la commande de l'UPFC, un bref aperçu sur les stratégies de contrôle de l'UPFC dans la littérature a été analysé.

Le troisième chapitre est réservé pour enrichir le system FACTS étudié (UPFC) par la simulation des réseaux électriques contenant ce dernier (réseau électrique associé à un UPFC) afin d'expérimenter leur efficacité en considérant différents modes de fonctionnement ainsi que différents objectifs, en employant un outil de simulation pour mettre cette étude en application et de nous aider à observer les différents phénomènes électriques proches à celles de la réalité ainsi que le comportement de l'UPFC pour les affaiblir. À cet égard, le logiciel Matlab/Simulink est utilisé pour modéliser et tester les différents systèmes proposés, ce logiciel est l'un des meilleurs logiciels pour la simulation dynamique dans le domaine de contrôle et de commande des systèmes FACTS. À travers multiples tests d'applications sous différents fonctionnements nous avons analysé globalement toutes les fonctionnalités de ce composant dans un réseau électrique, la commande classique à structure simple (PI) est utilisée dans le mécanisme de control des convertisseurs de l'UPFC. Afin de mieux clarifier le contenu de ce chapitre, il faut signaler que dans ce chapitre on présente deux différentes parties d'études en tenant compte des simulations et discussions avec divers objectifs ainsi que différents modèles UPFC. Tout d'abord, dans la première partie de ce chapitre nous avons étudié et analysé les performances et les aptitudes de l'UPFC concernant le contrôle indépendant et instantané de flux de puissance active et réactive. Ensuite, la réponse du réseau après des défauts (réseau électrique perturbé) et le rôle de l'UPFC pour les affaiblir a été également effectuée, et discutée. Dans la dernière partie de ce chapitre, un sujet important est étudié, il s'écoule dans le contexte de contribution de l'UPFC dans un réseau multi-machines. Le réseau choisi comme un test c'est le réseau multi-machines 14 nœuds, nous examinons l'action de l'UPFC dans le réglage de transit des puissances active et réactive en régime permanent, afin d'assurer l'aptitude de l'UPFC à imposer un flux de puissance désiré dans les différentes lignes constituent le réseau 14 nœuds et améliorer les capacités de transport de celle-ci. De plus, les tensions des nœuds et les pertes

active et réactive sont aussi traitées. En conséquence, la performance du réseau test sans UPFC sera comparée à celles doté d'un UPFC afin de mettre en exergue l'apport de ce dernier sur le transit de puissance. La contribution dans cette partie, est la conception du réseau 14 nœuds dans l'espace Simulink avec une nouvelle structure dynamique UPFC.

Les deux derniers chapitres IV, et V sont consacrés à atteindre le 2^{ème} objectif de notre thèse concernant l'aspect de contrôle de l'UPFC. Les deux chapitres font suite à l'idée du chapitre III, pour enrichir l'étude de système FACTS par le développement des techniques de commande avancées de sorte que leurs utilisations nous permettent d'améliorer les performances de réglage de l'UPFC pour atteindre un fonctionnement vital des réseaux électriques. Ces méthodes reposent sur le principe de la théorie 'Intelligence artificielle'. Parmi les techniques intelligentes, on trouve la logique floue et les méthodes d'optimisation qui sont connues souvent par le nom « méta-heuristique ». Pour cela, le quatrième chapitre a traité en détail les intelligences artificielles (la logique floue, les méta-heuristique), une brève introduction sur la théorie de commande floue sera discutée au début du chapitre. Par la suite, un état de l'art sur les méta-heuristiques les plus utilisées et nous mettons l'accent sur celles que nous avons étudié dans le cadre de cette thèse : les algorithmes génétiques (AG), les essaims de particules (PSO), le PSO hybride et les colonies de Fourmis (ACO).

Dans le cinquième chapitre, on examine les stratégies de commande de type avancé qui sont mentionnées pour améliorer les performances de réglage de l'UPFC. En conséquence, une étude comparative des performances de ces commandes (classique par PI / avancées avec la logique floue et les méta-heuristique) est effectuée et discutée.

Finalement, on clôturera la thèse par une conclusion générale où la finalité de l'objectif est mise en valeur par une description des résultats dont les performances sont jugées très satisfaisantes et prometteuses ainsi que les perspectives à entreprendre dans les futurs travaux concernant l'UPFC.

Chapitre I

Les Systèmes FACTS

I.1. Introduction

Devant les problèmes de transit de puissances qui proviennent typiquement des réseaux de transport, l'évolution progressive vers un réseau électrique plus intelligent est devenue nécessaire et ça demande de nombreuses avancées technologiques. En 1988 la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé un projet d'étude à long terme qui vise à rendre les réseaux plus modernes et flexibles [2]. Le concept proposé a été dénommé Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS). Ce projet met en relief les nouvelles possibilités de l'électronique de puissance dans la commande et le contrôle du transport de l'énergie électrique en courant alternatif (AC). En plus, cette technologie ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des installations électriques existantes sans avoir à construire des nouvelles lignes [14]. Essentiellement, les systèmes FACTS visent à contrôler la tension, augmenter les capacités de transit, et assurer la stabilité dynamique des réseaux de transmission d'électricité [6], [15]. Ce chapitre a pour objectif de présenter de manière approfondie les conceptions de base des systèmes FACTS, elles sont présentées et discutées d'un point de vue pratique. En effet, on va expliquer comment les dispositifs FACTS fonctionnent dans la pratique afin de pouvoir commander les paramètres du réseau électrique ainsi que l'amélioration des flux de puissance.

I.2. Besoin des systèmes FACTS au marché

En raison de la réglementation du marché d'énergie, le besoin des systèmes FACTS comme nouveaux équipements pour conduire le réseau de transport contre les différents problèmes qui peuvent affecter le réseau électrique durant son fonctionnement est devenu plus urgent. Ces systèmes offrent des capacités de contrôle incomparables qui ne peuvent pas être obtenues par l'utilisation d'autres types de contrôle classique (les solutions traditionnelles). Le schéma de la figure I.1, illustre un exemple d'un réseau de transport interconnecté, où l'interconnexion entre la transmission à haute tension et la distribution basse tension est montrée [14].

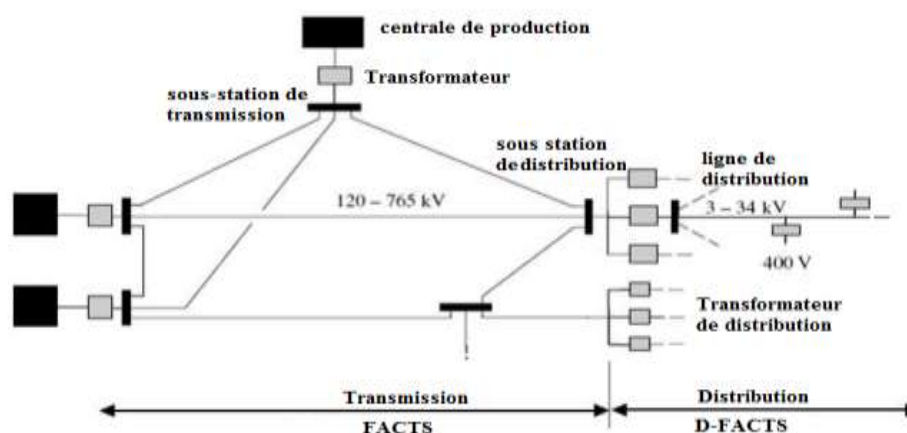


Figure I. 1: Schéma simplifié d'un réseau interconnecté

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

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

Pour fixer les idées et bien comprendre le concept principal du fonctionnement des FACTS, nous pouvons prendre un exemple simple comme est montré sur la figure I.2, où V ($V \angle \theta$) représente la tension d'entrée, et V' ($V' \angle \theta'$) la tension de réception. Les deux extrémités sont reliées par une ligne de transport de réactance (X_L) [1], [16].

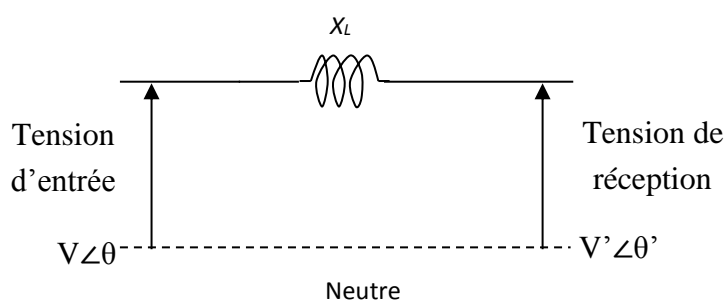


Figure I.2: Diagramme d'une ligne de transport

D'une façon générale, les puissances actives et réactives (P , et Q) transitées entre deux nœuds (V), et (V') présentant un angle de transport $\delta = \theta - \theta'$ (déphasage entre V et V') et connectées par une liaison d'impédance (X_L) sont données par les équations suivantes :

$$P = \frac{V.V'}{X_L} \sin \delta \quad (\text{I.1})$$

$$Q = \frac{V^2}{X_L} - \frac{V.V'}{X_L} \cos \delta \quad (\text{I.2})$$

En analysant l'équation (I.1), il est évident que la puissance transmissible par une ligne est limitée par les paramètres énoncés ci-dessus (tension, impédance, et angle de phase) et pas forcément par sa limite thermique [3]. De plus, il découle de cette équation que si l'on peut régler un, deux, voire les trois paramètres, on contrôle alors le transit de puissance dans la ligne.

Autrement dit, il est possible d'augmenter la puissance transitée entre deux nœuds soit en maintenant la tension des systèmes, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, soit en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison [3], [9]. En jouant sur un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettent un contrôle précis de transit des puissances dans les lignes de transmission.

On peut conclure que les contrôleurs FACTS puissent fournir de nombreux avantages importants lorsqu'ils sont implantés dans le système énergétique [6], [9], [15], [17], [18]:

- Assurer le contrôle du flux d'énergie à travers les lignes de transmission,
- Augmenter la capacité de transfert de puissance des réseaux de transport d'énergie à leurs limites thermiques,
- Améliorer la sécurité globale du système.
- Améliorer dynamiquement la stabilité des réseaux, cette fonction supplémentaire des FACTS comprend l'amélioration de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations de puissance
- Réduire les flux de puissance réactive, ce qui permettrait ainsi à la ligne de transporter plus de puissance active
- Fournir des connections sécurisées entre les compagnies de production et les régions par la diminution de la réserve de la puissance à générer requise par les deux zones.
- Améliorer la qualité de l'énergie du système.

I.3. Classification des dispositifs FACTS

La figure I.3, représente globalement les différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques. Alors que, la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels à base des composants fixes ou mécaniquement permutables comme les inductances ou les capacités ainsi que des transformateurs [2], [6], [14]. Il faut noter que les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commandés avec des interrupteurs statiques et des convertisseurs de l'électronique de puissance [9].

La classification des FACTS en termes « rapide » et « statique » a besoin d'une certaine explication. Le terme « rapide » est employé pour exprimer la contrôlabilité rapide des FACTS fournis par l'électronique de puissance. C'est l'un des facteurs principaux de différenciation des dispositifs conventionnels. Le terme « statique » signifie que les dispositifs n'ont aucune pièce mobile comme les commutateurs mécaniques pour exécuter la contrôlabilité rapide [6], [15].

Les contrôleurs FACTS sont classés selon deux aspects importants qui sont:

1. Le concept d'opération,
2. La manière de connexion avec le réseau de transport.

Il existe deux types de contrôleurs FACTS basés sur le concept de principe de fonctionnement et de fonctionnalité. Cette classification est résumée sur la figure I.3. Le premier type concerne les dispositifs FACTS contrôlés par thyristor, qui peuvent être commandés seulement à la conduction et non pas à l'interruption [19], ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive selon le besoin du réseau. La colonne gauche des systèmes FACTS sur la figure I.3 présente cette famille telle que le SVC et le TCSC qui sont connus depuis plusieurs dizaines d'années et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux [9]. Le deuxième type dit avancé, ceux-ci sont nés avec le développement des semi-conducteurs de puissance commandés à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs source de tension VSC (voltage sourced converter) ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau. Les dispositifs dans la colonne de droite de la même figure (Figure I.3) contiennent ces éléments tel que : le STATCOM, le SSSC et l'UPFC.

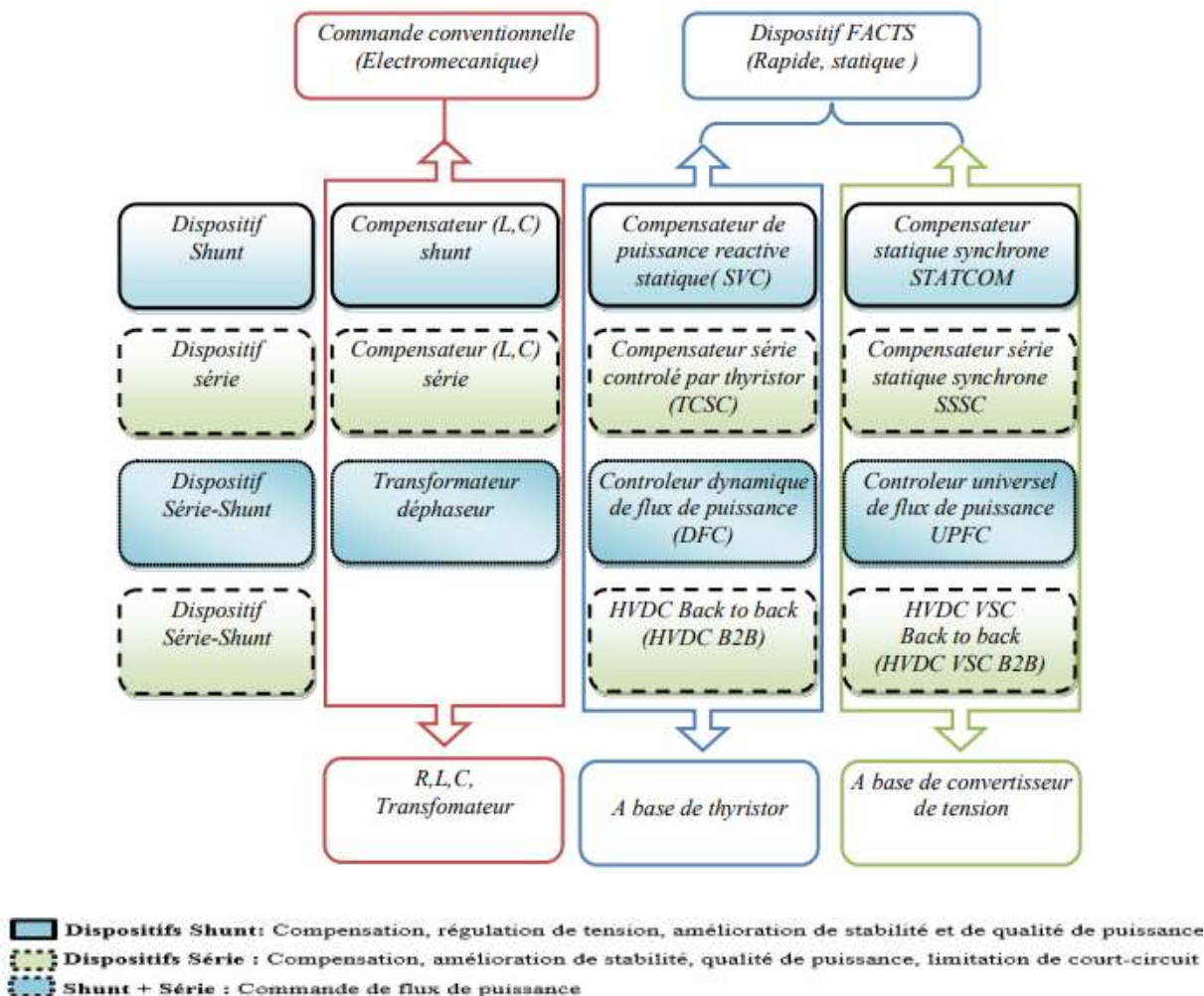


Figure I.3: Différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques [3]

D'un autre côté, les contrôleurs FACTS sont classés en trois catégories en fonction de leur connexion au réseau de transmission :

- ✓ Compensateurs parallèles (par exemple, TCR, SVC et STATCOM) connectés en parallèle dans les postes du réseau,
- ✓ Compensateurs séries (par exemple, TCSC et SSSC) insérés en série avec les lignes de transport,
- ✓ Compensateurs combinés (série-parallèle) qui recourent simultanément aux deux couplages (par exemple, l'IPFC et l'UPFC).

L'avantage de chaque catégorie énoncée ci-dessus est bien expliqué sur la Figure I.4, elle montre que les FACTS de type parallèle régulent la tension en agissant sur la puissance réactive dans les points de raccordement. D'un autre côté, les FACTS de type série agissent sur la réactance (X_L) de la ligne pour augmenter la puissance active à travers les lignes de transmission, tandis que les FACTS de type hybride contrôlent tous les paramètres de flux de puissance (tension, impédance et angle de phase) pour l'améliorer [9], [16].

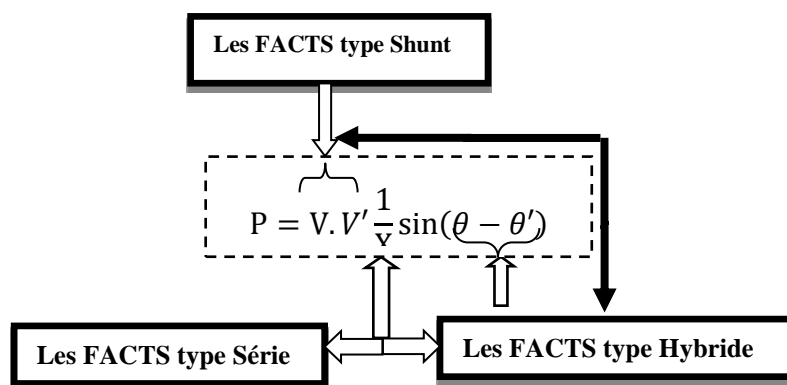


Figure I.4: Diagramme schématique pour l'application des FACTS

I.4. Équipements FACTS

I.4.1. TCR et TSR

Le TCR (Réactance à Thyristor Commandé) est défini comme : une inductance reliée en parallèle avec un thyristor commandé de manière que la réactance efficace est changée de façon continue par la commande partielle de conduction de la valve du thyristor [20].

Le TSR (Réactance à Thyristor commuté) est défini comme : une inductance et un thyristor commuté reliés en parallèle dont la réactance efficace est changée par étapes en plein fonctionnement ou à zéro conduction de la valve du thyristor [15].

I.4.1.1. Principes de fonctionnement de TCR

Le TCR est basé sur le fonctionnement des thyristors comme des éléments de contrôle, qui sont montés en deux thyristors antiparallèle pour conduire sur des moitiés de cycles alternatifs de la fréquence d'alimentation, comme est présenté sur la figure I.5 [20], [21].

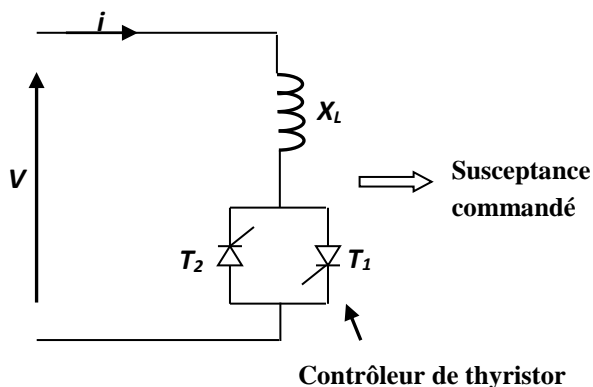


Figure I.5: La représentation de base d'un TCR

Le TCR est une susceptance contrôlable, qui peut être appliqué comme compensateur statique. Le courant instantané (i) est donné par :

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t), & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0, & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

Où: V représente la tension efficace, $X_L = \omega L$ est la réactance de la fréquence fondamentale de la réactance (en Ohms); $\omega = 2\pi f$, α l'angle de déclenchement en retard, et σ l'angle de conduction.

I.4.1.2. TCT

Une autre variante du TCR est le TCT (Transformateur à Thyristor Commandé), c'est un transformateur à noyau qui est nécessaire pour obtenir une très haute réactance de fuite [22], au lieu d'un transformateur abaisseur séparé avec des réactances linéaires, et les enroulements secondaires sont simplement court-circuités par les contrôleurs de thyristor (Figure I.6).

La réactance de fuite élevée protège le transformateur contre les forces de court-circuit pendant les défauts secondaires. En raison de ses linéarités et grande masse thermique, le TCT peut résister d'une manière très utile à des surcharges dans le régime de ralentissement (absorber) [21].

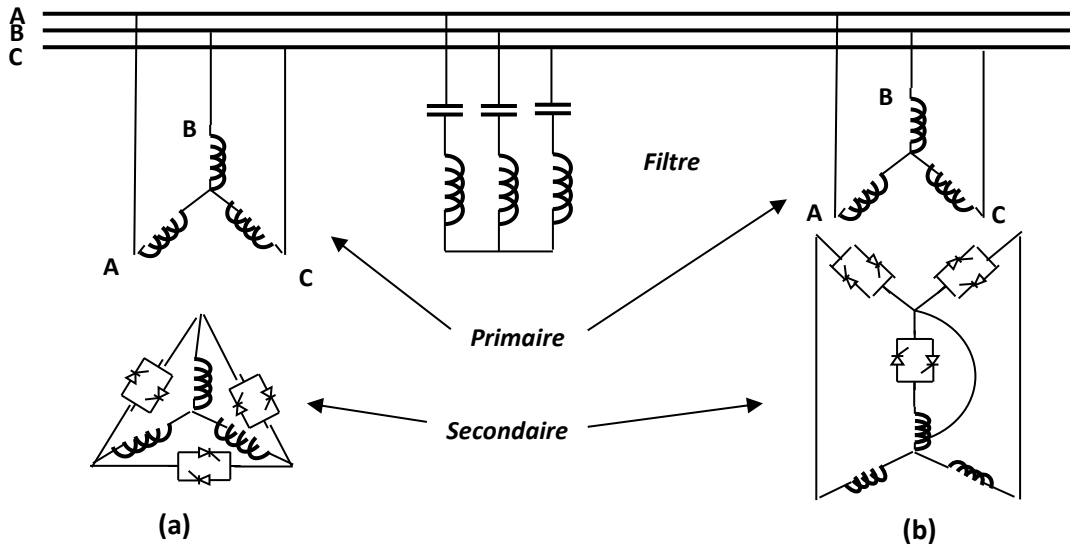


Figure I.6: Le compensateur TCT.

- (a) Le montage des réacteurs en étoile et les contrôleurs de thyristor en triangle,
- (b) Le montage des réacteurs et les contrôleurs de thyristor en étoile (système à quatre fils).

I.4.1.3. TSC

Le TSC est un condensateur commuté par thyristor et relié en parallèle avec une réactance efficace. Cette dernière est changée soit en fonctionnement complète de thyristor, soit à la conduction nul de la valve de thyristor [22]. Les figures I.7(a) et I.7(b) présentent un TSC triphasé pour deux types de montages différents [15], [21].

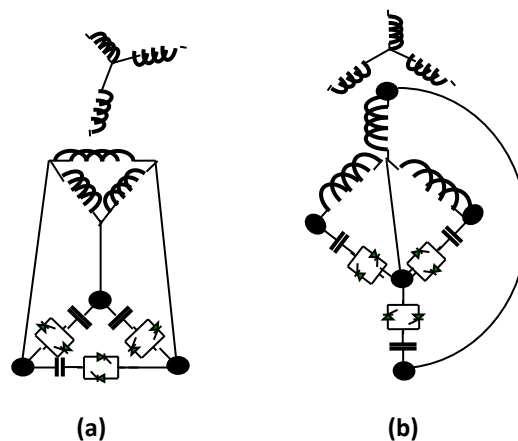


Figure I.7: Représentation d'un TSC triphasé.

- (a) Le secondaire d'un transformateur est en triangle, TSC connecté en triangle
- (b) Le secondaire d'un transformateur est en étoile, TSC en étoile relié (système à quatre fils)

I.4.2. Convertisseur de source de tension (VSC)

Un convertisseur source de tension est un dispositif de l'électronique de puissance basé sur des commutateurs à semi-conducteurs. Ce dernier, peut être classifié en deux catégories (VSC ou VSI) et (CSC ou CSI), selon leur source d'entrée du côté C.C, soit une source de tension ou de courant respectivement [22], [23]. On peut distinguer deux types :

I.4.2.1. VSC monophasé

Le convertisseur monophasé a pour but de transformer l'énergie électrique d'entrée de tension continue (V_{dc}) en tension de sortie alternative $v(t)$ (figure I.8). Comme montré dans cette figure, le VSC se compose de deux bras identiques, dont chacun est composé de deux cellules réparties de façon symétrique et chaque cellule contient un interrupteur commandé à la fermeture et à l'ouverture (IGBT, GTO) monté en antiparallèle avec une diode pour adapter le retour du courant continu requis sur le jeu de barre, et une source de tension de courant continu qui peut être un simple condensateur. La préention ici est que la valeur des condensateurs est suffisamment grande pour assurer un raid de courant continu de la source de tension [20], [21], [24].

Les interrupteurs sont unidirectionnels, ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, d'où la nécessité des diodes roue-libre en série.

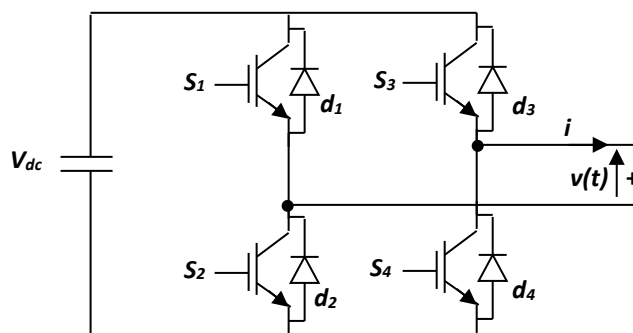


Figure I.8: Convertisseur de source de tension monophasé

I.4.2.2. VSC triphasé

Le VSC triphasé se compose de trois bras identiques qui sont commandés avec un déphasage de 120° entre eux. Comme le VSC monophasé, chaque bras est composé de deux cellules de commutation comme indiquée dans la figure I.9 [15]. La manière de base pour commander le VSC triphasé à six commutateurs est de mettre chaque commutateur en marche pour la moitié de la période (180°) avec un ordre 1, 2, 3....

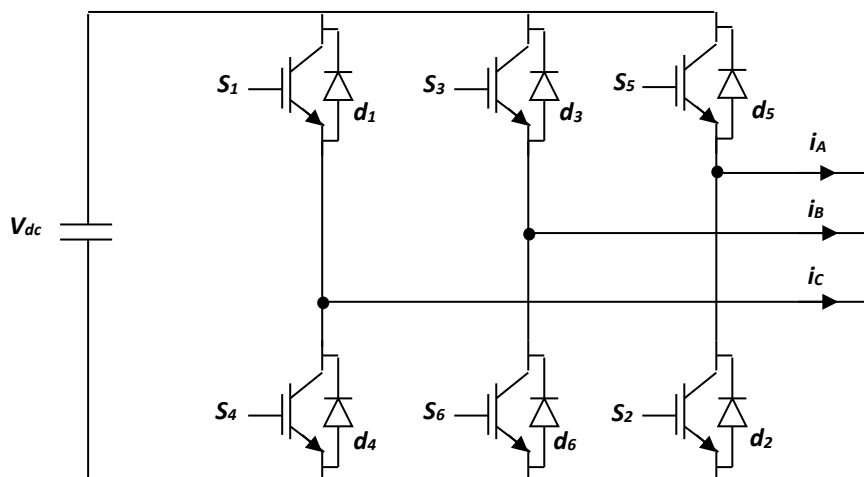


Figure I.9: Convertisseur de source de tension triphasé à six commutateurs

Le Tableau I.1 donne les différents interrupteurs commandés dans les applications des FACTS. Le VSC employant GTO comme dispositifs de puissance pour des applications de FACTS, et IGBT pour les applications de basse tension (D-FACTS) [22], [25]. Cependant, l'utilisation de la technique de MLI (Modulation- Large- Impulsion) est préférée pour les applications de basse tension, de but d'avoir une réponse et des possibilités plus rapides pour l'élimination des harmoniques.

Tableau I.1 : Les différents interrupteurs commandés dans les applications des FACTS.

Abréviation	Type	Signification
IGBT	Transistor	InsulatedGateBipolair Transistor
IEGT	Transistor	Injection EnhancedGate Transistor
GTO	Thyristor	GateTurn-Off thyristor
IGCT	Thyristor	Integrated GateCommutated Thyristor
GCT	Thyristor	Gate Commutated turn-off Thyristor

I.4.3. Système de stockage d'énergie

Le système de stockage d'énergie est basé sur deux paramètres plus importants pour avoir des possibilités de fournir l'énergie continue au VSC. Premièrement, la tension aux bornes de VSC de côté continu soit toujours suffisamment élevée pour générer la tension de compensation nécessaire. Deuxièmement, le dimensionnement du système de stockage d'énergie doit être conçu aux types de perturbations [22]. Les systèmes de stockage (figure I.10) d'énergie ont pour but de charger le bus continu reliant le VSC. Dans l'industrie, l'utilisation des différents types de ces systèmes sont selon les besoins techniques étudiés.

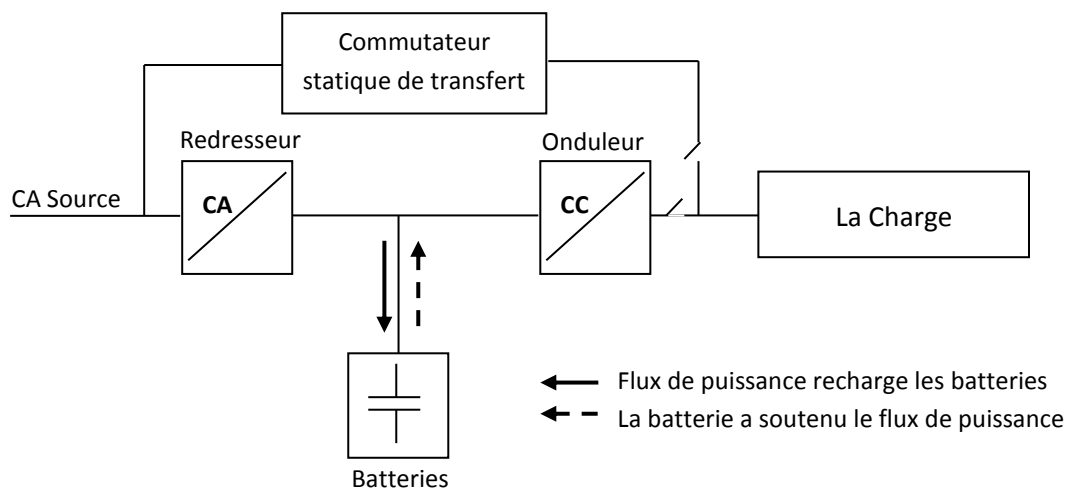


Figure I.10: Schéma fonctionnel de base d'un système de stockage.

I.5. Structure des principaux dispositifs FACTS

Nous allons maintenant procéder à une présentation sommaire de ces dispositifs FACTS qui figurent parmi les plus connus.

I.5.1. Compensateurs parallèles

Dans la compensation parallèle, le dispositif FACTS est connecté en parallèle avec le réseau comme une impédance variable, ou une source variable [26]. Ils sont principalement dédiés pour la compensation de la puissance réactive et la stabilisation de tension [16].

La figure I.11 montre l'installation d'un tel dispositif FACTS de type shunt, où (X_L) est la réactance de la ligne. (V), et (V') sont les tensions nodales d'extrémités du circuit. (V_{sh}) est la tension injectée du compensateur. (X_{sh}) est la réactance de la liaison du compensateur shunt avec la ligne.

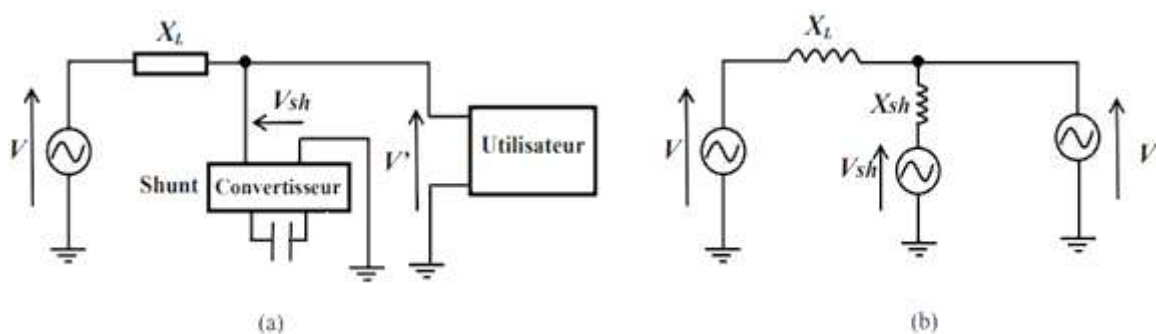


Figure I.11: Représentation : (a) principe d'une compensation shunt, (b) Schéma unifilaire équivalent

Les principales applications de ces compensateurs dans le réseau du transport, distribution et les réseaux industriels sont [6] :

- ✓ Réduction du flux de puissances réactives non désirées et donc réduction des pertes du réseau,
- ✓ Conservation des échanges de puissance contractuelle avec une puissance réactive équilibrée,
- ✓ Compensation des consommateurs et l'amélioration de la qualité de puissance particulièrement avec des fluctuations énormes de demande comme les machines industrielles, les usines de fusion des métaux, le chemin de fer... etc.
- ✓ Compensation des convertisseurs de thyristor par exemple dans le CCHT (Courant Continu Haute Tension) conventionnel,
- ✓ Amélioration de la stabilité statique et dynamique.

Parmi les compensateurs shunts les plus courants d'utilisation, on trouve :

I.5.1.1. SVC (Static Var Compensator)

Le compensateur statique d'énergie réactive (SVC) est le dispositif FACTS le plus ancien. En effet, a été installé pour la première fois en 1979 en Afrique du sud [27]. Le SVC ajuste sa valeur automatiquement en réponse aux changements des conditions de fonctionnement du réseau, il a des capacités de fournir sans interruption la puissance réactive exigée pour contrôler les oscillations dynamiques de tension et améliorer la stabilité des réseaux de transport et de distribution [6]. La figure I.12 représente la configuration de ce type de FACTS.

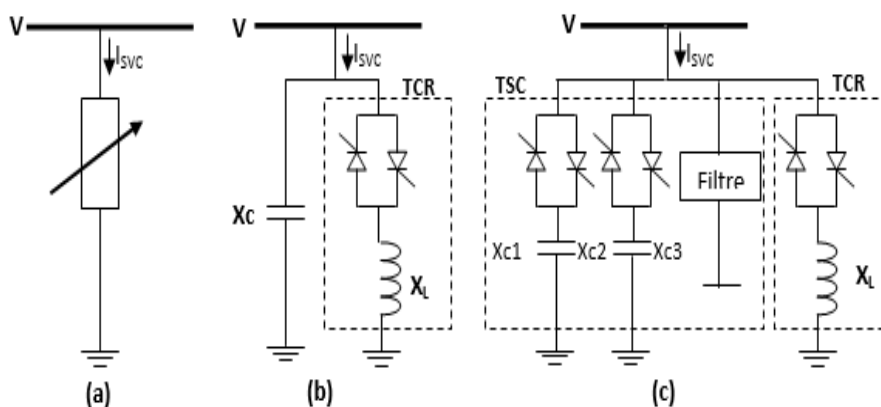


Figure I.12: Représentations schématiques d'un SVC

En principe, le SVC se comporte comme une réactance variable shunt pour fournir ou absorber la puissance réactive afin de régler l'amplitude de tension au point de raccordement (figure I.12(a)). Sous sa forme plus simple et plus typique, le SVC se compose d'un TCR en parallèle avec un condensateur (figure I.12(b)), ou l'association d'un TCR avec un TSC et d'un filtre d'harmoniques (figure I.12(c)) [15], [22]. Le filtre est introduit pour éliminer les

harmoniques générés par le TSC, et le TCR. Le fonctionnement des branches constituant le SVC (TCR, et TSC) a été abordées précédemment. Avec une coordination appropriée de l'interrupteur des condensateurs et le contrôle des bobines, la puissance réactive de sortie peut être variée continuellement entre les taux capacitifs et inductifs de l'équipement [14].

La caractéristique statique (tension-courant) de ce compensateur (le SVC) est donnée sur la figure suivante (figure I.13), trois zones sont distinctes [26] :

- Zone 1 (Capacitive) où le TSC donne une énergie maximale, seules les capacités sont connectées au réseau.
- Zone 2 (Mixte) ou de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des TCR et des TSC.
- Zone 3 (Inductive) où le TCR donne son énergie maximale (butée de réglage), les condensateurs sont déconnectés.

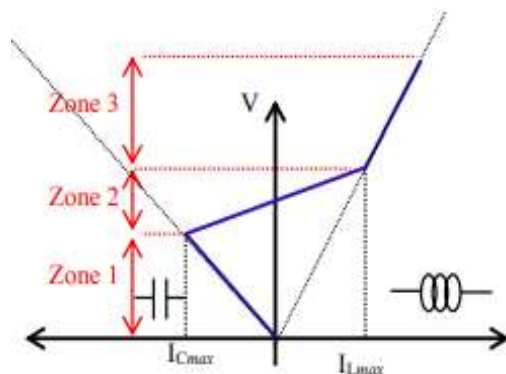


Figure I.13: Caractéristique d'un SVC

Jusqu'à à ce jour, le SVC est l'équipement le plus largement installé dans les systèmes de transmission en courant alternatif [15]. De plus, l'installation d'un SVC à un ou plusieurs points appropriés dans le réseau peut augmenter la capacité de transfert et réduire les pertes et maintenir un bon profil de tension sous différentes conditions. En outre un SVC peut atténuer les oscillations de la puissance active par la modulation d'amplitude de tension [6].

I.5.1.2. TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor)

Ce type de compensateur se monte en parallèle, il est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations [15]. La figure (I.14) représente un TCBR en parallèle avec un SVC équipé d'un banc de condensateurs et d'un filtre d'harmonique [26].

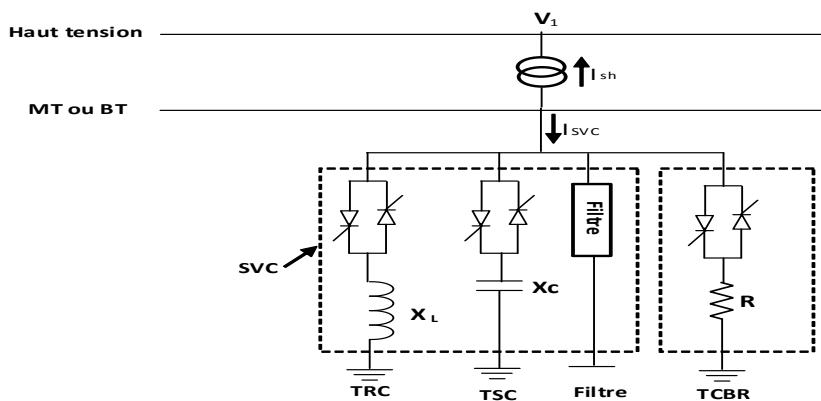


Figure I.14: Schéma du SVC et TCBR

I.5.1.3. STATCOM (Static Compensator)

Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70 mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte puissance [26], [28]. L'arrivée des thyristors GTO a conduit au développement d'un autre dispositif FACTS shunt appelé 'STATCOM' qui fonctionne selon le principe du VSC. Son fonctionnement est similaire au compensateur synchrone tournant classique. Le STATCOM présente un temps de réponse plus court et il est sans inertie mécanique. Jusqu'à présent, ce type a connu différentes appellations tel que [22], [28] : **ASVC** (Advanced Static Var Compensator), **STATCON** (Static Condenser), **SVG** (Static Var Generator), **SVC light**, et **SVC plus**.

Le STATCOM est employé dans les applications des systèmes de transmission et de distribution pour compenser la puissance réactive et régler la tension au point de raccordement au réseau de telle manière à remplir les mêmes fonctions que le SVC mais avec beaucoup plus de souplesse et moins de perturbations harmoniques. Il se compose d'un convertisseur VSC, un dispositif de stockage d'énergie de C.C, un transformateur d'accouplement relié en parallèle au système à C.A, et les circuits de commande associés. La figure I.15 dépeint son diagramme schématique [15], [29].

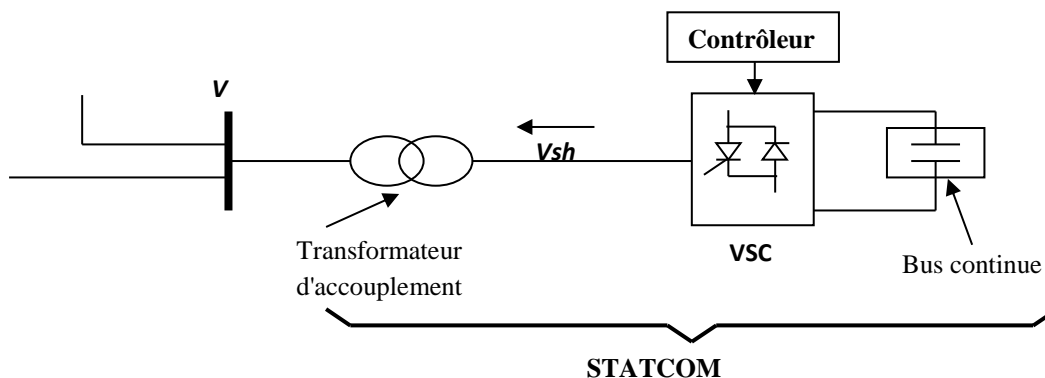


Figure I.15: Raccordement d'un STATCOM au système à courant alternatif.

Ce contrôleur est caractérisé par un échange des puissances actives et réactives entre le convertisseur et le système à C. A. et qui peut être commandé par le changement de l'angle de phase entre la tension de sortie du convertisseur et la tension de jeu de barre au point commun de raccordement. Cet échange peut être employé pour compléter le niveau des pertes internes du VSC et pour maintenir le condensateur C.C. chargé [30]. L'écoulement des puissances active et réactive, entre ces deux sources de tension est donné suivant le diagramme vectoriel montré sur la figure suivant I.16.

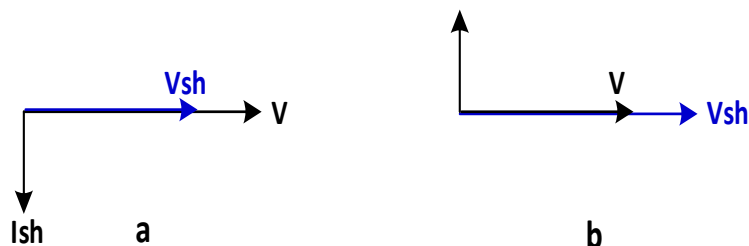


Figure I.16: Diagramme vectoriel de STATCOM

Donc suivant la tension de sortie de l'onduleur V_{sh} , l'échange de puissance réactive sera variable de la façon suivante [31], [32] :

- Si la tension V_{sh} est inférieure à V , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension V , ce qui donne un courant inductif (Fig. I.16.a) donc le STATCOM absorbe de la puissance réactive du nœud de connexion par conséquent la tension du nœud va diminuer [31],
- Si la tension V_{sh} est supérieure à V , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $+\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension V , ce qui donne un courant capacitif (Fig. I.16.b) donc le STATCOM génère de la puissance réactive au nœud de connexion, c'est-à-dire la tension de ce dernier augmente [32],
- Si la tension V_{sh} est égale à V , le courant circulant dans l'inductance est nul et par conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie.

Comme pour la caractéristique de dispositif SVC exposée précédemment (voir figure I.13), la caractéristique statique de STATCOM est donnée par la figure suivante (figure I.17). Il faut noter que la caractéristique de fonctionnement de STATCOM est bien supérieure à celle du SVC. En outre, le STATCOM permettant d'échanger l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'un convertisseur VSC. Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau [26]. De plus, le STATCOM a l'avantage de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension V diminue, contrairement au SVC.

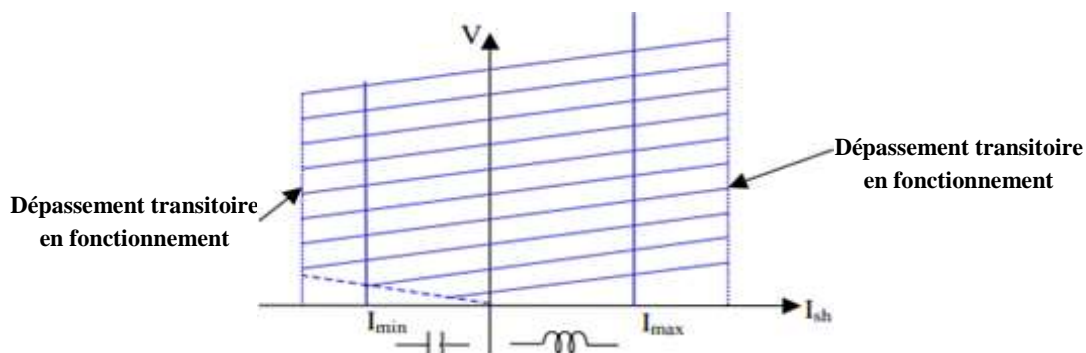


Figure I.17: Caractéristique statique d'un STATCOM

I.5.2. Compensateurs séries

Ces types de FACTS sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable [26]. Celle-ci insérée dans la ligne de transport peut modifier l'impédance de la liaison du réseau [16]. La figure I.18 montre l'installation d'un tel dispositif FACTS série au réseau. Où, (X_L) est la réactance de la ligne. (V , et V') sont les tensions nodales d'extrémités du circuit, (V_s) est la tension injectée par le compensateur, X_{eq} est la réactance équivalente de la liaison du réseau tenant compte de la réactance variable du compensateur (X_s) et la réactance de la ligne (X_L).

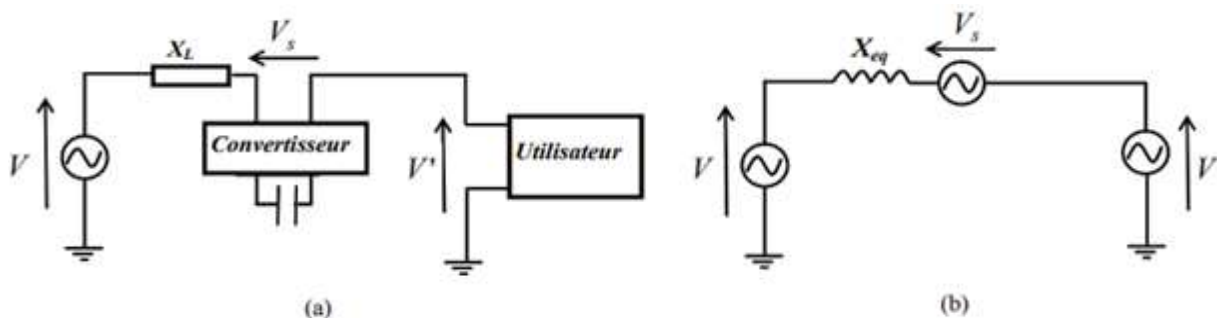


Figure. I.18: Représentation:(a) principe d'une compensation série, (b) Schéma unifilaire équivalent

Les applications principales de ces compensateurs sont [6] :

- Réduction de la chute de tension série de la ligne en module et en angle,
- Réduction de fluctuations de tension dans des limites définies pendant les changements des puissances transmis,
- Atténuation des oscillations,
- Limitation des courants de court-circuit dans les réseaux ou les postes,
- Prévention de flux en boucle et ajustement du flux de puissance.

Parmi les compensateurs série les plus courants d'utilisation, on trouve :

I.5.2.1. TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Le compensateur série commandé par thyristor TCSC (Thyristor Controlled Serie Capacitor) est un membre principal de la famille des contrôleurs de FACTS. C'est un FACTS typique série composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur [15]. La figure I.19 représente un schéma de principe de la connexion de ce dispositif FACTS au réseau. Où, (I_{TCSC}) est le courant de TCSC, (I_{cap} , I_{ind}) sont les courants circulant dans le condensateur et l'inductance respectivement, (X_{TCSC}) est une réactance variable d'un TCSC. Convenablement, pour augmenter la puissance transitée par une ligne triphasée, on doit ajouter un condensateur de capacité fixe en série dans chaque phase de la ligne. Ce qui a pour effet de réduire la réactance inductive de celle-ci. Ici, le condensateur série commandé par thyristors permet de faire un ajustement rapide sur le transit de la puissance en agissant sur la nouvelle valeur de la réactance de la ligne [22].

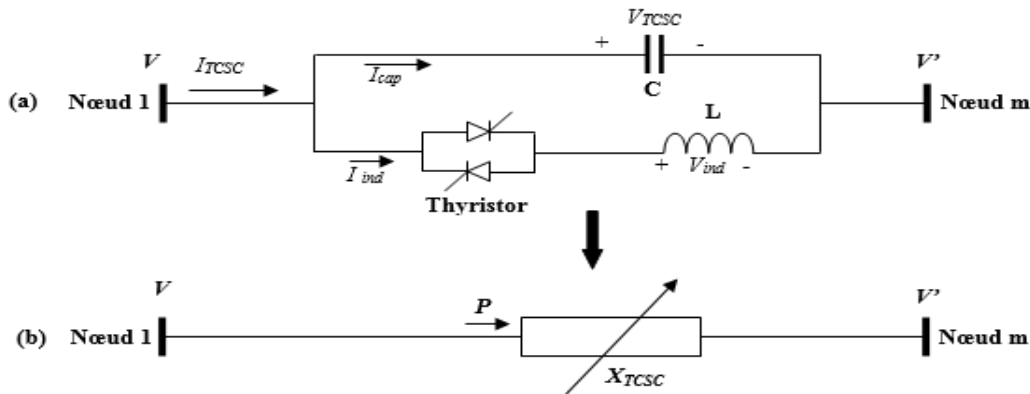


Figure I.19: Représentations schématiques d'un TCSC.

(a) : Un TCR en parallèle avec un condensateur fixe.

(b) : Circuit équivalent d'un TCSC compte une réactance variable

Ce dispositif fait un peu de retard des variations électriques de la ligne de transmission compensée. En raison de cette caractéristique, il peut être employé pour fournir le réglage actif et rapide de flux de puissance, en conséquence, il augmente la marge de stabilité du système, et aussi, il a des présentations avérées de l'atténuation très efficace de SSR et des oscillations de puissance [21].

L'expression de l'impédance de TCSC est donnée par l'équation suivante où α représente l'angle de retard à l'amorçage des thyristors [23], [25].

$$Z_{TCSC} = jX_{TCSC}$$

$$\bar{X}(\alpha) = \frac{X_c X_L}{\frac{X_c}{\pi(2(\pi-\alpha)+\sin 2\alpha)} - X_c} \quad (I.4)$$

Les courbes théoriques obtenues avec l'équation (I.4) sont représentées par la figure I.20 [25], [26].

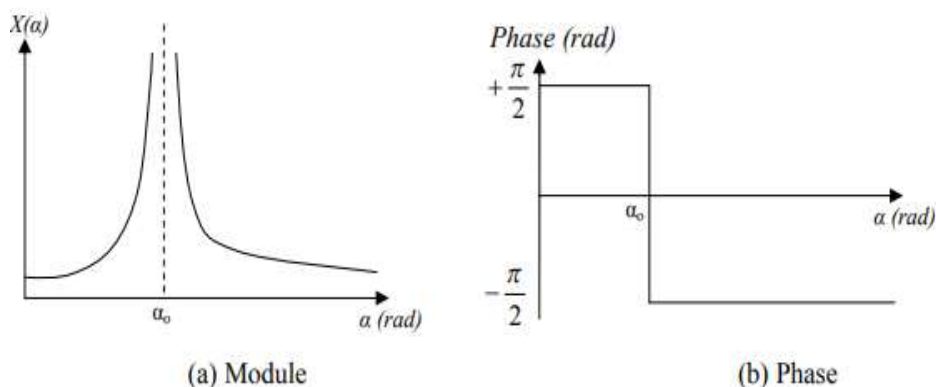


Figure I.20: Réactance équivalente du TCSC $X(\alpha)$

I.5.2.2. TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)

La figure I.21 représente un schéma de principe de la connexion de ce type de FACTS au réseau. D'après ce concept, il faut noter que le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable [16], [26], [33]. Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristor est de 180 degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable X_{TCSR} (Figure I.21) agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison parallèle de deux réactances [26].

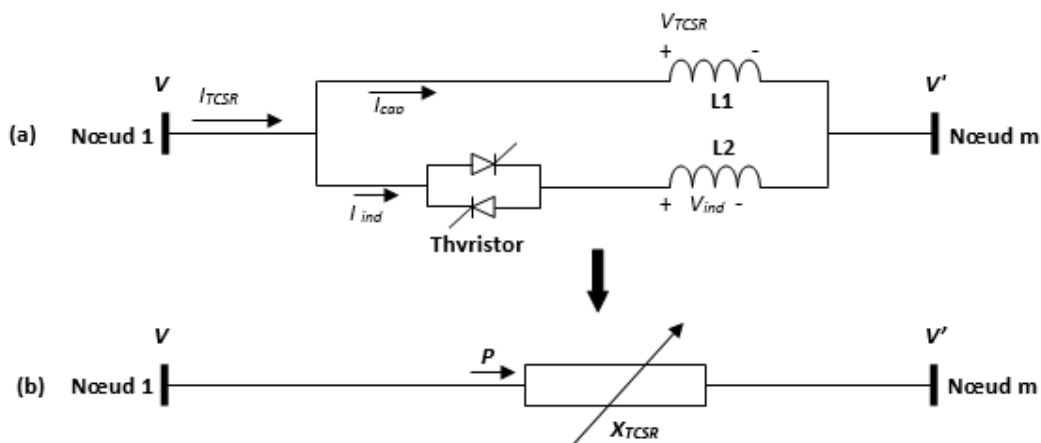


Figure I.21: Représentations schématiques d'un TCSR.

- (a) : TCR en parallèle avec une inductance fixe.
- (b) : Circuit équivalent d'un TCSR compte une réactance variable

L'expression de l'impédance de TCSR est donnée par l'équation (I.5) ci-dessous où α représente l'angle de retard à l'amorçage des thyristors :

$$\bar{X}(\alpha) = \frac{jL_1\omega}{\frac{2}{\pi}(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) - \frac{L_1}{L_2}} \quad (\text{I.5})$$

Il y a d'autres types de FACTS comme le TSSR et le TSSC dont les principes de fonctionnement sont basés sur ceux des TCSC et TCSR respectivement sauf l'angle d'amorçage de la réactance commandé par thyristor est soit de 90° soit de 180° [15], [26].

I.5.2.3. SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important de cette famille. La figure I.22 donne sa configuration. Il est constitué d'un convertisseur statique avec une source d'énergie qui est connecté en série avec la ligne de transport à travers un transformateur [22].

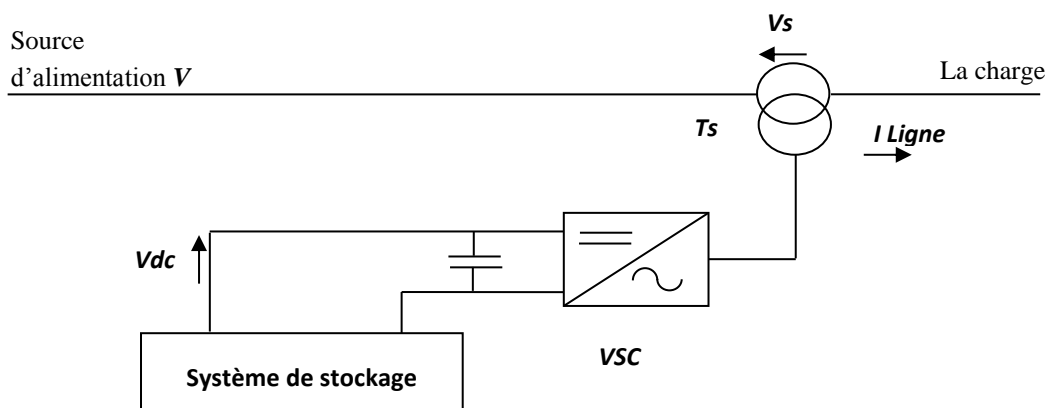


Figure I.22: Schéma de raccordement d'un SSSC au système d'alimentation

Dans le but d'un fonctionnement stable, ce type de compensateur, a une fonction comparable au TCSC [15]. Il injecte une tension d'amplitude et d'angle commandée soit directe ou indirecte pour commander la puissance sur cette ligne. Cependant, cette tension injectée dépend du mode de fonctionnement choisi de SSSC au flux de puissance commandé [22]. Contrairement au TCSC, le SSSC n'introduit pas physiquement un condensateur ou une inductance, mais il simule leurs fonctions. Cela évite l'apparition des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau [27]. De plus, l'introduction d'un stockage d'énergie est possible du fait de la structure des convertisseurs de tension (VSC). Si l'on utilise un système de stockage, le SSSC peut en ce moment-là échanger de la puissance active avec la ligne électrique. Ceci peut contribuer à améliorer la stabilité du réseau. Dans ce cas la tension (V_s) n'est pas obligatoirement en quadrature avec le courant de ligne [6].

La figure suivante (Figure.I.23) donne la caractéristique statique d'un SSSC.

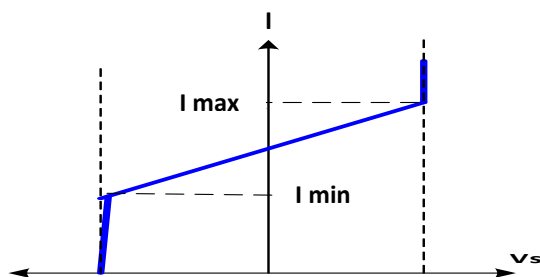


Figure I.23: Caractéristique statique du SSSC

I.5.3. Compensateurs hybrides (série-shunt)

Ces compensateurs font la combinaison des dispositifs série et shunts commandés d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variable, ils servent à contrôler les flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport [2], [16]. Parmi les compensateurs hybrides les plus utilisés, on trouve :

II.5.3.1. Déphaseur statique (SPS - Support Statique de Phase)

Les déphaseurs commandés par thyristors ont été créés afin de remplacer les déphaseurs mécaniques (transformateurs déphaseurs). Ils sont constitués de deux transformateurs l'un branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. La figure I.24 montre une représentation schématique d'un SPS (une seule phase étant représentée) et son circuit équivalent. Où (X_t) est la réactance de fuite du transformateur de série, (Φ) l'angle de phase [2], [14].

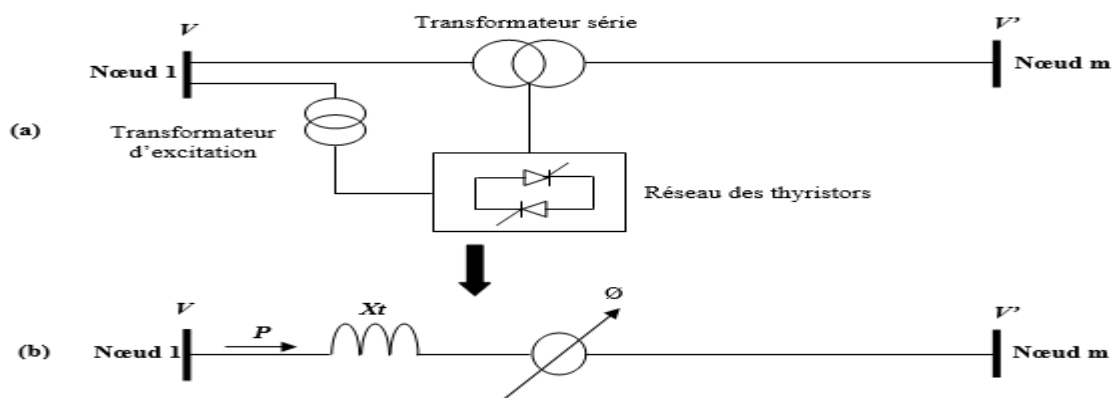


Figure I.24: Structure schématique d'un SPS

- (a) : Deux transformateurs, l'un série et l'autre d'excitation et un réseau de thyristors
- (b) : Circuit équivalent avec un variateur de l'angle de phase.

Le SPS peut changer les angles de phase des tensions aux extrémités de la ligne, en injectant sur les trois phases une tension en quadrature avec la tension de l'extrémité de la ligne à déphaser [22]. Cet équipement peut également être utilisé pour fournir le réglage actif et

rapide du flux de puissance. La variable de commande est l'angle de phase de la tension injectée (Φ), qui est ajusté en utilisant l'algorithme de Newton pour satisfaire un flux de puissance active spécifié [3], [22]. La puissance active transitée dans cette ligne à travers le SPS est calculée par la formule I.1 [2], avec : $\delta = \theta - \theta' - \phi$.

I.5.3.2. DPFC (Dynamic Power Flow Controller)

Un nouveau dispositif dans le domaine de contrôle d'écoulement de puissance est le contrôleur dynamique de flux de puissance (DPFC). Le DPFC est un dispositif hybride entre un transformateur déphaseur (PST) et une compensation série [6].

La structure du contrôleur dynamique de flux de puissance est montrée sur la figure I.25. Le contrôleur dynamique de flux de puissance comprend les composants suivants :

- Transformateur déphaseur standard avec changeur de prise (PST: phase shifting transformer).
- Condensateur et inductance commutés par thyristor connecté en série (TSC/TSR).
- Condensateur shunt mécaniquement commuté (MSC: Mechanically Switched shunt Capacitor). (C'est facultatif selon le besoin de puissance réactive).

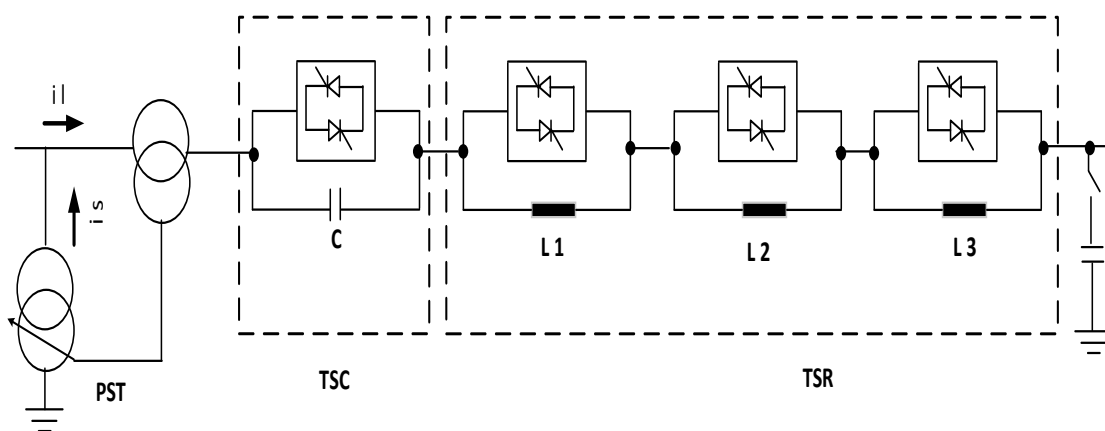


Figure II.25: Configuration de DPFC

Basé sur les conditions de système, un DPFC pourrait se composer d'un certain nombre de TSC ou de TSR en série. Le condensateur shunt mécaniquement commuté (MSC) fournira le support de tension en cas de surcharge de réseau et d'autres conditions. Cependant, généralement le principe de la commande de l'angle de phase utilisé dans TCSC peut être appliqué pour le DPFC.

L'opération d'un DPFC est basée sur les règles suivantes [6]:

- ✓ TSC/TSR sont utilisés quand une réponse rapide est exigée.
- ✓ Le soulagement de la surcharge est manipulé par TSC/TSR.
- ✓ La commutation du changeur de prise du transformateur déphaseur devrait être réduite au minimum en particulier pour les courants les plus élevés.
- ✓ La compensation d'énergie réactive peut être obtenue par MSC, changeur de prises avec les capacités et les inductances commutées.

I.5.3.3. UPFC (Unified Power Flow Controller)

Le contrôleur de transit de puissance unifié UPFC, appelé aussi Déphaseur Régulateur Universel (DRU) ou variateur de charge universel, est l'un des plus performants des dispositifs FACTS qui a été présenté en 1990 par *L. Gyugyi* [1],[14],[22]. Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment la puissance active et la puissance réactive de la ligne. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique (tension, impédance, déphasage). En fait, il réunit les fonctions des trois précédents types de dispositifs FACTS (compensateur shunt, compensateur série et déphaseur) en un seul système employant deux onduleurs de tension [4], [25].

La figure I.26 donne le schéma de principe de l'UPFC (pour meilleure présentation une seule phase étant représentée) [3], [22].

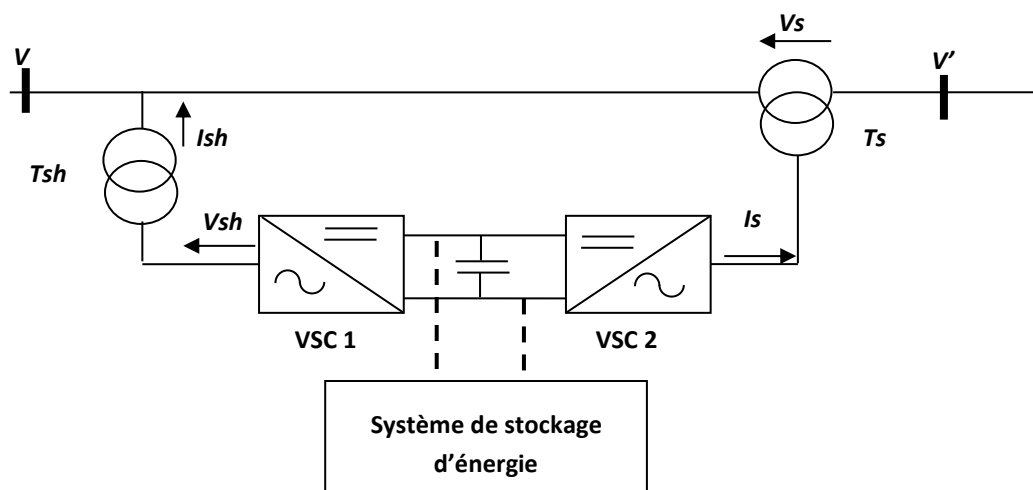


Figure I.26: Schéma de principe d'un UPFC placé dans un système d'alimentation.

Comme montre l'installation précédente de la figure I.26, le dispositif UPFC est constitué de deux convertisseurs de tension, l'un connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé, et l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile [6]. Les deux onduleurs sont reliés par une liaison à courant continu formée par un condensateur.

Une autre définition plus simple et plus typique, l'UPFC est la combinaison d'un STATCOM et d'un SSSC partagent le même condensateur dans leurs côtés continus et possédant un système de commande unifié.

Dans la figure (I.26) l'onduleur (1) est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur (2). Il réalise aussi la fonction de compensation réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active, au réseau. L'onduleur (2) injecte la tension (V_s) et fournit les puissances active et réactive nécessaires à la compensation série [26]. Le circuit DC permet l'échange de puissance active entre les convertisseurs série et shunt pour commander l'angle de phase de la tension [6].

I.5.3.4. IPFC (Interline Power Flow Controller)

Le contrôleur de transit de puissance entre ligne IPFC (*Interline Power Flow Controller*) est utilisé dans le cas d'un système de lignes multiples reliées à un même poste. Sa structure de base est montrée dans la figure I.27. Il est formé de plusieurs SSSC, chacun d'eux fournissant une compensation série à une ligne différente. Du côté continu, tous les convertisseurs sont reliés entre eux via des disjoncteurs.

L'IPFC permet de transférer de la puissance active entre les lignes compensées pour égaliser les transits de puissances actives et réactives sur les lignes ou pour décharger une ligne surchargée vers une autre moins chargée. Les tensions injectées possèdent une composante en quadrature et une composante en phase avec les courants respectifs des lignes. La composante en quadrature permet une compensation série indépendante dans chaque ligne, alors que la composante en phase définit le niveau de puissance active échangé avec les autres lignes. Sur la liaison continue, le bilan est toujours nul [6], [16].

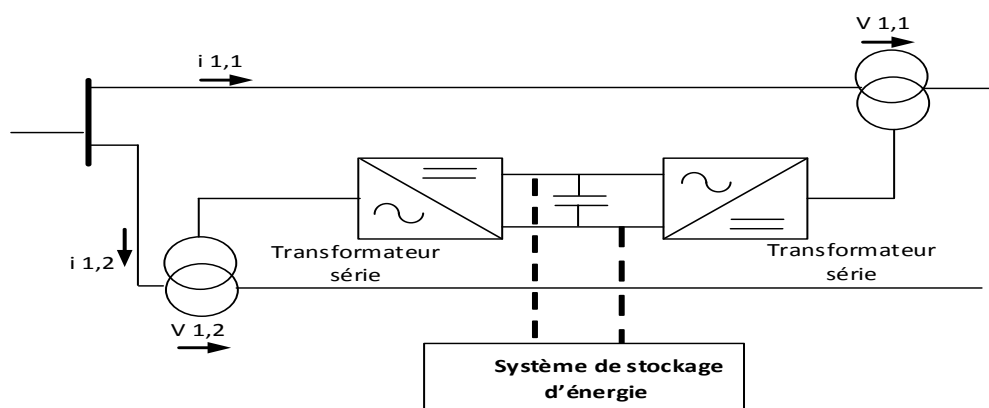


Figure I.27: Schéma de principe d'un IPFC

I.5.3.5. GUPFC (Generalized Unified Power Flow Controller)

Le GUPFC combine les fonctions de l'IPFC pour la compensation série et celle de l'UPFC pour la partie de compensation parallèle [16]. La figure I.28 représente le schéma d'un tel dispositif. Le GUPFC le plus simple se compose de trois convertisseurs, un convertisseur shunt et les autres sont en série avec deux lignes de transport d'un poste.

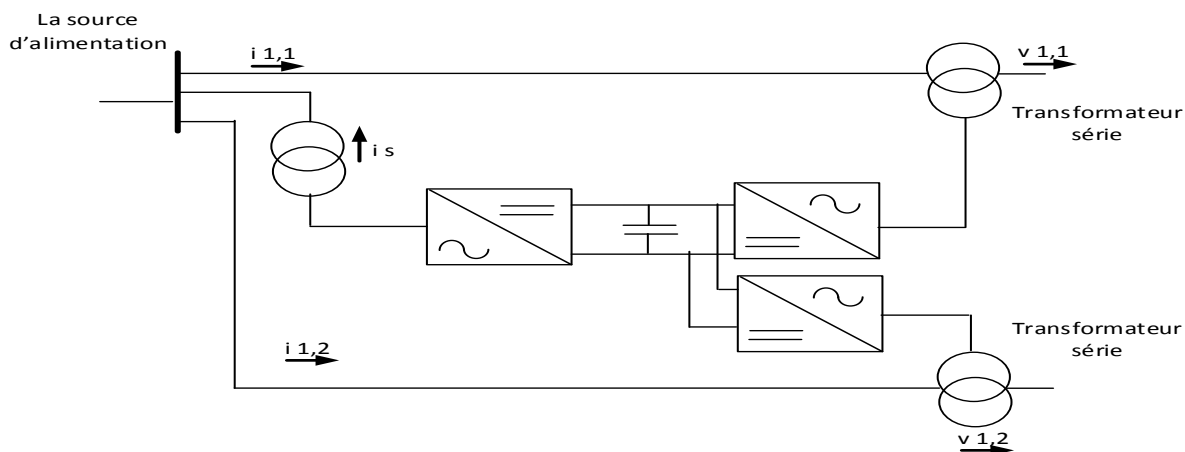


Figure I.28: Configuration d'un GUPFC

I.5.3.6. DISPOSITIFS DOS- À -DOS (BACK-TO-BACK)

Les dispositifs dos à dos fournissent en général une contrôlabilité et une limitation d'écoulement de puissance. Une surcharge de ces dispositifs est donc impossible. Ils peuvent résister aux défauts en cascade, qui pourraient se produire en raison des défauts de la ligne lorsqu'une ligne après l'autre est surchargée.

Les systèmes HVDC (High Voltage Direct Current) dos à dos conventionnels avec des convertisseurs à base de thyristor ont besoin des filtres pour réduire la déformation harmonique. La puissance réactive n'est pas contrôlable. Ces dispositifs sont principalement utilisés quand deux réseaux asynchrones doivent être interconnectés ou dans le cas de transport d'énergie pour de très grandes distances [9].

Le HVDC VSC a des avantages même lors d'interconnexion entre deux réseaux de même fréquence. Il fournit la pleine contrôlabilité de tension au réseau sur les deux extrémités. Par conséquent, il peut fonctionner en plus de la commande d'écoulement de puissance en tant que deux STATCOM. Sur les deux extrémités un plein diagramme opérationnel circulaire de quatre quadrants est fourni. Cette disposition de puissance réactive peut être employée pour augmenter les capacités de transmission des lignes en plus d'équilibrer le flux de puissance. La figure I.29 montre la configuration d'un VSC HVDC B2B [9].

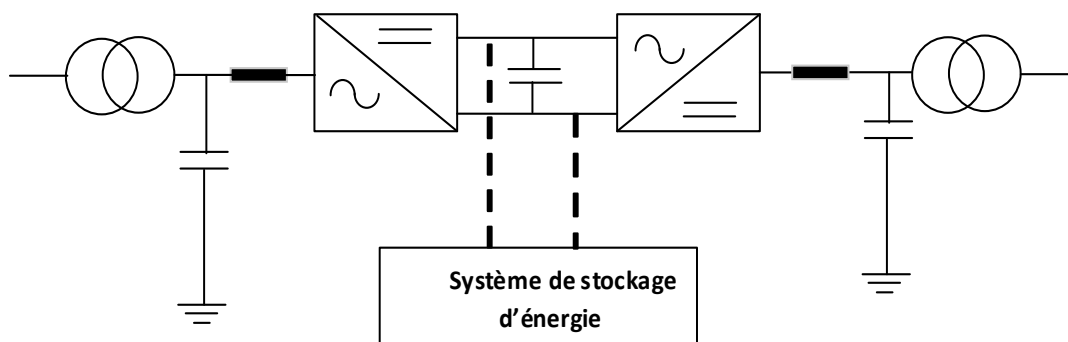


Figure I.29: Configuration schématique de VSC HVDC Back-to-Back

En conclusion, les différents dispositifs FACTS présentés dans ce chapitre possèdent tous leurs propres caractéristiques tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif sera donc utilisé pour répondre à des objectifs bien définis. Le tableau I.2 résume les fonctions données par chaque dispositif de FACTS dans le domaine de transmission alternative en haute tension.

Tableau I.2 : Contribution des systèmes FACTS dans les réseaux électriques

No :	Dispositif FACTS	Fonctions et tâches préférées
1	SVC, TSC, TCR	Contrôle de tension, stabilité transitoire, stabilité dynamique, oscillations d'amortissement, VAR compensation
2	TCBR	Oscillations d'amortissement, stabilité transitoire, stabilité dynamique....
	STATCOM	Contrôle de tension, VAR Compensation, stabilité transitoire, stabilité dynamique, oscillations d'amortissement....
3	TCSC	Contrôle du courant, limitation du courant de court-circuit, stabilité transitoire, stabilité dynamique, contrôle du flux de la puissance active et réactive....
4	SSSC	Contrôle du courant, limitation du courant de court-circuit, stabilité transitoire, stabilité dynamique, contrôle du flux de puissance active et réactive...
5	SPS	Contrôle du flux de puissance active, stabilité transitoire, stabilité dynamique...
6	DPFC	Réduite les courants les plus élevés, stabilité dynamique
7	GUPFC	Contrôle de tension, contrôler l'écoulement de puissance de plusieurs lignes, augmenter la capacité de transfert.....
8	UPFC	Contrôle de tension, contrôle du flux de puissance active et réactive, Stabilité transitoire, stabilité dynamique, limitation du courant de court-circuit, oscillations d'amortissement, VAR Compensation
9	IPFC	Contrôle du flux de puissance réactive, stabilité transitoire, Stabilité Dynamique, Oscillations d'amortissement, Contrôle de tension...
10	HVDC	L'interconnexion entre deux réseaux de même fréquence, contrôle de la tension de réseau sur les deux extrémités, contrôle et équilibre le flux de puissance active et réactive entre les deux réseaux...

I.6. Applications pratiques des dispositifs FACTS en exploitation

D'après notre étude de recherche bibliographique, le potentiel des dispositifs FACTS sont largement connus depuis 1979 [34]. Le tableau I.3 résume de façon générale certains des dispositifs FACTS fabriqués et installés dans différents pays par différentes compagnies [35-47].

D'après l'analyse de ce tableau (Tableau I.3), on remarque un taux de développement croissant et rapide des FACTS dans l'industrie comme le SVC, STATCOM ou le TCSC, ceci montre l'acceptation de ce genre de technologie dans leurs domaines d'application spécifiques. D'autre part, Il faut noter qu'en réalité le nombre à l'échelle mondiale d'implémentation de l'UPFC dans l'industrie reste limité en raison de son prix élevé. Autrement, la complexité dans la conception de ce dispositif et leur stratégie de commande complexe peuvent être l'une des autres raisons de l'utilisation limitée de l'UPFC [7], [8].

Tableau I.3 : Mise en œuvre pratique des certains dispositifs FACTS dans différents pays avec des Entreprises renommées

Type de FACTS	Lieu d'installation	Compagnie	Année
SVC	Nebraska – US	GE	1974
	Minnesota – US	Westinghouse Electric	1975
	Milagres – Brazil, Banabuiu – Brazil	Siemens	1983
	Brushy Hill – Canada	Siemens	1986
	Queensland – Australia	ABB	1987
	Kemps Creek I + II – Australia	Siemens	1989
	Kuala Lumpur Northsubstation – Malaysia	ABB	1991
	Eddy County – USA	Siemens	1992
	Harker – UK	Siemens	1993
	Drakelow – UK, Feckenham – UK, Jember – Indonesia	Siemens	1994
	RejsbyHede – Denmark, Muldersvlei – South Africa	Siemens	1997
	La Pila – Mexico	Siemens	1999
	Funnel – Brazil	Siemens	2001
	Limpio – Paraguay	Siemens	2003
	Siems – Germany	Siemens	2004
	Porter & Ninemile – USA	Siemens	2005
	Devers – USA, Radsted – Denmark, Shinyanga & Iringa – Tanzania, Ahafo – Ghana, Segaliud & Dam Road – Malaysia	Siemens	2006
	National power transmission grid of RTE – France	ABB	2006
	Nopala – Mexico, Sinop – Brazil, Railways & Nebo – Australia, Strathmore – Australia	Siemens	2007
	Alligator Creek – Australia, Islington – New Zealand	Siemens	2009
London underground stations – UK, Riyadh – Saudi Arabia	ABB	2009	

Tableau. I.3: (a continué)

Type de FACTS	Lieu d'installation	compagnie	année
SVC	La Ventosasubstation – Mexico	ABB	2010
	Chevire – France, Nanticoke – Canada	Siemens	2011
	Manitoba – Canada	ABB	2011
	Hiteen, Qassim&Afif – Saudi Arabia	Siemens	2012
TCSC	Kayenta, Arizona substation – U SA	ABB	1992
	Stöde – Sweden	ABB	1998
	Imperatriz – Brazil	ABB	1999
	Tian Guang – China	Siemens	2003
	Gorakhpur – India	Siemens	2006
STATCOM	Inuyamasubstation – Japan	Mitsubishi	1991
	Sullivan – USA	Westinghouse	1995
	RejsbyHede, Vattenfall – Sweden	Siemens	1997
	Laredo, Texas – USA, Virginia – USA	Siemens	2000
	Texas – USA	ABB	2005
	Cerro Navia – Chile	ABB	2011
UPFC	Inez – USA	Westinghouse	1998
	New York	NYPA	2001
	Kanjin – Korea	Siemens	2003

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue globale sur les dispositifs FACTS (leurs classifications et leurs différentes catégories) avec des schémas de chaque dispositif. Les caractéristiques principales des FACTS tels que TCSC, SSSC, SVC, STATCOM, UPFC, GUPFC et IPFC, ont été présentées brièvement avec leurs utilités dans les réseaux de transport. On peut constater que l'intégration de cette nouvelle technologie (FACTS) dans les réseaux électriques, permet le réglage des tensions, le contrôle du transit de la puissance active et réactive, ce qui permet une meilleure gestion de l'énergie et une amélioration des indices de qualité de l'énergie électrique.

En conclusion, d'après l'illustration des rôles de chaque FACTS, on trouve que l'UPFC est un compensateur plus complet que les autres grâce à sa caractéristique spéciale. Ce dernier, permet de régler une grande partie des problèmes du réseau électrique parce qu'il combine les fonctionnalités de la compensation série, shunt et la compensation de l'angle de phase en un seul dispositif. Le chapitre suivant (chapitre II) présente une étude approfondie sur l'UPFC, son apport sur le réseau électrique (principe et mode de fonctionnement), ainsi que sa modélisation et sa stratégie de commande.

Chapitre II

*Modélisation, commande et réglage
d'un UPFC*

II.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que les dispositifs FACTS ont l'aptitude d'accroître la capacité de transport de puissance du réseau existant et permettent d'améliorer ses performances dynamiques [7]. Cette amélioration sera plus en présence d'un élément efficace qui regroupe la plupart des fonctionnalités des FACTS dans un seul dispositif comme l'UPFC, ce dernier est l'un des systèmes FACTS le plus sophistiqué qui offre beaucoup de flexibilité et des capacités de contrôle incomparables qui ne peuvent pas être obtenues par l'utilisation d'autres types de FACTS (shunt ou série).

Ce chapitre couvre en largeur et en profondeur le concept UPFC, son mode de fonctionnement, l'établissement du modèle mathématique, et les schémas qui relient les blocs de commande de l'UPFC, tous ces éléments sont présentés prochainement d'une façon détaillée. Afin de présenter clairement ce dispositif, ce chapitre sera décomposé en quatre parties (sections). Dans une première section (section 1), nous étudierons la structure générale de l'UPFC, nous effectuons tout d'abord une description schématique de chaque élément constituant le système UPFC où nous donnons une explication du principe de son fonctionnement et par la suite nous établissons un schéma équivalent. Ces éléments concernent: La partie shunt (ou STATCOM), La partie série (ou SSSC), et le bus continu (ou DC link). La deuxième partie sera consacrée à la modélisation de ces éléments. La troisième partie sera réservée pour la discussion sur le contrôle globale de l'UPFC, nous allons présenter la configuration de circuit de commande des deux convertisseurs constituant l'UPFC. Également cette section d'étude, présente la commande appliquée à l'onduleur VSC de l'UPFC. Enfin, la section quatre donne lieu à la présentation des différents régulateurs utilisés dans la chaîne de contrôle de l'UPFC, nous terminons notre chapitre par une conclusion.

II.2. Première invention de l'UPFC

Le dispositif UPFC a été installé depuis 1998 à Inez (Kentucky - USA), dans le système d'interconnexion du réseau "138 (kV)". La figure II.1, illustre le premier UPFC installé dans le monde (c'est une UPFC avec 2 onduleurs de tension de 3 niveaux, 48 impulsions, 160 MVA) [48]. La compagnie d'AEP (American Electric Power) utilise l'UPFC dans ce réseau pour :

- optimiser l'utilisation du système de transmission existant,
- avoir une capacité de transmission suffisante (charge de 2000 MW),
- minimiser le besoin de nouveaux équipements,
- Pour diminuer les pertes de puissance active [49].

A titre d'information, les deux convertisseurs de ce dispositif peuvent être découplés et exploités séparément, comme un STATCOM, l'autre comme un SSSC [50], [51].

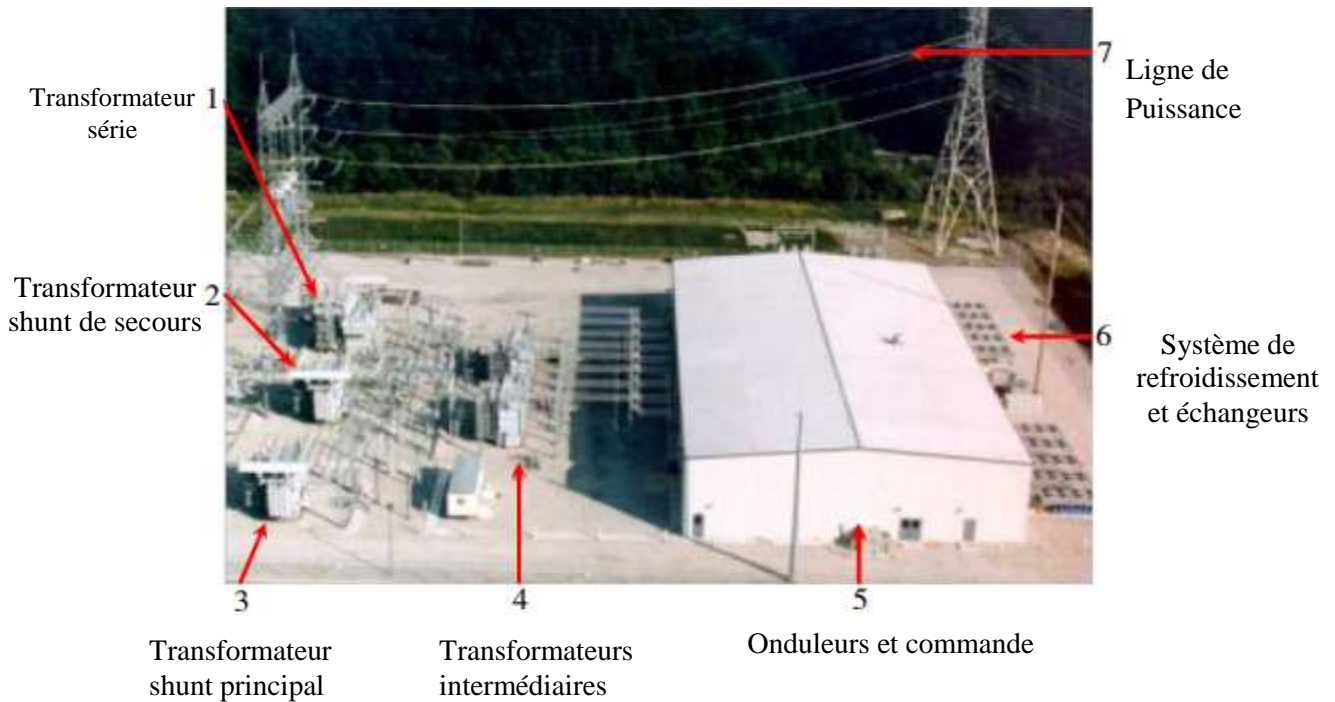


Figure II.1: Vue aérienne de l'UPFC installé à AEP Inez, USA [7].

A l'heure actuelle, les chercheurs sont certes intéressés par l'originalité du concept UPFC, mais encore beaucoup plus par ses éventuelles applications en industrie [8]. En réalité, le nombre d'implémentations de l'UPFC dans l'industrie reste limité en raison de son prix élevé. Il existe actuellement trois installations de transport à base d'UPFC mises en œuvre à travers le monde (voir Tableau II.1) [7], [6], [51], [52]. Autrement, la complexité dans la conception de ce dispositif et leur stratégie de commande complexe peuvent être l'une des autres raisons de l'utilisation limitée de l'UPFC [4],[6], [8], [54].

Tableau II.1 : Nombre d'UPFC installés dans le monde et leur puissance installée

Type	Lieu d'installation	Capacité en MVA	mis en service	Compagnie
UPFC	Poste 138 kV d'AEP à Inez, Kentucky (Etats-Unis)	160	1998	Conjointement avec EPRI et Westinghouse
	Réseau de transport de New York	400	2001	New York Power Authority (NYPA) conjointement avec EPRI
	Poste 154 kV de Kang Jin - station (Corée du Sud)	80	2002	Siemens et Hyosung

II.3. Section 1 : Description schématique du système

II 3.1. Structure de base de l'UPFC

Le concept de contrôleur unifié de flux de puissance (UPFC) est une variante de FACTS proposée initialement par *Laszlo Gyugyi* en 1991 pour la commande en temps réel et la compensation dynamique des réseaux de transports, fournissant la flexibilité multifonctionnelle exigée pour résoudre plusieurs problèmes de transport d'énergie électrique [7],[55]. L'implémentation pratique actuellement utilisée c'est comme indiqué précédente dans la figure II.1.

La figure II.2 donne la représentation structurelle de base d'un UPFC connecté au réseau électrique. Selon cette figure, l'UPFC est composé de deux compensateurs de source de tension synchrone à semi-conducteurs, l'un est un compensateur série (convertisseur 2) qui monté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés entre eux, en étoile, et l'autre est un compensateur shunt (convertisseur 1) monté en parallèle avec la ligne de transmission par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé [6].

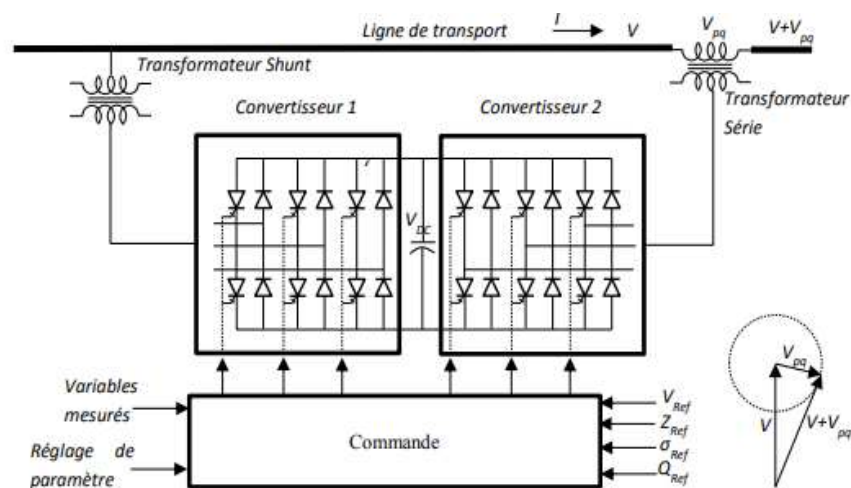


Figure II. 2: Structure de base d'un UPFC connecté au réseau électrique

Les convertisseurs dos à dos (convertisseur 1 et le convertisseur 2) dans la figure ci-dessus, partagent un lien commun en courant continu, ce lien est un condensateur de stockage à courant continu. Cet arrangement fonctionne comme un convertisseur idéal de puissance C.A.-à-C.A., où la puissance active peut librement transiter dans l'une ou l'autre direction entre les bornes C.A. des deux convertisseurs, et chaque convertisseur peut indépendamment fournir (ou absorber) la puissance réactive sur sa propre borne C.A [6].

Sur la base de ce que nous avons étudié dans le chapitre précédent (chapitre I), nous pouvons facilement remarquer que le VSC relié au transformateur shunt peut jouer le rôle d'une source de puissance réactive variable semblable à celle du compensateur shunt. En outre, le

VSC peut fournir de la compensation série ou la compensation de l'angle de phase par injection d'une tension série suivant une propre relation vectorielle.

II 3.2. Présentation des différents blocs constitutifs de l'UPFC

Une vue plus détaillée de l'UPFC faisant ressortir les différents composants de cet ensemble peut se voir sur la figure ci- dessus (figure II.2). De ce schéma, il ressort que le dispositif UPFC peut être subdivisé en quatre principaux blocs à savoir: l'onduleur N°1, l'onduleur N°2, Le bus continu (ou DC Link) et le bloc de commande. Le rôle attribué à chaque élément sera présenté en détail dans les paragraphes suivants:

II.3.2.1. Partie shunt de l'UPFC (STATCOM)

Cette partie joue un rôle n'est rien d'autre que le FACTS STATCOM qui est un convertisseur de tension triphasé constitué de 3 bras d'interrupteurs et relié au réseau via un transformateur triphasé [29]. Chaque bras d'interrupteur est constitué d'une association de deux blocs ayant chacun un interrupteur commandé (GTO/ou bien IGBT) monté en antiparallèle avec une diode et ayant pour rôle de bloquer les tensions inverses. Son rôle est de fournir ou absorber de la puissance active demandée par le convertisseur (2) à la liaison continue (DC) commune pour soutenir l'échange de la puissance active résultant de l'injection de tension série. Cette demande de puissance au lien de C.C du convertisseur 2 est convertie de nouveau en C.A. par le convertisseur 1 et couplée à la ligne par l'intermédiaire d'un transformateur shunt [6]. En plus de cela, il peut aussi produire ou absorber de la puissance réactive selon la demande au nœud auquel il est raccordé, et assurer une compensation shunt indépendante de la ligne de transport [53]. Le circuit du convertisseur shunt, et son schéma unifilaire équivalent sont représentés à la figure II.3. Où, (P_p et Q_p) désignent respectivement, la puissance active et la puissance réactive injectées par le STATCOM dans la ligne et plus exactement, au nœud de connexion shunt. D'après la figure II.3, il est clair que le redresseur renvoie en sortie une tension alternative triphasée (V_p) ajustable en amplitude et en phase. Cette fonctionnalité est assurée par l'intermédiaire de la commande des interrupteurs du convertisseur shunt (les instants d'ouverture et de fermeture).

La tension (V_t) au point de raccordement de la source de tension shunt (STATCOM) doit être maintenue dans une bande étroite compatible avec le dimensionnement du matériel utilisé. En effet,

- ✓ une tension trop élevée entraîne le vieillissement ou la destruction du matériel raccordé,
- ✓ une tension trop basse provoque une surcharge dans la ligne et perturbe le bon fonctionnement des protections et des transformateurs régulateurs en charge.

Le nœud de connexion shunt, représenté à la figure II.4, assure deux fonctions principales à savoir [7]:

- ✓ l'alimentation du convertisseur shunt (STATCOM) qui à son tour, assure l'alimentation en courant continu du convertisseur série (SSSC),
- ✓ le maintien, proche de sa valeur nominale, de l'amplitude de la tension au nœud de connexion shunt.

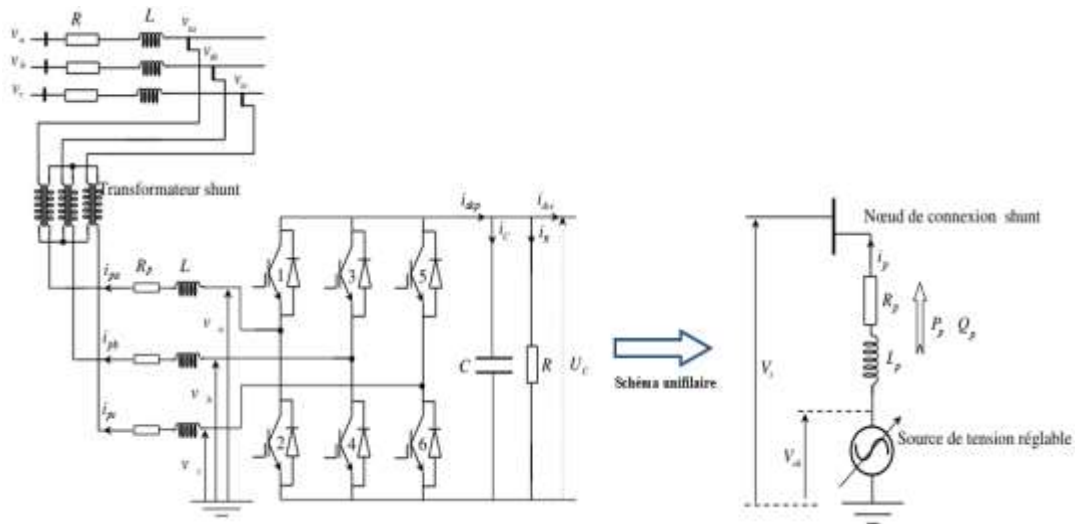


Figure II.3: Circuit de la partie shunt, et son schéma unifilaire équivalent (Redresseur à absorption sinusoïdale de courant).

A la figure II.4, (ΔV) représente la chute de tension, partant du nœud émetteur jusqu'au nœud de connexion shunt. Cette chute de tension est due essentiellement au courant (i) qui est l'image des puissances actives et réactives (P, Q) transitant dans la partie amont de la ligne. Cette chute de tension, plus la répartition des puissances actives et réactives seront analysées plus en détail dans la section 2.

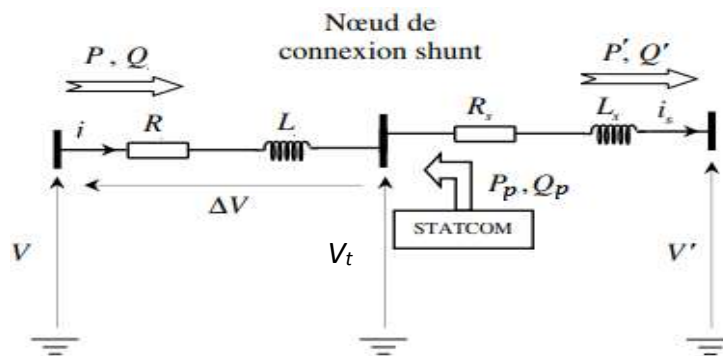


Figure II.4: Répartition des puissances actives et réactives au nœud de connexion shunt.

II.3.2.2. Partie série de l'UPFC (SSSC)

La figure II.5 représente le circuit électrique de la partie série de l'UPFC (SSSC) qui est constituée principalement d'un convertisseur servant de générateur de tension, constitué de 3 bras d'interrupteurs et relié au réseau par l'intermédiaire de trois transformateurs monophasés dont les primaires sont couplés en étoile [26]. Tout comme le STATCOM, chaque bras d'interrupteur est constitué d'une association de deux blocs ayant chacun un interrupteur commandé (GTO Ou IGBT) monté en antiparallèle avec une diode et ayant pour rôle de bloquer les tensions inverses [56].

La principale tâche de l'onduleur de tension (onduleur N°2) est d'injecter une tension alternative triphasée V_s (V_{sa} , V_{sb} et V_{sc}) à la même fréquence que celle du réseau en série avec la ligne et en quadrature avec le courant de ligne. Cette tension série doit correspondre à la tension triphasée désirée (d'amplitude et de phase bien définies) en commandant convenablement les interrupteurs du convertisseur série.

Ici, il faut noter que dans le cas de la compensation série, l'onduleur 2 peut fonctionner indépendamment de l'onduleur 1 (STATCOM) dès le moment que l'onduleur 2 ne fournit/consomme que la puissance réactive et n'a aucune puissance réelle échangée avec l'onduleur 1. Dans un tel cas, la tension du condensateur de liaison sera idéalement constante [6].

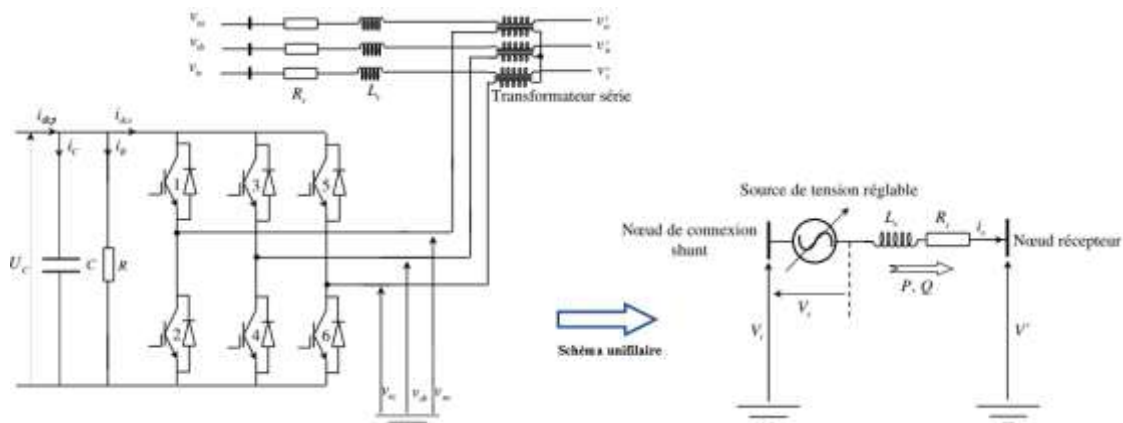


Figure II.5: Circuit de la partie série, et son schéma unifilaire équivalent (redresseur à absorption sinusoïdale de courant).

II.3.2.3. Circuit de liaison à courant continu (DC link)

Le bus continu (DC link) assure la liaison entre les deux convertisseurs (STATCOM et le SSSC) [6]. Ce circuit est essentiellement constitué d'un condensateur de filtrage C ayant pour fonction principale de se charger et de se décharger jusqu'à une certaine valeur en fonction des exigences du réseau [56].

Pour assurer un bon fonctionnement des convertisseurs, la tension continue (V_{dc}) à ses bornes doit être maintenue constante. Parmi les facteurs qui causent l'effondrement du niveau de la tension (V_{dc}), on trouve [6]:

- ✓ les pertes statiques et dynamiques dans les semi-conducteurs de puissance des convertisseurs,
- ✓ l'injection d'un courant dans le nœud de connexion shunt pendant les régimes transitoires de la tension shunt,
- ✓ l'injection d'une tension dans la ligne de puissance pendant les régimes transitoires de l'écoulement des puissances.

Le bus continu peut être modélisé par une capacité de stockage en parallèle avec une résistance qui représente les pertes des convertisseurs comme montre la figure II.6.

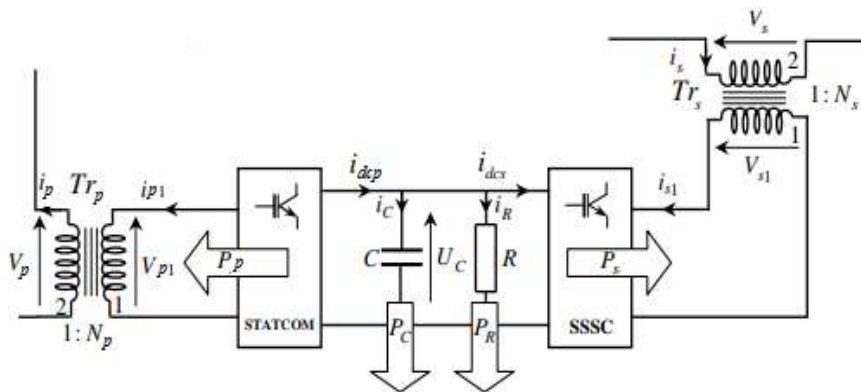


Figure II.6: Schéma du bus continu

En effet, à tout instant de fonctionnement de l'UPFC le STATCOM injecte une certaine puissance active (P_p) au nœud de connexion shunt à travers le transformateur (T_p) et qu'il tire du bus continu. Ce dernier assure l'alimentation du SSSC par la puissance active (P_s). La puissance (P_c) qui en reste sert à la charge du condensateur et à la compensation des pertes joule (P_R) (modélisée par la résistance R) dues aux commutations des valves de puissance (figures II.3 et II.5) [7].

II.3.2.4. Bloc de commande

Ce module est un système asservi qui permet de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs des différents bras de convertisseurs en fonction :

- ✓ des références,
- ✓ de l'état des mesures des capteurs,
- ✓ Les lois de commande.

Le but principal du système de commande, c'est de mesurer les courants et les tensions en différents points de transition du système par des capteurs appropriés, et de les utiliser pour la commande de l'UPFC, de telle sorte que la compensation générée par les convertisseurs de l'UPFC soit la plus proche de la valeur de référence [56]. Ici, les modes d'opération fonctionnelle et les demandes de compensation représentées par les entrées de références externes, peuvent être réglées manuellement (par l'intermédiaire d'un clavier d'ordinateur) par l'opérateur ou être dictées par un système automatique d'optimisation de commande pour répondre aux exigences spécifiques de fonctionnement et d'éventualité [6].

II 3.3. Analyse fonctionnelle de l'UPFC

Cette sous-section explique le fonctionnement de l'UPFC ainsi que les différents échanges énergétiques qui s'effectuent entre ce dernier et la ligne de transport. Afin de bien comprendre le concept UPFC, on concède un système de puissance qui se compose de deux régions très éloignées reliées par une ligne de transport d'impédance (X_L) comme illustré dans la figure suivante (figure II.7). On suppose que ces régions sont tellement puissantes que leurs tensions et leurs angles respectifs ne s'influencent pas: C'est à dire qu'en régime normal et en l'absence d'UPFC, ce qui se passe sur la première région n'affecte pas la deuxième région, et inversement [1].

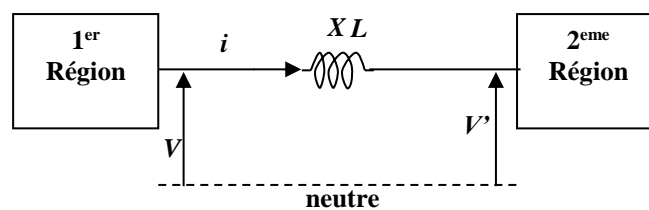


Figure II.7: Réseau d'interconnexion reliant deux régions

❖ Premier cas où $V=V'$

Quand (V , et V') sont égales en modules et en phases, les régions étant réunies par une ligne d'impédance (X_L), le courant de ligne sera nul car la différence de potentiel entre les deux extrémités est nulle. Il n'y aura donc pas d'échange de puissance active ou réactive entre les deux régions. Or, une région disposant d'un surplus de puissance pourrait contribuer à l'alimentation de la région qui lui est connectée et qui pourrait être en déficit. De même, une perturbation dans une région serait moins néfaste si la région voisine pouvait lui venir en aide. Durant ces moments critiques, une réponse immédiate s'impose. Les puissances actives et réactives appropriées doivent être transitées sur la ligne rapidement [1], [16]. Pour atteindre cet objectif, il faudrait:

- ✓ Créer un déphasage entre les tensions des régions 1 et 2 afin de permettre un échange de puissance active entre ces dernières,

- ✓ Créer une différence entre les valeurs des tensions des régions 1 et 2 afin de permettre un échange de puissance réactive entre elles.

L'UPFC insère en série avec la ligne de transport une tension (V_s) à la même fréquence que le réseau dont l'amplitude et la phase sont ajustables [56]. La figure suivante II.8, présente la ligne de transport dans laquelle est insérée la tension (V_s).

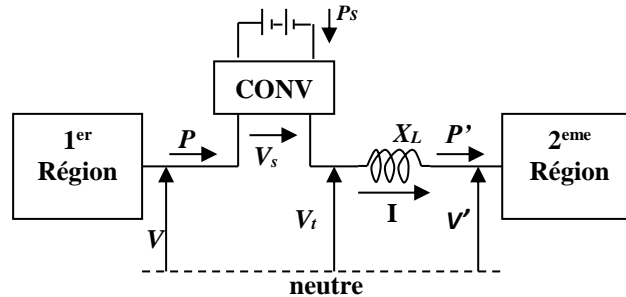


Figure II.8: Concept d'un UPFC dans un réseau à deux machines

Sachant que : (V : tension à la source (région 1), V' : tension à la réception (région 2), V_t : tension de l'onduleur shunt, V_s : tension de l'onduleur série, X_L : réactance de liaison)

La tension résultante (V_t) en amont de la réactance (X_L) est alors égale à la somme vectorielle de (V , et V_s) comme montre le diagramme de la figure II.9 ($\vec{V}_t = \vec{V}_s + \vec{V}$). Si l'angle entre (V_t , et V') est δ , il s'ensuit qu'une puissance active sera transportée sur la ligne [16], [57]. Selon l'équation suivante:

$$P = \frac{V \cdot V'}{X_L} \sin \delta \tag{II.1}$$

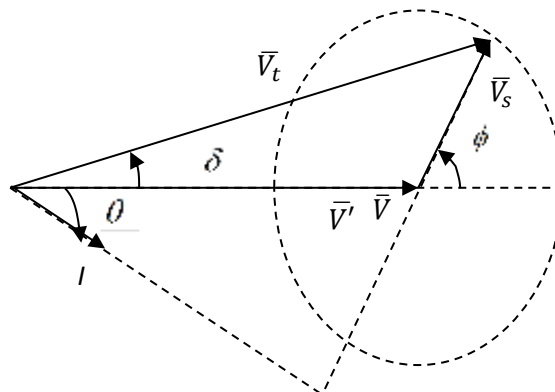


Figure II.9: Diagramme vectoriel de tension ($V=V'$)

Le diagramme vectoriel de la figure II.9, montre les conditions lorsque (V_s) est en avance sur (V) et par conséquent (V') d'un angle (ϕ). Il s'ensuit que (V_t) sera en avance sur (V') d'un angle δ . Si l'on fait varier l'angle (ϕ) du convertisseur tout en gardant (V_s) constante, l'extrémité de (V_s) décrira un cercle centré sur l'extrémité de vecteur (V_t) et suivra ce cercle en

pointillé. Par conséquent, l'angle (δ) changera progressivement d'une valeur maximale positive à une valeur minimale négative en passant par une valeur nulle. Ainsi, selon l'équation (II.1), la puissance active portée par la ligne peut être positive ou négative, ce qui revient à dire qu'elle peut circuler dans les deux sens. De plus, on peut faire varier la puissance en faisant varier l'amplitude de (V_s) et par conséquent (V_t) [16].

Notons que, lorsque (V et V') sont égales en modules et en phases figure.II.9, le vecteur (I) sera toujours en retard sur le vecteur (V_s) de 90° et sera tel que ($I=V_s /x$). Dans ces circonstances, aucune puissance active n'est débitée ni absorbée par le convertisseur. Cependant, le convertisseur fournit une puissance réactive égale à ($Q_s=V_s .I$). Cela correspond précisément à la puissance réactive absorbée par la réactance (X) de la ligne [1].

Quant à la puissance réactive nous savons que son transit obéit à la relation suivante [3] :

$$Q = \frac{V_t^2}{X_L} - \frac{V_t.V'}{X_L} \cos \delta \quad (\text{II.2})$$

Il ressort de cette relation que la puissance réactive sera transitée de la région 1 vers la région 2 si et seulement si : $V_t - V' \cos \delta > 0$, c'est-à-dire :

$$\cos \delta < \frac{V_t}{V'} \quad (\text{II.3})$$

La puissance réactive sera transitée en sens inverse si la relation (II.3) n'est plus vérifiée.

❖ Deuxième cas où $V \neq V'$

En supposant (V , et V') en phase mais de modules différents tels que le montre la figure II.10 ci-dessous. Le vecteur (V_s) pivote autour de l'extrémité du vecteur (V) en décrivant un cercle.

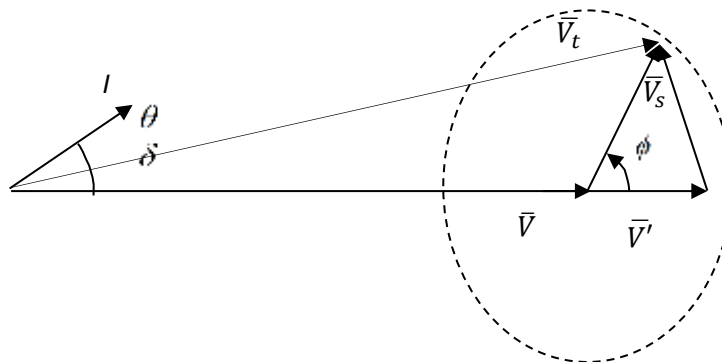


Figure II.10: Diagramme vectoriel de tensions ($V \neq V'$)

La chute de tension dans la ligne est ($jI.X=V_t-V'$) et le courant I se trouve à 90° en arrière de celle-ci d'où : $\phi - \theta = 90$. Par conséquent, (I) sera en avance sur (V , et V') de θ . On a donc les puissances actives débitées et reçues respectivement par la première et deuxième région telles que [1]:

$$P = V.I.\cos\theta \quad (\text{II.4})$$

$$P' = V'.I.\cos\theta \quad (\text{II.5})$$

Contrairement au cas précédent où les tensions (V_t , et V') étaient égales, le convertisseur débite une puissance active (P_s), et une puissance réactive (Q_s) sur le réseau. Cette puissance est égale à la différence entre les deux régions. Donc les puissances (P_s , et Q_s) débitées par le convertisseur sont:

$$P_s = V_s.I.\cos(\phi - \theta) = 0 \quad (\text{II.6})$$

$$Q_s = V_s.I.\sin(\phi - \theta) = V_s.I \quad (\text{II.7})$$

Etant donné que l'UPFC débite de la puissance réactive sur le réseau, il doit en absorber autant d'un accumulateur. A moins d'être très gros, celui-ci se déchargerait très rapidement, donc au lieu d'utiliser un accumulateur, on pourrait le remplacer par un redresseur qui serait alimenté par un transformateur monté en parallèle avec la ligne. Cette solution demande l'installation de deux convertisseurs connectés par une liaison à courant continu. La figure II.11, montre le schéma de ce type d'installation. Le convertisseur 1 redresse la puissance à courant alternatif provenant du transformateur T monté en parallèle avec la ligne, et l'envoie au circuit de liaison à CC du convertisseur 2 qui le retransforme en puissance à courant alternatif et l'injecte dans la ligne de transport sous la tension (V_s). L'ensemble des deux convertisseurs porte le nom d'UPFC [16], [56], [58].

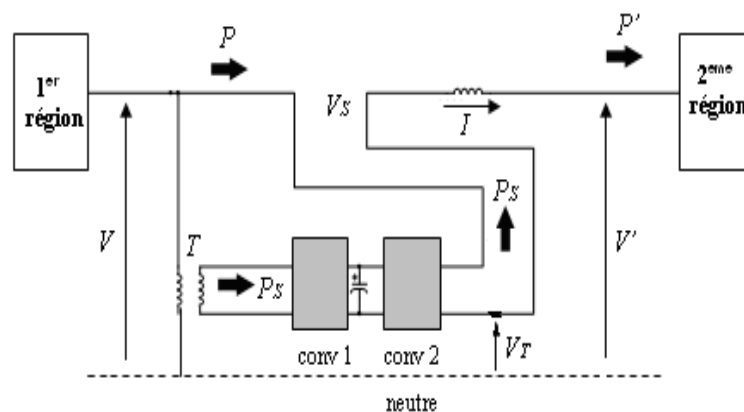


Figure II.11: Schéma fonctionnelle d'un UPFC

II 3.4. Contribution des deux convertisseurs shunt et série à la réalisation de la fonction de l'UPFC

Les multiples performances dont regorge le dispositif UPFC font de lui l'un des dispositifs FACTS le plus flexible. Les convertisseurs shunt et série d'un UPFC ont différents modes de fonctionnement en fonction des signaux de référence [9]. Les signaux de référence pourraient être, une référence de courant ou de tension. La Figure II.12, donne une façon simplifiée le fonctionnement des convertisseurs shunt et série de l'UPFC en fonction des références de courant et de tension.

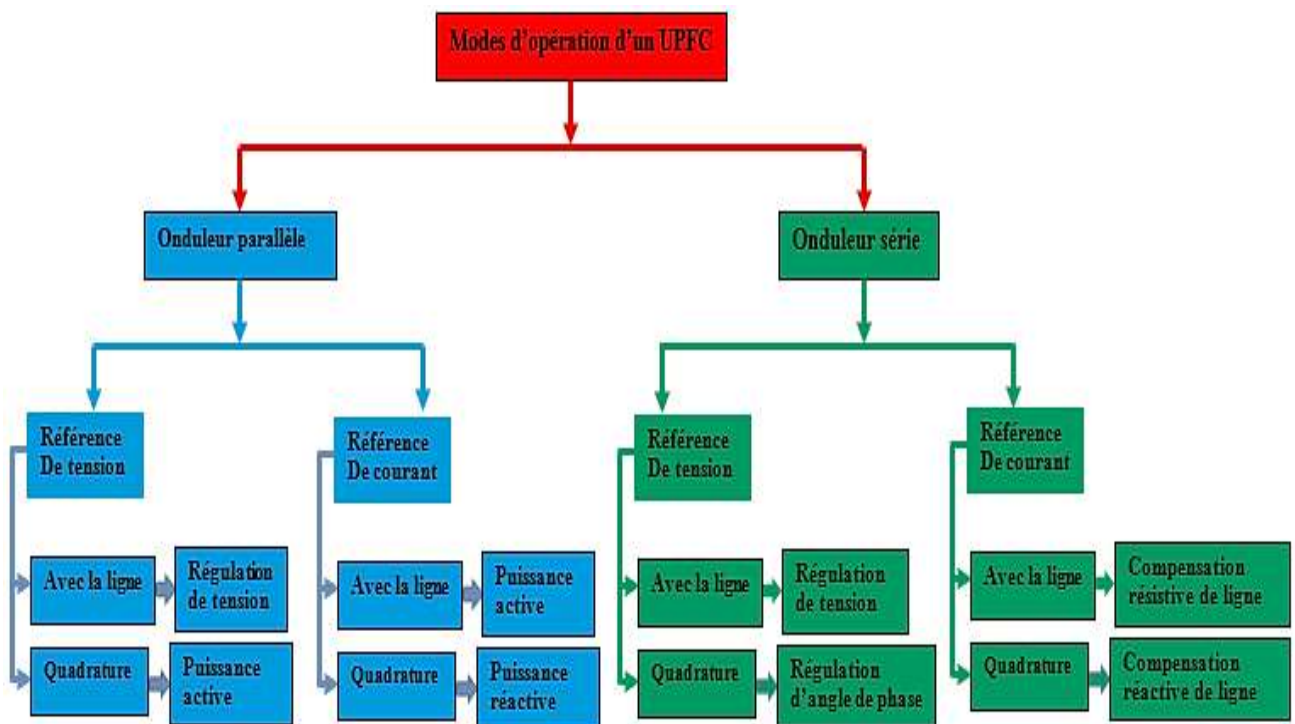


Figure II.12: Modes de fonctionnement des convertisseurs shunt et série d'un UPFC

II 3.4.1. Modes de fonctionnement du convertisseur shunt

Les modes de fonctionnement du convertisseur shunt dépendent du signal de référence utilisé pour dériver l'amplitude et l'angle de la tension de sortie du convertisseur. Les signaux de référence peuvent être une référence de tension ou de courant.

Modes de fonctionnement du convertisseur shunt utilisant la tension de bus comme référence : Dans ce mode de fonctionnement, la tension de sortie du convertisseur shunt peut être divisée en deux composantes (V_{shd} , et V_{shq}) par rapport à la tension de bus AC à laquelle l'UPFC est connecté. La composante d'axe direct peut être utilisée pour contrôler la tension du bus système afin de protéger la ligne de transmission contre les changements dans le réseau. Tandis que, la composante en quadrature assiste le convertisseur shunt pour échanger la puissance active avec la ligne de transmission qui est nécessaire pour le convertisseur série. Ce mode de fonctionnement est connu comme le mode de contrôle de tension [9].

Modes de fonctionnement du convertisseur shunt utilisant le courant du convertisseur shunt comme référence : Dans ce mode de fonctionnement, le courant du convertisseur shunt est utilisé comme signal d'entrée de référence. Ici, la tension de sortie du convertisseur est également divisée en deux composantes. La composante en phase permettra l'échange de la puissance active. D'autre part, la composante en quadrature est responsable de l'échange de la puissance réactive avec la ligne de transmission. Cela permettra également de supporter la puissance réactive dans le système de transmission indépendamment de la variation de la tension du nœud. Ce mode de fonctionnement est appelé mode de puissance réactive [6], [9].

III 3.4.2. Modes de fonctionnement du convertisseur série

Le convertisseur série d'un UPFC permet d'injecter la tension en série avec le courant de ligne pour contrôler l'amplitude et la phase de la tension de ligne qui à son tour peut contrôler le flux de puissance dans la ligne. Le convertisseur série peut fonctionner dans différents modes basés sur les signaux de référence (tension ou courant) pour dériver l'amplitude et l'angle de phase de la tension injectée.

Modes de fonctionnement du convertisseur série utilisant la tension de nœud comme référence :

Dans ce mode, le convertisseur série de l'UPFC génère une tension contrôlable à la fois en amplitude et en angle de phase sur la base de la référence de tension du nœud. Lorsque la tension est en phase avec le courant, le mode de fonctionnement est la régulation de la tension tandis que lorsque la tension est en quadrature avec le courant, le mode de fonctionnement s'appelle « régulation de l'angle de phase ».

Mode de régulation de tension :

Dans ce mode de fonctionnement, le convertisseur série génère un vecteur de tension à l'amplitude et à l'angle de phase requis en référence à la tension du nœud.

Mode de réglage de la phase : L'UPFC peut être utilisé dans ce mode pour réguler l'angle entre les deux extrémités de la ligne de transmission. L'angle de phase de la tension peut être décalé en injectant une tension avec l'angle spécifié par l'entrée de référence.

Modes de fonctionnement du convertisseur série utilisant le courant de ligne comme référence : Dans ces modes, le convertisseur série injecte une tension contrôlable dans la ligne de transmission basée sur le courant de ligne comme référence. Lorsque le courant de ligne est en phase avec la tension injectée, le mode de fonctionnement est la compensation résistive de ligne. Lorsque le courant de ligne est en quadrature avec la tension du nœud, le mode de fonctionnement c'est la compensation réactive.

Compensation résistive de ligne : Dans ce mode de fonctionnement, la tension est injectée proportionnellement au courant de ligne par le convertisseur série (le SSSC) de l'UPFC. Le transformateur série connecté au convertisseur série de l'UPFC est considéré comme une impédance. Dans ce mode de fonctionnement, la tension injectée en série est maintenue pour être en phase avec le courant de ligne afin de compenser la chute de tension résistive de la ligne de transmission. Le schéma de compensation est limité par le rapport (X/R) de la ligne de transmission.

Compensation réactive de ligne : Dans ce mode, la tension injectée en série est maintenue hors de phase avec le courant de ligne afin de compenser l'impédance de la ligne de transmission réactive.

Mode de control automatique du flux de puissance : Dans ce mode, le convertisseur série peut contrôler à la fois le flux de puissance active et réactive indépendamment dans une ligne de transmission en réglant la tension série injectée en amplitude et angle de phase à la fois. La tension injectée est déterminée automatiquement et continuellement pour maintenir la puissance active et réactive souhaitée malgré les changements du système [9].

II.4. Section 2 : Modélisation du système

Cette section est consacrée à la modélisation mathématique de l'UPFC (STATCOM et SSSC) sur la base des schémas équivalents de chaque partie. La modélisation d'un UPFC exige une configuration mathématique équivalente pour étudier les relations entre le réseau électrique et l'UPFC en régime stationnaire. Le schéma de base est donné sur la Figure. II.13, cette figure représente un schéma unifilaire d'un UPFC installé dans une ligne de transmission ou le convertisseur série et shunt sont représentés par des sources de tension (V_s , et V_p) respectivement, tandis que ($r = r_s + r_L$) et ($L = L_s + L_L$) représentent respectivement la résistance et l'inductance de fuite du transformateur série et de la ligne de transmission, respectivement. De même, (r_p et L_p) représentent respectivement la résistance et l'inductance de fuite du transformateur shunt [59], [60]. La ligne est représentée par un modèle simple composé d'une résistance (r) et d'une réactance (L).

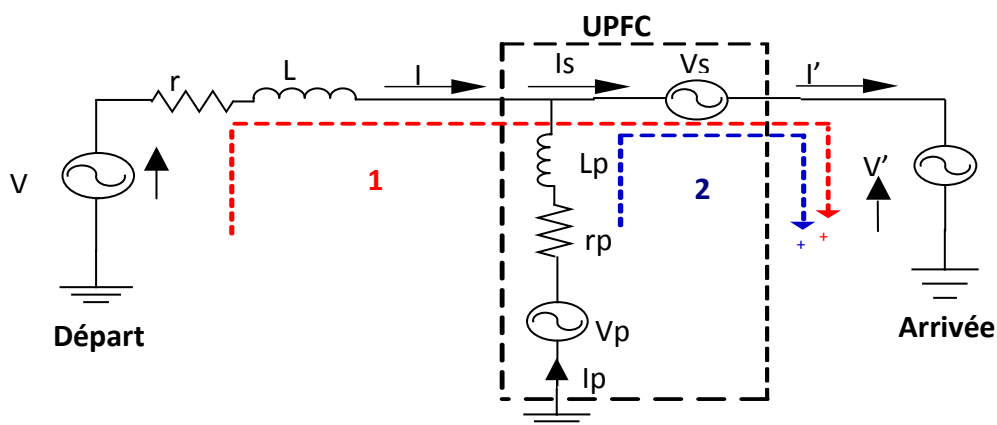


Figure II.13: Modèle mathématique de l'UPFC et de la ligne de transport

La modélisation du système est effectuée en admettant les suppositions suivantes:

- les impédances de la ligne et des transformateurs sont constantes,
- la variation de la tension du bus continu est relativement lente, comparée à celle des courants,
- la fréquence du réseau est constante.

Celles-ci ne sont possibles qu'en conséquences et moyennant les hypothèses, communément admises, ci-dessous :

- le réseau est stable,
- les circuits magnétiques des transformateurs sont linéaires (ne sont pas saturés),
- les systèmes électriques amont et aval sont suffisamment puissants (ont des marges suffisantes en actif et en réactif).

La modélisation de L'UPFC est définie par trois systèmes d'équations qui sont :

II.4.1. Modélisation de la partie série de l'UPFC (SSSC)

En appliquant les lois de Kirchhoff sur la Maille 1, on a les équations suivantes [8], [61], [62]:

$$\begin{cases} V_a = r i_a + L \frac{di_a}{dt} + V_{s_a} + V'_a \\ V_b = r i_b + L \frac{di_b}{dt} + V_{s_b} + V'_b \\ V_c = r i_c + L \frac{di_c}{dt} + V_{s_c} + V'_c \end{cases} \Leftrightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_a - V_{s_a} - V'_a \\ V_b - V_{s_b} - V'_b \\ V_c - V_{s_c} - V'_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

La transformation de Park vise à modéliser ce système triphasé (a, b, c) en système biphasé (d, q). Dans le repère de Park. La forme matricielle en système biphasé (d, q) du convertisseur de série est donnée comme suit:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & \omega \\ \omega & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \left(\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V'_d \\ V'_q \end{bmatrix} \right) \quad (\text{II.9})$$

Ou (V_d, V_q) , (V_{sd}, V_{sq}) , (V'_d, V'_q) sont respectivement les deux composantes d et q des tensions V , V_s et V' .

II.4.2. Modélisation de la partie shunt de l'UPFC (STATCOM)

De la même manière, on peut déterminer les expressions de la partie shunt en appliquant les lois de Kirchhoff sur la Maille 2 (Figure II.13). On aboutit à la relation matricielle suivante [7], [8], [60] :

$$\begin{cases} V_{pa} = r_p i_{pa} + L_P \frac{di_{pa}}{dt} + V_{S_a} + V'_a \\ V_{pb} = r_p i_{pb} + L_P \frac{di_{pb}}{dt} + V_{S_b} + V'_b \\ V_{pc} = r_p i_{pc} + L_P \frac{di_{pc}}{dt} + V_{S_c} + V'_c \end{cases} \Leftrightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_p}{L_P} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r_p}{L_P} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_p}{L_P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_P} \begin{bmatrix} V_{pa} - V_{S_a} - V'_a \\ V_{pb} - V_{S_b} - V'_b \\ V_{pc} - V_{S_c} - V'_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

La même chose, la transformation de Park vise à modéliser ce système triphasé (a, b, c) en système biphasé (d, q). La forme matricielle du convertisseur shunt est donnée comme suit [1], [8]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_p}{L_P} & w \\ -w & -\frac{r_p}{L_P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_P} \left(\begin{bmatrix} V_{pd} \\ V_{pq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V'_d \\ V'_q \end{bmatrix} \right) \quad (\text{II.11})$$

Où (V_{pd}, V_{pq}) , (V_{sd}, V_{sq}) , (V'_d, V'_q) sont respectivement les deux composantes d et q des tensions V_p , V_s et V' .

D'après la figure II.4 (section II.2), la répartition des puissances au nœud de connexion shunt conduit à la relation ci-dessous:

$$\begin{cases} P = P' - P_p \\ Q = Q' - Q_p \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

L'expression de la chute de tension (ΔV) d'après la figure II.4 peut être réécrite comme suit :

$$\Delta V = \frac{X}{V_t} (P' - P_p) + \frac{X}{V_t} (Q' - Q_p) \quad (\text{II.13})$$

Ainsi, d'après la figure II.4 (V_t) s'exprime par :

$$V \cos \delta = V_t + \Delta V \quad (\text{II.14})$$

Ou encore :

$$V_t = -\Delta V + V \cos \delta \quad (\text{II.15})$$

Où : (δ) est le déphasage entre les deux extrémités tension (V_t , et V).

Les équations (II.13) et (II.15) permettent d'écrire :

$$V_t = \frac{X}{V_t} Q_p - \frac{X}{V_t} (P' - P_p) - \frac{X}{V_t} Q' + V \cos \delta \quad (\text{II.16})$$

L'équation (II.16) régit l'évolution de la tension shunt (V_t) où, les seuls degrés de liberté disponibles pour agir sur (V_t) sont (Q_p , et P_p). Cependant, comme (P_p) est une commande réservée au réglage de (V_{dc}), aussi, seule la puissance réactive (Q_p) peut être utilisée comme grandeur de commande pour le réglage de la tension (V_t). Toutefois, la puissance active pourrait jouer le même rôle que la puissance réactive, surtout dans les réseaux BT (basse tension) où la résistance linéique est plus conséquente que sur les réseaux de niveau de tension plus élevé HT (réseau de transport) [7]. Il est donc possible de régler (V_t) en agissant sur la puissance réactive injectée par le STATCOM et créer ainsi une variation de tension algébrique permettant à la tension (V_t) d'atteindre sa valeur de consigne (V_t^*).

Calcul des puissances active et réactive instantanées de l'UPFC

Les puissances active et réactive instantanées s'expriment par les relations suivantes :

Les puissances active et réactive générées:

$$P = \frac{3}{2} (V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q) \quad (\text{II.17})$$

$$Q = \frac{3}{2} (V_q \cdot i_d + V_d \cdot i_q) \quad (\text{II.18})$$

Les puissances active et réactive absorbées:

$$P = \frac{3}{2} (V'_d \cdot i'_d + V'_q \cdot i'_q) \quad (\text{II.19})$$

$$Q = \frac{3}{2} (V'_q \cdot i'_d + V'_d \cdot i'_q) \quad (\text{II.20})$$

Les courants absorbés par la deuxième région sont tels que :

$$i'_d = i_d + i_{pd} \quad (\text{II.21})$$

$$i'_q = i_q + i_{pq} \quad (\text{II.22})$$

Concernant la régulation du flux de puissance, les consignes de puissances (P^* , et Q^*) sont directement liées aux consignes des courants série à travers la relation des puissances instantanées [8], [60] celles-ci sont données par équation (II.23) :

$$\begin{cases} P^* = \frac{3}{2}(V'_d i_{sd}^* + V'_d i_{sq}^*) \\ Q^* = \frac{3}{2}(V'_q i_{sd}^* - V'_d i_{sq}^*) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

La résolution de (II.23) par rapport à (i_d^* , et i_q^*) conduit à :

$$\begin{cases} i_{sd}^* = \frac{2}{3} \frac{(P^*(V'_d - Q^*V'_q))}{V_d'^2 + V_q'^2} \\ i_{sq}^* = \frac{2}{3} \frac{(P^*V'_q - Q^*V'_d)}{V_d'^2 + V_q'^2} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Cette dernière équation met en évidence le lien entre le sous-système externe et le sous-système interne. En effet, les consignes contractuelles de puissance, qui sont le plus souvent dictées par l'exploitant du réseau, sont transformées en consignes de courants par l'intermédiaire de la relation (II.24).

II.4.3. Modélisation de la partie continue de l'UPFC

L'échange de puissance active entre les lignes est tel que :

$$P_{dc} = \frac{3}{2}(V_{sd} \cdot i_{sd} + V_{sq} \cdot i_{sq} - V_{pd} \cdot i_{pd} + V_{pq} \cdot i_{pq}) \quad (\text{II.25})$$

L'équation dynamique de tension continue redressée aux bornes du condensateur est :

$$CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = P_{dc} \quad (\text{II.26})$$

II.5. Section 3. Structure de réglage globale de l'UPFC

Comme nous avons dit dans la partie précédent (section 2), le Bloc de control de l'UPFC est un système asservi qui permet de générer des ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs des différents bras de convertisseurs en fonction de l'écart observé entre les valeurs de référence et les valeurs mesurées durant la période de compensation. Le système de commande mesure seulement les valeurs efficaces de la tension, les puissances active et réactive au point de transition et utilisées ces paramètres pour la commande d'UPFC. Le but de cette commande est de faire en sorte que la compensation générée par les convertisseurs de l'UPFC soit la plus proche de la valeur de référence [56].

Le système de commande de l'UPFC peut être divisé fonctionnellement en commande interne (ou commande de convertisseur) et commande des opérations fonctionnelles. Les commandes internes actionnent les deux convertisseurs afin de produire la tension injectée en série commandée et, simultanément, commander le courant réactif shunt désiré. Les commandes internes fournissent les signaux d'amorçage aux valves de convertisseur de sorte que les tensions de sortie de convertisseur répondent correctement aux variables internes de référence, (i_p^* , i_q^* et V_s^*), selon la structure de commande représentée dans la figure II.14 [6].

Cette figure montre la commande interne, et la commande d'opération fonctionnelle, et le système d'optimisation de commandes avec les références internes et externes. La commande externe ou des opérations fonctionnelles définissent le mode fonctionnel d'opération de l'UPFC qui est responsable de produire des références internes, (V_s^* , et i_p^*) pour que la compensation série et shunt satisfasse les demandes actuelles du système de transport. Les modes d'opération fonctionnelle et les demandes de compensation, représentées par les entrées de référence externes, peuvent être réglés manuellement (par l'intermédiaire d'un clavier d'ordinateur) par l'opérateur ou être dictés par un système automatique d'optimisation de commande pour répondre aux exigences spécifiques de fonctionnement et d'éventualité.

Suivant la figure II.14, l'aptitude de l'injection de tension série ainsi que l'échange de la puissance réactive indépendamment contrôlable offert par la structure de circuit de deux convertisseurs dos à dos, facilitent plusieurs modes de fonctionnement et de commande de l'UPFC comme mentionné dans les paragraphes précédents (paragraphe II.3.4).

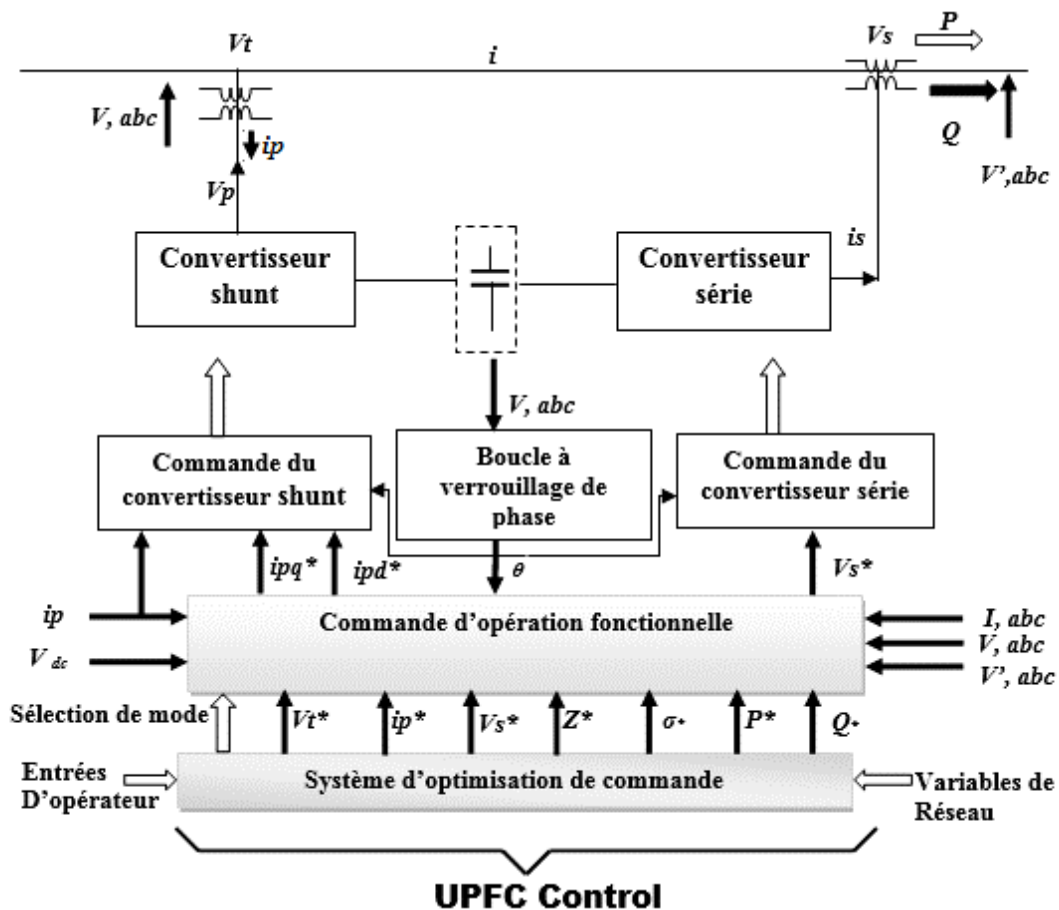


Figure II.14: Structure globale de commande de l'UPFC

Pour faciliter le traitement du dispositif, le contrôle des deux convertisseurs se fera séparément. Pour chacune, nous allons présenter la configuration de circuit de commande de chaque l'onduleur (série et shunt).

II.5.1. Schéma fonctionnel de la commande des convertisseurs série et shunt de l'UPFC

Théoriquement, l'UPFC devrait être traité comme un système multi variables car les deux convertisseurs série et parallèle sont connectés d'un côté à la ligne de transmission et l'autre côté au circuit continu DC et donc comportent chacun deux sorties. Cependant, pour faciliter la synthèse des réglages, le traitement des deux convertisseurs se fera séparément. La possibilité de cette séparation est justifiée par deux facteurs principaux. Premièrement, le couplage entre les deux convertisseurs sur la ligne de transmission est assez faible [63], [64]. Deuxièmement, la variation dynamique de la tension du côté du continu DC est dominée par le convertisseur parallèle. Ceci est justifié par le fait que la variation de la tension du côté DC est beaucoup moins sensible au contrôle du convertisseur série [4], [9]. Donc pour contrôler le flux de puissance active dans la ligne de transmission, le régulateur de l'UPFC série doit ajuster l'angle de la phase de la tension de compensation (V_s) tandis que pour régler le flux de puissance réactive, l'amplitude de la tension injectée série doit être contrôlé. Pour assurer la stabilité du système, une chaîne de contrôle est implémentée avec le contrôleur PI (le cas général) pour :

1. Contrôle de la branche série.
2. Contrôle de la branche parallèle et la partie continue.

Les figures II.15 et II.16 représentent successivement le circuit de réglage du compensateur série et le circuit de réglage du compensateur shunt. Chaque convertisseur VSC (1 ou 2) est branché sur la ligne de transmission à travers deux transformateurs série (T_s), et shunt (T_p).

Le convertisseur VSC est commandé par le dispositif de commande MLI à l'aide des trois signaux de commande V_{sa}^* , V_{sb}^* , et V_{sc}^* . Le réglage des courants (i_d , et i_q) se fait à l'aide des régulateurs type PI classique. Les deux tensions dans le repère de Park sont les signaux de commande. Le calcul des courants de références est effectué à l'aide d'un algorithme à partir de la tension du réseau et des valeurs de consigne (P^* , et Q^*) (équation II.24) [9], [16], [65].

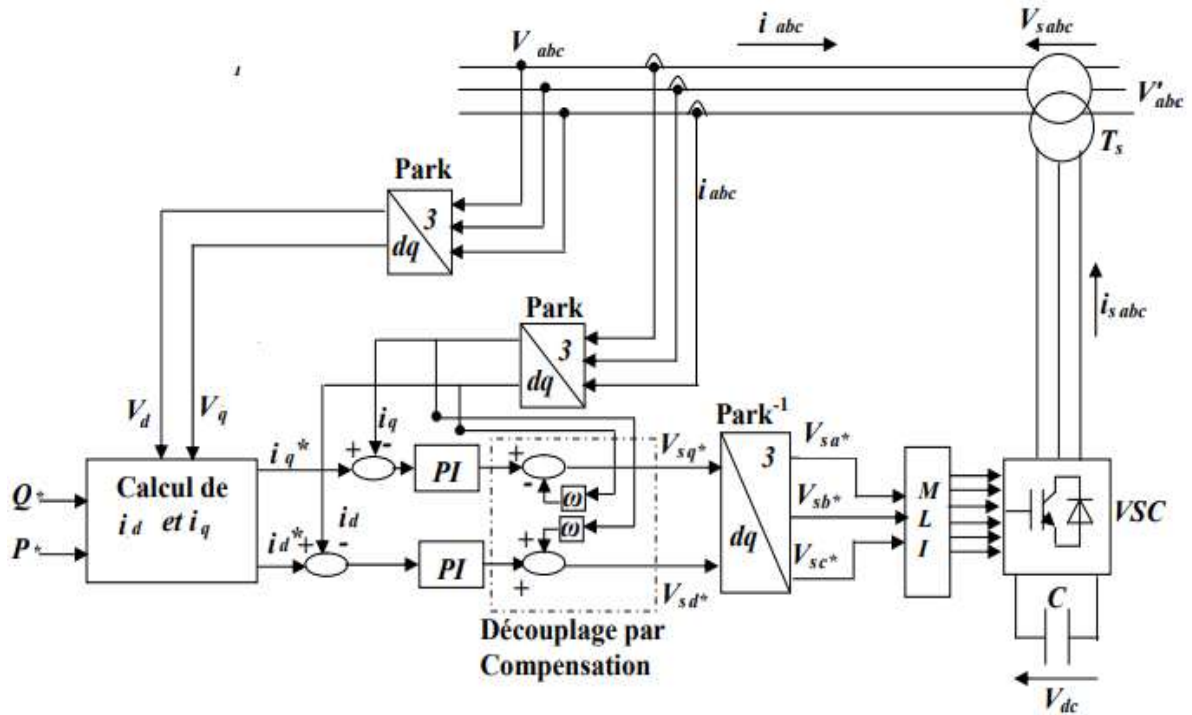


Figure II.15: Configuration du circuit de réglage du convertisseur série

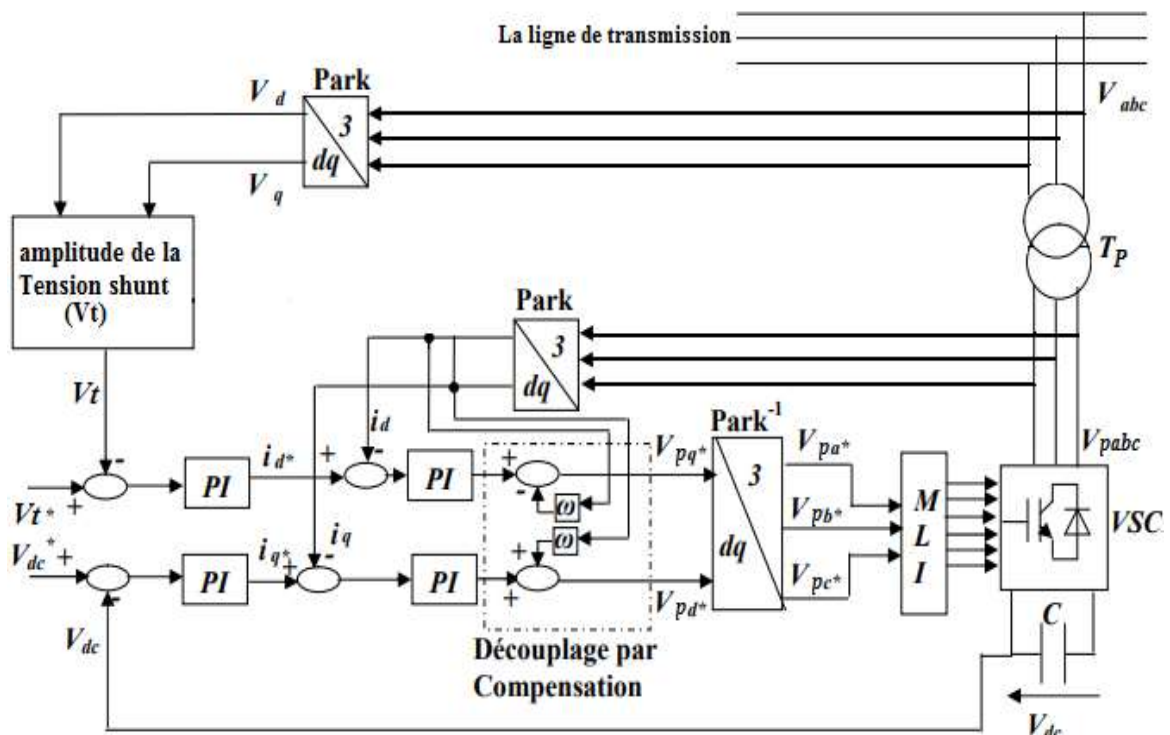


Figure II.16: Configuration du circuit de réglage du convertisseur shunt

La figure II.17 représente la structure du système de commande global contient la ligne de puissance, l'UPFC (série et parallèle), les capteurs de tension et de courant, les unités d'adaptation, les dispositifs de commande des deux sous-systèmes [7].

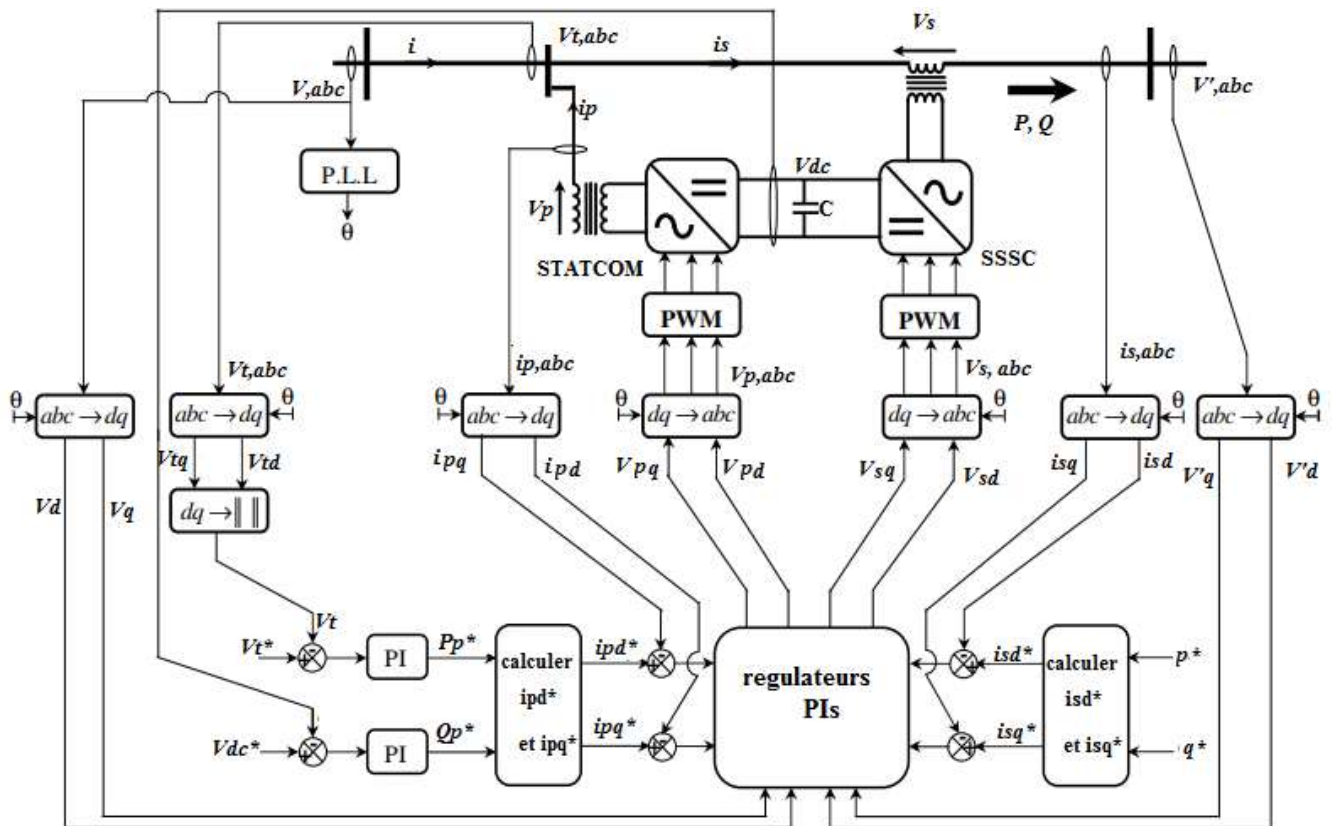


Figure II.17: Association des configurations parallèle et série

II.5.2. Commande appliquée à l'onduleur VSC de l'UPFC

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées:

- Commande par hystérésis,
- Commande par MLI (Modulation de la Largeur d'Impulsion).

II.5.2.1. Commande par hystérésis appliquée au VSC

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation [22]. En pratique c'est la technique schématisée sur la figure II.18 que l'on utilise. La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliqué à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de la commande des interrupteurs des bras correspondants de l'onduleur [26].

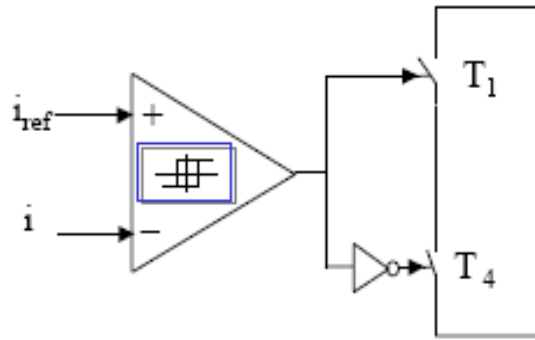


Figure II.18: Contrôle du courant par hystérésis

La simplicité de la mise en œuvre de cette stratégie est son avantage, tandis que la fréquence de commutation variable peut être son inconvénient. Celui-ci peut être remédié par une autre version de contrôle par hystérésis avec une fréquence de commutation fixe.

La rapidité du contrôle par hystérésis à réagir au changement brusque de référence, donne des performances dynamiques et statiques meilleurs. Malgré ces avantages, nous avons choisi la commande par MLI car le dispositif UPFC commande de fortes puissances et a besoin d'une fréquence fixe pour les commutations [25].

II.5.2.2. Commande MLI appliquée au VSC

L'objectif d'application de la commande MLI est de varier l'état des interrupteurs à une cadence qui ne dépend pas de la manière dont évoluent les grandeurs relatives aux systèmes interconnectés par le convertisseur d'électronique de puissance. Cette cadence étant fixée essentiellement en fonction de la vitesse de commutation des interrupteurs.

La commande MLI consiste à choisir une fréquence de commutation pour les interrupteurs, et détermine les intervalles de conduction de ces interrupteurs pour permettre de régler de manière indépendante les valeurs moyennes de chacune des tensions sur chaque période de commutation. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés par la comparaison de trois ondes de référence avec une onde porteuse qui fixe la fréquence de commutation correspondante à la cadence à laquelle on veut faire varier l'état des interrupteurs (Figure II.19). Cette comparaison fournit trois signaux logiques (Figure II.20). A partir de ces signaux, l'électronique de commande élabore les signaux de commande des interrupteurs [14], [66].

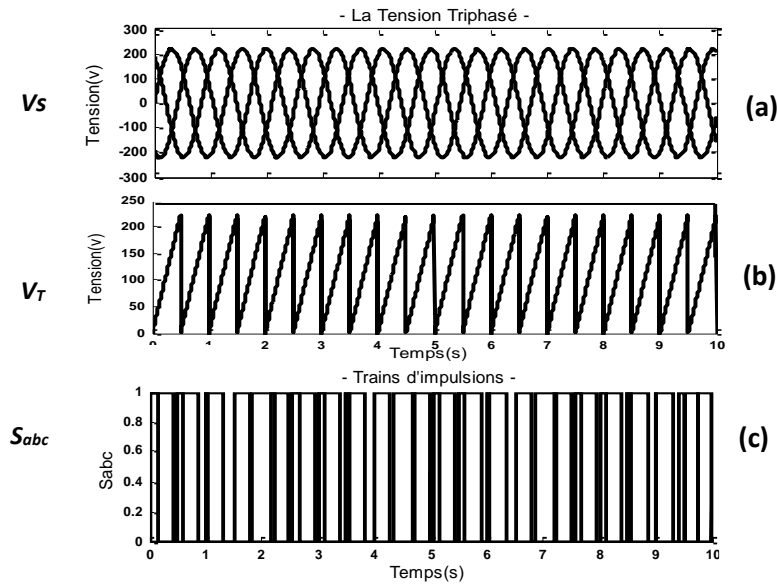


Figure II.19: (a) Signale triphasé sinusoïdal, (b) Signale triangulaire, (c) Train d'impulsion

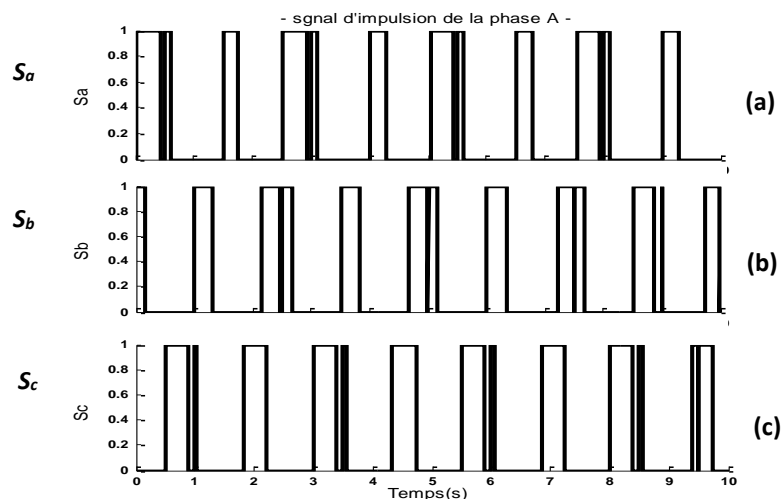


Figure II.20: Représentation des trois signaux de commande des interrupteurs

II.6. Section 4 : Régulateurs utilisés pour la commande de l'UPFC

II.6.1 Littérature sur les systèmes de commande pour l'UPFC

Dans une liaison électrique, la capacité de l'UPFC à imposer un flux de puissance donné, avec de bonnes performances statiques et dynamiques, ne peut être assuré que par un choix judicieux de la loi de commande. En littérature, diverses stratégies de contrôle ont été utilisées pour concevoir les contrôleurs de l'UPFC, ces contrôleurs peuvent être classés en contrôleurs linéaires et non linéaires.

II.6.1.1. Contrôleurs linéaire de l'UPFC

La commande découplée par PI [67], [68], la commande SVD [69], [70], la commande H_∞ [71], la commande prédictive et celle optimale [72]. Néanmoins, dans la majorité de ces

travaux, le phénomène de couplage entre les deux convertisseurs constituant l'UPFC ainsi que leurs dynamiques ont été négligés. De plus, les modèles utilisés n'ont considéré aucune perturbation interne ou externe ce qui, bien entendu, n'est pas réaliste.

II.6.1.2. Contrôleurs non linéaire de l'UPFC

Concernant la commande non linéaire de l'UPFC qui est moins abondante, on trouve la commande utilisant le principe de Lyapunov [73], la commande par linéarisation [74], la commande par back-stepping [75], et la commande par mode glissant [76]. En général, les contrôleurs non linéaires sont implémentés sur la base d'équations différentielles non linéaires et les solutions de ces équations sont très compliquées et prennent beaucoup de temps. Pour surmonter les problèmes des contrôleurs discutés au-dessus (linéaire et non linéaire), des contrôleurs intelligents ont été proposés.

II.6.1.3. Contrôleur Intelligent Artificiel de l'UPFC

Parmi ces contrôleurs on peut citer : La commande floue [77], la commande neuronale [78]. Le réseau neuronal artificiel (RNA) du contrôleur intelligent a été utilisé pour apaiser le problème des contrôleurs PI [79], [80], [81]. L'UPFC avec ANN et le système d'inférence adaptative neuro-floue (ANFIS) ont été utilisés pour amortir les oscillations et améliorer stabilité transitoire [81], [82]. Toutes les méthodes de contrôles abordés précédemment sont résumées dans le tableau suivant (Tableau II.2).

Tableau II.2 : Résumé des différents types de contrôle de l'UPFC et leurs limites

Méthode de CONTROLE	Paramètres contrôlés	Limitation
Contrôle linéaire de l'UPFC	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contrôle du flux de puissance active et réactive, 2. Régulation de la tension 	Il ne s'applique pas lorsque les paramètres de la ligne de transmission change. La complexité du système de contrôle augmente. De plus, l'utilisation du contrôleur PI entraîne une faible marge de stabilité dans la ligne. En outre, l'interaction entre le shunt et le série convertisseurs de l'UPFC n'est pas complètement éliminée.
Contrôle non linéaire de l'UPFC	<ol style="list-style-type: none"> 1. Améliore l'amortissement des oscillations de puissance. 2. Améliore le contrôle du flux de puissance 	Les contrôleurs non linéaires sont implémentés sur la base d'équations différentielles non linéaires et les solutions de ces équations sont très compliquées et longues.
Contrôle basé sur l'intelligence Artificielle	<ol style="list-style-type: none"> 1. Stabilité de la tension, 2. Oscillations humides, 3. Flux de puissance active et réactive dans le réseau 	Malgré les avantages de ce type de control, mais il reste comme une méthode ad-hoc basée sur le savoir qu'un humain peut acquérir sur un système. Les performances sont donc mesurées a posteriori et ne peuvent être calculées a priori. Les réglages se font donc par essais/erreurs

II.7. Conclusion

Le chapitre présent a porté sur l'étude structurelle et fonctionnelle de l'UPFC, la présentation des différents blocs constitutifs de ce dernier a été présentée d'une manière détaillée. Une analyse structuro fonctionnelle quant à elle nous a permis d'étudier les différents convertisseurs de base entrant dans la construction de l'UPFC, il s'agit notamment du STATCOM utilisé dans la branche parallèle et le SSSC utilisé dans la branche série, ceci nous a permis de mettre en exergue la contribution de ces deux sous-systèmes en vue de la réalisation de la fonction UPFC. Après avoir analysé le fonctionnement de chaque partie constituant l'UPFC, une modélisation mathématique de celui-ci a été développée sur la base des schémas équivalents de chaque partie. En exploitant les équations électriques, nous avons tout d'abord établi un modèle triphasé qui a été transformé en un modèle biphasé par la projection des grandeurs dans un repère synchrone (de Park). Nous avons également présenté le système de commande pour la partie parallèle et la partie série de l'UPFC. De plus, un aperçu des différentes stratégies de contrôle UPFC existantes a été présenté.

Enfin, et après avoir analysé globalement la constitution du dispositif UPFC, nous pouvons désormais envisager avec sérénité la simulation du comportement d'un réseau électrique contenant ce dernier (réseau électrique associé à un UPFC), toutes les fonctionnalités de ce composant dans un réseau électrique sont traitées via une analyse temporelle sous logiciel qui nous aide à observer les différents phénomènes de défaut qui peut se produire dans un réseau électrique, ainsi que le comportement de dispositif UPFC pour les affaiblir, c'est ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre III

*Simulation d'un l'UPFC doté d'un
régulateur classique*

III.1. Introduction

L'étude théorique précédente dans les sections du chapitre II effectuée sur l'UPFC et leur force dynamique sur le réseau électrique, nous a permis de voir que l'UPFC comme un FACTS exceptionnel utilisé pour la régulation de flux de puissance, peut commander respectivement la puissance active, la puissance réactive et la tension de nœud. Maintenant, il serait logique d'expérimenter l'efficacité de ce dispositif dans un réseau électrique via une analyse dynamique sous des conditions de fonctionnement proches à celles de la réalité, cela a besoin d'un outil de simulation pour mettre cette étude en application et cela nous aide à observer les différents phénomènes électriques ainsi que le comportement de dispositif UPFC pour les affaiblir. À cet égard, le logiciel MATLAB/Simulink est utilisé pour modéliser et tester les différents systèmes proposés, ce logiciel est un multi fonctionnel pour la simulation des réseaux électriques, en particulier le toolbox Sim Power Systems [6] qui offre des bibliothèques des composants et des outils d'analyse pour la modélisation et la simulation des réseaux électriques. Au cours de ce chapitre et à travers plusieurs tests d'applications sous différents fonctionnements nous avons analysé globalement toutes les fonctionnalités de ce composant dans un réseau électrique, la commande linéaire à structure simple (PI) est utilisée dans le mécanisme de control des convertisseurs de l'UPFC.

Dans ce contexte, le travail dans ce chapitre est partagé en deux scénarios principaux selon l'objectif souhaité derrière la mise en place de cet élément (UPFC) dans le réseau, ces scénarios définis comme suite :

- ⊕ **Scénario 1** : Le comportement d'un système UPFC dans un réseau électrique en fonction des variations possibles dans le réseau.
- ⊕ **Scénario 2** : Etude et mise au point d'un UPFC en vue d'améliorer le flux de puissance dans un réseau électrique.

Le 2^{ème} Scénario sert à étudier l'aptitude de l'UPFC à résoudre des problèmes liés aux réseaux électriques telle que : l'amélioration des flux de puissances, réduire les pertes de puissance et minimiser la déviation de tension des nœuds aux différents jeux de barres. Pour atteindre cet objectif, des réseaux multi machines comme le réseau test standard IEEE 14 nœuds est considéré.

III.2. Simulations et résultats

III.2.1. Scénario 1 : Comportement d'un UPFC dans un réseau électrique en fonction des variations possibles dans le réseau

Dans ce Scénario, l'objectif principal c'est de mener à bien l'analyse des performances de l'UPFC dans un réseau électrique sous des conditions que nous croyons proches de la situation réelle. Pour valider les lois de commande sur le fonctionnement global d'un système de transmission, on va étudier essentiellement le comportement du système UPFC et leur aptitude à contrôler le flux de puissance active et réactive instantanément et indépendamment, nous aurons surveiller aussi leur action sur la stabilité de tension du réseau face à des défauts. Pour les conditions de défauts, on simule les différentes perturbations les plus courantes dans les systèmes de transmission comme les changements brusques dans les puissances transitées, et autres perturbations surtout celles qui ciblent seulement la tension de ces systèmes, nous avons choisi deux exemples de perturbation de tension qui sont : le creux de tension et la surtension.

La simulation dans ce scénario sera effectuée en deux parties essentielles qui sont:

- ⊕ **Cas 01:** Fonctionnement de l'UPFC en mode contrôle du flux de puissance,
- ⊕ **Cas 02:** Fonctionnement de l'UPFC en mode contrôle de tension.

Le 1^{er} cas de simulation sert à étudier l'aptitude de l'UPFC à contrôler instantanément et de façon indépendante le flux de puissance traversant une ligne de transmission vis-à-vis les changements brusques dans les références de puissance, tandis que le 2^{ème} scénario de simulation est réservé pour prouver le rôle de l'UPFC face aux changements dans l'allure de la tension. A cet égard, deux différents tests avec différents modèles UPFC sont concernés pour la simulation en prenant les mêmes essais (variation dans les consignes des puissances et dans l'allure de la tension) dans les deux tests.

III.2.1.1. Test d'application 1

Dans le premier test (Test I), en basant notre étude sur le montage de la figure III.1, c'est un réseau de transport canadien (hydrau-Québec) de 500 kV qui est constitué de trois générateurs (G_1 , G_2 , G_3) dont leurs puissances de court-circuit sont 8500 MVA, 6500 MVA et 900 MVA respectivement. Il se compose également de 4 nœuds (B_1 à B_4), trois lignes de transport (L_1 à L_3), et deux charges [8], [59], [83]. L'UPFC situé à l'extrémité gauche de la ligne ' L_2 ' entre les nœuds (B_1 et B_2), l'onduleur shunt contrôle la tension du bus UPFC (V_{bus_1}) à 1,0 pu et la tension continue (V_{dc}) à 20 kV. L'onduleur série contrôle le flux de puissance dans la ligne de transmission (PQ_ligne), les convertisseurs shunt et série peuvent échanger de la puissance active à travers un bus continu. Le flux de puissance naturel via le nœud ' B_2 ' lorsque la tension zéro est générée par le convertisseur série de l'UPFC est $P=+870$ MW et $Q = -60$

Mvar, ces valeurs sont prises comme références et des entrées utilisées dans la commande de l'UPFC. Les paramètres du modèle à simuler en plus le système de contrôle de l'onduleur shunt et l'onduleur série de l'UPFC sont données à l'annexe A (tableau A.1, Figures: A.1, A.2)

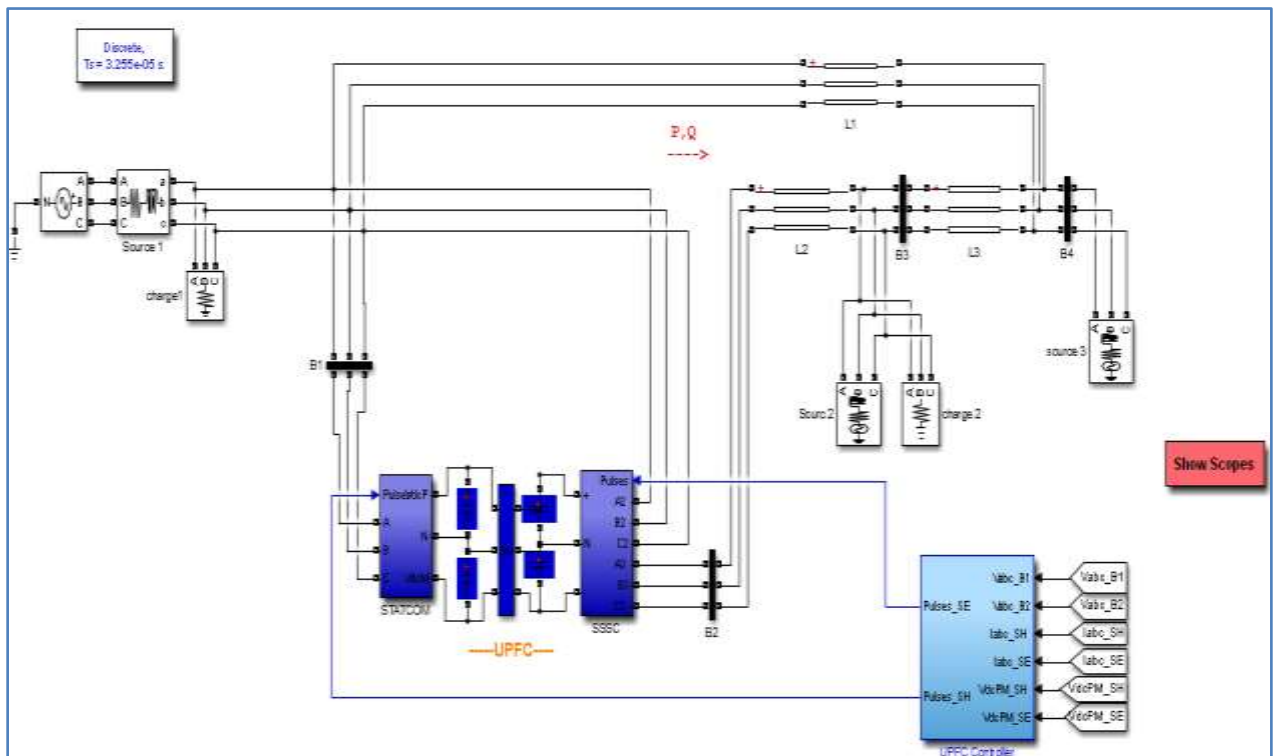


Figure III.1: Blocs Simulink d'un UPFC relié au réseau (Test 1, Cas N°1)

III.2.1.1.1. Cas 01 : Fonctionnement de l'UPFC en mode contrôle du flux de puissance

La performance de l'UPFC en mode de contrôle de flux de puissance est présentée dans un plusieurs récents travaux et certaines simulations sont présentées ici. Dans le premier cas de ce travail, les simulations sont effectuées sur le réseau test de figure III.1 pour valider l'action de l'UPFC sur la régulation de Flux de puissance vis-à-vis une perturbation dans les consignes de puissance (P_{ref} , Q_{ref}) au niveau de la ligne raccordé entre le nœud 1 et nœud 2 (ligne B1-B2).

✓ Essais de simulation

Les simulations sont démarrées avec des conditions initiales liées à l'interconnexion considérée fonctionnant à l'état stable suivant: $P = 870$ MW (8,7 pu), $Q = -60$ Mvar (-0,6 pu), durant la simulation on applique des changements de consigne sur les puissances actives et réactives afin de tester le comportement de l'UPFC sur le contrôle instantané et simultané de flux de puissance. A cet égard, trois tests (A, B et C) ont été réalisés :

Cas-A: Dans le premier cas de simulation nous simulons notre système test et à l'instant $t = 0.25$ sec, la puissance active est augmentée à partir de sa valeur initiale 870 MW (8.7 pu) à 1000 MW (10 pu) et la puissance réactive reste constante à partir de sa valeur initiale de -60 Mvar (-0,6 pu).

Cas-B: Dans le deuxième cas de ce test, nous simulons à nouveau notre système test, mais le changement est appliqué uniquement pour la valeur de la puissance réactive. Cela signifie que à $t = 0.5$ sec, la puissance réactive de la ligne de transmission passe de la valeur initiale de -60 Mvar (-0.6 pu) à +70 Mvar (0.7 pu) et la puissance active reste constante ($P = 8.7$ pu) pendant tout le temps de la simulation. Grâce à ces deux tests (cas A et B), nous serons en mesure de montrer l'indépendance de l'UPFC pour contrôler la puissance active et réactive.

Cas-C: Dans ce test, contrairement à la première étude de cas (cas A, et B), en raison du fait que le changement est appliqué à la fois dans les puissances actives et réactives (conjonction du 'Cas A' et du 'cas B' de test A). Cela signifie qu'à l'instant $t = 0.25$ sec, la puissance active est passée de sa valeur initiale de 870 MW (8,7 pu) à 1000 MW (10 pu) tandis que la puissance réactive passe de la valeur initiale -60 Mvar (-0,6 pu), à +70 Mvar (+0,7 pu) à $t = 0,5$ sec. Ce cas est réalisé afin de tester la capacité de l'UPFC à contrôler simultanément le flux de puissance.

Dans les trois tests (A, B et C), le comportement dynamique du système UPFC en réponse au changement appliqué aux valeurs de référence des puissances actives et réactives est présenté et discuté ci-dessous en détail. Les figures III.2 jusqu'au III.7 (Les cas A, B et C), illustrent les graphes des résultats obtenus, les courbes en rouge représentent les consignes (références) et les courbes en bleu représentent les réponses.

À partir des résultats des figures III.2 jusqu'au III.7 pour les trois simulations A, B et C respectivement, il peut être remarqué que le flux de la puissance active à travers la ligne (B₁-B₂) a commencé à suivre leurs consignes, on observe un asservissement total avec pic de dépassements aux instants des variations des consignes, la même remarque pour la variation de la puissance réactive qui est illustrée dans les mêmes figures. Nous constatons aussi que la variation de la puissance active influence celle de la puissance réactive et la variation de la puissance réactive influence celle de la puissance active, à $t = 0.25$ sec lorsque la puissance active change, il y a une petite variation de la puissance réactive avec moins d'oscillation et vice versa en raison du changement de la puissance réactive à $t = 0.5$ sec, ceci est du fait que le découplage par PI classique n'est pas parfait. D'après les résultats des tests précédents (cas A, B et C), nous pouvons maintenant être sûrs que : le fonctionnement de l'UPFC contrôle efficacement la puissance active et réactive transmise soit indépendamment (cas A, et cas B) ou simultanément (cas C) dans la ligne de transmission.

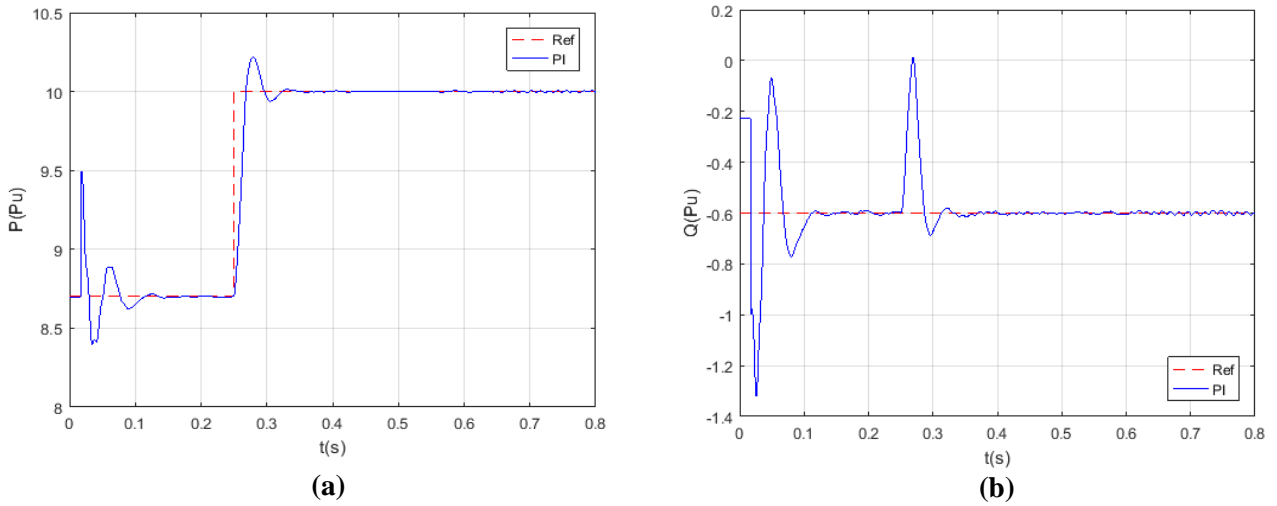


Figure III.2 : Contrôle de la puissance transité active (a) et réactive (b) par l'UPFC (Cas A)

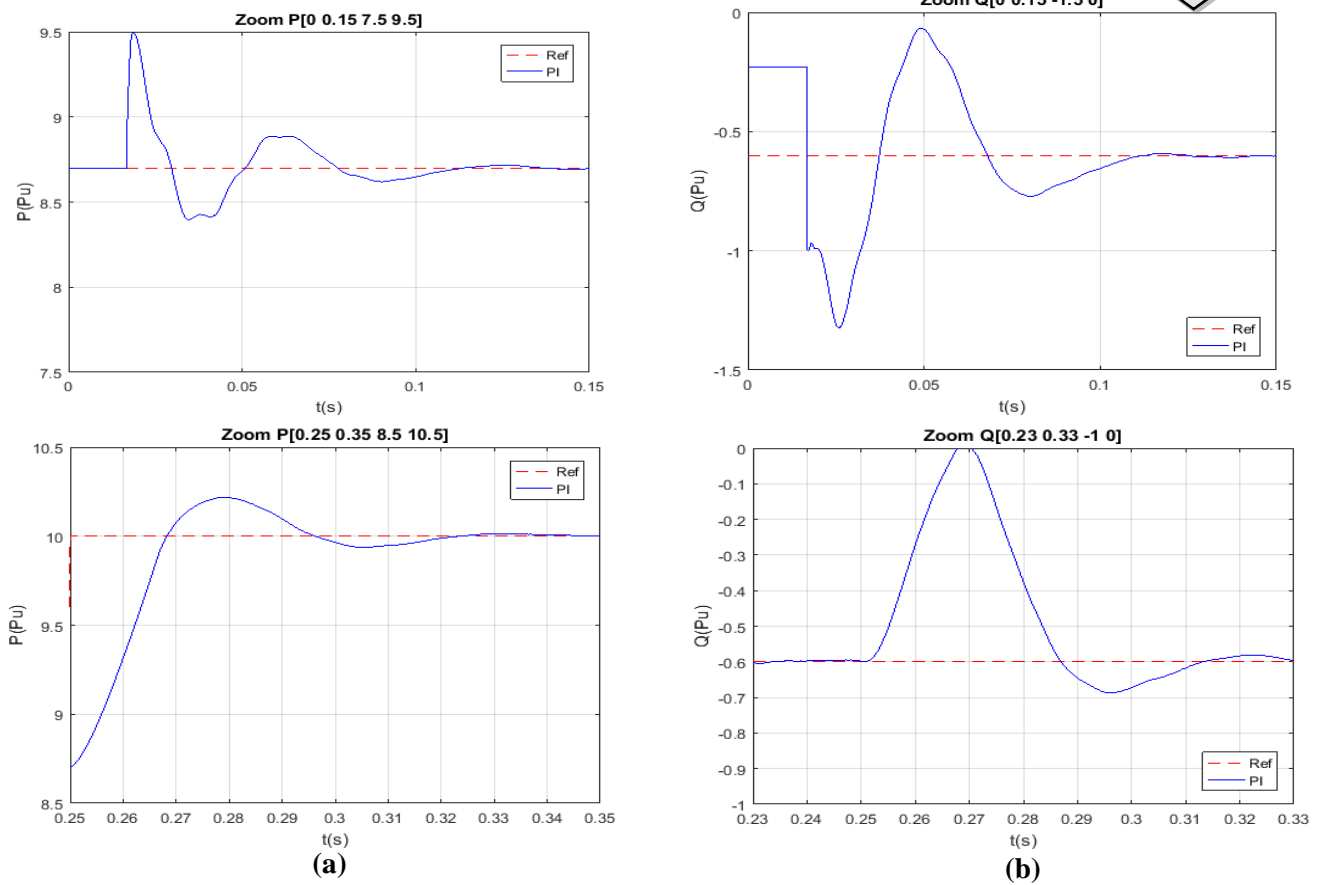
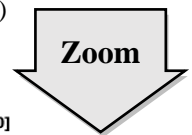


Figure III.3 : Figuration en zoom de variation de la puissance active (a) (temps pris entre : 0– 0.15s, et 0.25– 0.35s), la puissance réactive (b) (temps pris entre : 0– 0.15s, et 0.23– 0.33s)

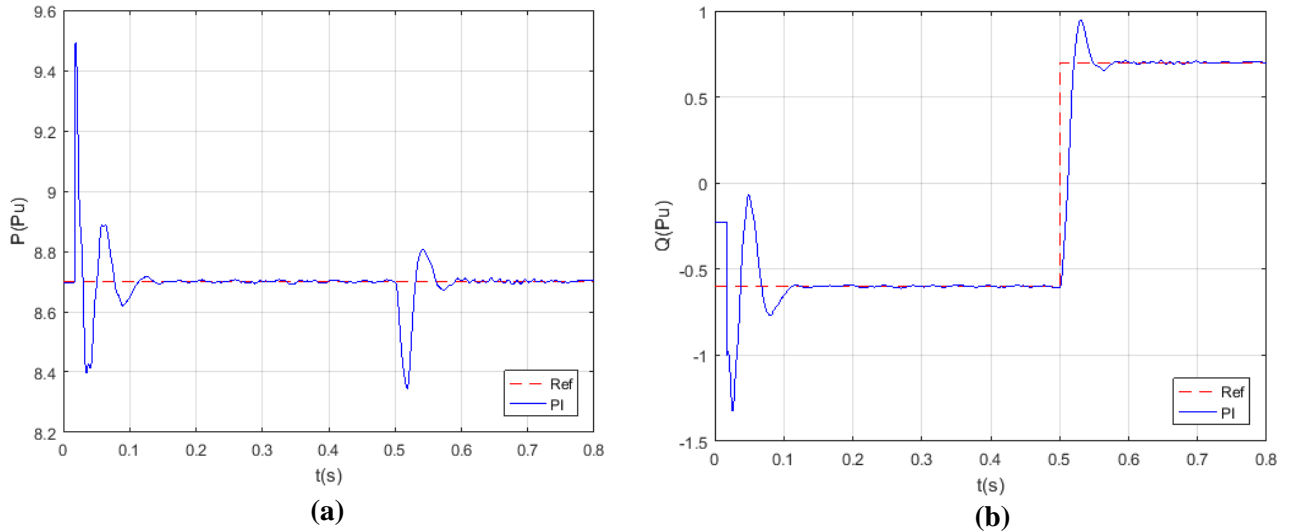


Figure III.4 : Contrôle de la puissance transité active (a) et réactive (b) par l'UPFC (Cas B)

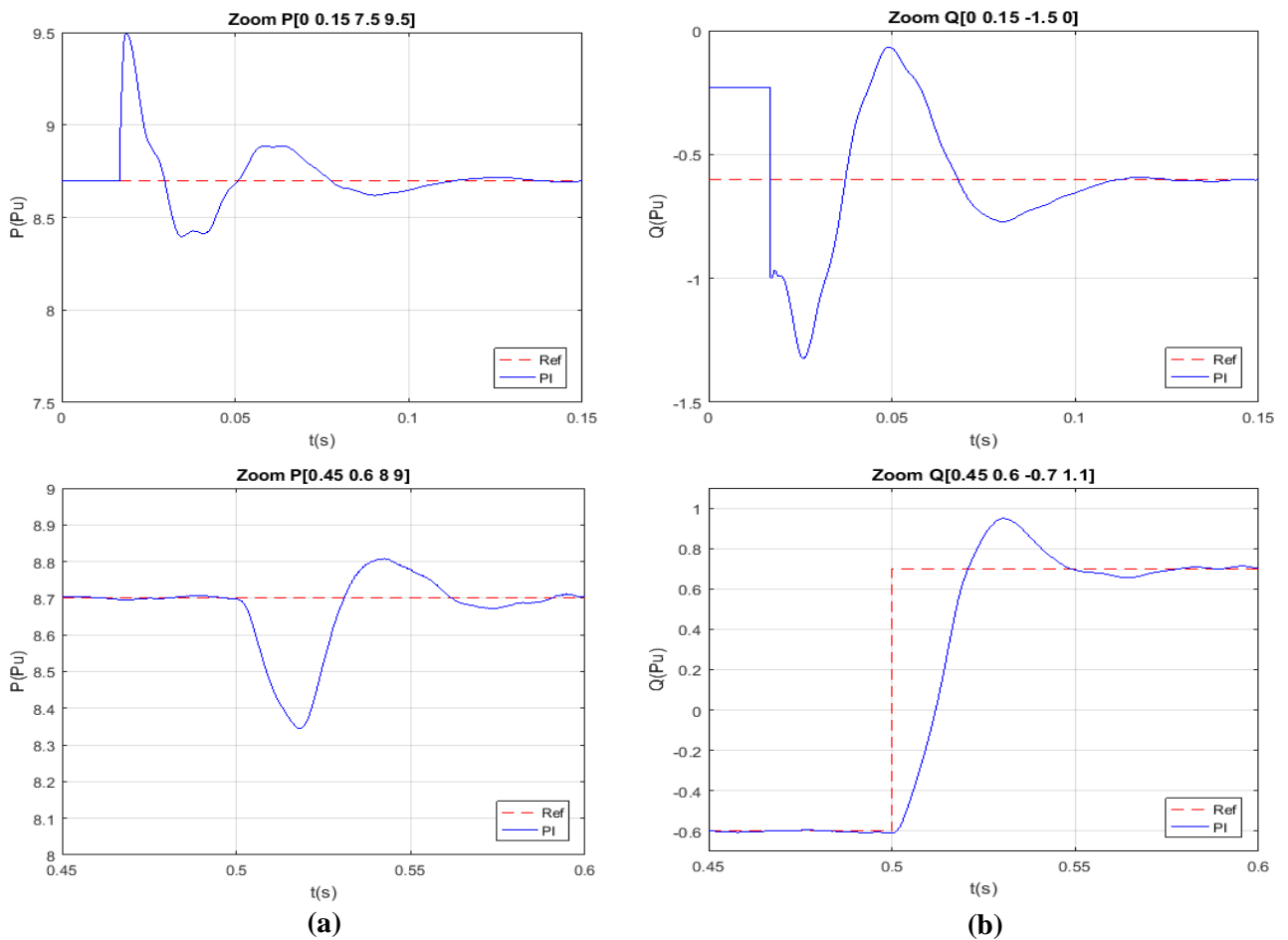
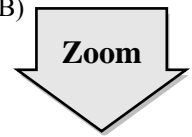


Figure III.5 : Figuration en zoom de variation de la puissance active (a) (temps pris entre : 0–0.15s, et 0.45–0.6s), la puissance réactive (b) (temps pris entre : 0–0.15s, et 0.45–0.6s)

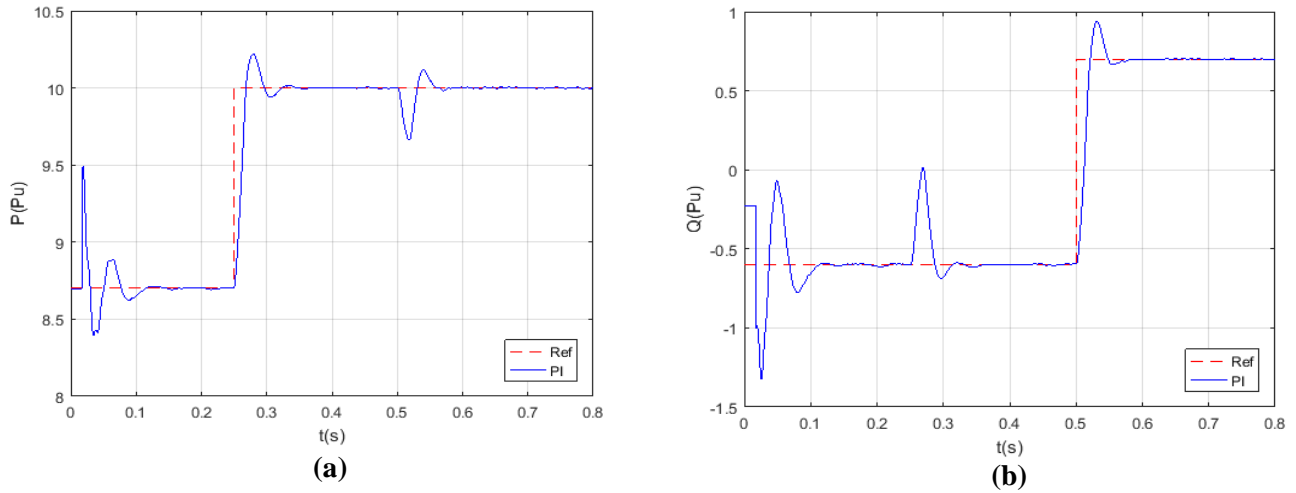


Figure III.6 : Contrôle de la puissance transité active (a) et réactive (b) par l'UPFC (Cas C)

Zoom

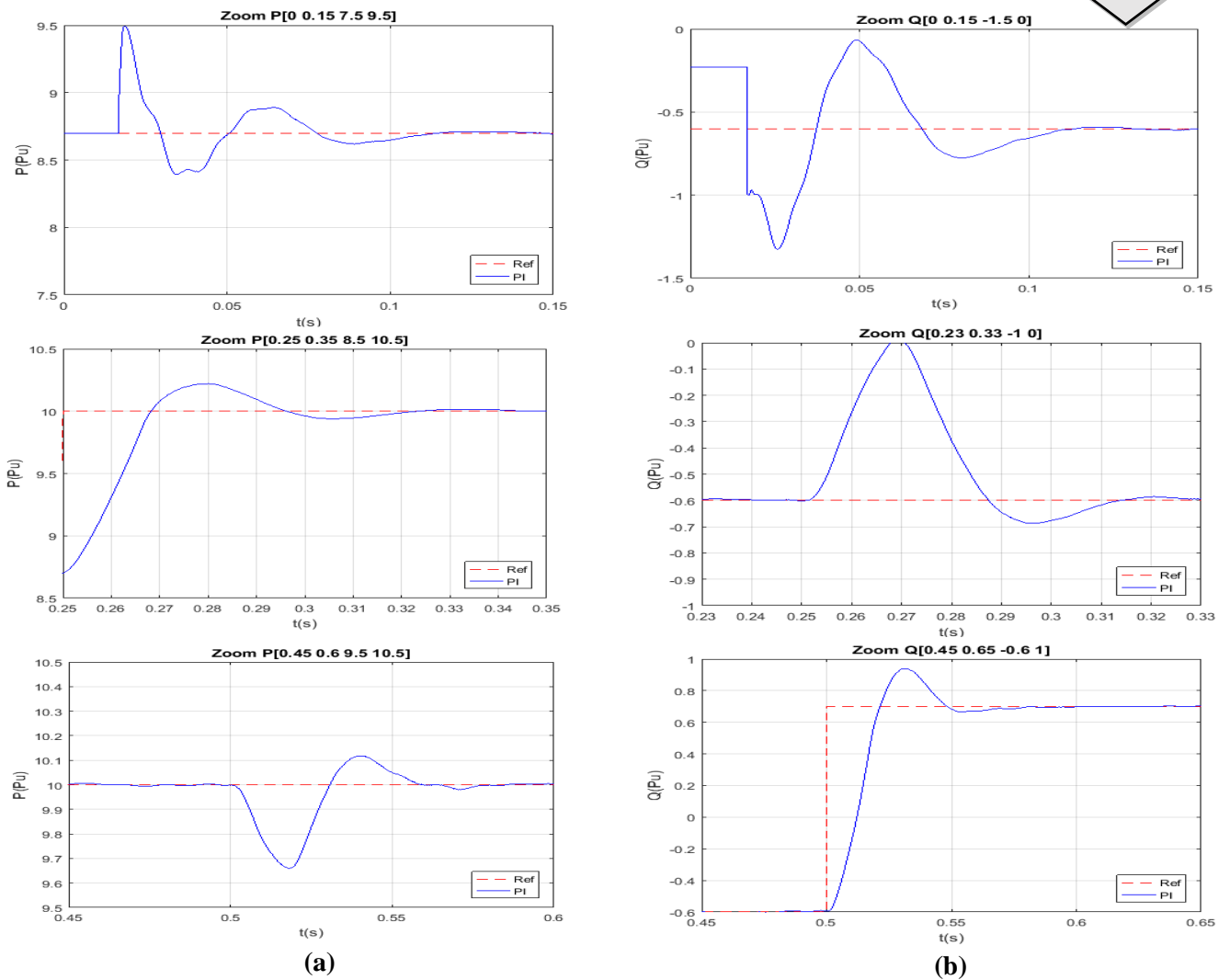
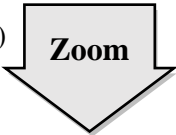


Figure III.7 : Figuration en zoom de variation de puissance active (a) (temps pris entre : 0– 0.15s, 0.25– 0.35s et 0.45– 0.6s), la puissance réactive (b) (temps pris entre : 0– 0.15s, 0.23– 0.33s et 0.45– 0.65s)

III.2.1.1.2. Cas 2 : Fonctionnement de l'UPFC en mode contrôle de tension

Le réseau électrique est exposé aux différentes perturbations telle que : l'augmentation de la charge, augmentation ou diminution de la tension,... L'UPFC est utilisé pour rendre l'équilibre de tension au réseau, ou compenser la puissance réactive. Dans le second cas de simulation, on va étudier le comportement dynamique de l'UPFC et son pouvoir de compensation via à vis des perturbations de tension. La performance de l'UPFC en mode contrôle de tension, est présentée dans un de plus récents travaux et certaines simulations sont présentées ici. Pour atteindre cet objectif, on suppose qu'un défaut se produit au niveau de la ligne au jeu de barre où le STATCOM est raccordé. Ce défaut est caractérisé par un changement transitoirement dont les allures de tension. Autrement dit, une variation de tension (chute de tension /surtension), provoquant le point de fonctionnement de la part shunt de l'UPFC pour passer du mode entièrement capacitif au mode entièrement inductif.

A cet effet, l'ensemble de la structure étudiée précédemment (Test 1, Figure III.1) est fortement simplifié [8]. La nouvelle structure est composée de deux sources de tension triphasée, reliées par deux tronçons des lignes, deux charges sont construites et connectées séquentiellement sur le nœud 2 en commutant les disjoncteurs 'CB1 et CB2' à différents moments, pour simuler des perturbations -10% en tension au point de raccordement. Le dispositif de compensation représenté par l'UPFC est connecté avec le système de transmission entre les deux nœuds B₂, et B₃ à $t = 0$ sec avec une seule charge dans le système sur le nœud 4.

La figure III.8 montre l'espace de travail sous Matlab/Simulink.

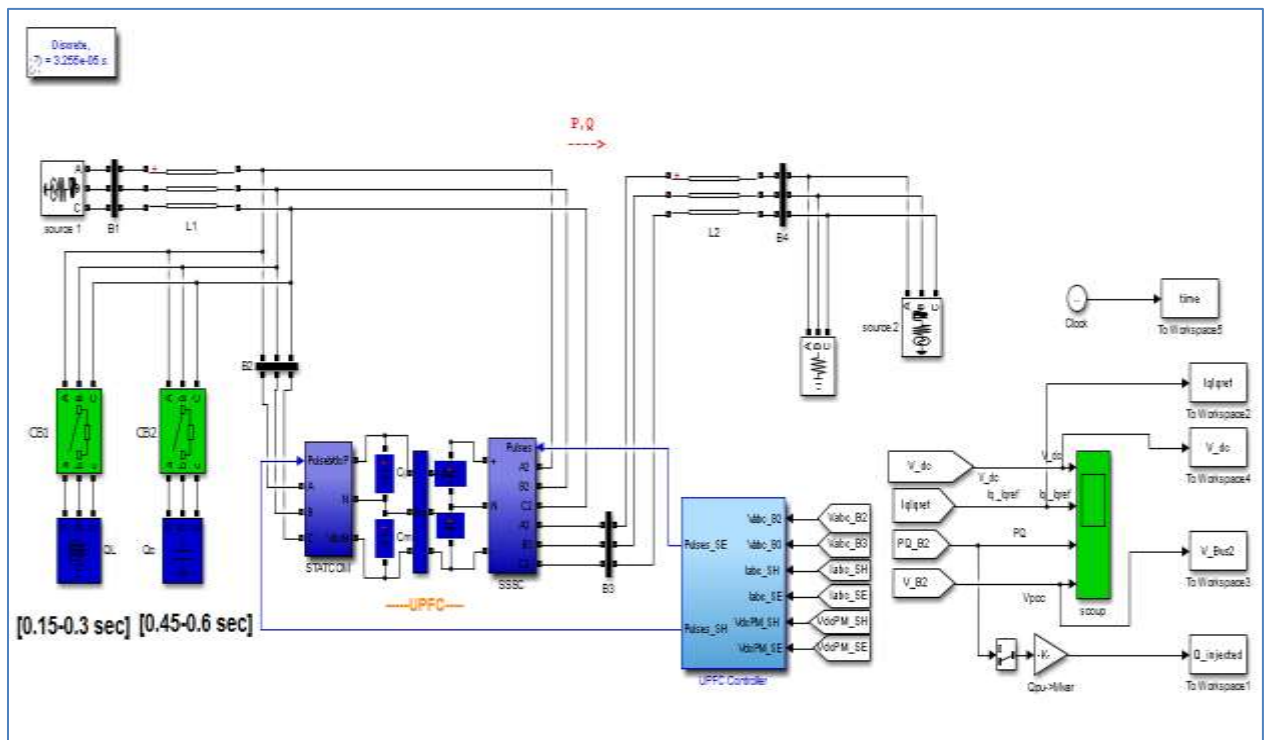


Figure III.8 : Blocs Simulink d'un UPFC relie au réseau (Test 1, Cas N°.2)

✓ **Essais de simulation :**

La simulation a été réalisée jusqu'à 0.8 sec, alors que les résultats sont obtenus pour les étapes suivantes :

- **Étape-1 :** D'abord, une charge inductive triphasée ($Q_L = 1\text{ pu}$) est injectée dans le nœud N°2 à $t = 0.15\text{ s}$ en commutant le disjoncteur "CB1",
- **Étape-2 :** à $t = 0,3\text{ sec}$, la charge inductive triphasée Q_L est retirée (CB1 ouvert),
- **Étape 3 :** à l'instant $t = 0,45\text{ s}$, la charge capacitive ($Q_C = 1\text{ pu}$) est injectée sur le nœud N°2 en commutant le disjoncteur CB2,
- **Étape 4 :** Enfin à $t = 0,6\text{ sec}$, la charge capacitive est retirée (CB2 ouvert).

Le comportement dynamique de l'UPFC en réponse au changement appliqué au réseau est présenté et discuté ci-dessous en détail. D'abord, la figure III.9, expose la forme de tension pour une seule phase au nœud B₂ sans UPFC. On a exposé la tension d'une seule phase pour visualiser la variation de tension de façon claire.

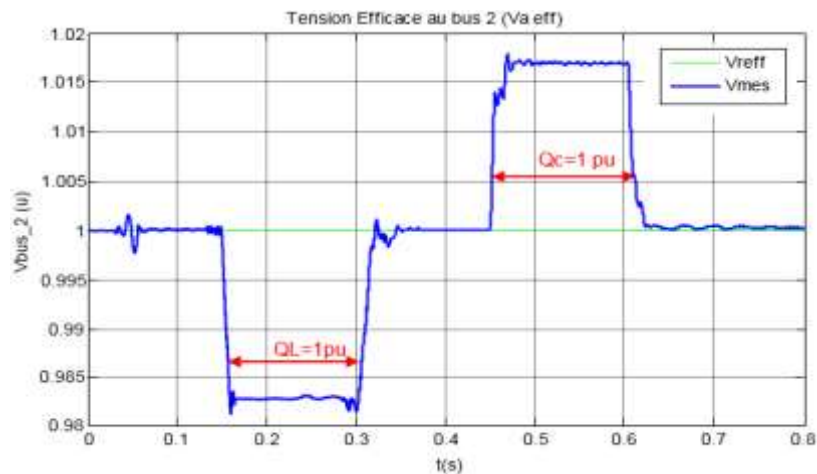


Figure III.9 : La forme d'onde RMS de tension au bus 2 sans l'UPFC (phase a)

A partir de la figure III.9, on observe pendant la période (0 s-0.15 s), (0.3 s-0.45 s) et (0.6 s-0.8 s) que le réseau fonctionne en régime permanent, aucune perturbation ne s'effectue sur la tension. Dans la même figure, on peut remarquer que la tension de réseau est provoquée par une baisse de tension de 1,7% (0,983 pu sans UPFC) détectée au jeu de barre 2 à un intervalle de $0,15 \leq t \leq 0,3\text{ sec}$. Dans ce cas, le système se trouve devant une chute de tension parvenue due à la connexion de la charge Q_L . À l'instant $t=0.45\text{ s}$, nous notons que la tension de réseau au nœud 2 est imposée une deuxième fois mais dans ce cas avec une surtension de 1,7% (1,017 pu sans UPFC) lorsque la charge inductive Q_C connectée, cette valeur est propagée jusqu'à l'instant $t = 0.6\text{ s}$ où la tension se stabilise à 1 pu due la déconnexion de la charge Q_C . En raison des variations d'amplitude de tension au nœud 2 de la figure III.9, le system de control utilisé imposent l'UPFC pour réagir rapidement au besoin de réseau. Ce dernier, calcule la puissance réactive requise à injecter pour satisfaire et corriger la tension de réseau au nœud B2

en demandant l'énergie nécessaire au convertisseur shunt. Cette action de compensation est nettement sur les figures III. 10 (a-d). Spécifiquement, les figures III.10.(a), (b) et (c), montrant les formes d'ondes de variation de la puissance active, réactive et le courant shunt injecté par la partie shunt de l'UPFC au cours des conditions de fonctionnement de tout le système, tous ces variations sont nécessaires pour répondre aux exigences de compensation et rétablir l'état de fonctionnement normal du system. Le dernier schéma (figure III.10.d) montre l'apport et l'action positive de l'UPFC pour cette particularité de tension.

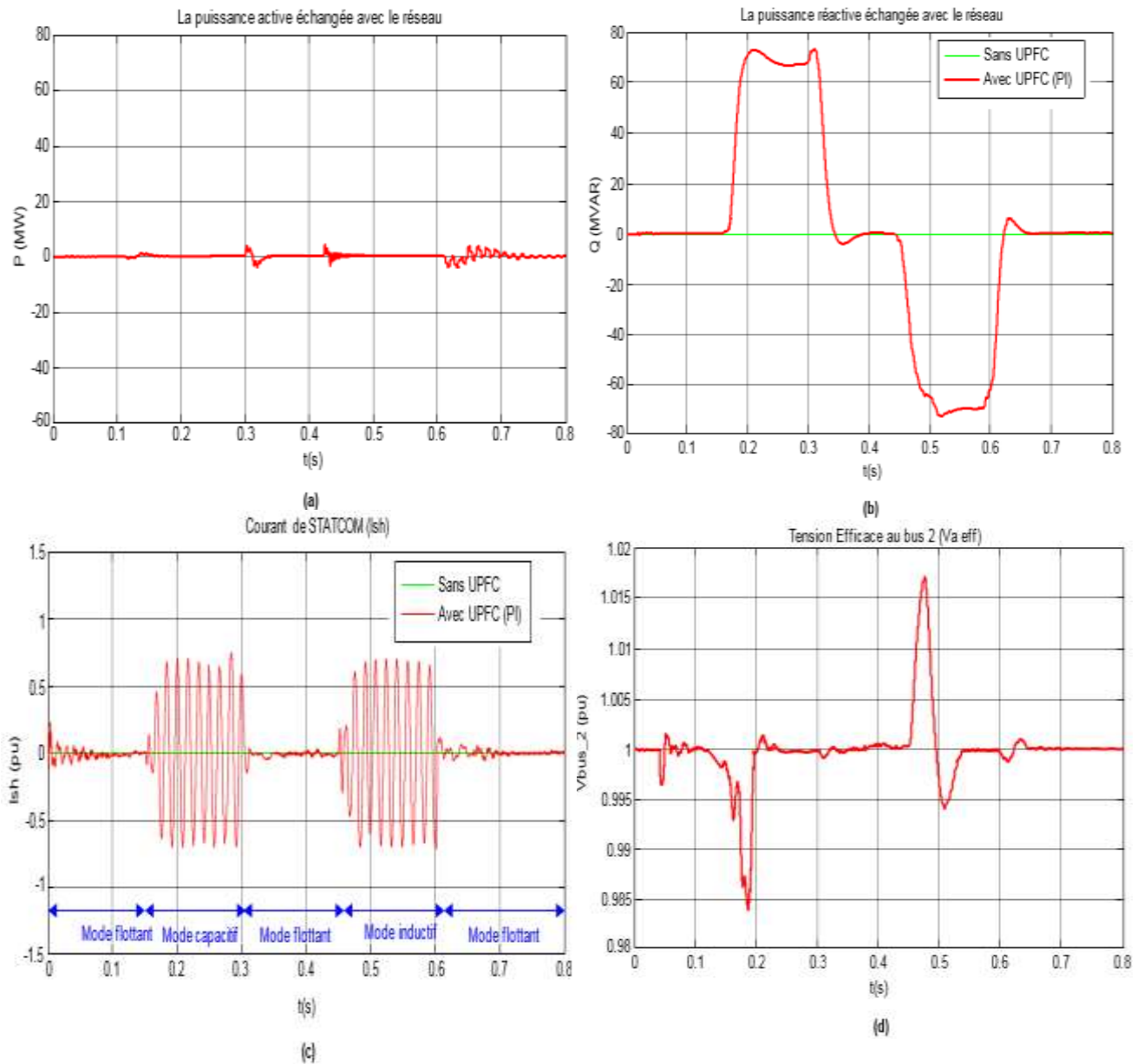


Figure III.10: Formes d'ondes de la puissance active (a), la puissance réactive (b), le courant I_{sh} (c) échangé avec le dispositif UPFC et le réseau aux différents cas de compensation (Capacitif, et inductif), et la forme RMS de tension au nœud B2 avec l'UPFC (d).

Selon la figure III.10, nous confirmons ce que nous avons dit plus tôt que, le réseau fonctionne en régime permanent pendant la période (0 s-0.15 s), (0.3 s-0.45 s) et (0.6 s-0.8 s), aucune puissance réactive et active n'a été échangée entre l'onduleur shunt de l'UPFC et le réseau (aucun changement dans le réseau).

Dans l'intervalle de temps (0.15 s-0.3 s), puisque le réseau est mené par une chute de tension due la connexion de la charge Q_L , l'onduleur shunt de l'UPFC (STATCOM) est intervenu par l'injection de la puissance réactive adéquate à celle perdue par le défaut, ce qui signifie que l'UPFC fonctionne en mode capacitif à l'intervalle $0,15 \text{ s} \leq t \leq 0,3 \text{ s}$ comme montré ci-dessous sur la figure III.11.

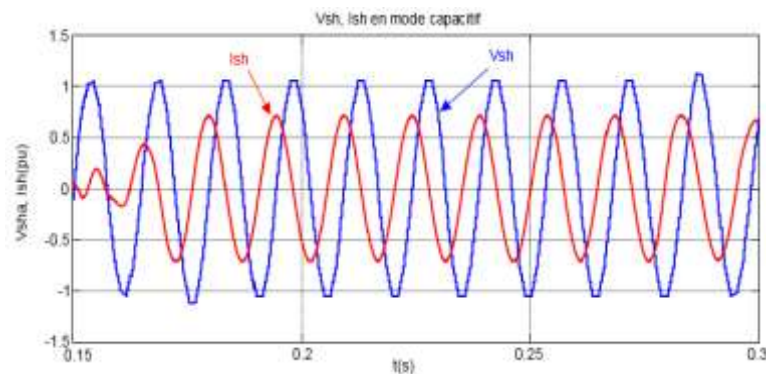


Figure III.11 : Courbes de tension (V_{sh}) et courant (I_{sh}) d'onduleur VSC en fonction de temps (temps pris entre : 0.15 – 0.3 sec).

Quand on revient à la figure III.10.b on constate que, la compensation de l'énergie réactive se répercute directement sur la tension au point de raccordement, la puissance réactive présente une variation ce qui donne par conséquent une variation soudaine du courant (I_{sh}) (voire figure III.9.c), la puissance injectée au point de branchement est de l'ordre $Q = +72 \text{ Mvar}$ (figure IV.10(b)). En remarquant aussi dans cette figure (III.10.a) que la puissance active (P) reste constante et porte quelques fluctuations aux instants de l'intervention de l'UPFC qui dépendent de la composition des éléments constituant ce système de compensation, ce qui signifie que la partie shunt de l'UPFC est chargée uniquement pour la compensation de la puissance réactive et non pas de la puissance active. Conformément à la figure III.10. (c), on observe à partir de cette figure que la tension de jeu de barre 2 où la partie shunt de l'UPFC (le STATCOM) relié est corrigée et augmentée à sa référence.

La compensation de la puissance réactive par le STATCOM afin d'améliorer les anomalies de la tension au point d'accouplement PCC du réseau s'effectue par l'injection du courant quadratique (I_q) (la composante I_q étant une image de la puissance réactive) par ce dispositif en parallèle dans le réseau électrique selon la nature de la perturbation agissant au

point de raccordement, la figure III.12 montre la variation de composante de courants dans le repère Park.

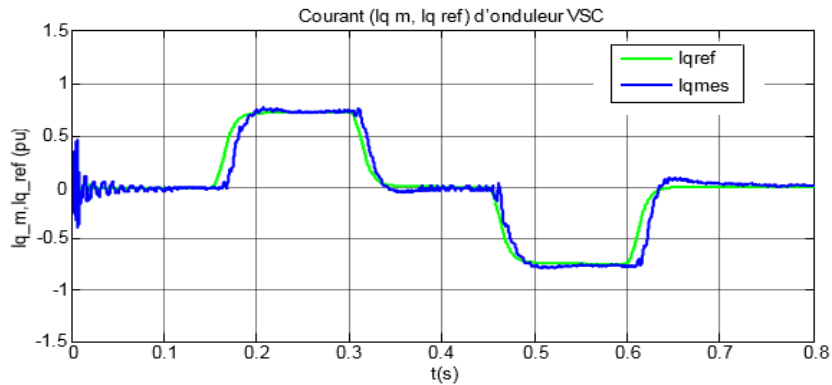


Figure III.12 : Courant (I_{qm} , I_{qref}) d'onduleur VSC en fonction de temps.

A l'instant : $t = 0,3$ s lorsque la charge inductive triphasée (Q_L) est retirée (disjoncteur CB1 ouvert), le point de fonctionnement de l'UPFC revient à zéro Mvar comme illustré sur la figure III.9.b. Cette étape signifie qu'il n'y a aucun échange entre le dispositif UPFC et le réseau.

Dans l'intervalle de temps (0.45 s-0.6 s), la charge Q_C est connectée en commutant le disjoncteur CB2, ce qui résulte une surtension de 1,7% (sans UPFC 1,017 pu) dans le réseau capté au jeu de barre B2 (voire Figure III.9) car la charge capacitive a un effet compensateur. À cet effet, et avec le système contrôle de tension du nœud B2, l'UPFC réagit en changeant son point de fonctionnement vers le mode inductif comme le montre la figure III.13 afin de réguler la tension du nœud à 1p.u (Figure.III.10 (d)), dans cette période ($0,45 \leq t \leq 0,6$), l'UPFC par son convertisseur shunt absorbe la puissance réactive ($Q = 71$ Mvar) du système comme le montre la figure III.10 (b), aucun changement à propos la puissance active entre le réseau et le système l'UPFC (Figure.III.10(a)). On a vu que le courant de shunt UPFC (I_{qsh}) est négatif à un intervalle de $0,45 \leq t \leq 0,6$ sec (Figure III.12).

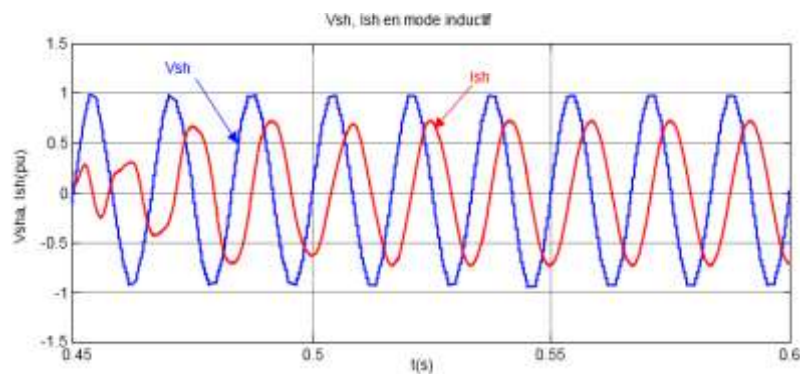


Figure III.13 : Courbes de tension (V_{sh}) et courant (I_{sh}) d'onduleur VSC en fonction de temps (temps pris entre : 0.45 – 0.6 s).

Finalement à $t = 0,6$ sec, la charge capacitive est retirée du nœud B2 (disjoncteur CB2 ouvert), pendant ce temps la tension du nœud B2 revient à sa valeur nominale à 1p.u (voire figure III.9, et figure III.10. (d)) et le point de fonctionnement de l'UPFC à Zéro Mvar (voire Figure III.10. (b)), cette étape signifie également qu'il n'y a pas d'échange entre le réseau et l'UPFC.

La figure III.14 présente la forme d'onde de la tension du circuit continu V_{dc} liée aux études des étapes précédentes (1, 2, 3 et 4), à partir de cette figure on peut remarquer que l'effet de la compensation se répercute directement sur la tension V_{dc} , on note des oscillations sur la courbe V_{dc} aux instants de l'intervention de l'UPFC qui y sont dus à la variation de tension.

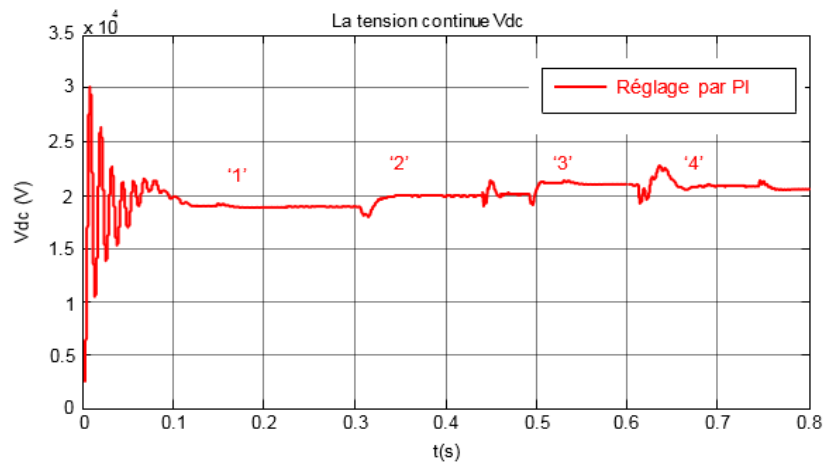


Figure III.14 : Tension (Vdc) en fonction de temps (s).

III.2.1.2. Test d'application 02

La figure III.15 montre, l'espace de travail concerné pour la simulation du deuxième test. Comme montré dans cette figure, l'UPFC est supposée relier deux sources (V_s , et V_r) (amont et aval). Le système de contrôle de l'onduleur shunt et l'onduleur série de l'UPFC sont présentés à l'annexe A exactement dans les deux figures : A.3, et A.4.

✓ Essais de simulation

Le même travail précédent sera réalisé pour le 2^{ème} test, l'analyse sera faite sous des conditions proche à celle de test précédent (Poursuite d'une référence de puissance, Réseau perturbé). En premier lieu, nous avons choisi les références des puissances transitées comme suit: $P_{réf}=500$ MW, $Q_{réf}=1000$ Mvar.

III.2.1.2.1. Cas 01 : Poursuite d'une référence de puissance

Pour tester la performance dynamique des régulateurs on a procédé à la variation des références des puissances active et réactive. Pour la puissance réactive à l'instant $t= 0.2$ s un changement de référence de 600 Mvar à 0 Mvar est appliqué. Puis à l'instant $t=0.3$ s un changement de référence de 500 MW à 1000 MW est appliqué.

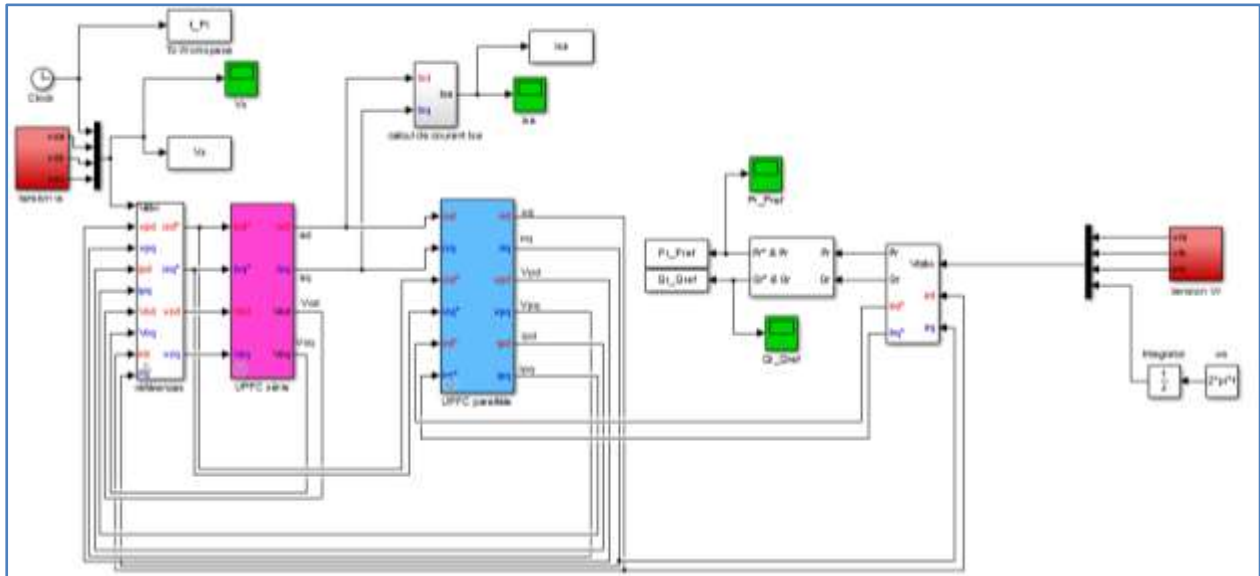


Figure III.15 : Blocs Simulink d'un UPFC relie au réseau (test 2)

La figure III.16, donne les résultats de simulation du régime de poursuite des puissances avec le réglage classique. Les résultats montrent que les puissances de ligne imposées suivent leurs consignes après une oscillation importante dans la phase transitoire avec PI. Cependant, l'apparition de petites oscillations dues à l'interaction entre la puissance active et réactive.

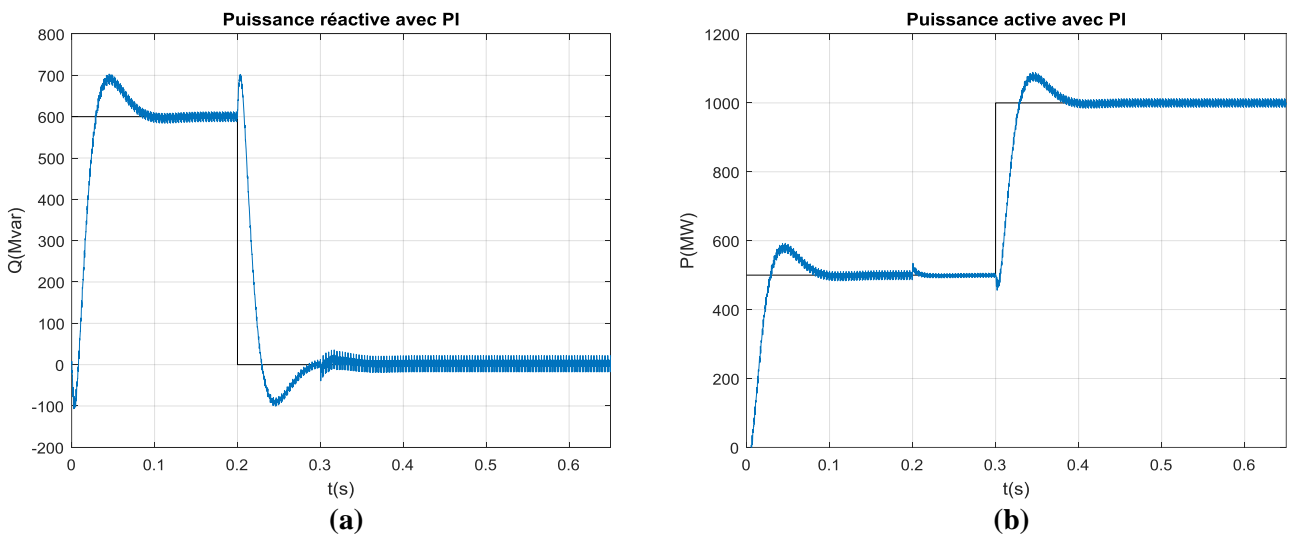


Figure III.16 : Variation de la puissance réactive (a), et active (b) avec PI

Les figures III.17 et III.18, représentent les réponses des deux convertisseurs de l'UPFC en respectant les variations appliquées au réseau. Au moment de variation de la puissance réactive à l'instant ($t = 0.2$ s) pour qu'elle devienne $Q_{ref} = 0$ MVAR, on remarque que le courant délivré par la partie shunt diminue (figure III.17), et le STATCOM absorbe la puissance réactive car l'appel de la puissance réactive du réseau en aval dans l'intervalle $[0.2$ s, 0.6 s] est nul. Contrairement à la période ($t = 0$ s à $t=0.2$ s), où le courant injecté par la partie shunt augmente ce qui implique l'augmentation de la puissance réactive injecté par le STATCOM pour compenser l'appel de réseau en aval. Au moment de l'augmentation de la puissance active demandée par le réseau en aval à l'instant ($t = 0.3$ s) le courant délivré par le STATCOM augmente, ces variations sont nécessaires pour rétablir l'état de fonctionnement précédent.

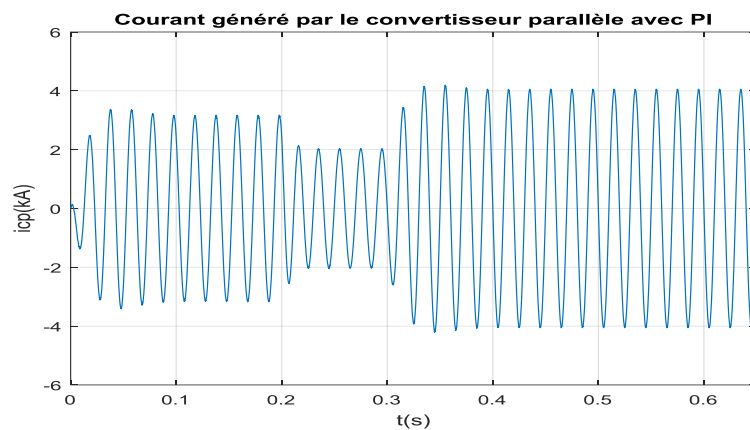


Figure III.17 : Courant générer par le convertisseur parallèle de l'UPFC

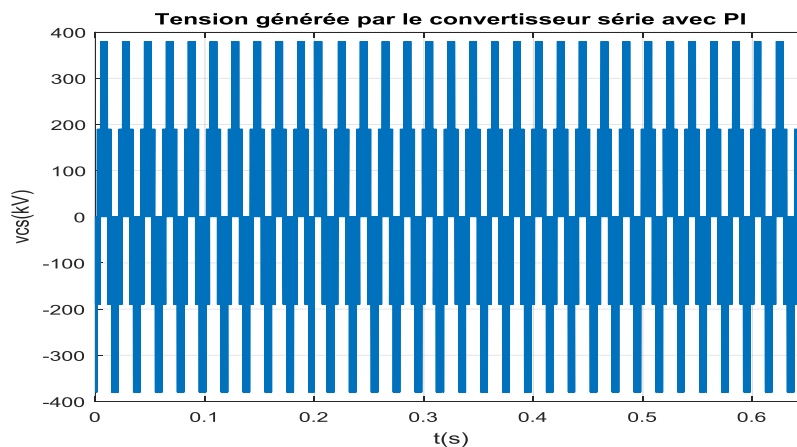


Figure III.18 : La tension injectée par le convertisseur série de l'UPFC

La forme du courant de ligne du réseau amont (i_s) et aval (i_r) est présentée sur la figure.III.19.a, et b, elle présente des variations aux instants sus mentionnés de la variation des puissances de références réactives (à $t=0.2$ sec), et actives (à $t=0.3$ sec), ces variations sont nécessaires pour rétablir l'état de fonctionnement précédent.

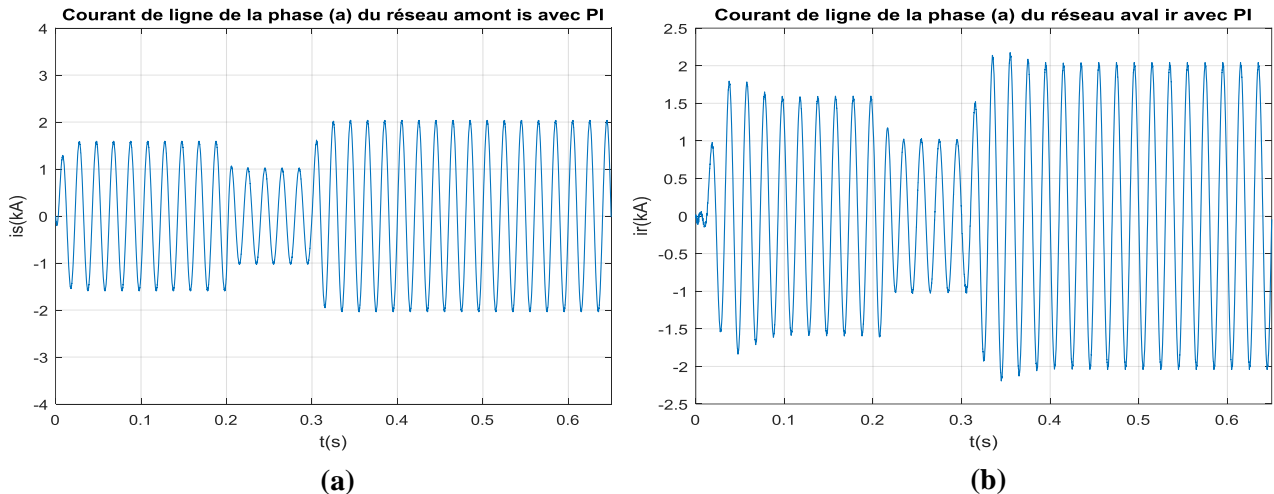


Figure III.19 : Formes d'ondes de courant coté amont (a), et au côté aval (b) du réseau

III.2.1.2.2. Cas 02 : Réseau perturbé

Dans cette partie de test, on suppose un réseau perturbé et on va analyser le comportement de l'UPFC comme un FACTS pour garder la qualité d'énergie. De ce fait, on distingue deux cas de fonctionnement :

- ✓ Cas A : Creux de tension,
- ✓ Cas B : Surtension.

On va simuler le comportement de notre système pour chaque test dans différentes situations (creux de tension, et surtension), et observer l'effet du réglage dans chaque cas. Aussi, pour tous les cas indiqués au-dessus, nous allons garder les changements précédemment de consigne de puissances actives et réactives (l'état du système initial) dans les mêmes intervalles de temps.

✓ Cas A : Creux de tension

On examine cette situation en considérant qu'un creux de tension survienne sur le réseau en amont à l'instant $t=0.4-0.5$ s avec une profondeur de 40% par rapport à la tension nominale de 220 kV comme indique la figure suivante III.20, ce type de défaut peut être engendré lors du branchement d'une charge lourde du système d'alimentation.

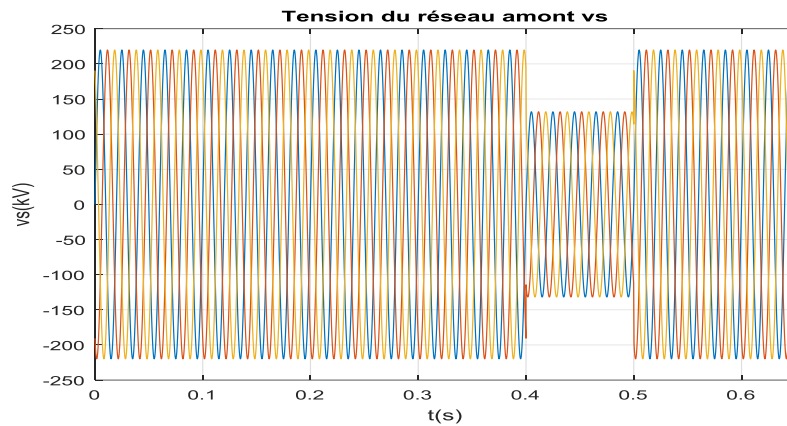


Figure III.20 : Tension du réseau amont V_s (cas de creux de tension)

L'apport de l'UPFC pour ce phénomène de tension (Creux de tension) est clairement visible dans les figures suivantes 'Fig.III.21, jusqu'au Fig.III.23'. Dans le même contexte, on visualise les mêmes signaux précédents (les puissances transitées en présence de défaut).

Le comportement de l'UPFC dans le contrôle du système est clairement visible dans les figures suivantes (Figs: 21, 22 et 23). Aux instants de variation de consignes 0.2- 0.3 s et 0.4- 0.5 s (temps de creux de tension), l'UPFC agit sur le système par ces convertisseurs. La figure III.21 montre, la tension (V_s) injectée par l'UPFC exactement par sa partie série SSSC.

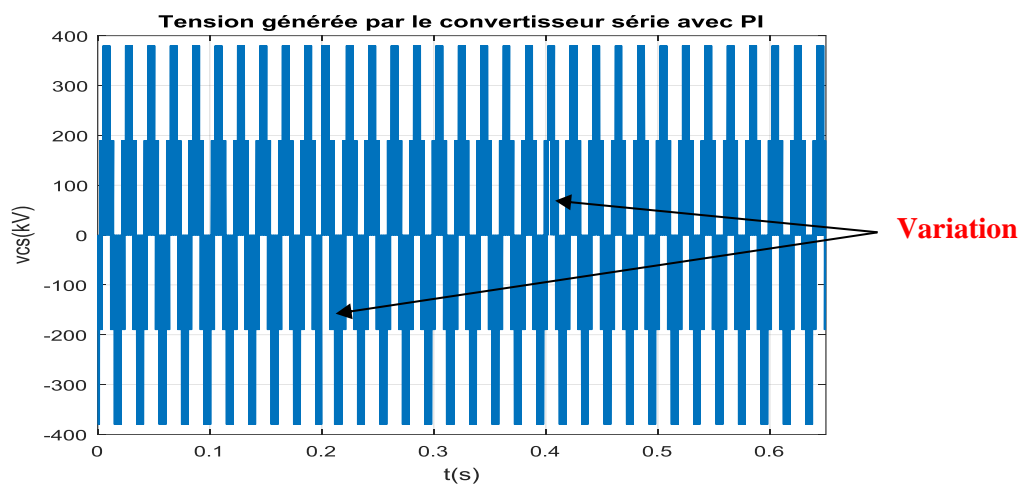


Figure III.21 : Tension injectée par le SSSC

La forme du courant de ligne du réseau amont (i_s) et aval (i_r) est présentée sur la figure III.22.a, et b, qui montre des variations des puissances de références réactive (à $t=0.2$ sec), et active (à $t=0.3$ sec) et aussi aux instants du creux de tension du réseau amont (entre $t=0.4$ sec et $t=0.5$ sec), ceci pour compenser le creux de tension triphasé et conserver la puissance. Selon la figure III.22, l'action de la commande du convertisseur série/shunt de l'UPFC est bien adaptée parce que le courant de ligne (i_r) reste constant malgré le creux de tension enregistré au niveau

de la tension du réseau amont à l'instant $t = 0.4-0.5$ sec ceci est dû à l'action de l'UPFC qui garde la qualité de l'énergie de réseau.

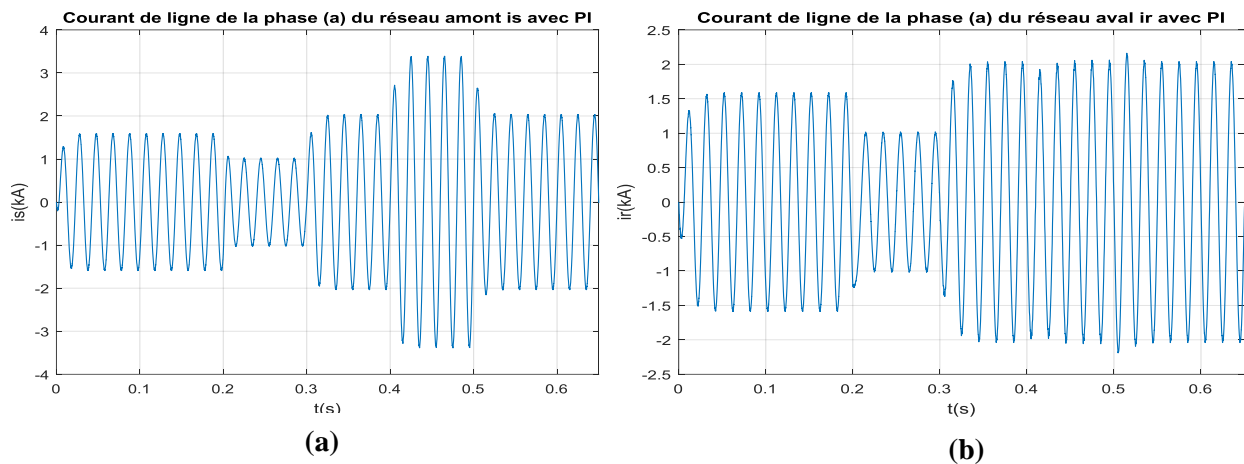


Figure III.22 : Formes d'ondes de courant coté amont (a), et au côté aval (b) du réseau (cas de creux de tension).

Le courant généré par le convertisseur parallèle qui est présenté sur la figure III.23 reproduit fidèlement les variations que ce soit au niveau des puissances de références ou bien au niveau du réseau amont où il est le siège d'une surtension triphasée entre 0.4 s et 0.5s.

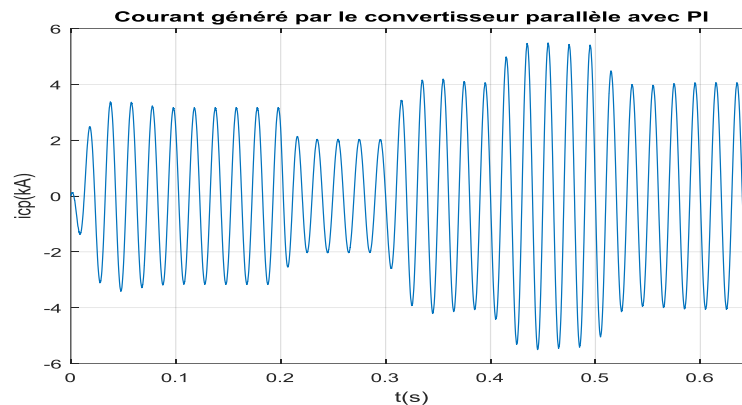


Figure III.23 : Formes d'ondes de courant injecté par le STATCOM

Parce que nous gardons les variations au niveau des consignes des puissances (l'état de fonctionnement précédent), au moment de variation de la puissance réactive à l'instant ($t = 0.2$ s) pour qu'elle devienne $Q_{ref} = 0$ MVAR, on remarque que le courant délivré par la partie shunt diminue (figure III.23). Contrairement à la période ($t = 0$ s à $t = 0.2$ s), où le courant injecté par la partie shunt augmente ce qui implique l'augmentation de la puissance réactive injecté par le STATCOM pour compenser l'appel de réseau en aval. Au moment de l'augmentation de la puissance active demandée par le réseau en aval à l'instant ($t = 0.3$ s), le courant délivré par le STATCOM augment. Selon la figure III.23, l'appel de courant est nettement remarquable entre 0.3s et 0.4s, ceci pour compenser l'appel de puissance active de réseau en aval. Finalement à la période ($t = 0.4$ s à $t = 0.5$ s) où le creux de tension appliquée, le réseau demande de la puissance

de la partie STATCOM pour la compenser, ce qui se traduit par une grande augmentation de courant shunt (figure III.23), ceci est dû à l'action du régulateur pour compenser et ramener la tension de réseau à sa valeur nominale en injectant du réactif au point de raccordement, tous ces variations sont nécessaires pour rétablir l'état de fonctionnement précédent.

La figure III.24, illustre l'effet de la variation de tension (creux de tension) sur les puissances générées.

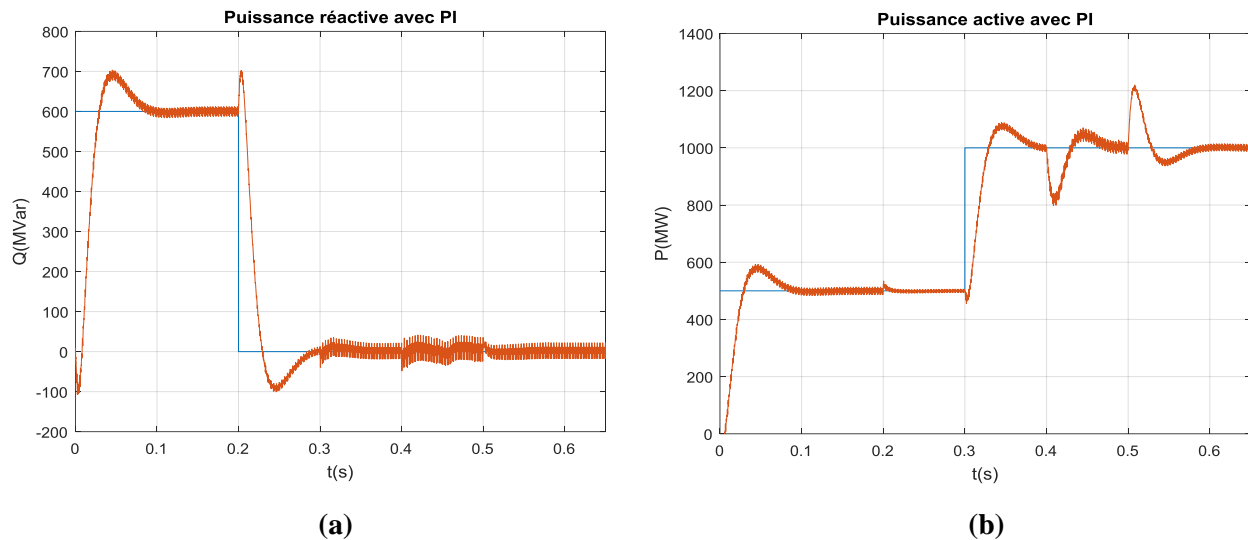


Figure III.24: Variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI (cas de creux de tension)

Les résultats présentés dans la figure III.24, montre clairement l'action efficace de l'UPFC en maintenant le principe de la conservation de la puissance qui est un principe fondamental de l'électrotechnique, ceci en maintenant la puissance constante selon les références malgré les variations enregistrées au niveau du réseau amont à savoir le creux de tension triphasé apparu entre 0.4 s et 0.5 s. En tant qu'analyse de système de contrôle utilisé selon la Fig.III.24, l'action de la commande conventionnelle de l'UPFC génère des puissances actives et réactives qui suivent les puissances de références du réseau aval mais avec un dépassement important dans les signaux de réponse avec un temps de réponse considérable aux instants de variation des puissances réactives à $t=0.2$ s et actives à $t=0.3$ s. Dans les mêmes présentations, on remarque aussi l'apparition de deux pics de puissance active d'amplitude considérable aux deux instants $t_1=0.4$ s et $t_2=0.5$ s. Ces pics sont dus à la variation brusque de la tension en amont. Cependant, la puissance réactive n'est pas très affectée car la demande en réactif est nulle, on remarque de légères fluctuations sur la puissance réactive, causés par l'interaction entre les deux puissances.

✓ Cas B : Surtension

Dans ce cas, on suppose qu'une surtension survienne sur le réseau à l'instant $t=0.4-0.5$ s avec une profondeur de 20% par rapport à la tension nominale de 220 kV. Ce type de défaut peut se créer au moment du démarrage des groupes électrogènes, ou lors du débranchement d'une charge lourde du réseau, il est caractérisé par un changement transitoirement dans les allures de tension.

La figure III.25, indique la forme de tension sur les trois phases au niveau de la tension de la source V_s , on a élargi l'échelle de la tension (axe y) jusqu'à la valeur 300 kV pour visualiser l'élévation de tension d'une façon claire.

L'apport de l'UPFC pour ce phénomène de tension est illustré sur les figures 'Fig.III.26, et Fig.III.27'. Dans le même contexte, on visualise les mêmes signaux précédents (les puissances transitées en présence de défaut).

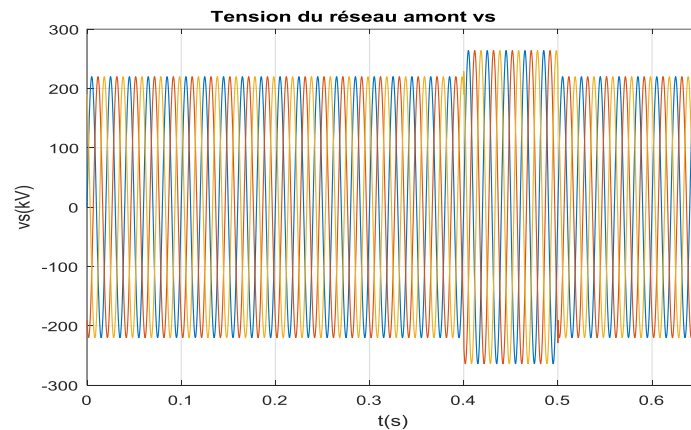


Figure III.25 : La tension V_s du réseau amont (cas de surtension)

La forme du courant de ligne du réseau amont est présentée sur la figure III.26.a. Il présente des variations aux instants sus mentionnés de la variation des puissances de références réactive (à $t=0.2$ sec), et active (à $t=0.3$ sec) et aussi aux instants de la surtension triphasé au niveau de la tension du réseau amont (entre $t=0.4$ sec et $t=0.5$ sec), malgré la surtension triphasé enregistré au niveau de la tension du réseau amont, mais toujours le courant de ligne (i_r) reste constant ceci est dû à l'action de l'UPFC qui garde la qualité de l'énergie de réseau.

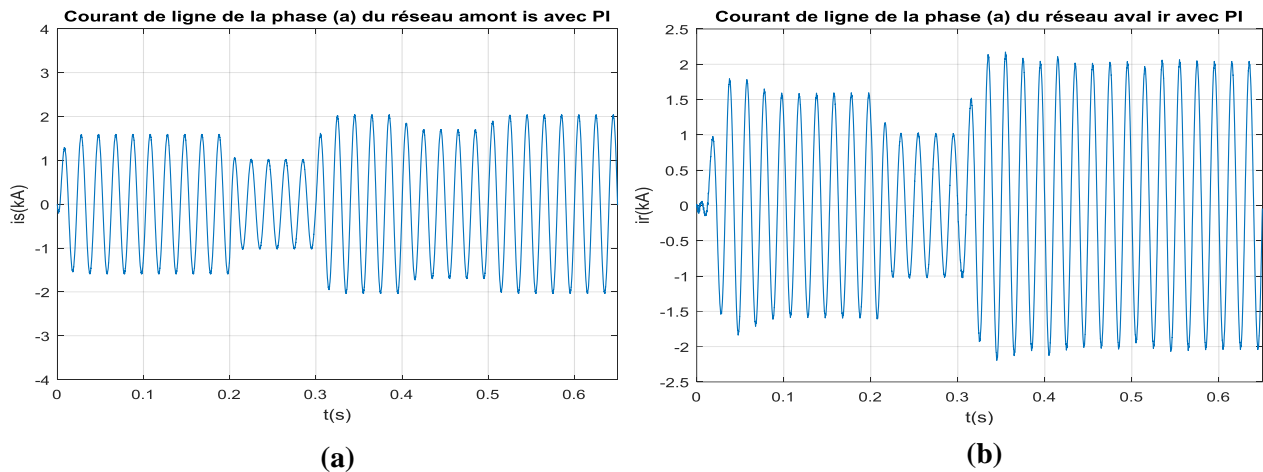


Figure III.26 : Formes d'ondes de courant coté amont (a), et au côté aval (b) du réseau (cas de surtension).

Le courant généré par le convertisseur parallèle qui est présenté sur la figure III.27 reproduit fidèlement les variations que ce soit au niveau des puissances de références ou bien au niveau du réseau amont où il est le siège d'une surtension triphasée entre 0.4 s et 0.5 s.

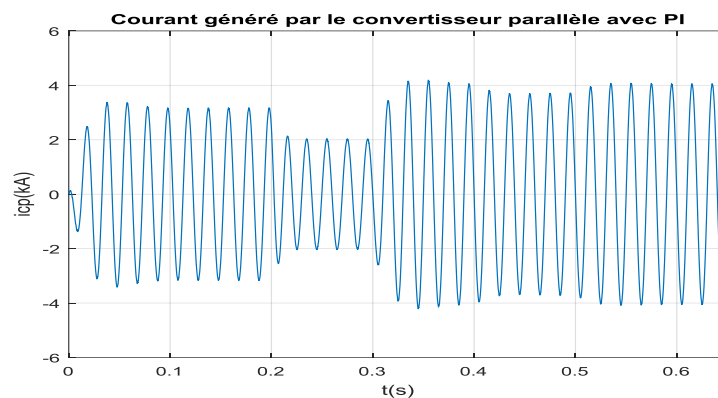


Figure III.27 : courant généré par le convertisseur parallèle

Au moment de variation de la puissance réactive à l'instant ($t = 0.2$ s) pour qu'elle devienne $Q_{ref}=0\text{MVAR}$, on remarque que le courant délivré par la partie shunt diminue (figure III.27). Contrairement à la période ($t = 0$ s à $t=0.2$ s), où le courant injecté par la partie shunt augmente ce qui implique l'augmentation de la puissance réactive injecté par le STATCOM pour compenser l'appel de réseau en aval. Au moment de l'augmentation de la puissance active demandée par le réseau en aval à l'instant ($t = 0.3$ s), le courant délivré par le STATCOM augment. Selon la figure III.27, l'appel de courant est nettement remarquable entre 0.3 s et 0.4 s, ceci pour compenser l'appel de puissance active de réseau en aval. Finalement à la période ($t = 0.4$ s à $t=0.5$ s), où la surtension appliquer on remarque que le courant délivré par la partie shunt est encore diminué pour garder la tension dans la limite admissible, tous ces variations sont nécessaires pour rétablir l'état de fonctionnement précédent.

La figure III.28, illustre l'effet de la variation de tension (surtension) sur les puissances transitées, les mêmes remarques que le cas précédemment (cas de creux de tension), l'UPFC maintient les puissances constantes selon les références malgré les variations enregistrées au niveau du réseau amont à savoir la surtension triphasée apparu entre 0.4 s et 0.5 s.

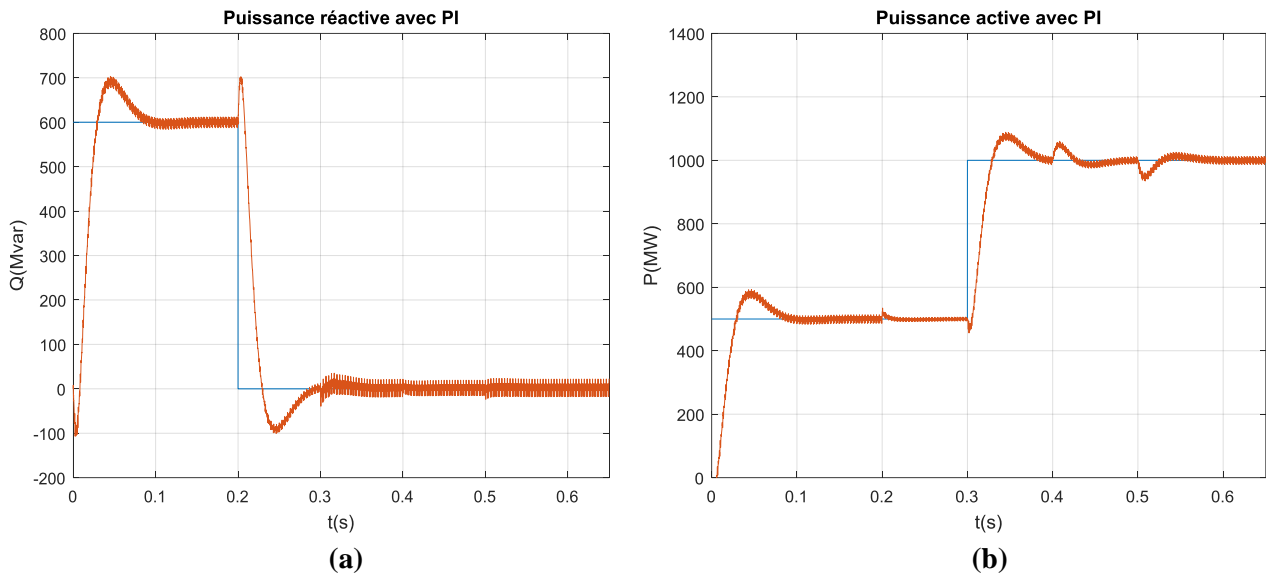


Figure III.28 : Variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI (cas de surtension)

En résumé, à partir des résultats de simulation dans les deux tests d'applications 1 et 2, nous pouvons maintenant être sûr que : l'UPFC peut contrôler efficacement le flux de la puissance active et réactive transmise, la puissance active et réactive suit les changements dans les signaux de référence que ce soit instantanée ou indépendante. En plus de ce qui est déjà mentionné, l'UPFC a aussi prouvé son efficacité avec son convertisseur shunt de faire la compensation requise, il a répondu à toute modification qui se manifeste dans la tension de réseau.

III.2.2. Scénario 2 : l'apport de l'UPFC pour l'amélioration de flux de puissance dans un réseau multi machine

Du fait que l'UPFC est un contrôleur multi-variable, il devient nécessaire d'évaluer son impact pour résoudre d'autres problèmes liés aux réseaux électriques telle que : l'amélioration des flux de puissances à leurs valeurs désirées, la capacité de transfert de puissance (PTC), réduire les pertes de puissance et minimiser la déviation de tension [84]. Une partie non négligeable de la littérature consacrée aux FACTS, en général, et à l'UPFC, en particulier, traite l'écoulement de puissance (Load-Flow) en présence de l'UPFC en régime statique, avec différentes techniques d'insertion. On trouve aussi quelques travaux relatifs à la commande du flux de puissance dans un réseau maillé en présence d'un ou de plusieurs dispositifs FACTS tel que : SVC [85], [86], STATCOM [87], TCSC [88-90] et UPFC [91-93]. Il est important de citer

que la majorité de ces travaux, utilisent des méthodes de calcul des références de puissance (flux de puissance désiré) que l'UPFC doit imposer pour améliorer le fonctionnement du réseau. Il faut noter aussi que ces travaux s'intéressent à l'aspect optimisation du nombre d'UPFC à installer ainsi qu'à leurs emplacements optimaux [94]. Sans doute, l'analyse statique du réseau électrique a apporté des contributions importantes et constitue l'outil de base pour l'analyse de comportement du réseau, et cette étape est très importante dans l'exploitation et la planification, il permet également à l'ingénieur de la planification de simuler différents scénarios qui peuvent survenir pour une demande prévue [9], [84]. Malgré tous ces avantages, l'analyse du fonctionnement des réseaux électriques en régime dynamique est toujours nécessaire vu la vitesse relativement élevée des phénomènes électriques. Il est nécessaire de vérifier le comportement des FACTS avec le réseau via une analyse dynamique. L'analyse dynamique des réseaux constitue le fondement de base pour la réalisation car il fournit des informations précieuses et plus proches de la réalité, et cela permet essentiellement de faire un dimensionnement adéquat et une commande performante d'un tel FACTS afin d'en tirer tout le profit possible [55], [95].

Pour atteindre cet objectif, nous avons décidé d'utiliser un réseau Multi-machines comme le réseau 14 nœuds en tant que réseau de test. Nous allons procéder dans un premier temps à la simulation du réseau actuel non compensé. Ensuite la performance du réseau test sans UPFC sera comparée à celles doté d'un UPFC afin de mettre en exergue l'apport de ce dernier sur le transit de puissance. Le système test (IEEE_14 nœuds) est modélisé et développé dans l'espace Matlab/Simulink en utilisant les composants dynamiques disponibles dans sa bibliothèque.

III.2.2.1. Topologie du réseau multi-machines simulé

Le réseau choisi dans cette partie de travail est le système IEEE_14 nœuds, ce réseau contient : 20 lignes et 5 alternateurs (2 générateurs et 3 synchrones Motors compensateur), 11 blocs de charge *RLC* triphasés connectés aux nœuds : B2, B3 B4, B5, B6, B9, B10, B11, B12, B13 et B14. Les informations détaillées concernant ce réseau (les paramètres des nœuds, et les paramètres des lignes) sont mentionnés dans [96], et l'implémentation finale de ce réseau sous le simulateur Simulink est illustré dans la figure III.29. Comme montré dans cette figure, les blocs de lignes de transmission mettent en œuvre un modèle de ligne de transmission triphasée équilibrée avec des paramètres regroupés dans une section PI. Les paramètres de ligne *R*, *L* et *C* sont spécifiés comme paramètres de séquence positive et homopolaire qui prennent en compte les couplages inductif et capacitif entre les trois conducteurs de phase, ainsi que les paramètres de masse. Aussi comme illustré la figure III.29 entre chaque deux nœuds il y'a deux types de bus de mesure l'un pour la mesure dans le nœud (V_{buses}), et l'autre utilisé pour la collection des mesures (P_{Ligne} , et Q_{Ligne}) entre deux nœuds liant une ligne.

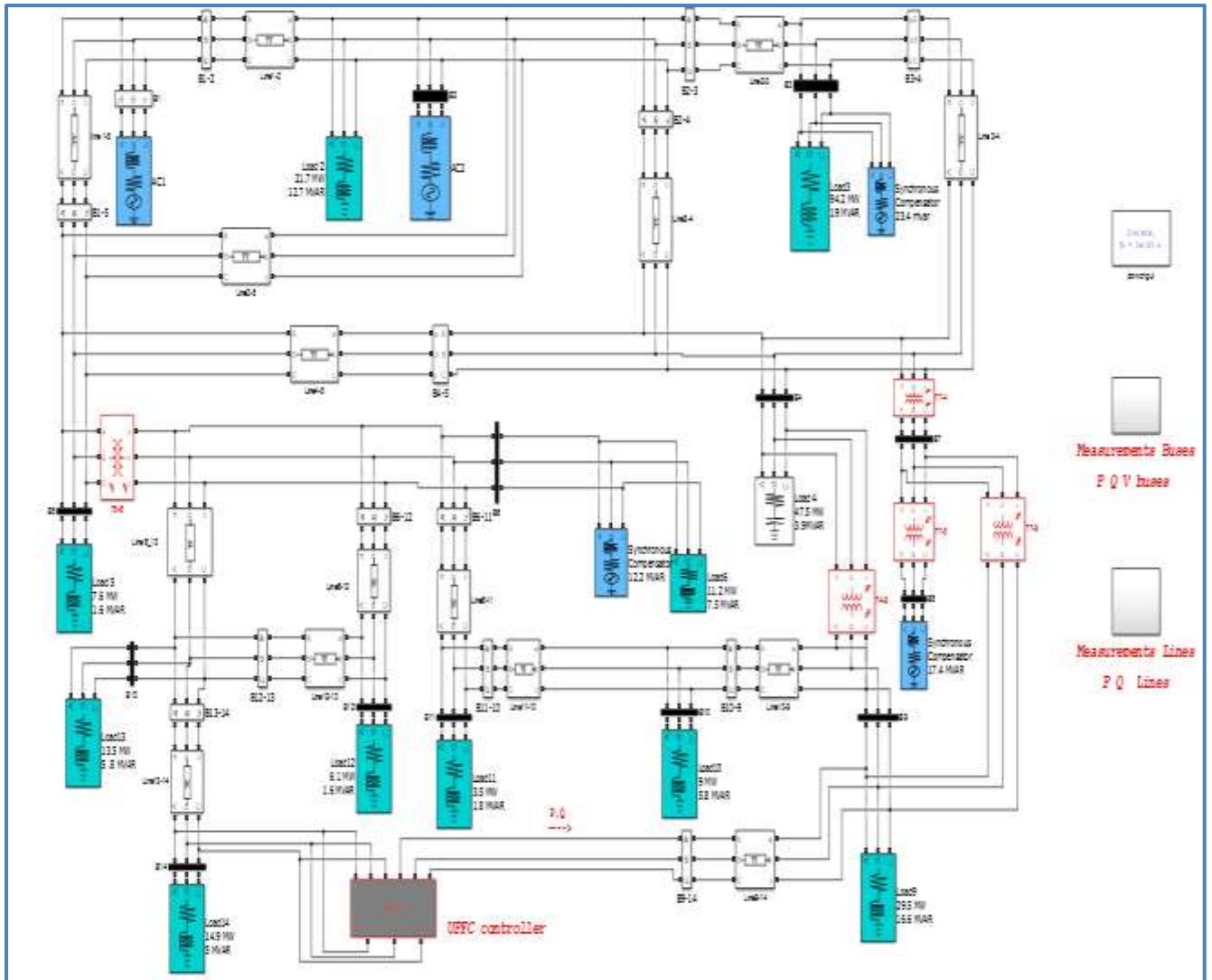


Figure III.29 : Blocs Simulink d'un UPFC relie au réseau IEEE_14 nœuds (test 3, avec UPFC)

III.2.2.2. Modèle UPFC développé (circuit de puissance)

La configuration finale de l'UPFC développée dans cette thèse est présentée ci-dessous sur la figure III.30. Selon la figure III.30 ce dispositif est composé de deux convertisseurs source de tension synchrone à semi-conducteurs (shunt et série) couplés par une liaison CC commune. Dans cette recherche et pour améliorer la structure de l'UPFC, l'UPFC proposée est développée en plaçant deux filtres alternatifs passe-bas type LC à la sortie de chaque convertisseur pour empêcher le flux de courants harmoniques produits par la commutation. Le filtre LC est conçu pour les VSC haute puissance avec une fréquence de commutation minimale de 10 kHz [97], [98]. Une inductance L est connectée en parallèle avec le condensateur C pour réduire l'ondulation de la tension continue.

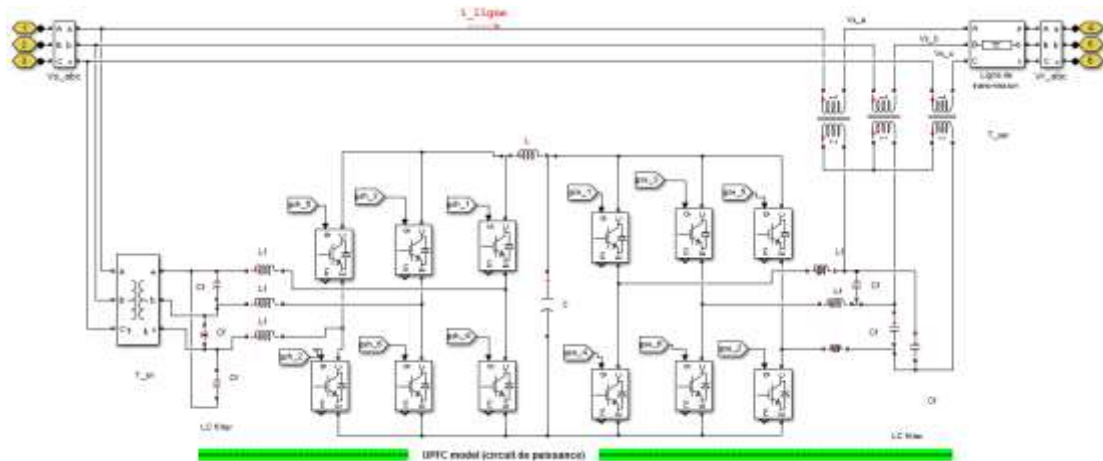


Figure III.30 : Modèle dynamique de l'UPFC

En raison du nombre limité de pages de ce chapitre, la discussion sur la conception des convertisseurs de l'UPFC sera reportée dans la partie annexe, la fonction et la stratégie de contrôle pour les deux convertisseurs seront également expliquées en détail dans l'annexe A (Voire annexe A, section A.3.3).

III.2.2.3. Méthodologie de recherche et essais de simulation

Premièrement il faut noter que le modèle ici sera simulé en temps discret, ce choix est lié au fait que les simulations en temps continu devenaient trop lourdes au fur et à mesure que le modèle du système devenait plus complexe. D'autre part, comme on utilise des convertisseurs et qu'il y a des éléments qui commutent, il faut utiliser un pas de simulation discret. L'organigramme ci-dessous dans la figure III.31, résume toutes les étapes de la simulation dans cette section. Le graphique de la figure III.31 contient deux essais de simulations organisés comme suit :

Test I : Dans cette partie du test, nous allons procéder à la simulation de notre réseau sans l'intervention de l'UPFC (réseau non compensé), c'est-à-dire le cas de base, où aucune compensation n'est appliquée au système. Il faut noter que cette procédure est nécessaire avant de faire la compensation, c'est une étape de planification. A travers ce test, nous aurons une idée sur l'emplacement de compensateur UPFC avec le réseau, ainsi que les paramètres de ce dernier deviennent clairs tel que : P_{ref} , Q_{ref} et V_{sref} .

Test II : Dans le deuxième jeu de simulation, nous allons simuler l'état du réseau avec insertion de l'UPFC (situation d'évaluation avec l'UPFC). Ici, les réponses du différents paramètres système sont simulées lors de l'UPFC a été mis en œuvre sur la ligne la plus faible pour clarifier l'influence de celui-ci sur le flux de puissance, les tensions des nœuds et les pertes des puissances dans les lignes préalablement établies (avant insertion de l'UPFC), à la fin de ce test une étude comparative sera faite entre les résultats issus des deux simulations afin de mettre en

exergue l'apport de l'UPFC à l'amélioration du transit de puissance sur le réseau électrique, cette comparaison a été faite en termes de performance et de capacité.

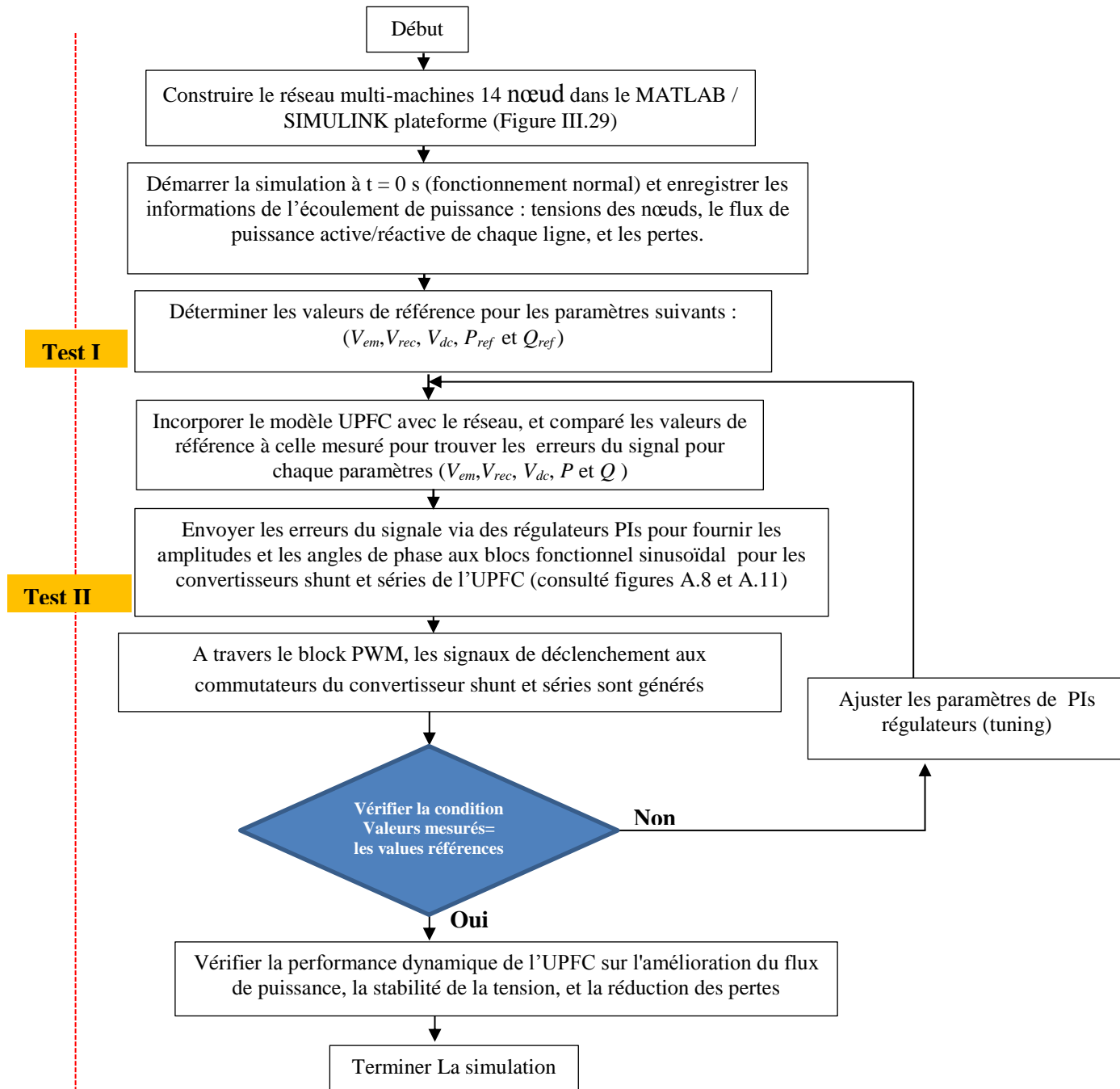


Figure III.31 : Méthodologie de la recherche

III.2.2.4. Résultats de simulation et discussions

a. Cas de Test I : Analyse dynamique de système test avant l'installation de l'UPFC

Les blocs de mesure sur MATLAB sont utilisés pour faciliter les mesures des paramètres du système. Ces résultats reflètent l'image des tensions (V) aux différents nœuds, le flux des puissances transmises (P , et Q) et les pertes de puissance aux différentes lignes. Le system bloc qui fait l'opération de calcul sous Matlab/Simulink est donné en annexe B (Figure. B.1, jusqu'à la figure B.4). A travers ces systèmes de mesure, l'écoulement de puissance, la tension aux différents nœuds a été effectuée instantanément. Le profil de tension dans les différents nœuds de réseau test peut être obtenu en utilisant des blocs de mesures sur chaque nœud. De la même manière, les pertes de puissance sont mesurées en prenant la différence entre les puissances mesurées aux extrémités de chaque nœud reliant deux nœuds.

Les résultats de l'analyse d'écoulement de puissance sans compensation sont montrés dans l'Annexe B (Tableaux : B.1, B.2 et B.3, 'cas sans UPFC'), et la représentation graphique de ces paramètres est montrée dans les figures a, b, et c de la figure III.32.

❖ Interprétation des résultats

Après avoir analysé les résultats décrits ci-dessus qui sont obtenus dans le réseau test sans tenir compte des contrôleurs FACTS, nous pouvons conclure que ce réseau souffre de trois problèmes :

La première remarque, c'est le faible transit de puissance en particulier dans les lignes: 9-14 (6,51 MW), ligne 9-10 (4,48 MW), ligne 10-11 (4,57 MW), ligne 12-13 (2,13 MW), et la ligne 13-14 (5,89 MW), tandis que les lignes près du nœud de production (PV) ont le plus haut débit de puissance active, par exemple les lignes: 1-2, 1-5, 2-3 et 2-4 possèdent le flux de puissance active le plus élevé dans le réseau IEEE-14 nœuds (voire figure III.31.a).

Deuxièmement, les pertes des puissances actives et réactives ont respectivement représenté environ 11,767 MW et 44,531 Mvar lorsqu'aucun dispositif FACTS n'a été installé, (le Tableau B.3 dans l'annexe donne les pertes mesurées dans chaque ligne). Graphiquement, d'après la figure III.32, il faut noter que les pertes de puissance active dans les lignes : 1-2, 1-5, 2-3 et 2-4 dépassent le 1 MW comme indiqué sur la figure III.32. (b). En réfèrent à la figure de flux de puissance (Figure III.32.(a)) on remarque que les lignes: 1-2, 1-5, 2-3 et 2-4 possèdent le flux de puissance active le plus élevé dans le réseau IEEE-14 nœuds, ce qui représentent les pertes des puissances actives les plus élevées du réseau (dépassent le 1 MW).

Troisièmement, le même réseau souffre également d'un mauvais support de tension à certains nœuds. La figure III.32. (c), illustre le profil total de la tension mesurée à la fin de simulation dans les différents nœuds de réseau. D'après la figure III.32. (c), nous avons

enregistré un problème de tension dans les nœuds plus loin des nœuds générateurs (PV) en raison d'un manque de réserve de puissance réactive suffisante dans ces nœuds, les nœuds concernés sont : B₆, B₁₂, B₁₃ et B₁₄, au nœud B₁₃ la tension diminue jusqu'à 0.947pu (130,6 kV). Donc on peut citer que la tension traversant les nœuds B₆, B₁₂, B₁₃, et B₁₄ est hors la fourchette admissible [0.96-1.06 pu].

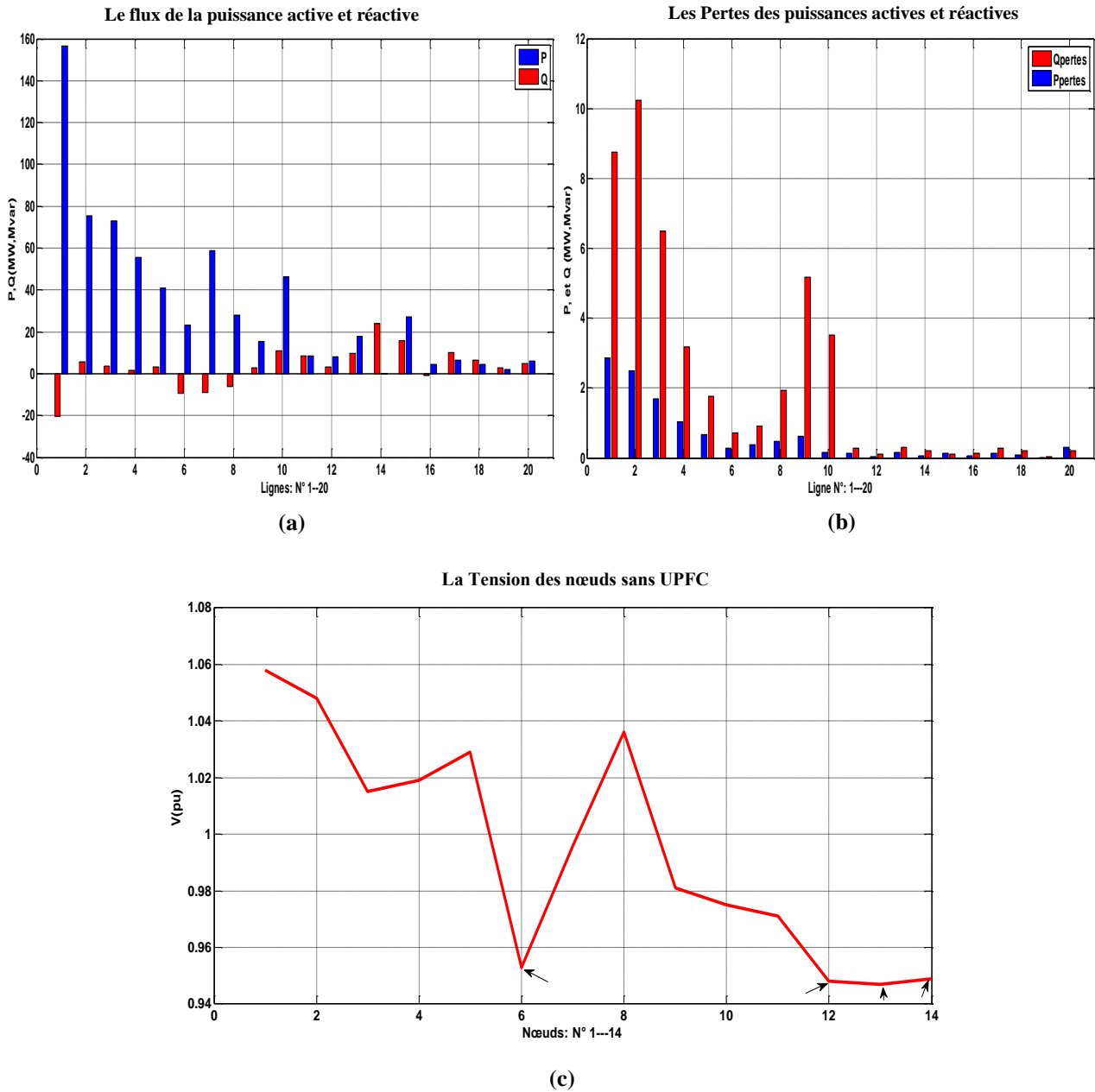


Figure III.32 : Résultats de l'analyse dynamique de réseau IEEE-14 Nœuds sans FACTS, a)- le flux de puissance, b)- Perte de puissance, et c)- le profil de tension.

Donc, puisque nous avons un problème important de transit de puissance qui affecte la stabilité de la tension et qui influe sur l'augmentation des pertes, il est nécessaire de résoudre ces problèmes en utilisant des moyennes de compensation. Les dispositifs FACTS tels que : l'UPFC ont émergé comme un sauveur de ces problèmes. Avec l'insertion de l'UPFC, le flux de puissance est accru et les tensions nodales seront améliorées, mais le problème principal est de savoir où nous allons installer cette apparence ? Quels sont les paramètres de réglage de cet appareil afin d'obtenir l'amélioration souhaitée ? Parfois le choix optimal d'installation d'un dispositif FACTS devrait dépendre des conditions du système d'alimentation et de ce que nous souhaitons améliorer sur le réseau. Comme dans le travail présent, nous avons l'intention d'améliorer le flux de puissance, en particulier dans les lignes les plus faibles, cela nécessite une simulation avec différents emplacements de l'UPFC pour s'arrêter sur les points essentiels de l'amélioration du fonctionnement du système.

Après une longue tâche de recherche sur l'emplacement optimal de l'UPFC avec la considération de différentes remarques effectuées préalablement, nous avons retenu comme position optimale de placement de l'UPFC, celle située en ligne 17 entre les deux nœuds 9 et 14, nous avons inséré ce dispositif dans la ligne où nous avons un problème de transit de puissance pour améliorer à la fois le transit de puissance et les tensions nodales. La figure A.5 dans l'annexe montre l'intégration de circuit UPFC avec le réseau via la ligne N°17.

b. Cas de test II : Performance dynamique de l'UPFC sur l'amélioration des paramètres du système

Dans cette sous-section, les simulations sont réalisées pour arrêter sur les points essentiels de l'amélioration des différents paramètres constituant le réseau (IEEE-14 nœuds) avec le dispositif UPFC. L'emplacement de ce dernier est choisi via une analyse dynamique, et leur performance dans cet endroit sur les différents paramètres telles que : les puissances transitées dans chaque ligne, les tensions des nœuds, et les pertes des puissances sont examinées et comparées aux mêmes paramètres sans l'utilisation de l'UPFC.

Pour une meilleure présentation, la réponse de l'UPFC pour chaque paramètre a été étudiée séparément, et après nous allons évaluer globalement leur performance et prouver leur efficacité dans le réseau Test. Les paramètres et les valeurs des éléments caractérisant l'UPFC sont résumées dans l'annexe A (tableau A.2).

❖ L'effet de l'UPFC sur le flux des puissances transitées

Selon les conditions du premier test (Test1) pour le système non compensé, le flux de puissance transmis sur la ligne 9-14 sans installation UPFC était : $P = 6,51$ MW (0,651pu) et $Q = 10,3$ MVAR (0,103pu) respectivement comme montré dans le cas "sans UPFC" de la Fig. III.33.a.

Le choix des références de flux de puissance active et réactive sont très nécessaires car elles sont utilisées comme entrées pour le système de contrôle de l'UPFC, la valeur de référence de la puissance active est choisie comme 1 pu, ce qui est supérieur à la valeur initiale mesurée entre les nœuds B9, et B14 sans UPFC, cela signifie que la valeur de référence de la puissance active a été fixée à 7,50 MW (0,750p.u), tandis que la puissance réactive de référence a été réduite d'environ 1 MVAR de 10,3 MVAR (0,103p.u) à 9,3 MVAR (0,93p.u) pour objectif de réduire les pertes dans le réseau.

Lorsque l'UPFC a été installé dans le réseau, la circulation du flux de puissance dans le réseau test était sous contrôle ceci est évident à travers la figure III.33.(b), le Flux de puissance active et réactive oscille lorsque l'UPFC est installé sur la ligne 9-14 (entre 0 et 0.25 sec). Avec l'incorporation de l'UPFC, le flux de puissance active transmis est augmenté à la puissance donnée comme référence ($P_{ref}=7,5$ MW). Comme montre dans la figure III.33.b, le flux de puissance active a atteint la valeur 7,32 MW (0,732p.u). D'autre part, le flux de puissance réactive est réduit comme prévu à 9,64 MVAR (0,964p.u). On note que, le FACTS 'UPFC' a amélioré le flux de puissance active qui a trouvé 0,81 MW (+12.44%) de plus que sa valeur mesurée sans UPFC, en outre la puissance réactive a été réduite de 0,659 MVAR (-6.40%) par rapport à sa valeur mesuré sans UPFC.

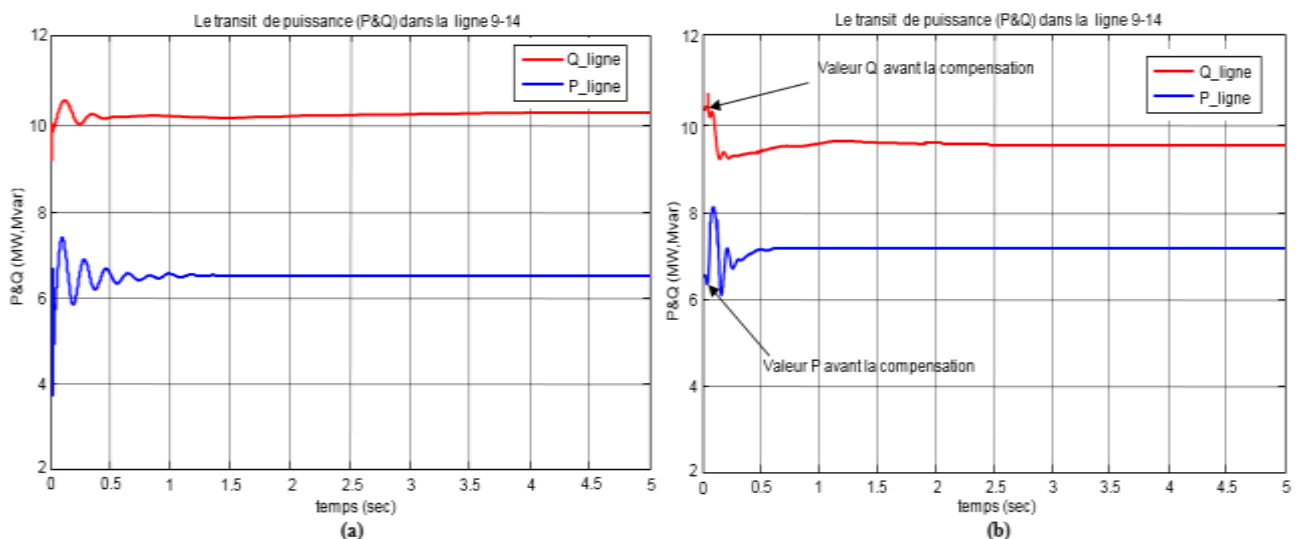


Figure III.33 : Réponse dynamique du flux de puissance (active et réactive) dans la ligne N°17.

La figure III.34, illustre la variation de flux de puissance dans la ligne N°20 qui relie l'un des nœuds de connexion de l'UPFC (le nœud N°14) avec le nœud N°13. D'après cette figure, nous avons enregistré une amélioration dans la puissance active transitée via cette ligne, le FACTS 'UPFC' a amélioré le flux de puissance active avec 5.43% (de 5.89 à 6.21 MW) de plus que sa valeur mesurée sans UPFC. En outre, la puissance réactive a été réduite avec 15.21% (de 4.93 à 4.18 Mvar) par rapport à sa valeur mesurée sans UPFC.

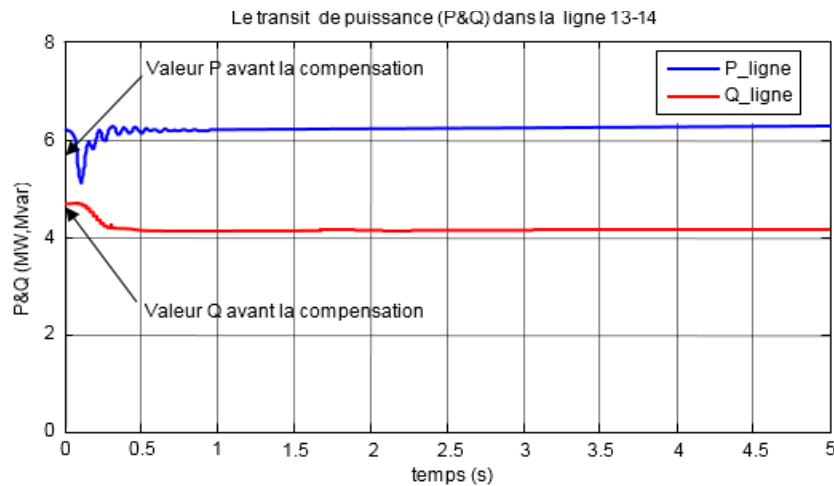


Figure III.34 : Réponse dynamique du flux de puissance (active et réactive) dans la ligne N°20 (ligne 13-14).

❖ Amélioration du niveau de tension aux nœuds de connexion de l'UPFC

L'un des avantages de l'UPFC est le maintien de la tension des différents nœuds du réseau au niveau admissible. Pour démontrer ça, l'effet du contrôleur UPFC sur la tension des nœuds laquelle est connecté, sera investie et discutée. Après l'insertion de l'UPFC à la ligne N°17 'ligne 9-14', la tension dans les deux nœuds B₉, et B₁₄ est amélioré. En référence à la figure III.31, la tension mesurée à l'extrémité de nœud B₉ est trouvée 0.981 pu dans le cas 'sans UPFC', cette valeur est améliorée car elle est devenue 1.001p.u lorsque l'UPFC fonctionne avec le réseau (Le Cas de réseau compensé, figure III.35.a). De la même manière, la tension mesurée à l'extrémité de nœud B₁₄ passe à 0.977 p.u avec l'UPFC, qui était trouvé 0.949 p.u dans le cas 'sans UPFC', comme montré dans la figure III.35. (a). Donc, on note que l'UPFC a amélioré la tension dans les deux nœuds B₉, et B₁₄ de plus que sa valeur mesurée dans le cas sans UPFC avec 2.03% et 2.95% respectivement.

Pour améliorer le facteur de puissance du réseau électrique, le flux de puissance réactive dans la ligne 9-14 doit être diminué pour qu'elle réduise la différence d'angle de phase entre les deux extrémités de la ligne. D'après la figure III.35. (b), il a été constaté que l'angle de différence avant la connexion UPFC était 0.246 degrés qui ont été réduit à 0.149 degrés après

la compensation par l'intervention de l'UPFC placés sur la ligne 9-14.

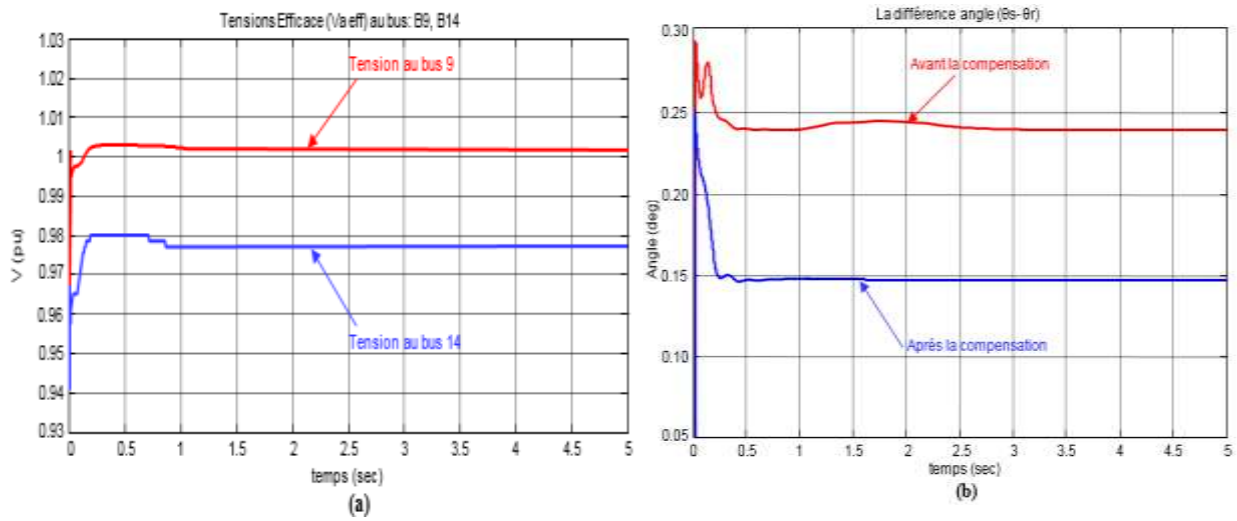


Figure III.35 : (a)- La tension traverse dans les deux nœuds de la ligne 9-14, (b)- La différence d'angle ($\theta_{vs} - \theta_{vr}$) entre les deux extrémités de la ligne 9-14.

Lorsque l'UPFC est incorporé avec le réseau via la ligne 9-14 et commence à fonctionner, le convertisseur série SSSC commence à injecter la tension dans la ligne concernée (La ligne 9-14). Pour étudier le flux de puissance active et réactive via la ligne 9 - 14, il est convenu de trouver une différence de phase entre la tension injectée en série (V_{inj}) et le courant de ligne (I_L). Si la tension injectée est en phase avec le courant de ligne, la puissance active est uniquement injectée sur la ligne de transmission. En revanche, si la tension injectée est déphasée par rapport au courant de ligne, la puissance réactive est uniquement injectée sur la ligne de transmission. D'autres différences de phase indiquent que la puissance active et la puissance réactive sont injectées dans la ligne de transmission. La forme d'onde de la tension injectée (V_{inj}) par le SSSC de l'UPFC est représentée sur la figure III.36.

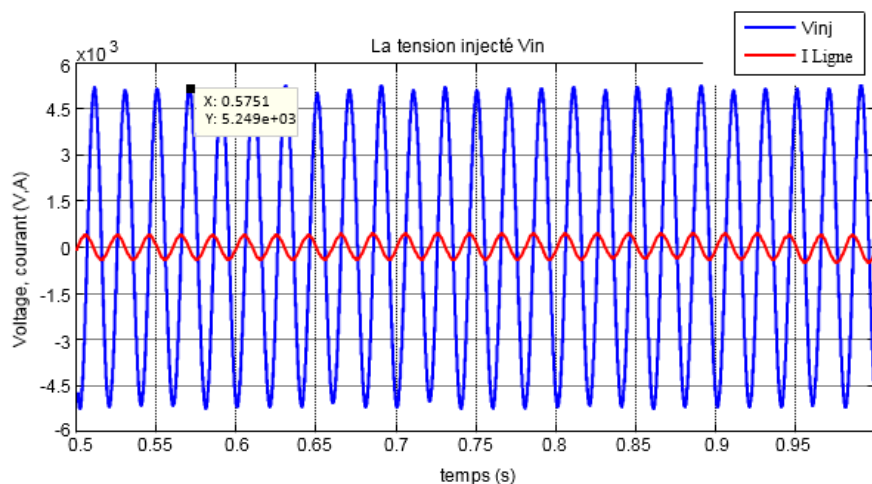


Figure. III.36 : Variation de l'amplitude de la tension injectée (V_{inj}), et le courant de ligne (I_L) de la phase « a » (temps pris entre (0.5 – 0.1).

Selon cette figure, une tension d'environ 5.25 kV est injectée sur la ligne 9-14 en série avec un courant de ligne de 0,37 kA. De la figure III.36, on observe une différence de phase entre la tension injectée en série (V_{inj}) et le courant de ligne (I_L), ce qui indique l'injection du flux de puissance active et réactive à la fois par l'UPFC vers le réseau.

Un autre facteur important permet d'évaluer le bon fonctionnement de l'UPFC et sa performance c'est la charge correcte du condensateur de liaison CC, il faut noter que la tension (V_{dc}) du condensateur de liaison CC sera modifiée en fonction de la puissance requise par le convertisseur série. Par conséquent, si la tension V_{dc} ne se charge pas jusqu'à la valeur nominale, la tension de sortie du convertisseur série ne sera pas égale à la valeur de compensation et celle-ci ne sera pas satisfaite (ce problème a été mentionné dans l'introduction générale, il considère parmi l'un des défis dans la conception d'un système de contrôle pour l'UPFC). La figure III.37 montre que la tension de condensateur de liaison V_{dc} a été chargé presque de sa valeur de référence.

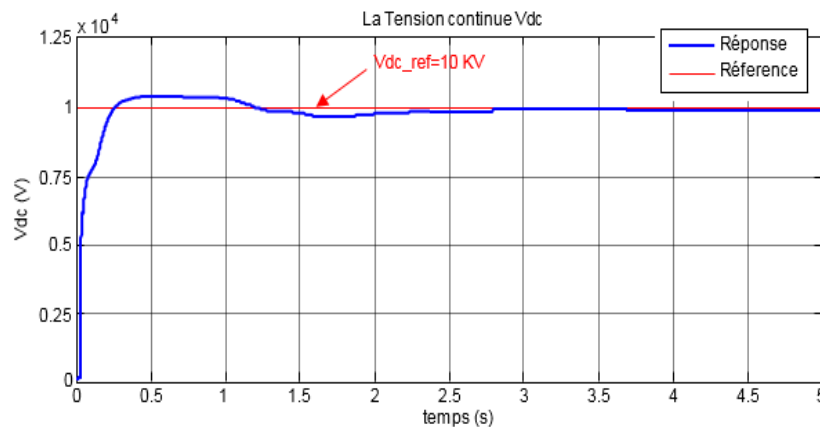


Figure III.37 : Tension du condensateur du circuit intermédiaire de l'UPFC (V_{dc})

❖ Analyse globale du réseau et évaluation des performances de l'UPFC

Dans cette sous-section, nous allons évaluer globalement la performance de l'UPFC et prouver son efficacité dans le réseau test IEEE-14 nœuds, la performance de compensation par l'UPFC est prouvée en comparant les résultats de simulation du réseau compensé au réseau non compensé (sans UPFC). Les résultats d'analyse de l'écoulement de puissance et le profil de tension, sans et avec l'UPFC installé dans la ligne n°17 sont illustrés dans l'annexe B (voire les tableaux B.1, B.2 et B.3) et les représentations graphiques de ces résultats sont montrées et également discutées ici.

1. Le profil général de la tension du réseau dans les deux situations de fonctionnement, sans UPFC et avec UPFC sont présentées sur la Figure III.38.

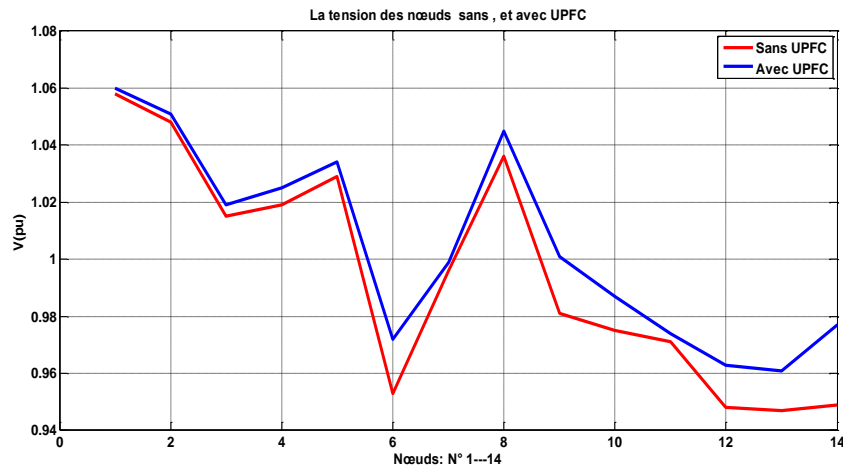


Figure III.38 : Profil de la tension sans UPFC et avec l'UPFC installé dans la ligne n°17

Graphiquement d'après la dernière figure, nous observons une amélioration importante sur les tensions car l'amplitude a été augmentée, non seulement les tensions B_9 , B_{14} dans laquelle l'UPFC est connecté sont améliorées, mais son effet est efficace et clair également sur le reste des nœuds du réseau qui sont aussi désormais contenues à l'intérieur de la fourchette admissible [0.96-1.06]. La qualité de la tension a été améliorée au nœud 6 de 0.956 à 0.972pu, dans le nœud 9 de 0.981 à 1.001 pu, au nœud 12 de 0.948 à 0.963, au nœud 13 de 0,974 à 0,961pu, et enfin au nœud 14 de 0,949 à 0,977pu.

2. Son rôle ne se limite pas à améliorer uniquement le flux de puissance dans la ligne à laquelle est connecté (ligne 9-14), mais d'autres lignes sont également affectées par cette amélioration. L'histogramme de la figure III.39, montre la valeur finale de flux de puissance dans les différentes lignes de réseau, tandis que la figure III.40 illustre les lignes où nous avons enregistré une amélioration importante par l'UPFC.

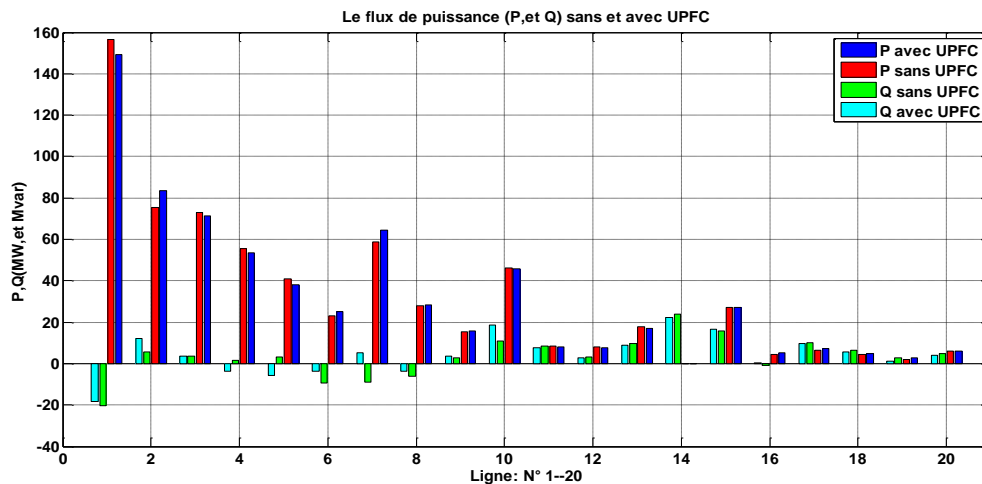


Figure III.39 : Le flux de la puissance active/réactive sans UPFC, et avec l'UPFC installé dans la ligne n°17



Figure III.40 : Le Flux de puissance active des lignes où nous avons enregistré une amélioration importante, du réseau IEEE-14 nœuds avec compensation (UPFC).

À partir de la figure III.40, et le tableau B.1 (avec UPFC) dans l'annexe B, il est clair que l'UPFC a changé totalement la répartition de puissance dans le réseau, certaines lignes ont été soulagées en diminuant leur flux de puissance comme les lignes : 1, 3, 5, 6, 11, 12 ...etc., et parallèlement en augmentant le flux de puissance d'autres lignes telles que les lignes : 2, 4, 7, 17, 20...etc.

3. En ce qui concerne les pertes totales des puissances, elles ont été calculées en additionnant les pertes des puissances de toutes les lignes de transmission (pour les valeurs numériques des pertes de puissances actives et réactives traversant chaque ligne voire le tableau B.3 dans l'annexe B).

À partir de la figure III.41, et le tableau B.3 dans l'annexe B, il est clair que les pertes de puissance active et réactive étaient diminuées par rapport à celles sans UPFC. Les résultats numériques montrent que les pertes de puissances actives et réactives étaient respectivement de 11.767 MW et 44.531 Mvar sans UPFC, ces valeurs ont été réduites à 10.144 MW (réduit de 13.792%) et 37.421 Mvar (réduit de 15.966%) lorsque l'UPFC était en service, soit un bénéfice de 1.6 MW.

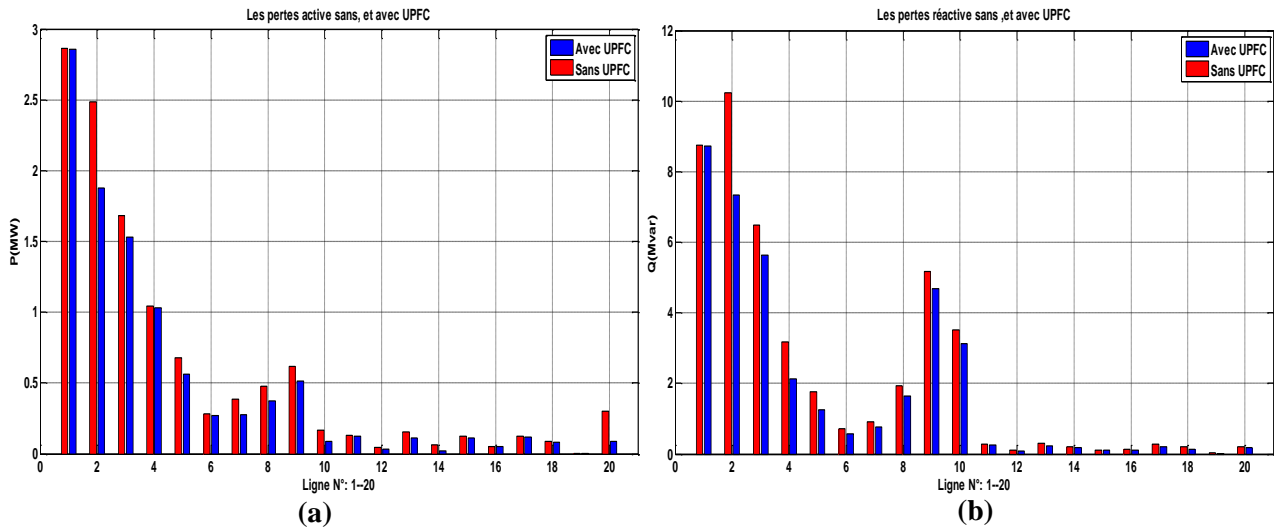


Figure III.41 : Les Pertes des puissances active (a) et réactive (b) dans les deux cas de fonctionnement (sans, et avec UPFC)

Afin de mettre en relief les pourcentages d'amélioration donnée par l'UPFC dans le réseau IEEE-14 Nœuds, le tableau ci-dessous résume le ratio de compensation dans les nœuds et les lignes les plus infectées par l'intégration de l'UPFC. Selon les informations de tableau (III.1), nous avons constaté une dynamique améliorée dans le cas de compensation avec l'UPFC.

Tableau III.1 : Analyse des performances de l'UPFC dans le réseau IEEE-14 nœud

paramètres	Sans UPFC		Avec l'UPFC	
	Nœud N°	Valeur	Valeur	Ratio de compensation
1. La Tension (pu)	B6	0.953	0.972	+1.99%
	B7	0.996	0.999	+0.30%
	B9	0.981	1.001	+2.03%
	B10	0.975	0.987	+1.23%
	B11	0.971	0.974	+0.30%
	B12	0.948	0.963	+1.58%
	B13	0.947	0.961	+1.47%
	B14	0.949	0.977	+2.95%
2. Le flux de puissance active (MW)	Ligne N°	valeur	Valeur	Ratio de compensation
	Ligne 1-2	156.51	149.19	- 4.67 %
	Ligne 1-5	75.38	83.42	+10.66%
	Ligne 2-3	72.87	71.56	-1.79%
	Ligne 2-4	55.41	53.32	-3.77%
	Ligne 2-5	40.93	38.23	-6.59%
	Ligne 3-4	23.19	25.31	+9.14%
	Ligne 4-5	58.97	64.29	+9.02%
	Ligne 9-14	6.51	7.32	+12.44%
Ligne 13-14	5.89	6.21	+5.43%	
3. Les pertes totales de puissances (MW, Mvar)	P&Q pertes	valeur	Valeur	Ratio de compensation
	P losses	11.767	10.144	-13.792%
	Q losses	44.531	37.421	-15.966%

En résumé à partir des résultats de simulation dans le réseau d'applications 3 (le réseau multi machine 14 nœuds), nous pouvons maintenant être sûr que : l'implémentation de l'UPFC sur le réseau électrique présente une flexibilité accrue par rapport à le cas sans UPFC.

III.3. Conclusion

Le présent chapitre a porté sur la simulation de l'UPFC dans un réseau électrique, son fonctionnement et sa performance est vérifié par une série de simulations dans l'environnement MATLAB/Simulink. On a choisi le régulateur "PI" pour la partie parallèle ainsi que pour la partie série, nous avons examiné la performance de la commande classique sur le contrôle de l'UPFC, et nous surveillerons leur réponse sur le contrôle de réseau. Divers systèmes test avec différentes tâches ont été étudiés, dans les deux premiers tests, nous avons étudié les performances et l'aptitude de l'UPFC à contrôler le flux de puissance active et réactive instantanément et indépendamment, nous avons présenté aussi son effet sur la stabilité de tension du réseau face à des défauts. Pour les conditions de défauts, on simule les différentes perturbations les plus courantes celles qui ciblent seulement la tension, nous avons sélectionné deux types de perturbations qui sont : le creux de tension et la surtension. Les résultats de simulation des essais dans les deux tests d'applications 1, et 2 démontrent que la commande de puissance active et réactive dans les réseaux électriques, et la stabilité de tension peut être efficacement réalisée avec l'UPFC. Dans les conditions de défaut, le réseau devient fortement perturbé mais l'UPFC à travers les deux compensateur SSSC et le STATCOM réagir de corriger toutes ces anomalies présentes dans le réseau (maintenir la stabilité de tension du réseau, et de permettre aux puissances transitées de suivre leurs références), on note particulièrement un dépassement important dans les signales de réponse avec un temps de réponse considérable lorsque l'UPFC réagit, ce problème ouvre la voie au développement d'autre mode de réglage pour l'UPFC en vue d'améliorer sa performance.

Le troisième test est le système multi machine 14 nœuds (IEEE-14 nœuds), dans ce test l'UPFC est connectée avec le réseau via la ligne N°17 afin d'améliorer le transfert d'énergie dans le réseau. L'analyse dynamique montre que : l'insertion de l'UPFC a un impact significatif sur le flux d'énergie et les niveaux de tension.

Enfin, puisque la performance de l'UPFC et devenus plus remarquable par l'amélioration de la partie de contrôle de ce dernier, nous nous sommes intéressés à la synthèse de développement des lois de commande de l'UPFC basé sur l'intelligence artificielle largement exposée dans le futur chapitre à savoir la logique flou et les techniques d'optimisation. Pour cette raison, les deux tests 1, et 2 seront retenus dans les chapitres suivants, ces deux tests constituent la base d'une analyse plus approfondie de contrôle de l'UPFC lorsqu'elle est développée par d'autres contrôleurs dans les chapitres suivants.

Chapitre IV :

***Présentation des techniques
intelligentes et Typologies
d'optimisation***

IV.1. Introduction

Le chapitre précédent traite l'intérêt de développer des contrôleurs efficaces de l'UPFC pour pallier aux problèmes induits par les variations brusques dans le réseau, c'est vrai que le contrôleur PI est simple et facile à construire, mais ces performances peuvent être dégradées dans les systèmes non linéaires, lorsqu'il y a des variations dans les paramètres du système comme nous l'avons vu précédemment (Les deux tests **1**, et **2** du chapitre III). Un dispositif tel que l'UPFC peut s'avérer assez complexe par sa commande dans la conduite d'un réseau électrique, ce qui nous amène à faire appel à l'intelligence artificielle afin de surmonter la complexité du problème de réglage [4], [16]. Ces méthodes ouvrent la voie au développement des techniques de commande utilisant des règles intelligentes pour parcourir l'espace des solutions, récemment ils reçoivent de plus en plus d'intérêt en raison de leurs capacités potentielles à résoudre des problèmes complexes. De nombreux travaux ont été réalisés dans ce sens et on peut citer la commande:

1. Par la logique floue,
2. Par les méthodes d'optimisation qui sont connues souvent par le nom : '**méta-heuristique**'.

On pourrait dire que la logique floue et les algorithmes d'optimisation constituent des approches qui ne sont pas nouvelles, leur développement se fait à travers les méthodes par lesquelles l'homme essaye de copier la nature et de reproduire des modes de raisonnement et de comportement qui sont propres à la nature, elles ont émergé dans plusieurs domaines notamment le traitement de l'image à la gestion financière, elles commencent à peine à être utilisées dans les domaines de l'électrotechnique et de l'industrie afin de résoudre les problèmes d'identification, de régulation de processus, d'optimisation, de classification, de détection de défauts ou de prise de décision [48].

Le présent chapitre est consacré à la présentation de quelques types de commande intelligentes contribuant à la thèse et que nous utiliserons plus tard dans le processus de commande de l'UPFC. Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons d'une manière générale la théorie de la logique floue, puis nous allons entamer l'étude sur les méthodes méta heuristiques tels que, l'essaim de particules (PSO), les algorithmes génétiques (AG), les colonies de Fourmies (ACO), et le PSO hybride (PSO-SQP). Une vue totale sur leurs philosophies, leur implémentation, et leurs caractéristiques sont également expliquées.

IV.2. Logique floue

IV.2.1. Notions fondamentales de la théorie floue

IV.2.1.1. Apparition de la logique floue:

Les prémisses de la logique floue sont apparues avant les années 1940, avec les premières approches, du concept d'incertitude. Il a fallu attendre 1965, pour que le concept de sous ensemble flou soit proposé par *L. A. Zadeh* [99], automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkeley en Californie, qui a contribué à la modélisation du phénomène sous forme floue [100], en vue de franchir les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. En 1974, *M. Mamdani* expérimentait la théorie énoncée par *Zadeh* sur une chaudière à vapeur [101], introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel [16]. Initialement, cette théorie a été appliquée dans des domaines non techniques, comme le commerce, la jurisprudence ou la médecine, dans le but de compléter les systèmes experts, et afin de leur donner l'aptitude de prise de décision. Dès 1975, on trouve les premières applications au niveau des systèmes de réglage [102]. A partir de 1985 environ, ce sont les Japonais qui commencent à utiliser la logique floue dans des produits industriels pour résoudre les problèmes de réglage et de commande. Tout récemment, aussi en Europe, une activité de recherche intense a débuté afin d'introduire le principe de réglage par la logique floue [16]. L'avantage du contrôleur flou par rapport aux autres contrôleurs est qu'il n'a pas besoin de modèle mathématique précis du système et peut fournir une réponse rapide pendant les fonctionnements dynamiques du réseau, car il adapte facilement une large gamme de changements dynamiques du système électrique [8], [9].

IV.2.1.2. Bases de la logique floue

Afin de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, on présente un exemple simple, celui de la classification des personnes en trois ensembles «jeune», «entre deux âges», «âgé» [4], [103]. Selon la logique de Boole qui n'admet pour les variables que les deux valeurs 0 et 1, une telle classification pourrait se faire comme le montre la figure IV.1. Toutes les personnes âgées de moins de 25 ans sont alors considérées comme jeunes et toutes les personnes âgées de plus de 50 ans comme vieux.

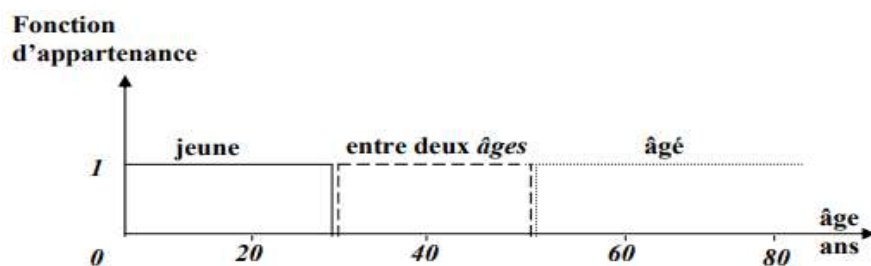


Figure IV.1: Classification des personnes selon la logique booléenne

Cependant, une telle logique de classification n'est pas logique. Pourquoi une personne ayant atteint 50 ans, doit être considérée comme appartenant à l'ensemble âgé ? En réalité, un tel passage se fait progressivement et individuellement. La logique floue, dont les variables peuvent prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1, permet de tenir compte de cette réalité. Les limites ne varient pas soudainement, mais progressivement [104]. La figure IV.2, montre une classification possible pour l'exemple précédent, cette fois-ci à l'aide de la logique floue. Ainsi une personne de 25 ans appartient à l'ensemble «jeune» avec une valeur $\mu=0.75$ de la fonction d'appartenance et à l'ensemble «entre deux âges» avec $\mu=0.25$. Par contre une personne âgée de 65 ans appartient avec une valeur $\mu=1$ de la fonction d'appartenance à l'ensemble «âgé» [4].

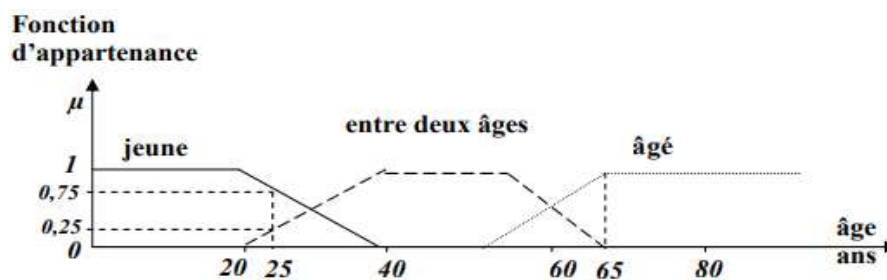


Figure IV.2: Classification des personnes selon la logique floue

Les éléments de base de la logique floue sont [103], [105], [106], [107]:

- ✓ Les variables linguistiques,
- ✓ La définition des variables linguistiques (les fonctions d'appartenance),
- ✓ Les déductions floues (inférences),
- ✓ Les opérateurs.

Ces descriptions détaillées de chaque élément de base sont expliquées comme suit:

IV.2.1.2.1. Variable linguistique

L'ensemble de référence d'un langage naturel s'appelle l'univers du discours. L'univers du discours d'un mot est un ensemble de termes qui évoquent le même concept mis à degrés différents. Il peut être fini ou non. Une variable linguistique représente un état dans le système à régler ou une variable de réglage dans un contrôleur flou. Sa valeur est définie dans les termes linguistiques qui peuvent être des mots ou des phrases d'un langage naturel ou artificiel. Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que [1], [108] : $\{ x, T(x), U, G, M \}$

Où : (x : est le nom de la variable, $T(x)$: est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre x , U : est l'univers du discours associé avec les valeurs linguistiques de x , G : est la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de x , M : est la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique).

IV.2.1.2.2. Fonction d'appartenance

Chaque sous-ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance. La forme de fonctions d'appartenance dépend de l'application, en général, on utilise trois formes géométriques : trapézoïdale, triangulaire et de cloche. Les deux premières formes sont les plus souvent employées en raison de leur simplicité. L'allure de la forme trapézoïdale est complètement définie par quatre points P1, P2, P3, P4 (Figure.IV.3). Le triangle peut être considéré comme un cas spécial du trapèze lorsque deux points coïncident (P2=P3). Même la forme rectangulaire (pour représenter la logique classique) est comprise dans le trapèze si (P1, P2) et (P3, P4) se trouvent sur une verticale.

Dans la plupart des cas, en particulier pour le réglage par logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous. Cependant, la forme gaussienne ou cloche (Figure. V.4.d) qui donne dans certains cas une meilleure représentation des ensembles flous, peut être utilisée. On peut aussi utiliser les lettres pour définir la forme des fonctions d'appartenance. Il s'agit de fonctions d'appartenance de type S, Λ ou Π comme le montre la figure IV.4 [1], [108].

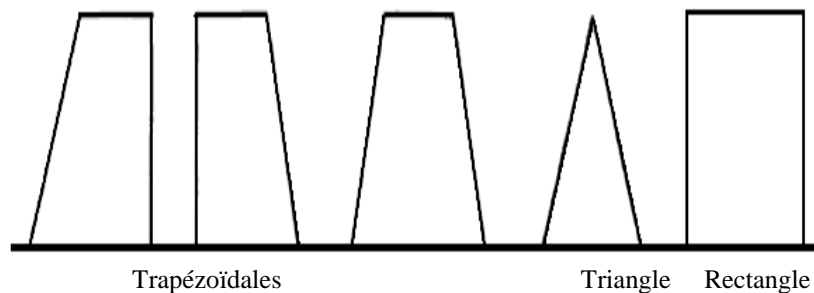


Figure IV.3: Fonctions d'appartenance de forme trapézoïdale avec 2 cas spéciaux

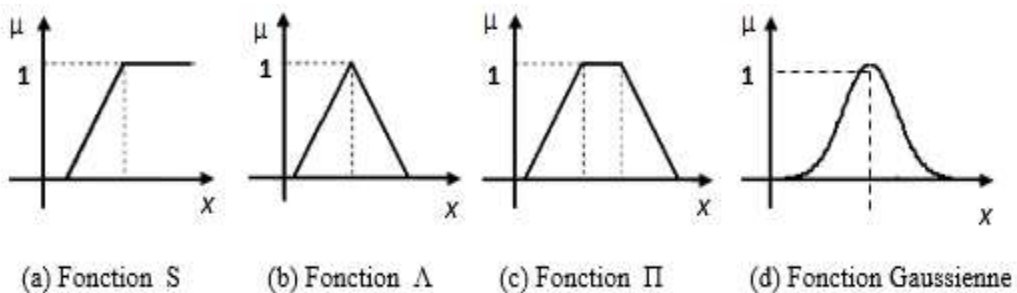


Figure IV.4: Quelques différentes formes de fonctions d'appartenance

IV.2.1.2.3.Univers de discours

Un des premiers pas dans la conception d'une commande par logique floue est de définir l'ensemble de référence ou univers de discours pour chaque variable linguistique. A titre d'exemple, l'ensemble 'x' (erreur) peut être caractérisé par un ensemble de sous-ensembles (ou de nombres flous) dont les fonctions d'appartenance sont montrées à la figure IV.5 et chaque sous ensemble flou dans l'univers de discours représente une valeur linguistique [1], [108], [109].

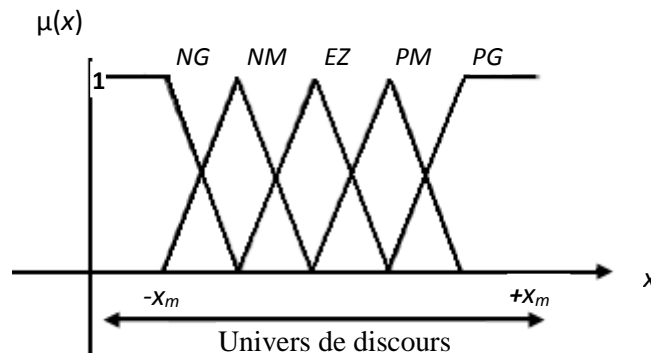


Figure IV.5: Univers de discours d'une variable linguistique

La normalisation d'un univers de discours nécessite une discrétisation de cet univers en un nombre fini de segments ayant chacun un correspondant dans l'univers normalisé. Dans ce cadre, un ensemble flou est alors défini explicitement par sa fonction d'appartenance [1], ainsi la normalisation d'un univers de discours continu nécessite une connaissance antérieure de l'espace d'entrée / sortie. La cartographie d'échelle peut être uniforme ou non. Un exemple est montré dans le tableau IV.1 ci-dessous où l'univers de discours [-10, 10] est transformé en un univers fermé normalisé [-1, 1].

Tableau IV.1 : Exemple de normalisation

Univers normalisé	Intervalle normalisé	Intervalle nominal
[-1, 1]	[-1, 0.5]	[-10, -5]
	[-0.5, -0.3]	[-5, -3]
	[-0.3, 0]	[-3, 0]
	[0, 0.2]	[0, 2]
	[0.2, 0.6]	[2, 5]
	[0.6, 1]	[5, 10]

IV.2.1.2.4.Opérateurs de la logique floue

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences floues par des opérateurs de la logique floue intervenant sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques. Voici quatre principaux opérateurs [1]:

➤ **Opérateur Négation NON**

La propriété «l'erreur n'est pas grande» peut être caractérisée de façon évidente par la fonction d'appartenance.

$$\overline{\mu(x)} = 1 - \mu(x) \quad (IV.1)$$

A noter qu'il s'agit de l'opérateur NON, appelée aussi 'complément', 'négation' ou 'inverse'.

➤ **Opérateur Conjonction ET**

La solution la plus simple et la plus utilisée pour caractériser la satisfaction simultanée de deux propriétés est de poser :

$$\mu_C(z) = \mu_{AETB}(z) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (IV.2)$$

On parle alors d'opérateur minimum dit aussi 'intersection'. Il est possible que la fonction d'appartenance résultante $\mu_{C(Z)}$ n'atteigne pas la valeur 1. On peut facilement vérifier que l'opérateur minimum est commutatif, c'est à dire qu'il est possible d'invertir $\mu_{A(x)}$ et $\mu_{B(y)}$ sans que le résultat change.

➤ **Opérateur Disjonction OU**

La réalisation de l'opérateur ou au niveau de la logique floue se fait en général par la formation du maximum (union), appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_{A(x)}$ et $\mu_{B(y)}$ des deux ensembles A et B. On a donc l'opérateur maximum [108].

$$\mu_C(z) = \mu_{AETB}(z) = \max[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (IV.3)$$

A noter qu'il est possible que la fonction d'appartenance résultante $\mu_{C(Z)}$ atteigne deux fois la valeur 1. Evidemment, l'opérateur maximum est aussi commutatif et associatif.

➤ **Implication**

Si x est A, Alors y est B

$$\text{Imp de Zadeh} \quad \mu_C(x, y) = \max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x)\} \quad (IV.4)$$

$$\text{Imp de Mamdani} \quad \mu_C(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (IV.5)$$

La description schématique de la figure IV.6 illustre les opérations qui sont également définies [110].

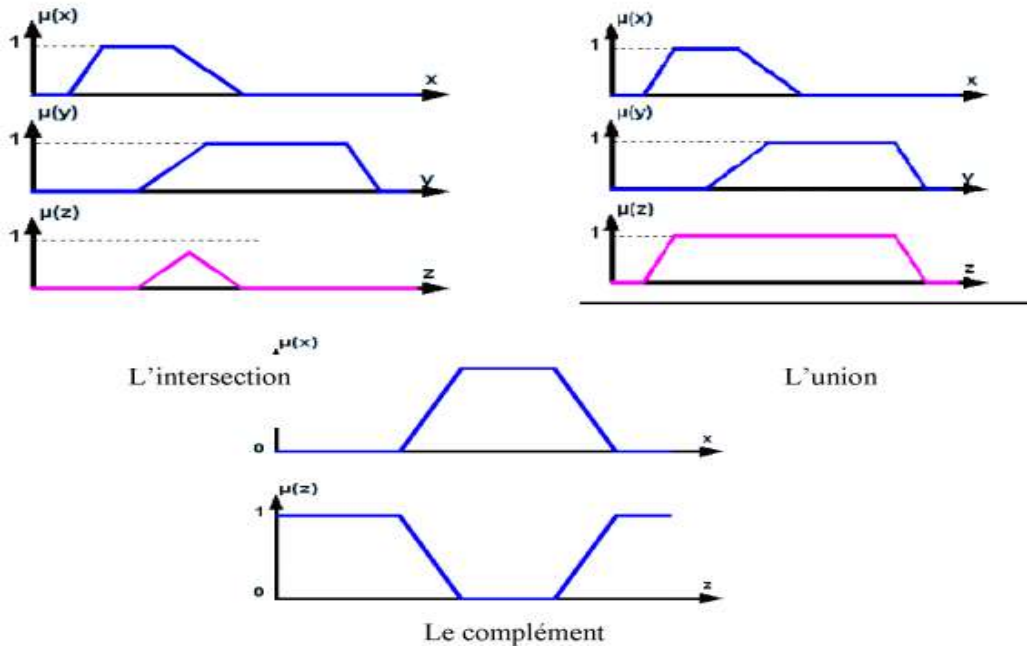


Figure IV.6: L'intersection (min), L'union (max) et le complément.

IV.2.2. Réglage, et commande par la logique floue

Le schéma de la figure IV.7, représentée la structure d'un asservissement par un contrôleur flou (Fuzzy Logic Controller (FLC)). Comme indique dans cette figure, on peut déclarer que le calcul ou bien la décision de la commande de sortie, s'effectue à partir des étapes essentielles qui sont bien détaillées dans les paragraphes suivants [48], [110]:

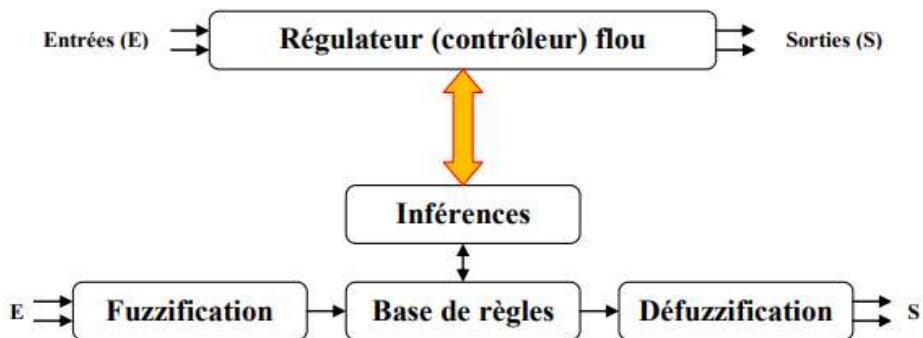


Figure IV.7: Configuration et structure interne d'un système flou

IV.2.2.1. Choix du régulateur flou (Etape 1)

Comme nous le savons déjà constaté le rôle principal d'un régulateur flou est de gérer un processus en fonction d'une consigne donnée par action sur les variables qui décrivent le système. Il y a plusieurs méthodes d'applications du régulateur flou, les plus importantes sont:

➤ **Contrôleur de Mamdani**

La méthode de Mamdani utilise une approche basée sur les connaissances du domaine pour élaborer les règles d'inférences et le choix des fonctions d'appartenances. Une autre méthode permettant de déduire ces règles c'est à partir des connaissances à priori des résultats obtenus avec des régulateurs classiques [1]. La forme générale suivante pour N_x entrées :

$$\text{Si } x_1 \text{ est } A_{1k} \text{ et } \dots \text{ et } x_{N_s} \text{ est } A_{N_s} \text{ alors } y \text{ est } b_k$$

Où A_{1k}, A_{N_s} et B_k représentent des termes linguistiques auxquels est attribuée une signification floue que l'on suppose normalisée.

Un synoptique de ce type de contrôleur est représenté sur la figure IV.8 [111]

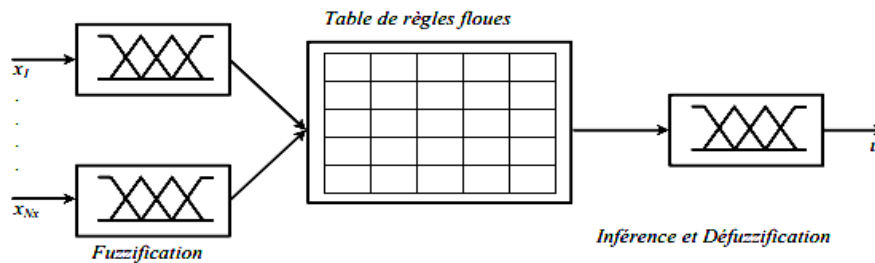


Figure IV.8: Contrôleur Mamdani

➤ **Contrôleur de Sugeno**

La méthode Takagi-Sugeno-Khan est introduite en 1985, elle est similaire à celle de Mamdani sur plusieurs aspects. Les deux premières parties (moteur d'inférence et fuzzification) sont exactement les mêmes, la différence principale réside à la sortie du régulateur flou (commande u). Dans la méthode de Sugeno, la sortie est de type linéaire ou de type constant. La règle s'annonce comme suite [108], [111]:

$$\text{Si } x_1 \text{ est } A_{1k} \text{ et } \dots \text{ et } x_{N_s} \text{ est } A_{N_s} \text{ alors } y = b_{0k} + \sum_{i=1}^{N_s} b_{1k} x_i$$

Un synoptique de ce type de contrôleur est représenté sur la figure IV.9 [111]

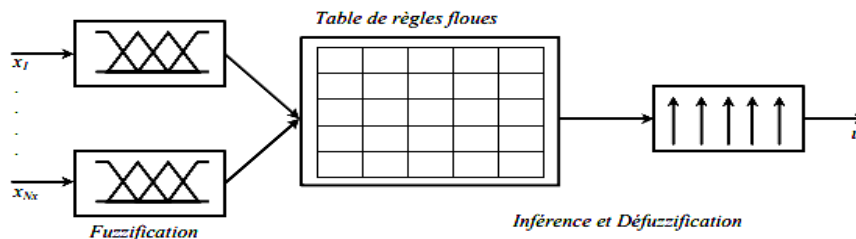


Figure IV.9: Contrôleur Sugeno

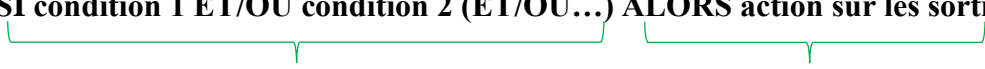
L'avantage de la méthode de Sugeno à celle de la méthode Mamdani c'est que le premier marche bien avec des techniques linéaires (exemple : Régulateur PID), permet d'optimiser et d'utiliser des techniques adaptatives, et garantit la continuité de la surface de sortie [108].

IV.2.2.2. Fuzzification (Etape 2)

Dans le domaine du contrôle, les données observées sont des grandeurs physiques générées par des capteurs. Il est nécessaire de convertir ces grandeurs réelles en des variables floues. Pour cela, on fait appel à une opération dite fuzzification [112]. Cette opération constitue le passage des grandeurs réelles aux valeurs floues. Cette étape permet de fournir les degrés d'appartenance de la variable floue à ses ensembles flous en fonction de la variable réelle de la grandeur d'entrée. La grandeur d'entrée du contrôleur doit d'abord être fuzzifiée, c'est-à-dire que l'on va fixer les valeurs linguistiques ainsi que la forme des fonctions d'appartenance. Cette opération doit être faite également sur la variable de sortie. Bien sûr cette sortie fuzzifiée n'est pas exploitable pour attaquer l'interface de puissance. Il faudra donc avoir en tête de faire une opération de « défuzzification » pour résoudre ce problème [1].

IV.2.2.3. Bases de règle (Etape 3)

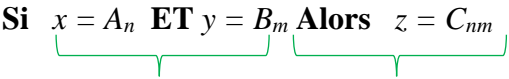
Les bases de règle permettent de déterminer la sortie du régulateur en fonction des entrées en utilisant des variables linguistiques. L'établissement de ces règles est généralement basé sur la connaissance du problème et sur l'expérience de l'opérateur qui peut fixer le nombre de sous-ensembles, leurs fonctions d'appartenance ainsi que les variables linguistiques. Ils existent plusieurs présentations de la base de règles telles que la description linguistique, symbolique ou par une matrice d'inférence [112]. Ces règles sont combinées en utilisant les connections ET et OU et se présentent sous la forme usuelle suivante [108]:

SI condition 1 ET/OU condition 2 (ET/OU...) ALORS action sur les sorties

Prémisse
Conclusion

Supposons que le régulateur flou ait deux entrées convenablement transformées en variables linguistiques x et y et une sortie z , et que l'on a défini n règles linguistiques comme suit :

Si $x = A_1$ **ET** $y = B_1$ **Alors** $z = C_{11}$ **OU**
Si $x = A_1$ **ET** $y = B_2$ **Alors** $z = C_{12}$ **OU**

Si $x = A_i$ **ET** $y = B_j$ **Alors** $z = C_{ij}$ **OU**

Si $x = A_n$ **ET** $y = B_m$ **Alors** $z = C_{nm}$

Prémisse
Conclusion

Une simplification de cette représentation peut être obtenue en utilisant la matrice d'inférence montrée au tableau IV.2 où l'intersection entre une colonne et une ligne indique la valeur linguistique correspondante à la variable de sortie, où A_i , B_j et C_{ij} ($i = 1, n$ et $j = 1, m$) sont les sous-ensembles flous définis dans les ensembles de référence pour x , y et z respectivement. En toute généralité, n'importe quelle combinaison des opérateurs ET, OU et NON peut apparaître dans la condition d'une règle, suivant les conditions imposées par le système à régler [1].

Tableau. IV.2: Matrice d'inférence

		x						
		Z	A_1	A_2	.	.	A_i	.
y	B_1	C_{11}	C_{21}	.	.	C_{i1}	.	C_{n1}
	B_2	C_{12}	C_{22}	.	.	C_{i2}	.	C_{n2}

	B_j	C_{1j}	C_{2j}	.	.	C_{ij}	.	C_{nj}

	B_m	C_{1m}	C_{2m}	.	.	C_{im}	.	C_{nm}

La description linguistique des inférences de réglage comme montré dans le tableau au-dessus est en générale assez lourde, on obtient une certaine simplification de l'écriture par la description symbolique. Pour cette raison il y a d'autre description simple où les ensembles sont alors désignés de manière abrégée par leur symbole, (par exemple, négatif grand : NG, positif moyen : PM). Cette description est en générale préférable à la description linguistique, surtout lorsque plusieurs variables sont en jeu.

IV.2.2.4.Moteur ou Mécanisme d'inférences (Etape 4)

Le moteur d'inférence est le mécanisme par lequel les règles d'entrée soient combinées pour produire un résultat de commande [108]. D'autre façon dans cette étape, il s'agit de déterminer comment le système interprète les variables linguistiques floues. Les variables linguistiques (entrées et sorties) sont liées par les règles d'inférence. Les variables sont liées par l'opérateur « ET », tandis que les variables de sortie des différentes règles sont liées par l'opérateur « OU » et l'ensemble des règles sont liées par les connecteurs tels que « ET » et « ALORS ». La conséquence d'une règle floue est inférée par l'emploi de règle de composition, en utilisant les fonctions d'implications floues et les connecteurs « ET » et « ALORS » [113]. Il y a plusieurs sortes d'inférences floues, elles se différencient essentiellement selon la combinaison et l'utilisation des opérateurs « ET » et « OU » dans les règles d'inférence. Parmi ces méthodes on trouve :

- Méthode d'inférence MAX-MIN (Mamdani),
- Méthode d'inférence MAX-PROD (Larsen),
- Méthode d'inférence SOMME-PROD (Sugeno).

Chacune de ces méthodes citées, permet un traitement numérique des inférences, chaque étape est expliquée comme suite :

- Pour la méthode d'inférence max-min, l'opérateur « et » est réalisé par la formation du minimum, l'opérateur « ou » est réalisé par la formation du maximum, et « alors » (l'implication) est réalisée par la formation du minimum,
- Pour la méthode d'inférence max-produit, l'opérateur « et » est réalisé par la formation du produit, l'opérateur « ou » est réalisé par la formation du maximum, et « alors » est réalisée par la formation du produit,
- Pour la méthode d'inférence somme-produit, on réalise au niveau de la condition, l'opérateur « ou » par la formation de la somme (valeur moyenne), et l'opérateur « et » par la formation du produit. Pour la conclusion, l'opérateur « alors » est réalisé par un produit [48], [114].

IV.2.2.5. Défuzzification (Etape 5)

Le résultat d'une inférence floue est une fonction d'appartenance, cependant, un organe de commande nécessite un signal de commande précis. La transformation d'une information floue en une information déterminée est la défuzzification. Il y a plusieurs méthodes de défuzzification proposées dans la littérature à savoir la méthode du maximum, la méthode des hauteurs pondérées et la méthode du centre de gravité mais la méthode du centre de gravité reste de loin la plus courante [108].

➤ *Méthode du centre de gravité*

La méthode de défuzzification la plus utilisée est celle de la détermination de l'abscisse du centre de gravité (z^*) de la fonction d'appartenance résultante de l'inférence $\mu_c(z)$. Cette abscisse correspond à la valeur de sortie du régulateur. La figure IV.10, montre le principe de cette méthode de défuzzification [1].

$$z^* = \frac{\int_{z_0}^{z_1} z\mu(z)dz}{\int_{z_0}^{z_1} \mu(z)dz} \tag{IV.6}$$

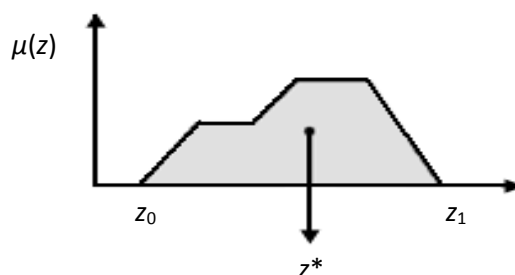


Figure IV.10 : Principe de défuzzification par centre de gravité

Concernant les autres techniques de défuzzification (méthode du maximum, et la méthode des hauteurs pondérées) sont expliqués en détail dans [115].

NB : La transformation de l'interférence Mamdani à l'interférence Sugeno ce fait avec les mêmes entrées et les mêmes règles, la seule différence est dans la forme de sortie de la commande.

IV.3. Techniques d'optimisation

IV.3.1. Théorie de la méta-heuristique

Les méthodes d'optimisation globales connues souvent par le nom méta-heuristiques sont inspirées parfois de la théorie d'évolution chez les sociétés d'animaux et d'insectes dans laquelle on trouve les algorithmes génétiques (AG), parfois sont inspirées de la théorie d'éthologie de ces sociétés dans laquelle on cite les algorithmes d'optimisation par essais particuliers PSO, les colonies de Fourmies (ACO)...etc. Les premières méta-heuristiques datent des années 1980, et bien qu'elles soient d'origine discrète, on peut les adapter à des problèmes continus. Elles sont utilisées généralement quand les méthodes classiques (mathématiques) ont échoué de trouver la solution souhaitée, en raison de leurs capacités potentielles à résoudre des problèmes complexes notamment dans le domaine d'optimisation des paramètres de contrôle tel que les paramètres de PI conventionnelle [19], [116] leur efficacité n'est pas toujours garantie, elle dépend de la nature de problème envisagé et les paramètres de l'algorithme. La figure suivante représente le principe de base d'une méthodologie d'optimisation [117], [118].

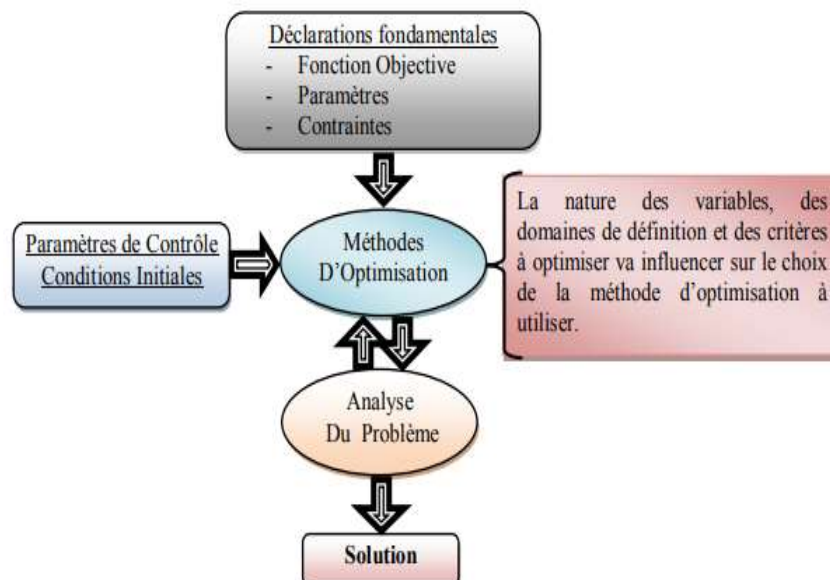


Figure IV.11: Principe de base d'une méthodologie d'optimisation.

A travers notre revue de références scientifiques dans ce domaine, il existe une grande variété de techniques de commande intelligente basé sur les méthodes d'optimisation. Dans cette thèse notre intérêt se portera sur :

1. les algorithmes d'optimisation par essaims de particules (PSO),
2. les algorithmes d'optimisation Hybride (la méthode hybride : PSO _ SQP),
3. les algorithmes génétiques (GA),
4. les algorithmes de colonies de fourmis(ACO).

Dans les paragraphes suivants on va détailler les méthodes d'optimisation qui sont classées ci-dessus, leurs philosophies, leurs caractéristiques et algorithmes de ces méthodes.

IV.3.1.1. Optimisation par l'essaim de particulaire

L'optimisation par Essaim de Particules (OEP) a été proposée par *Kennedy et Eberhart* en 1995 [119]. Cette méthode est inspirée du comportement social des animaux évoluant en essaim. L'exemple le plus souvent utilisé est le comportement des bancs de poissons [120], [121]. En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors qu'individuellement chaque individu a une intelligence limitée et une connaissance seulement locale de sa situation dans l'essaim. Un individu de l'essaim n'a pour connaissance que la position et la vitesse de ses plus proches voisins. Chaque individu utilise donc, non seulement, sa propre mémoire, mais aussi l'information locale sur ses plus proches voisins pour décider de son propre déplacement. Des règles simples, telles que « aller à la même vitesse que les autres », se déplacer dans la même direction ou encore « rester proche de ses voisins » sont des exemples de comportements qui suffisent à maintenir la cohésion de l'essaim, et qui permettent la mise en œuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs. L'intelligence globale de l'essaim est donc la conséquence directe des interactions locales entre les différentes particules de l'essaim. La performance du système entier est supérieure à la somme des performances de ses parties.

Kennedy et Eberhart se sont inspirés de ces comportements socio-psychologiques pour créer l'OEP. Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, survole l'espace de recherche, en quête de l'optimum global.

Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes [1]:

- Une composante physique : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement,
- Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée,
- Une composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

Dans le cas d'un problème d'optimisation, la qualité d'un site de l'espace de recherche est déterminée par la valeur de la fonction objective en ce point. La figure IV.12, illustre la stratégie de déplacement d'une particule [1], [19].

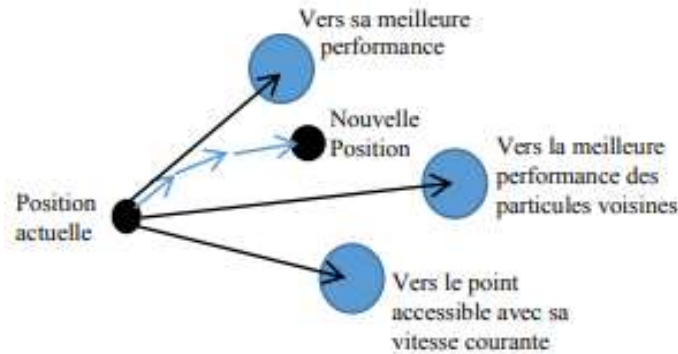


Figure IV.12: Déplacement d'une particule

Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $X_i = (x_{i1}; x_{i2}; \dots; x_{iD})$ et par son vecteur vitesse $V_i = (v_{i1}; v_{i2}; \dots; v_{iD})$. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $P_i = (p_{i1}; p_{i2}; \dots; p_{iD})$. La meilleure position atteinte par toutes les particules de l'essaim est notée $g = (g_1; g_2; \dots; g_D)$. Au temps t , le vecteur de vitesse est calculé à partir de (IV.7) [1].

$$v_{ij}(t) = w \cdot v_{ij}(t-1) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{ij}(t-1) - x_{ij}(t-1)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_j(t-1) - x_{ij}(t-1)) \quad (IV.7)$$

Avec : $j \in \{1, \dots, D\}$

Où (w) est en général une constante appelée, coefficient d'inertie, (c_1 et c_2) sont deux constantes, appelées coefficients d'accélération, et (r_1 et r_2) sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0,1]$ à chaque itération et pour chaque dimension [1].

$(w \cdot v_{ij})(t-1)$ correspond à la composante physique du déplacement. Le paramètre w contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur. Il est à noter que, dans certaines applications, le paramètre w peut être variable [121], [122], $C_1 \cdot r_1 \cdot (p_{ij}(t-1) - x_{ij}(t-1))$ correspond à la composante cognitive du déplacement. (C_1) contrôle le comportement cognitif de la particule.

$C_2 \cdot r_2 \cdot (g_j(t-1) - x_{ij}(t-1))$ correspond à la composante sociale du déplacement. (C_2) contrôle l'aptitude sociale de la particule.

La combinaison des paramètres (w , c_1 et c_2) permet de régler la balance entre les phases diversification et intensification du processus de recherche [122], [123]. Il est à noter que le terme vitesse est ici abusif car les vecteurs (v_i) ne sont pas homogènes à une vitesse. Il serait

plus approprié de parler de « direction de déplacement ». Cependant, pour respecter l'analogie avec le monde animalier, les auteurs ont préféré utiliser le terme « vitesse ». La position au temps (t) de la particule (i) est alors définie par (IV.8) [1], [124], [125], [126].

$$x_{ij}(t) = x_{ij}(t - 1) + v_{ij}(t), j \in \{1, \dots, D\} \quad (IV.8)$$

IV.3.1.1.1. Algorithmes de base

L'OEP est un algorithme à population, il commence par une initialisation aléatoire de l'essaim dans l'espace de recherche. A chaque itération de l'algorithme, chaque particule est déplacée suivant (IV.7) et (IV.8). Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées [1]. Les (p_i) ainsi que (g_i) sont alors mis à jour. Cette procédure est résumée par l'Algorithme ci-après [124]. N est le nombre de particules de l'essaim. Le critère d'arrêt peut être différent suivant le problème posé. Si l'optimum global est connu a priori, on peut définir une erreur acceptable " comme critère d'arrêt. Sinon, il est commun de fixer un nombre maximum d'évaluations de la fonction objectif ou un nombre maximum d'itérations.

Optimisation par l'algorithme essaim de particule

Initialisation aléatoire des positions et des vitesses de chaque particule

Pour chaque particule $i, \vec{p}_i = \vec{x}_i$

Tant que le critère n'est pas atteint faire

 Pour $i = 1$ à N faire

 Déplacement de la particule à l'aide de (IV.7) et (IV.8)

 Evaluation des positions

 Si $f(\vec{x}_i) < f(\vec{p}_i)$

$\vec{x}_i = \vec{p}_i$

 Fin si

 Si $f(\vec{p}_i) < f(\vec{g})$

$\vec{g} = \vec{p}_i$

 Fin Pour

 Fin Tant que

a. Confinement des particules

Il est possible que le déplacement d'une particule la conduise à sortir de l'espace de recherche. Dans ce cas, on peut assister à une amplification des rétroactions positives, qui conduit à une divergence de système. Pour s'affranchir de ce problème, on peut introduire un nouveau paramètre V_{max} , qui va permettre de contrôler l'explosion du système [125]. Une étude sur le comportement de l'OEP suivant les valeurs de V_{max} est disponible dans [126]. De plus, une stratégie de confinement des particules peut être introduite. Une telle stratégie permet de ramener une particule sortie de l'espace de recherche à l'intérieur de celui-ci. Plusieurs méthodes peuvent être alors employées [1]:

- La particule est laissée à l'extérieur de l'espace de recherche, mais on n'évalue pas sa fonction objective. Ainsi, elle ne pourra pas attirer les autres particules en dehors de l'espace de recherche,

- La particule est stoppée à la frontière et les composantes correspondantes de la vitesse sont annulées,
- La particule « rebondit » sur la frontière. La particule est stoppée sur la frontière, mais les composantes correspondantes de la vitesse sont multipliées par un coefficient α tiré aléatoirement dans l'intervalle $[-1,0]$.

b. Graphes d'influence

Si l'on se réfère à la version basique de l'OEP résumée par l'algorithme décrit, la meilleure particule g est choisie à partir de la population entière. Le graphe d'information est donc complètement connecté (voire figure IV.13). On est ici en présence d'une topologie statique d'information, car les liens d'information entre les particules sont définis une fois pour toutes [1].

De même, *Eberhart* dans [126] a défini une version dite « locale » de l'OEP, qui utilise aussi un graphe d'information statique. Cette version utilise un graphe d'information circulaire. Les particules de l'essaim sont virtuellement disposées en cercle et numérotées séquentiellement à partir de 1 en parcourant le cercle. La particule n'est donc plus informée par toutes les particules de l'essaim, mais par elle-même et ses deux voisins. Bien qu'elle converge moins rapidement que la version globale, la version locale de l'OEP donne de meilleurs résultats, car elle est moins sujette à l'attraction par des minima locaux [127]. La Figure IV.13, illustre la différence entre un graphe complètement connecté et un graphe circulaire.

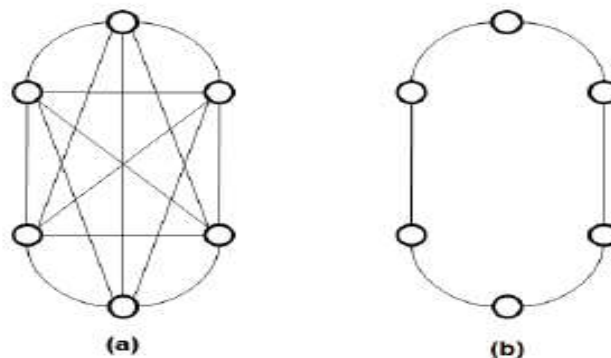


Figure IV.13: Graphe d'influence d'un essaim de particules. (a) Graphe complètement connecté, (b) Graphe circulaire.

De nombreuses autres topologies ont été testées. Parmi celles-ci, on peut retenir celles inspirées de modèles socio-psychologiques [128] ou celles incluant des stratégies petit-monde [129]. Des résultats d'OEP utilisant différentes topologies sont disponibles dans [127], [128], [129]. L'information importante qui ressort de ces résultats est qu'aucune topologie n'est meilleure que les autres, dans le sens où il n'y a aucune topologie qui donne de meilleurs résultats que toutes les autres sur un large panel de problèmes. A l'inverse des topologies statiques, il existe aussi des topologies dynamiques. Dans ce cas, les liens d'information entre les particules sont modifiés à chaque pas de temps.

Par exemple, dans [127], une stratégie globale favorisant une convergence rapide est combinée à une stratégie locale, qui favorise la phase de diversification. L'algorithme débute avec une topologie circulaire classique (2-voisinage) puis, au fur et à mesure du traitement, la taille des voisinages est augmentée jusqu'à obtenir un graphe complètement connecté. L'idée est de combiner les avantages des deux stratégies pour améliorer les résultats de l'OEP. De même, d'autres exemples de topologies aléatoires sont disponibles dans [128], [129]. Comme dans le cas des topologies statiques, les résultats ne permettent pas de dégager une hiérarchie claire.

C. Facteur de constriction

L'étude de la dynamique des particules au sein de l'essaim a conduit à la recherche de solutions pour éviter la divergence de l'algorithme. Dans les paragraphes précédents, on a vu en quoi l'introduction du paramètre ' V_{max} ' peut limiter la divergence des particules. De nombreuses études sur la dynamique ont été publiées [125]. Toutes ces études s'attachent à étudier dans quelle situation une convergence de l'essaim est assurée.

Dans [129], il a été démontré qu'une bonne convergence peut être assurée en rendant dépendants les paramètres w , c_1 et c_2 . L'utilisation d'un facteur de constriction permet de prévenir l'explosion de l'essaim, d'assurer la convergence, mais aussi de s'affranchir de la définition arbitraire d'un paramètre V_{max} . L'équation v_{ij} devient alors :

$$v_{ij}(t + 1) = x \left(v_{ij}(t) + \phi_1 \cdot r_1 \cdot (p_{ij} - x_{ij}(t)) + \phi_2 \cdot r_2 \cdot (g_j - x_{ij}(t)) \right), j \in \{1, \dots, D\} \quad (IV.9)$$

Avec :
$$x = \frac{2}{\phi - 2 + \sqrt{\phi^2 - 4\phi}}, \phi = \phi_1 + \phi_2, \phi > 4$$

On remarque que l'OEP avec coefficient de constriction est équivalente à l'OEP originale avec $x \leftrightarrow w, c_1 \leftrightarrow x\phi_1$ et $c_2 \leftrightarrow x\phi_2$

Dans [129], de nombreux tests sont menés pour déterminer les valeurs optimales de ϕ_1 et ϕ_2 . Dans la majorité des cas, on utilise $\phi = 4,1$ et $\phi_1 = \phi_2$; ce qui donne un coefficient multiplicatif approximativement égal à 0.7298.

La définition du paramètre ϕ permet de contrôler le système, afin qu'il présente les caractéristiques suivantes :

- Le système converge vers un état d'équilibre,
- Plusieurs régions de l'espace de recherche sont explorées, tout en évitant une convergence prématurée.

Bien que le système converge avec certitude vers un état d'équilibre, cependant, ce n'est pas certain que l'algorithme converge vers l'optimum global. Il est à noter que l'OEP avec un facteur de constriction n'est pas le seul algorithme d'OEP garantissant la convergence vers un état d'équilibre. La définition du facteur de constriction permet au système de converger, sans avoir à définir un paramètre V_{max} . Cependant, il a été montré dans [127], qu'il est bénéfique de définir un paramètre V_{max} . Cette étude amène à définir pour chaque dimension i , $V_{max,i}$ égal à $X_{max,i}$, qui définit la taille de l'espace de recherche sur la dimension i . Cette version de l'OEP a été adoptée comme la version canonique de celui-ci.

IV.3.1.2. Optimisation par génétique

L'optimisation par génétique est une autre méta-heuristique basée sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. C'est *J. Halland* [130], qui a posé les fondements théoriques des algorithmes génétiques, passant du paradigme darwinien de l'évolution naturelle à celui de l'évolution artificielle [19].

La figure IV.14, représente les concepts de base d'un algorithme génétique [131], [132].

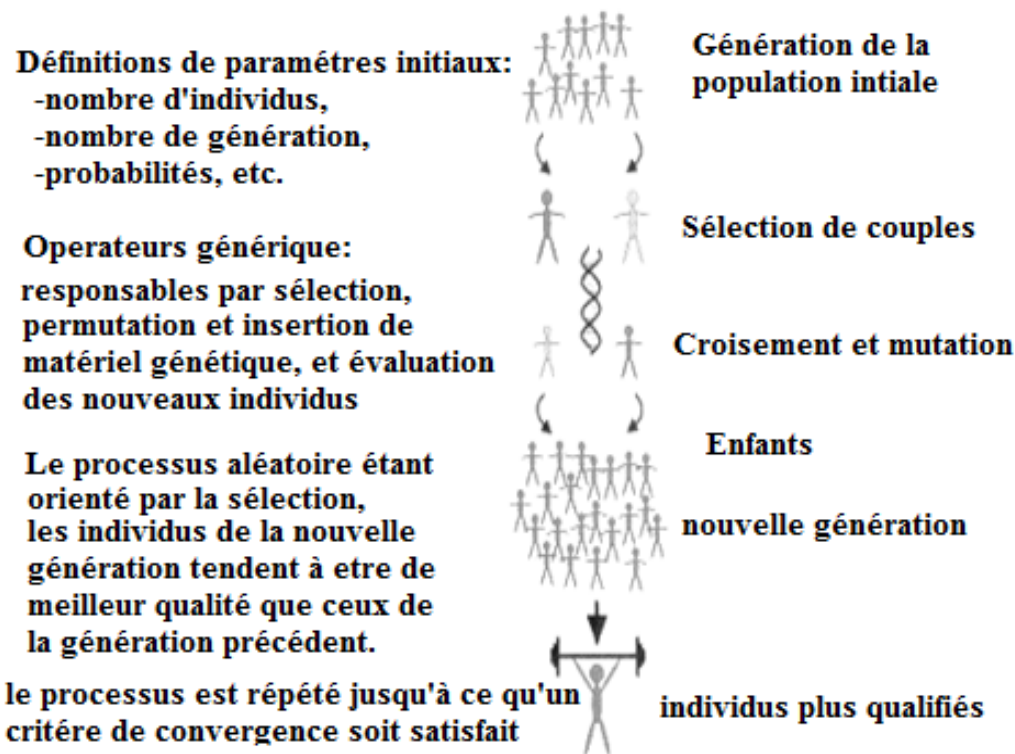


Figure IV.14: Concepts de base d'un algorithme génétique.

Comme montrée dans cette dernière figure, les processus de base de l'algorithme génétique comportent quatre opérations simples qui ne sont pas plus compliquées que des opérations algébriques, ces opérations présentées en détail comme suit [132]:

- 1- **Opérateur de génération de la population initiale** : Les algorithmes génétiques nécessitent une population initiale pour commencer le processus de recherche. La méthode appliquée fait générer aléatoirement un ensemble de solutions dans les contraintes proposées pour la population entière.
- 2- **Opérateur de Sélection** : Après la génération de la population initiale, la performance de chaque individu est évaluée : la performance mesure la qualité de la solution probable pour comparer les différentes solutions. Nous avons pris la valeur associée à la fonction objective comme indice de performance. Après le calcul de cet indice pour chaque individu, le mécanisme de sélection est appliqué pour copier les individus sélectionnés. Les individus ayant des performances élevées ont plus de probabilité d'être reproduits dans la génération suivante.
- 3- **Opérateur de Croisement** : Après l'étape de sélection, le croisement est appliqué. Dans cette étape, les individus sont regroupés aléatoirement par paire (parents). Le croisement se fait ensuite pour créer les enfants avec une probabilité P_c , sinon les parents ne changent pas. Cet opérateur sert à explorer des nouvelles régions dans l'espace de recherche.
- 4- **Opérateur de Mutation** : Pour introduire une certaine diversification dans la population et éviter ainsi une convergence prématurée en un optimum local, l'opérateur de mutation est appliqué. Les bits subissent la mutation sont choisis aléatoirement avec une probabilité P_m [1], [19].

IV.3.1.2.1. Algorithmes de base

En exploitant les définitions de différentes opérations au-dessus, l'algorithme génétique qui a été développé à l'origine par Holland [130], [131] peut résumer comme suit :

Optimisation par l'algorithme génétique
<pre> //initialisation du temps Pour t=0 //initialization aléatoire de la population init Population (P,t) //évaluation de la fitness individuelle Evaluate (P,t) //un critère d'arrêt dépendant du temps, de la fitness Pour t:=t+1 Q:=sélection (P,t) recombinaison(Q) mutation(Q) évaluer (Q,t) P:=survivants (P,Q,t) Fin Pour </pre>

IV.3.1.3. Optimisation par colonies de fourmis

Les algorithmes de colonies de fourmis (Ant colony optimization, ACO) forment une classe des méta-heuristiques récemment proposée pour des problèmes d'optimisation difficiles. Le premier algorithme d'optimisation par colonies de fourmis (aussi appelé Ant System AS) a été proposé par *Dorigo* [133], [134] vers le début des années quatre-vingt-dix, il a été développé spécialement pour résoudre le problème du voyageur de commerce. Depuis, cette approche a connu des variantes importantes et le nombre de travaux publiés augmente d'une année à l'autre, toute la théorie et les travaux récents les plus intéressants sont dans [135, 136] et [137].

Le principe de la méthode provient analogiquement avec les comportements collectifs des insectes, les algorithmes de colonies de fourmis sont nés d'une constatation simple : les insectes sociaux, et en particulier les fourmis, résolvent naturellement des problèmes complexes. Un tel comportement est possible car les fourmis communiquent entre elles de manière indirecte par le dépôt de substances chimiques, appelées phéromones (figure IV.15), sur le sol et le suivi de pistes observés dans les colonies de fourmis et construisent ainsi une solution à un problème en tenant compte de leur expérience collective. Au fait, elles adoptent pour la recherche de la solution la notion du **plus court chemin** [1], [138].

D'une manière simplifiée, les fourmis commencent par se déplacer au hasard. Puis, lorsqu'elles trouvent de la nourriture, elles retournent vers leur colonie, en marquant leur chemin à l'aide de phéromone [1]. Si d'autres fourmis rencontrent ce chemin, il y a de fortes chances qu'elles arrêtent leurs déplacements aléatoires et qu'elles rejoignent le chemin marqué, en renforçant le marquage à leur retour, s'il mène bien vers la nourriture. Par conséquent, le chemin le plus court sera davantage parcouru, et donc plus renforcé et plus attractif. Par conséquent, le nombre de fourmis suivant cette trajectoire augmente. Au fil du temps, la quantité de phéromones déposée sur le plus long chemin diminue et finit par disparaître. Toutes les fourmis suivent alors le chemin le plus court [138].

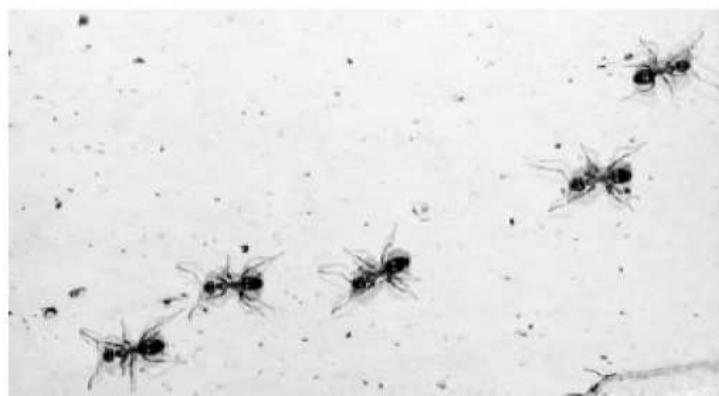


Figure IV.15: Des fourmis suivant une piste de phéromone.

En effet, comme illustré sur la figure IV.16, les fourmis le plus rapidement arrivées au nid, après avoir visité la source de nourriture, sont celles qui empruntent les deux branches les plus courtes. Ainsi, la quantité de phéromone présente sur le plus court trajet est légèrement plus importante que celle présente sur le chemin le plus long. Or, une piste présentant une plus grande concentration en phéromones est plus attirante pour les fourmis, elle a une probabilité plus grande d'être empruntée. Alors, La piste courte va être plus renforcée que la longue, et, à terme, sera choisie par la grande majorité des fourmis. Mais à tout moment, la probabilité existe qu'un individu quitte la trace puis se déplace plus ou moins au hasard. À cette occasion, l'individu «égaré» peut éventuellement découvrir une source de nourriture beaucoup plus riche que celle qu'exploitent ses sœurs. En déposant alors une trace de phéromones plus intense encore, elle va les attirer vers cette nouvelle ressource, formant une nouvelle boucle de rétroaction positive [1], [139], [140].



Figure IV.16: Expérience de sélection des branches les plus courtes par une C.F

IV.3.1.3.1. Algorithme de base

Comme nous avons pu le constater auparavant, l'algorithme de colonies de fourmis a été principalement utilisé pour produire des solutions quasi-optimales au problème du voyageur de commerce, puis plus généralement aux problèmes d'optimisation combinatoire. Récemment, son emploi se généralise à plusieurs domaines, depuis l'optimisation continue jusqu'à la classification, ou encore le traitement d'image [138].

Dans l'algorithme AS, les fourmis sont placées sur les sommets du graphe (sur chaque ville). Elles se déplacent d'un sommet à l'autre en empruntant les arrêtes du graphe [1], [140]. À chaque itération t ($1 < t < t_{max}$), chaque fourmi k ($k = 1, \dots, m$) parcourt le graphe et construit un trajet complet.

Pour chaque fourmi, le trajet entre une ville i et une ville j dépend de :

- La liste des villes déjà visitées, qui définit les mouvements possibles à chaque pas, quand la fourmi ' k ' est sur la ville ' j ' : J^k_i

- L'inverse de la distance entre les villes η_{ij} / d_{ij} : appelée **visibilité**. Cette information statique est utilisée pour diriger le choix des fourmis vers des villes proches, et éviter les villes trop lointaines;
- La quantité de phéromone déposée sur l'arête reliant les deux villes, appelée l'intensité de la piste τ_{ij} . Ce paramètre définit l'attractivité d'une partie du trajet global et change à chaque passage d'une fourmi. C'est en quelque sorte une mémoire globale du système, qui évolue par apprentissage.

La règle de déplacement est la suivante [1]:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha \cdot (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} (\tau_{il}(t))^\alpha \cdot (\eta_{il})^\beta} & \text{si } j \in J_i^k \\ 0 & \text{si } j \notin J_i^k \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

Où α et β deux paramètres contrôlant l'importance relative de l'intensité de la piste, $\tau_{ij}(t)$, et de la visibilité, η_{ij} . Avec $\alpha = 0$, seule la visibilité de la ville est prise en compte; la ville la plus proche est donc choisie à chaque pas. Au contraire, avec $\beta = 0$, seules les pistes de phéromone sont utilisées. Pour éviter une sélection trop rapide d'un trajet, un compromis entre ces deux paramètres, jouant sur les comportements de diversification et d'intensification est nécessaire [1].

Après un tour complet, chaque fourmi laisse une certaine quantité de phéromones $\Delta\tau_{ij}(t)$ sur l'ensemble de son parcours, quantité qui dépend de la qualité de la solution trouvée :

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)} & \text{si } (i,j) \in T^k(t) \\ 0 & \text{si } (i,j) \notin T^k(t) \end{cases} \quad (\text{IV.11})$$

Où $T^k(t)$ est le trajet effectué par la fourmi k à l'itération t , $L^k(t)$ la longueur du tour et (Q) un paramètre fixé. L'algorithme ne serait pas complet sans le processus d'évaporation des pistes de phéromone. En effet, pour éviter d'être piégé dans des solutions sous-optimales, il est nécessaire de permettre au système "d'oublier" les mauvaises solutions. Donc, on contrebalance l'additivité des pistes par une décroissance constante des valeurs des arêtes à chaque itération. La règle de mise à jour des pistes est donc [1]:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (\text{IV.12})$$

Avec :

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (\text{IV.13})$$

m est le nombre de fourmis. La quantité initiale de phéromone sur les arêtes est une distribution uniforme d'une petite quantité $\tau_0 > 0$. La figure IV.17, présente un exemple simplifié de problème du voyageur de commerce optimisé par un algorithme AS dont le pseudo code est présenté sur l'algorithme au-dessous [1]. Dans la figure IV.17, les points représentent les villes

et l'épaisseur des arêtes représente la quantité de phéromone déposée: (a) exemple de trajet construit par une fourmi, (b) au début du calcul, tous les chemins sont explorés, (c) le chemin le plus court est plus renforcé que les autres, (d) l'évaporation permet d'éliminer les moins bonnes solutions. [139].

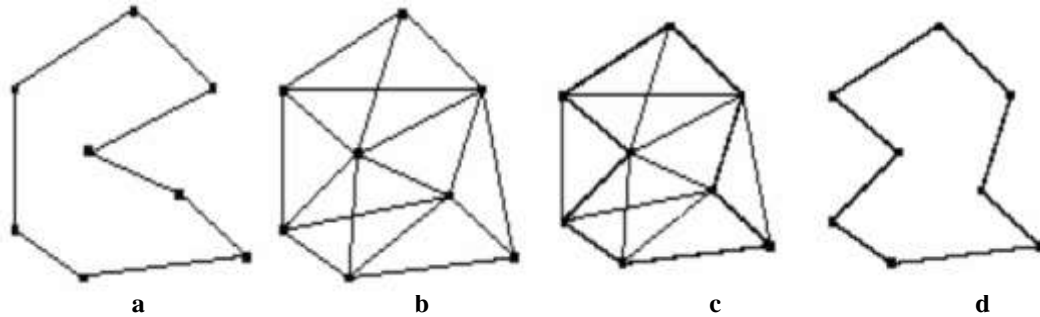


Figure IV.17: Le problème du voyageur de commerce optimisé par l'algorithme AS.

Les étapes de base de l'algorithme colonies de fourmis (Ant System) sont comme suit [1], [138]:

Optimisation par l'algorithme de Colonies de fourmis

Pour $t=1, \dots, tmax$

Pour chaque fourmi $k = 1, \dots, m$

 Choisir une ville au hasard

 Pour chaque ville non visitée i

 Choisir une ville j , dans la liste des villes restantes, selon la formule (IV.10)

 Fin Pour

 Déposer une piste $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ sur le trajet $T^k(t)$ conformément à l'équation (IV.11)

 Fin Pour

 Évaporer les pistes selon la formule (IV.12)

 Fin Pour

En plus des règles régissant le comportement des fourmis, un autre processus majeur a cours : l'évaporation des pistes de phéromone. En effet, à chaque itération, la valeur des pistes de phéromone est diminuée. Le but de cette diminution est d'éviter une convergence trop rapide et le piégeage de l'algorithme dans des minimums locaux, en favorisant l'exploration de nouvelles régions.

a. Phéromones et mémoire

L'utilisation de la stigmergie est cruciale pour les algorithmes de colonies de fourmis. Le choix de la méthode d'implémentation des pistes de phéromone est donc important pour obtenir les meilleurs résultats. Ce choix est en grande partie lié aux possibilités de représentation de l'espace de recherche, chaque représentation pouvant apporter une façon différente d'implémenter les pistes. Par exemple, pour le problème du voyageur de commerce, une implémentation efficace, moins efficace en pratique, consiste à considérer τ_{ij} comme une représentation de l'intérêt de visiter i en tant que $j^{\text{ème}}$ ville [1].

En effet, les pistes de phéromone décrivent à chaque pas l'état de la recherche de la solution par le système, les agents modifient la façon dont le problème va être représenté et perçu par les autres agents. Cette information est partagée par le biais des modifications de l'environnement des fourmis, par une forme de communication indirecte : **la stigmergie**.

L'information est donc stockée un certain temps dans le système, ce qui peut être considérée comme une forme de mémoire efficace consiste à utiliser une piste τ_{ij} entre deux villes '*i*' et '*j*' comme une représentation de l'intérêt de visiter la ville '*i*' après la ville '*j*' [1].

b. Intensification/diversification

Le problème de l'emploi relatif de processus de diversification et d'intensification est un problème extrêmement courant dans la conception et l'utilisation de méta-heuristique. Par intensification, on entend l'exploitation de l'information rassemblée par le système à un moment donné. La diversification est au contraire l'exploration de régions de l'espace de recherche imparfaitement prises en compte. Bien souvent, il s'agit de choisir où et quand "injecter de l'aléatoire" dans le système (diversification) et/ou améliorer une solution (intensification) [1].

Dans les algorithmes de type ACO, comme dans la plupart des cas, il existe plusieurs façons de gérer l'emploi de ces deux facettes des méta-heuristiques d'optimisation. La plus évidente passe par le réglage via les deux paramètres α et β , qui déterminent l'influence relative des pistes de phéromone et de l'information heuristique. Plus la valeur de α sera élevée, plus l'intensification sera importante, car plus les pistes auront une influence sur le choix des fourmis.

À l'inverse, plus α sera faible, plus la diversification sera forte, car les fourmis éviteront les pistes. Le paramètre β agit de façon similaire. On doit donc gérer à la fois les deux paramètres pour régler ces aspects.

Le choix diversification/intensification peut s'effectuer de manière statique avant le lancement de l'algorithme, en utilisant une connaissance a priori du problème, ou de manière dynamique, en laissant le système décider du meilleur réglage. Deux approches sont possibles : un réglage par les paramètres ou l'introduction de nouveaux processus. Dans ces algorithmes fondés en grande partie sur l'utilisation de l'auto-organisation, ces deux approches peuvent être équivalentes, un changement de paramètre pouvant induire un comportement complètement différent du système, au niveau global [1].

IV.3.1.3.2. Paramètres optimaux des algorithmes de colonies de fourmis

Utilisant des valeurs convenables pour les paramètres des algorithmes de colonies de fourmis est très important. Des valeurs mal choisies vont certainement donner une solution sous-optimale ou décroître la vitesse du processus de découverte de la solution optimale [1], [141]. *Dorigo* et *Stutzle* dans [141], [142] ont suggéré que souvent les valeurs exactes des paramètres dépendent du problème à résoudre. Partout dans la littérature, on peut trouver beaucoup de valeurs différentes utilisées dans beaucoup de variantes de l'algorithme de la colonie de fourmis original.

Pour résoudre donc un problème d'optimisation, il faut choisir les huit paramètres de l'algorithme de colonie de fourmis. La moitié de ces paramètres peut être gardés constants (tableau IV.3).

Tableau IV.3 : Les paramètres standard de l'algorithme ACO

Les paramètres constants		Gammes des paramètres variables	
Paramètre	Valeur constante	Paramètre	Valeur constante
α	1	β	$0 < \beta < 15$
γ	0	ρ	$0 < \rho < 1$
τ_0	$1/(n * \text{best_greedy_length})$	q_0	$0 < q_0 < 1$
Num Ants	N=nombre de cités à visiter	Max_cycles	$10 \leq \text{Max_cycles} \leq 1000$

IV.3.1.4. Méthodes d'optimisation hybride

Les méthodes d'optimisation hybrides sont proposées pour résoudre des problèmes d'optimisation et aussi à donner la notion de l'hybridation. L'hybridation est une tendance observée dans de nombreux travaux réalisés sur les méta heuristiques ces dix dernières années. Elle permet de tirer profit des avantages cumulés de différents méta heuristiques, à tel point que les méta heuristiques que nous avons vu jusqu'à présent ne sont plus que des canevas, des points de départ, pour commencer à résoudre un problème d'optimisation. L'hybridation consiste à combiner les caractéristiques de deux méthodes différentes pour tirer les avantages des deux méthodes. Les origines des algorithmes hybrides des méta heuristiques reviennent aux travaux de Glover [138]. Chacun d'eux a introduit une méthode de descente simple pour améliorer une recherche évolutive. Mais à cette période, la plupart des chercheurs n'y accordait que peu d'intérêt. Actuellement, les méta heuristiques hybrides sont devenues plus populaires car les meilleurs résultats trouvés pour plusieurs problèmes d'optimisation combinatoires ont été obtenus avec des algorithmes hybrides telle que : la méthode hybride des algorithmes génétiques avec la méthode des essaims particulaires de Kao [143], ont préféré d'hybrider la méthode des essaims de particules avec l'algorithme de colonie de fourmis selon des stratégies bien pensées par *Shelokar* [144]. Pour notre cas, ont préféré d'hybrider la technique PSO en utilisant l'algorithme de l'essaim particulaire (PSO) programmation quadratique séquentielle (SQP) qui a été bien décrite par la suite.

IV.3.1.4.1. Hybridation de PSO _ SQP

Les méthodes SQP représentent l'état de l'art des méthodes de programmation non linéaire, cette méthode vous permet d'imiter de près la méthode de Newton pour une optimisation sous contrainte, exactement comme pour une optimisation sans contrainte [138]. La méthode hybride de PSO _ SQP consiste à exécuter séquentiellement les deux méthodes (PSO et SQP) de telle façon que les résultats de l'algorithme de l'essaim particulaire (PSO) servent de solutions initiales à la programmation quadratique séquentielle. Cette technique d'hybridation est simple, elle ne nécessite pas de modification des deux méthodes de résolution utilisées. Il suffit d'initialiser la programmation quadratique séquentielle à partir de la solution pré-calculée par l'algorithme de l'essaim de particule (PSO).

À chaque itération majeure, une approximation de la fonction hessienne de la fonction lagrangienne est effectuée à l'aide d'une méthode de mise à jour quasi-newtonienne. Ceci est ensuite utilisé pour générer un sous-problème de programmation quadratique (PQ) dont la solution est utilisée pour former un sens de recherche pour une procédure de recherche de ligne. L'idée principale est la formulation d'un sous-problème de PQ basé sur une approximation quadratique de la fonction lagrangienne. La méthode numérique nous permet de déterminer la population initiale du PSO [131], [138].

IV.4. Conclusion

Dans ce travail de recherche, le réglage par l'intelligence artificielle est introduit afin d'éliminer ou de réduire les problèmes produits par le régulateur classique en terme (dépassement, régime transitoire, temps de réponse, etc.). Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes techniques d'amélioration de performance de l'UPFC, les bases nécessaires à la compréhension des méthodes de commande intelligente en particulier la logique floue et les techniques d'optimisations à savoir le : PSO, AG, ACO et PSO hybride ont été également discutées d'une manière détaillée. Les méthodes intelligence artificielle, par leur efficacité, sont les moyens performants non seulement pour éliminer les effets négatifs des régulateurs classiques, mais aussi pour une meilleure restitution dans le réseau lorsqu'il y a des perturbations.

Finalement, et pour voir s'il est possible d'améliorer le fonctionnement de l'UPFC piloté par ces techniques en cas des défauts, le prochain chapitre représente la partie de validation de notre travail ou bien l'implémentation des méthodes expliqué au-dessus, il explique clairement le processus de contrôle de l'UPFC par ces méthodes et leur application à travers des essais de simulation tout en mettant l'accent sur le régulateur PI.

Chapitre V

*Simulations d'un UPFC doté des
régulateurs intelligents*

V.1. Introduction

Nous avons établi, dans les parties précédentes du chapitre IV, une étude théorique sur l'intelligence artificielle, comme nous l'avons pu constater tout le long du chapitre préalable le régulateur flou n'a pas besoin de modèle mathématique précis du système et peut fournir une réponse rapide pendant les fonctionnements dynamiques du réseau, car il adapte facilement une large gamme de changements dynamiques du système électrique [9], tandis que les méthodes d'optimisation utilisent des règles intelligentes pour parcourir l'espace des solutions, leur développement se fait à travers les méthodes par lesquelles l'homme essaye de copier la nature et de reproduire des modes de raisonnement et de comportement qui lui sont propres. Ces avantages nous permettent d'améliorer la performance de fonctionnement de l'UPFC dans les réseaux électriques [48].

Pour valider les lois des commandes proposé par rapport au réglage classique, le présent chapitre sera consacré à vérifier le fonctionnement de l'UPFC doté des contrôleurs intelligentes et le tester dans différentes situations où les réponses que nous allons obtenir seront comparées à celle du réglage classique par PI.

V.2. Résultat de simulation et discussion

Dans cette section, l'importance de l'application de l'intelligence artificielle dans le système de contrôle de l'UPFC est étudiée par simulation. La configuration des réseaux étudiés dans ce chapitre sont les mêmes réseaux que dans le chapitre III. Les deux tests 1, et 2 de Scénario 1 du chapitre III seront retenus une deuxième fois pour la simulation, ces deux tests constituent la base d'une analyse plus approfondie sur le contrôle d'UPFC.

Les premiers essais seront effectués sur le réseau multi machine 4 nœud (Figure III.1), ce test sert à valider les avantages de la logique floue et les méta-heuristiques dans l'amélioration des performances de réglage de l'UPFC. Ici, il faut noter qu'on applique trois algorithmes à savoir : le PSO, PSO hybride et AG) sur notre système.

Le deuxième test (figure III.15) est exploité pour vérifier l'importance de la logique floue et l'algorithme ACO sur la performance de fonctionnement de l'UPFC.

Les différents essais de simulation qui sera effectuée dans les deux tests systèmes, seront analysés et discutés comme suit:

V.2.2.1. Test d'application 1

V.2.2.1.1. Cas 01 : Fonctionnement de l'UPFC en mode contrôle du flux de puissance

L'analyse effectuée dans le Scénario 1 du chapitre III (Cas N°.1, contrôle du flux de puissance) a montré que l'onduleur série de l'UPFC permet de suivre la référence des puissances actives et réactives avec un dépassement important et un temps de réponse considérable dans le signal de réponse (le cas de réglage classique). Ici, Pour valider les lois des commandes intelligentes sur le contrôle de flux de puissance, on procède aux simulations avec différents types des contrôleurs intelligents appliqués à l'UPFC, la simulation sera effectuée dans les mêmes conditions du troisième chapitre. Nous rappelons ci-dessous dans le tableau V.1 les conditions (Essais de simulation) retenues dans cette simulation.

Tableau.V.1 : Variation de consigne de puissance en fonction de temps

Les conditions	Cas A		Cas B		Cas C	
	variation de la puissance active	variation de la puissance réactive	variation de la puissance active	variation de la puissance réactive	variation de la puissance active	variation de la puissance réactive
Valeurs P et Q	P1* = 8.7 pu si t < 0.25 s P1* = 10 pu si t > 0.25 s	Q = cte = -0.6 pu	P = cte = 8.7 pu	Q1* = -0.6 pu si t < 0.5 s Q1* = +0.7 pu si t > 0.5 s	P1* = 8.7 pu si t < 0.25 s P1* = 10 pu si t > 0.25 s	Q1* = -0.6 pu si t < 0.5 s Q1* = +0.7 pu si t > 0.5 s

Donc, les résultats obtenus seront analysés et discutés comme suit:

- Nous commençons avec l'analyse de réseau test on concédera les conditions de fonctionnement décrit ci-dessus, on applique la logique floue sur la commande de l'UPFC,
- Ensuite, nous présentons les résultats de simulation en méta-heuristiques,
- Enfin, une comparaison avec discussion bien détaillé entre les régulateurs utilisés sera abordée en rappelant les résultats du chapitre III (les résultats avec la régulation classique).

a. Résultats de simulation en logique floue (types Mamdani et Sugeno)

Dans les trois tests (A, B et C), les performances de l'UPFC avec le contrôleur flou (Mamdani et Sugeno) seront évaluées et nous comparons ses performances avec l'UPFC classique doté par un contrôleur PI. Dans les figures V.1 jusqu'au V.6 (les cas A, B et C), le comportement dynamique des puissances actives et réactives contrôlées en réponse aux changements de leurs valeurs de référence est présenté. Dans les graphes des résultats obtenus, les courbes en rouge représentent les consignes (références) et les courbes en bleu, noir, et vert représentent les réponses.

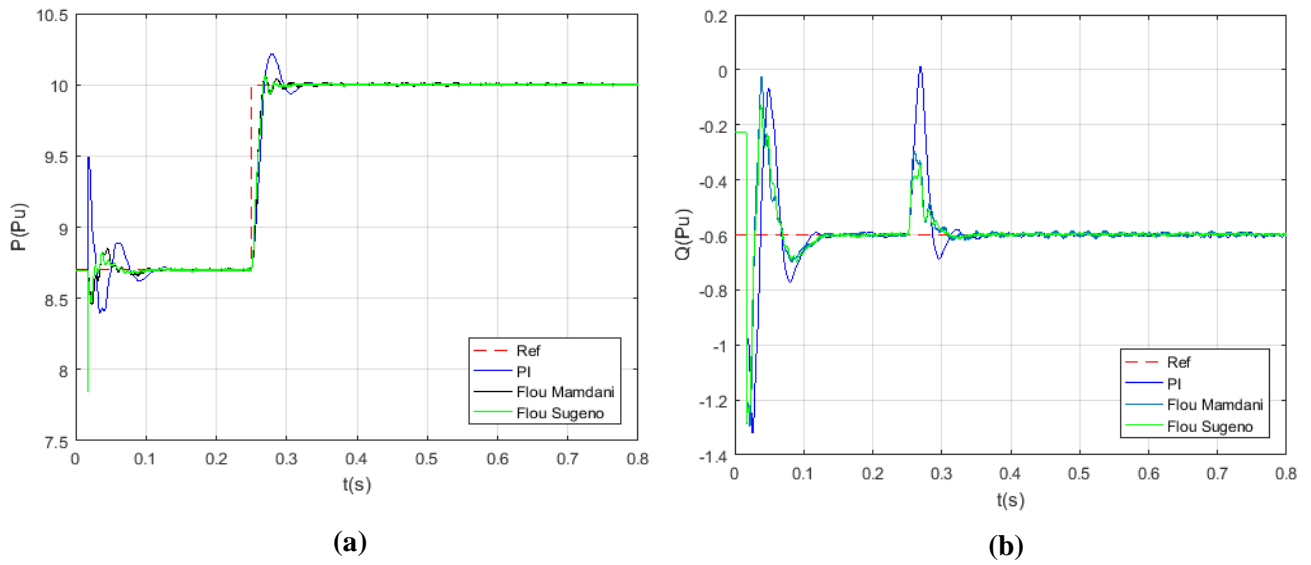


Figure V.1 : Contrôle de la puissance transité active (a) et réactive (b) par l'UPFC (Cas A)

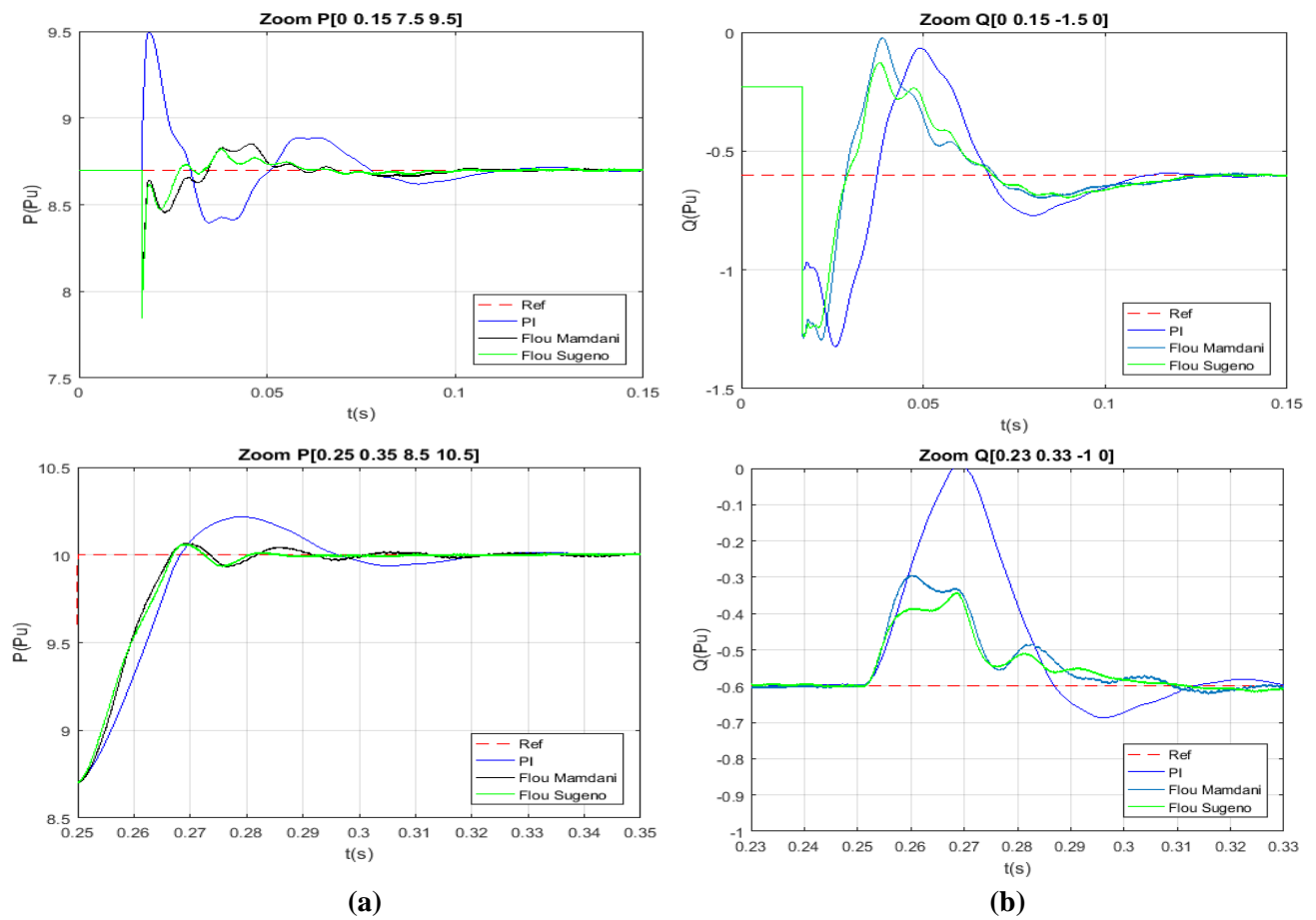
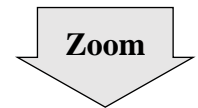


Figure V.2 : Figuration en zoom de variation de puissance active (a), et la puissance réactive (b)

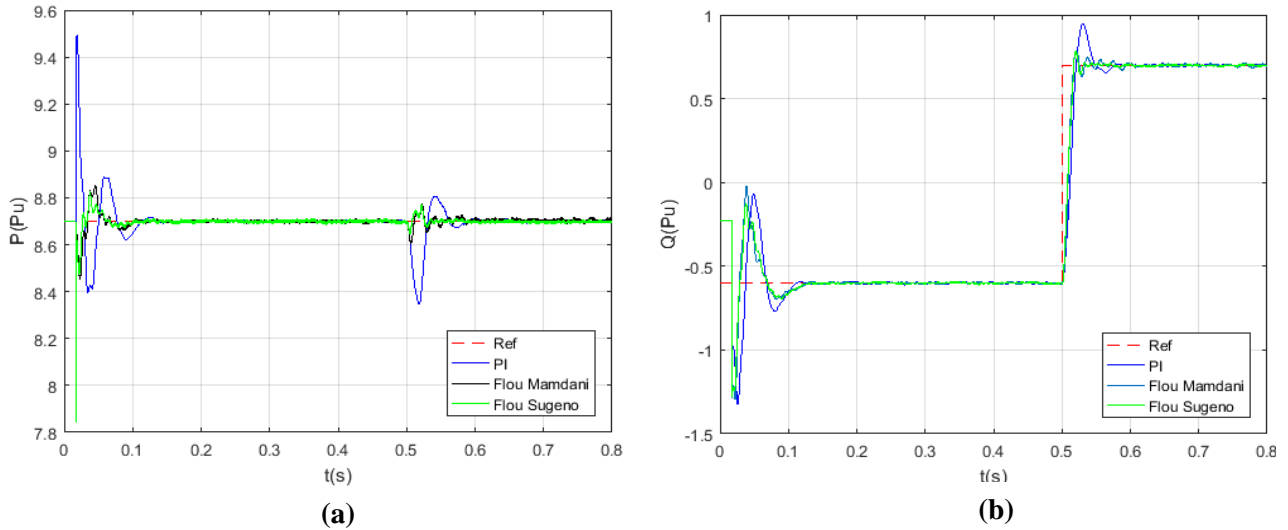


Figure V.3 : Contrôle de la puissance transité active (a) et réactive (b) par l'UPFC (Cas B)

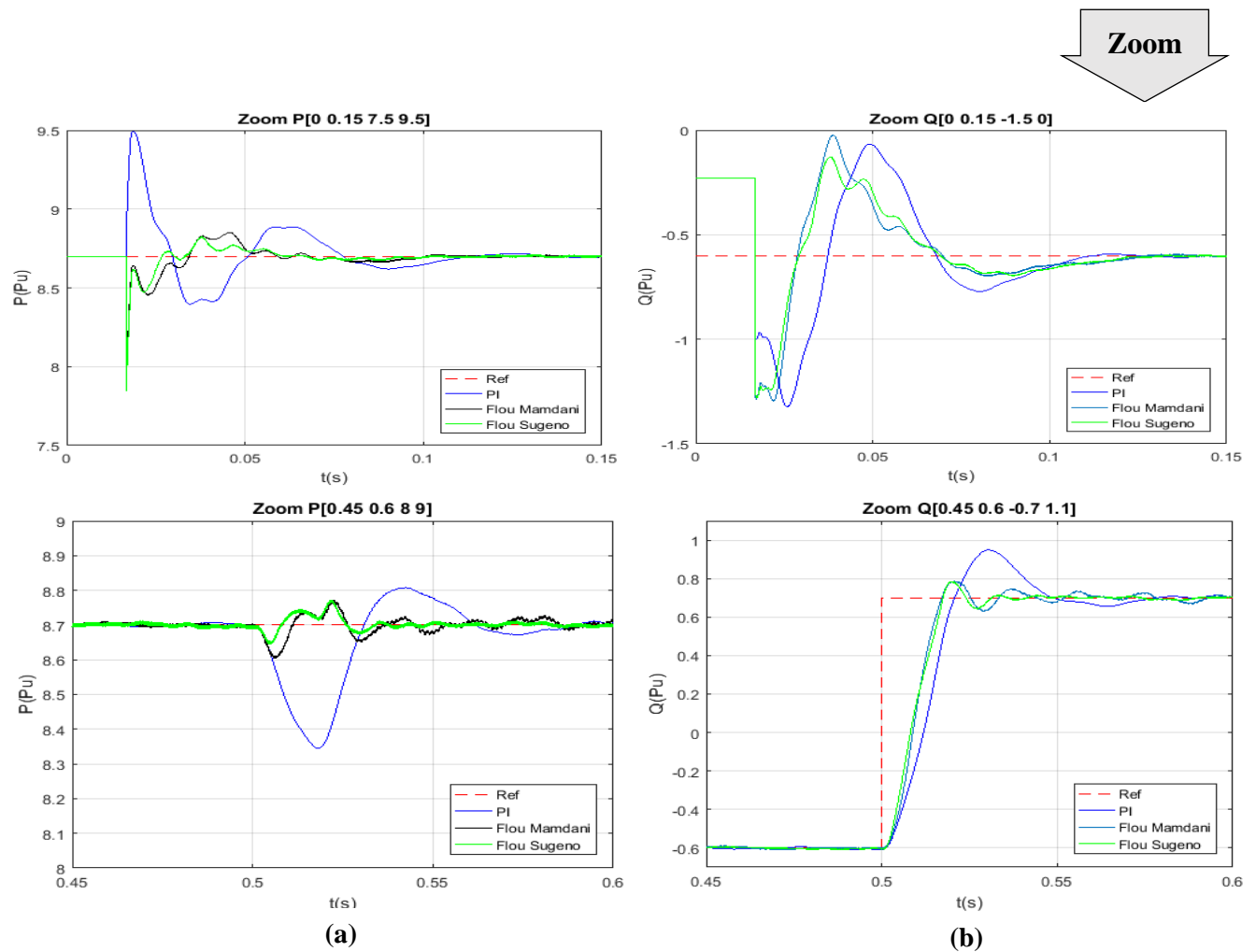


Figure V.4 : Figuration en zoom de variation de la puissance active (a), et la puissance réactive (b)

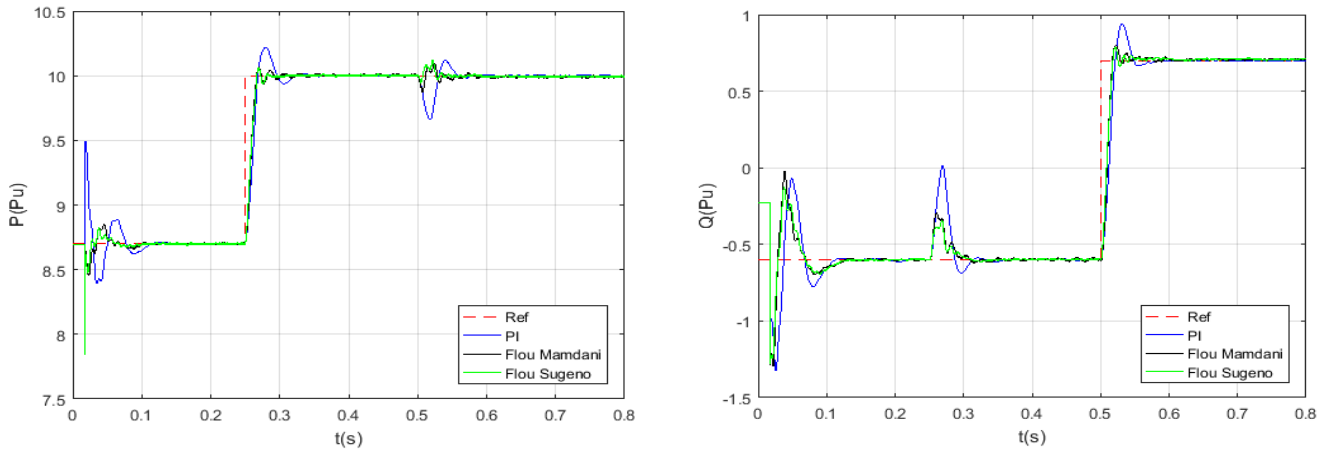


Figure V.5 : Contrôle de la puissance transité active (a) et réactive (b) par l'UPFC (Cas C)

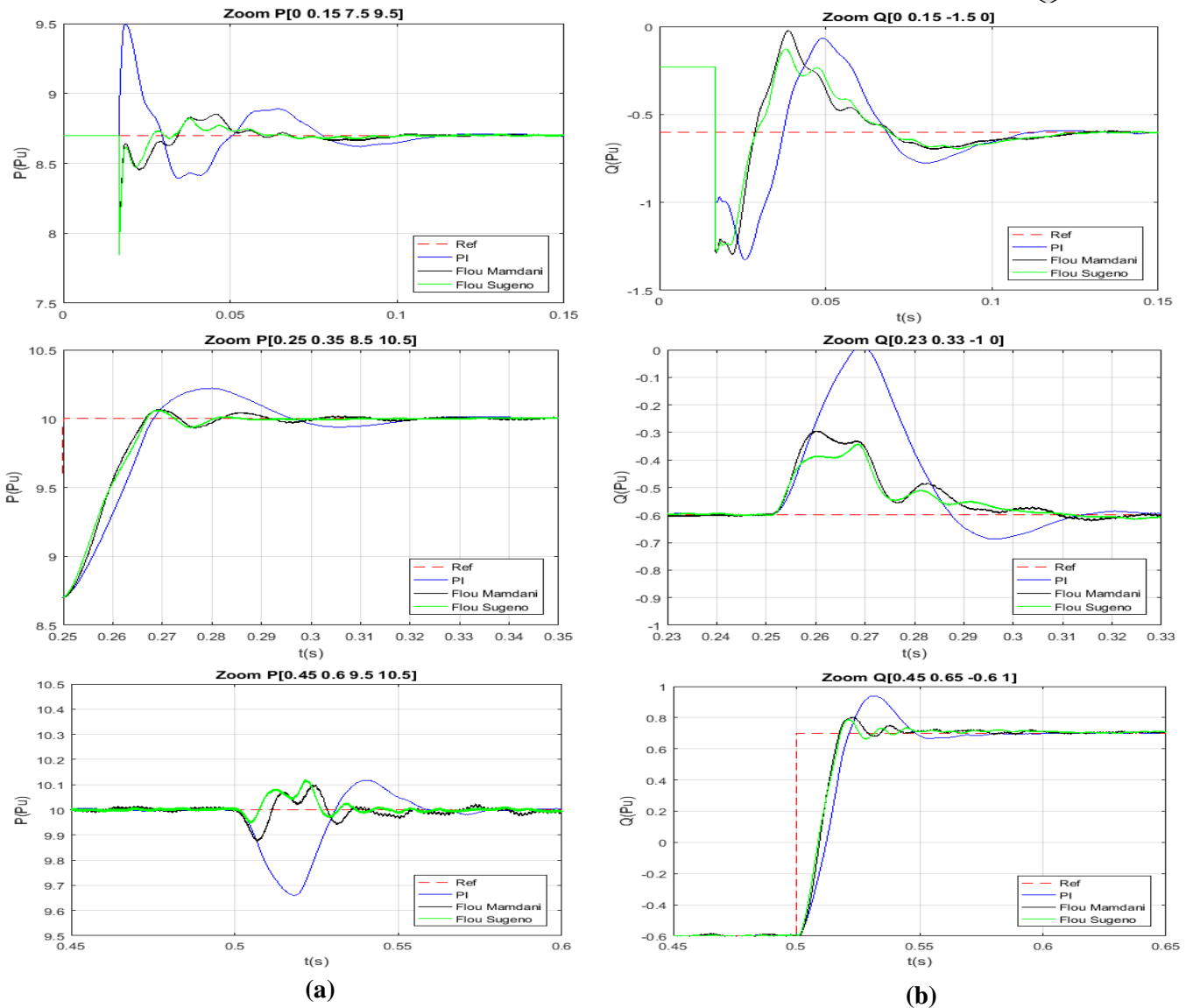
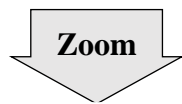


Figure V.6 : Figuration en zoom de variation de la puissance active (a), et la puissance réactive (b)

D'après les résultats, nous constatons que l'UPFC avec sa partie série (SSSC) contrôlée en utilisant la logique floue répond aux changements survenant dans le réseau et assure un suivi précis des signaux de référence avec dynamique améliorée que le régulateur PI classique. Comme illustrée dans les figures V.1 jusqu'au V.6, la variation des puissances selon leur référence se fait avec des petites perturbations pour chaque variation de consigne quand on utilise le réglage classique (courbe en vert.), ces petites variations seront près de la disparition quand la commande floue est utilisée (les courbes en bleu, et noir). Dans les mêmes figures on peut remarquer aussi une petite amélioration entre les deux régulateurs type flou (flou type Mamdani, et flou type Sugeno), nous constatons une dynamique améliorée où les dépassements sont réduits et les réponses sont un peu mieux quand on utilise le contrôle flou type Sugeno, à cause de l'efficacité de ce type de commande de garantir la continuité de la surface de sortie.

a. Résultats de simulation en méta-heuristiques

Dans ce cas, on se contente seulement de simuler la situation dans laquelle les deux puissances active et réactive changer au même essai, c'est-à-dire le cas C (le cas le plus fréquent).

Avant d'entamer à étudier les performances donné par les algorithmes d'optimisation développé, il serait préférable de présenter les paramètres de simulation de ces algorithmes, les paramètres de simulation des deux algorithmes représentés dans le tableau V.2.

Tableau. V.2 : Paramètre de simulation adoptée pour les deux méthodes GA et PSO

GA	PSO
Taille de la population=5	Fonction=particuleswarm
Max.N. de génération=10	Nombre de swarm=6
Sélection	Maximum d'itération=12
Croisement (CR)=0.8	Vélocité maximale= 4
Mutation= mutationadaptfeasible	Accélération (local best influence)= 2
Tolérance=1e-6	Accélération (global best influence)= 2

N.B : Il faut noter d'abord qu'on a choisi le contrôleur flou type Sugeno au lieu de contrôleur type Mamdani puisque le premier (FLC type Sugeno) marche bien avec les techniques d'optimisation, il permet d'optimiser et d'utiliser des techniques adaptatives. Donc, les résultats obtenus seront analysés et discutés comme suit :

⊕ Résultats de simulation avec un régulateur flou optimisé (Fuzzy_PSO)

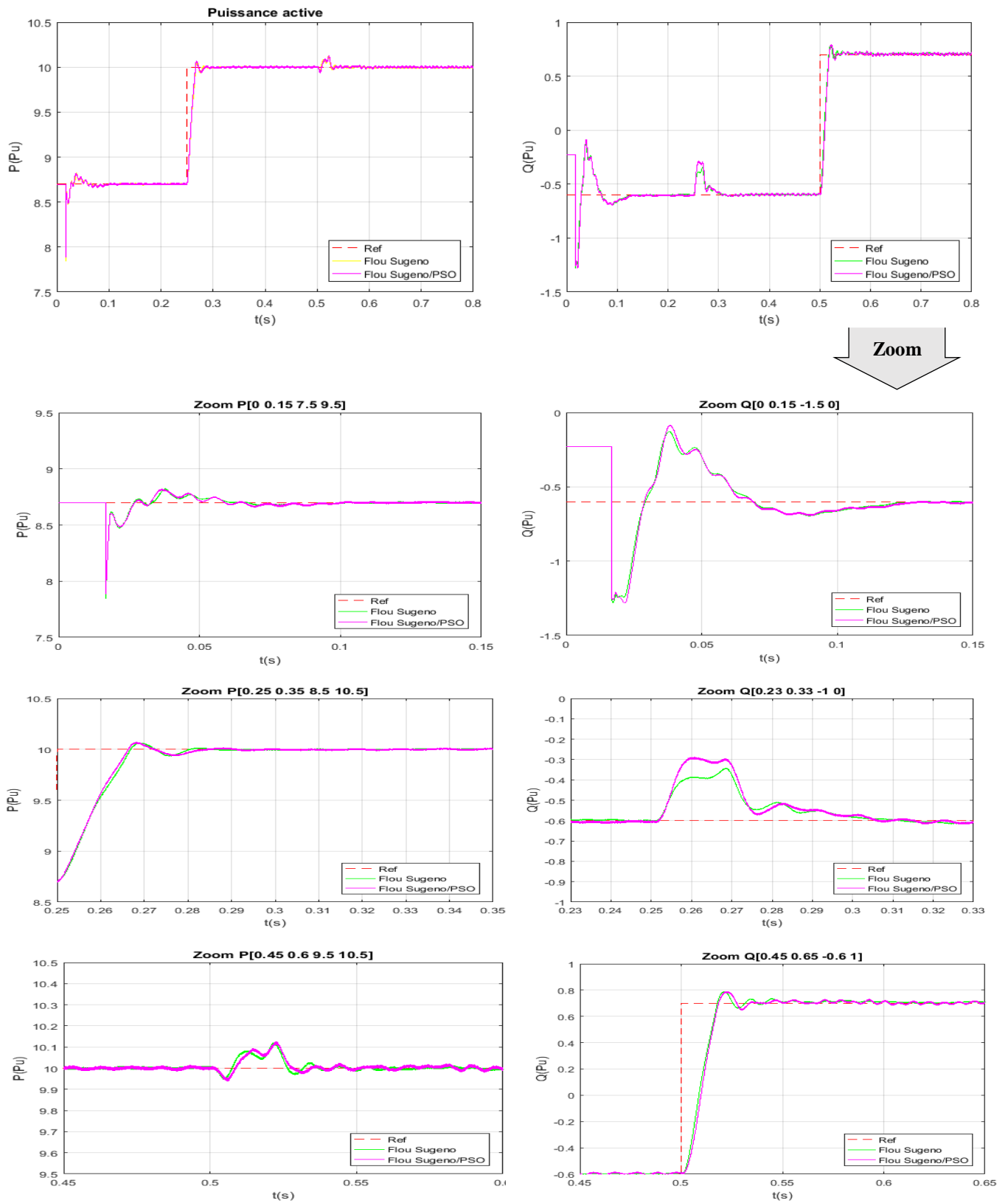


Figure V.7 : Variation de puissances active (a) et réactive (b), avec Sugeno/SugenoPSO

⊕ Résultats de simulation avec un régulateur flou Sugeno optimisé (PSO_PSO hybride)

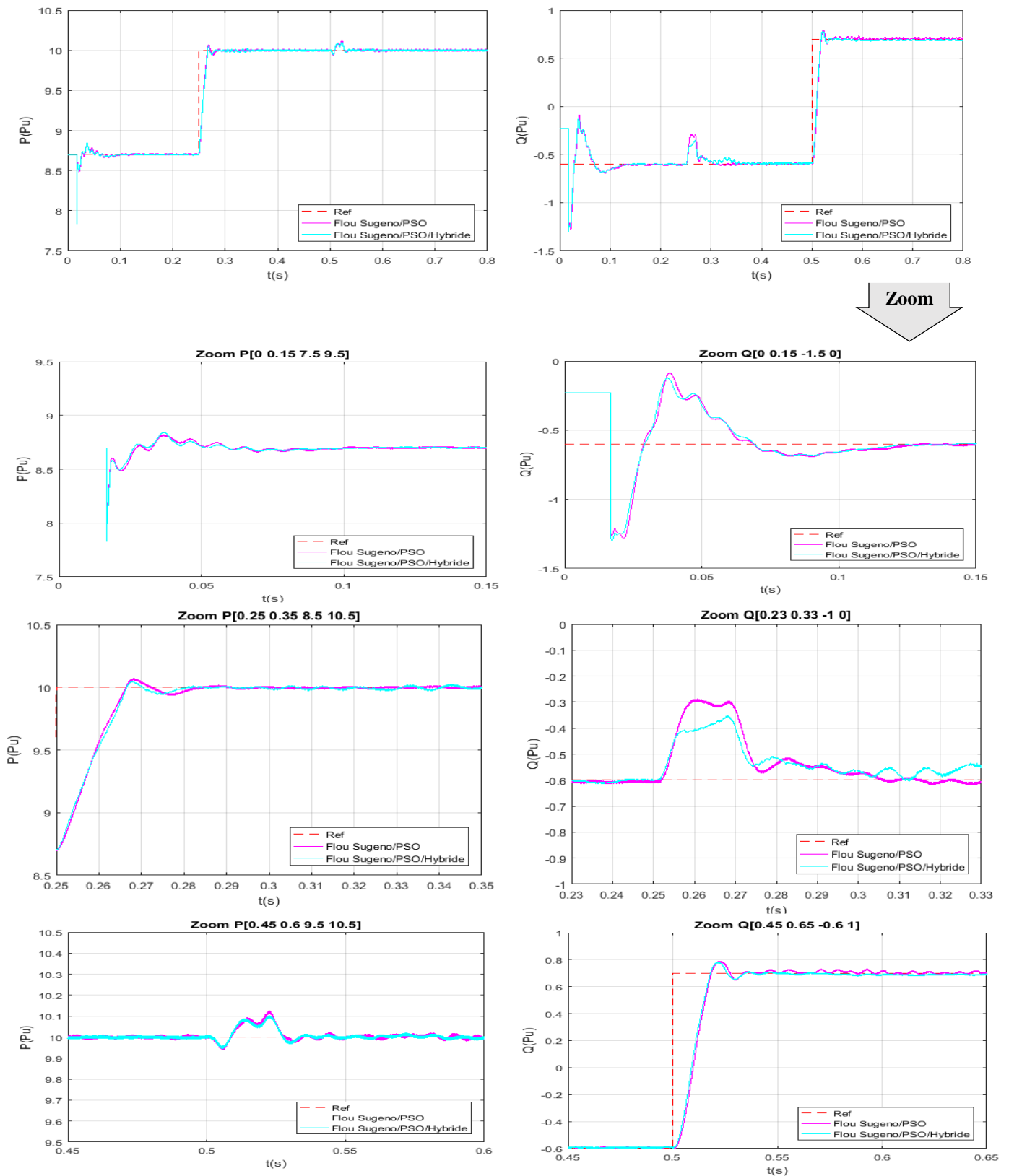
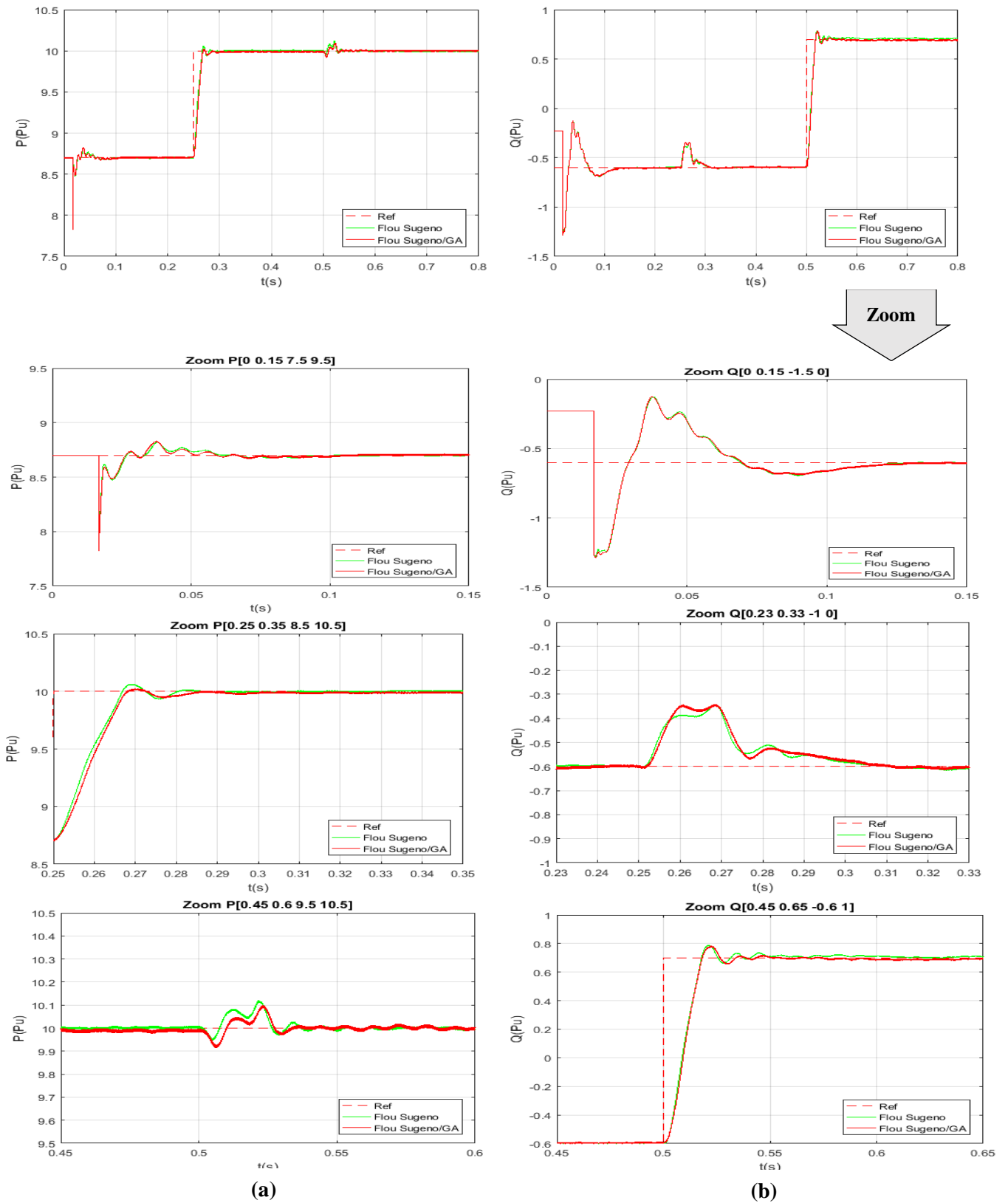


Figure V.8 : variation de puissances active (P) et réactive (Q) , avec Sugeno/PSO et PSO hybride

⊕ Résultats de simulation avec un régulateur flou Sugeno optimisé (Fuzzy_GA)



FigureV.9 : Variation de puissances active (a) et réactive (b), avec Sugeno et Sugeno/GA

c. Comparaison des résultats et discussions

La figure V.10, représente le comportement de réglage des puissances par les différents contrôleurs utilisés dans la commande de l'UPFC

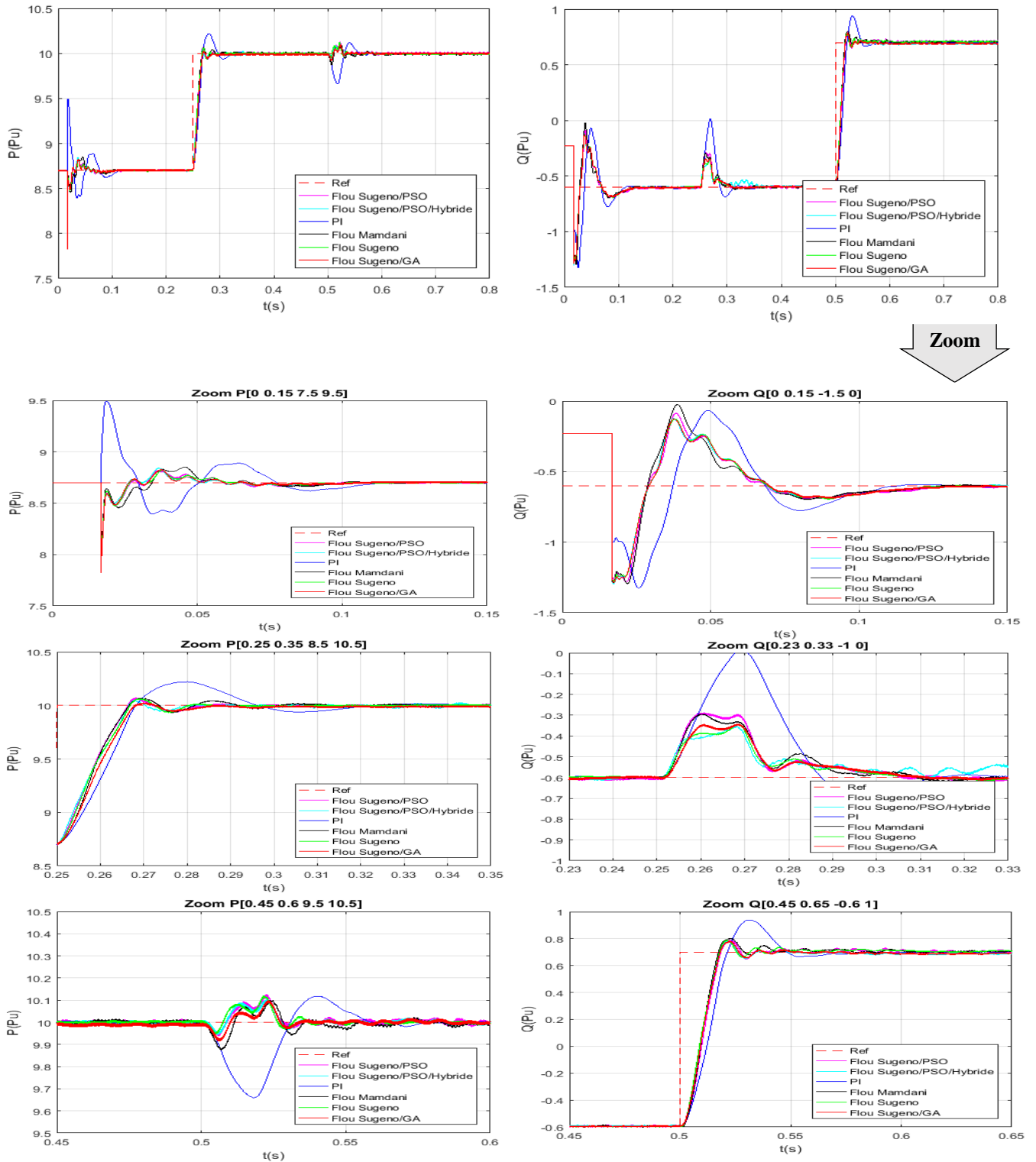


Figure V.10 : Comparaison entre les régulateurs utilisés dans le contrôle des variations des puissances active (a) et réactive (b)

Les résultats de simulation dans la figure V.10 montrent que les puissances imposées suivent leurs consignes après une oscillation importante dans la phase transitoire dans le cas de contrôle classique (la courbe bleu dans la figure V.10), cette remarque est déjà mentionnée dans le chapitre III. Après avoir appliqué la commande basée sur la théorie de l'intelligence artificielle (la logique floue et les méta-heuristiques), nous constatons une dynamique améliorée dans la phase transitoire de signale [0.5s-0.8s]. Le niveau d'instabilité a été démuni considérablement comme il est illustré dans la figure de comparaison 'Figure.V.10'.

La supériorité de réglage par l'intelligence artificielle est devenue plus remarquable dans les figures zoomées, le suivi des consignes est inférieur, avec un dépassement acceptable et un temps de passage transitoire inférieur à celui engendré dans le cas du régulateur PI. D'un autre côté, à $t=0.25$ sec lorsque la puissance active change, il y a une petite variation dans la puissance réactive avec moins d'oscillation et une bonne action de découplage avec les contrôleurs intelligents en comparaison avec régulateur PI classique et vice versa en raison du changement de la puissance réactive (Figure.V.10.(b)) à $t = 0.5$ sec, nous pouvons remarquer que les contrôleurs proposés assurent un meilleure découplage entre eux.

Les caractéristiques de tous les régulateurs utilisés à savoir : le temps de montée, le temps de réponse, le dépassement, le pic...etc. tous ces informations sont résumées dans les deux tableaux V.3, et V.4. Les relevés fournis dans ces tableaux, montrent qu'en termes de précision dynamique, la commande utilisant l'intelligence artificielle est meilleure que dans le cas de la commande classique car ils présentent un temps de montée réduite par rapport à celui du PI, ainsi que le dépassement.

Tableau V.3 : Caractéristiques des régulateurs utilisé dans le contrôle de variation de puissances active (P)

Caractéristiques	Les régulateurs utilisés					
	PI	flou Mamdani	flou Sugeno	flou optimisé PSO	flou optimisé PSO/Hybride	flou optimisé GA
Temps de montée (s)	0.0130	0.0115	0.0127	0.0121	0.0129	0.0128
Temps de réponse (s)	0.3168	0.2976	0.2790	0.2813	0.3173	0.2973
Réponse Min (pu)	9.8720	9.8677	9.8712	9.8641	9.8720	9.8650
Réponse Max (pu)	10.2204	10.0661	10.0628	10.0714	10.0486	10.0235
Dépassement	2.2040	0.6614	0.6277	0.7137	0.4865	0.2349
Sous dépassement	0	0	0	0	0	0
Pic (pu)	10.2204	10.0661	10.0628	10.0714	10.0486	10.0235
Temps de pic (s)	0.2802	0.2693	0.2692	0.2681	0.2677	0.2701

Tableau V.4 : Caractéristiques des régulateurs utilisés dans le contrôle de variation de puissances réactive (Q)

Caractéristiques	Les régulateurs utilisés					
	PI	flou Mamdani	flou Sugeno	flou optimisé PSO	flou optimisé PSO/Hybride	flou optimisé GA
Temps de montée (s)	0.0143	0.0113	0.0124	0.0120	0.0121	0.0123
Temps de réponse (s)	0.5625	0.5570	0.5467	0.5936	0.5323	0.5322
Réponse Min (pu)	0.5700	0.5733	0.5715	0.5743	0.5717	0.5693
Réponse Max (pu)	0.9388	0.8035	0.7893	0.7899	0.7830	0.7823
Dépassement	34.1090	14.7850	12.7610	12.8478	11.8551	11.7617
Sous dépassement	86.8895	87.5834	86.3283	87.3266	85.9835	86.3603
Pic (pu)	0.9388	0.8035	0.7893	0.7899	0.7830	0.7823
Temps de pic (s)	0.5313	0.5232	0.5212	0.5227	0.5216	0.5226

V.2.2.1.2. Cas 2 : Fonctionnement de l'UPFC en mode contrôle de tension

Dans cette section, on va étudier essentiellement la performance d'un UPFC doté par un contrôleur flou dans un réseau perturbé. Toujours, dans le but de comparer les performances de la commande floue et celles de la commande classique sur le contrôle de l'UPFC, on applique des variations de charge dans le nœud N°2 peut se traduire par une variation de tension comme déjà effectuée dans le Scénario 1 (Cas N°2, figure III.8) du troisième chapitre. Nous rappelons ci-dessous ces conditions :

- $V_2 = 1$ pu pour $0 \text{ s} < t < 0.15 \text{ s}$ (le system est dans l'état de fonctionnement initiale),
- $V_2 = 0,983$ pu pour $0.15 \text{ s} < t < 0.3 \text{ s}$ (la charge inductive est injectée),
- $V_2 = 1$ pu pour $0.3 \text{ s} < t < 0.45 \text{ s}$ (la charge inductive est retirée),
- $V_2 = 1.017$ pu pour $0.45 \text{ s} < t < 0.6 \text{ s}$ (la charge capacitive est injectée),
- $V_2 = 1$ pu pour $0.6 \text{ s} < t < 0.8 \text{ s}$ (les deux charges inductive et capacitive sont retirées)

Nous rappelons qu'après avoir effectué les manipulations au-dessus dans le Scénario 1 (Cas N°2) du troisième chapitre, la forme de tension dans le nœud N°2 sans UPFC contient des variations sous forme de creux (0,983pu), et surtension (1,017pu) dans l'allure de la forme de tension (voire Figure III.9). L'apport de l'UPFC en raison de ces variations est bien défini et discuté dans la même section (Scénario1, Cas N°2) du troisième chapitre, comme nous avons vu toutes les grandeurs électriques telles que : la puissance active (P), la puissance réactive (Q), et le courant shunt (I_{sh}) sont varié en fonction des variations dans l'allure de la forme de tension au jeu de barre 2, toutes ces variations sont nécessaires pour répondre aux exigences de compensation et rétablir l'état de fonctionnement normal du système . Dans ce contexte, nous allons analyser une deuxième fois le comportement de notre dispositif FACTS (UPFC) mais

cette fois avec l'application de la logique floue dans le système de contrôle, et comparer ses performances avec le contrôle analogique par PI. L'action de compensation de l'UPFC en réponse au changement appliqué dans le réseau (creux de tension, et surtension) avec les deux types de commande PI et FLC est nettement sur les figures V.11 (a-d). Les figures V.11.(a), et V.11.(b) donnent les variations de la puissance active/réactive injectée ou absorbée par l'UPFC pour maintenir la tension de nœud B2 comme montrée sur la figure V.11.(d). On note bien une dynamique améliorée entre les deux régulations où les réponses sont rapides quand on utilise le contrôle avancé, on remarquant aussi dans cette figure (IV.11.a) que la puissance active (P) reste constante aux instants de l'intervention de l'UPFC dotée par un contrôleur floue, ceci montre la bonne performance de ce dernier qui assure un découplage parfait. En outre, ce contrôleur fournit une transition simple du niveau de compensation capacitif à inductif par rapport au contrôleur PI comme illustré la figure IV.11. (c).

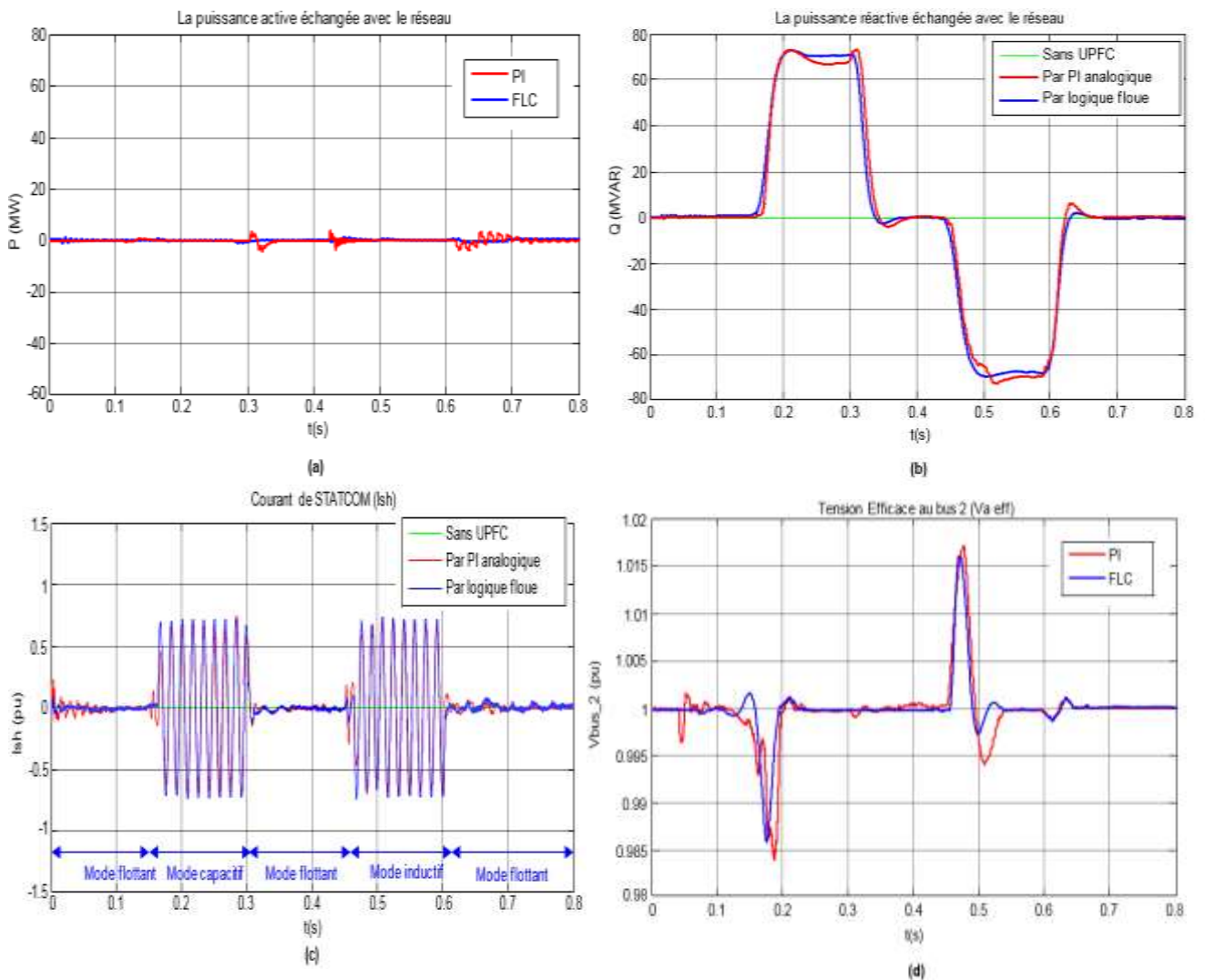


Figure V.11: Formes d'ondes de la puissance active (a), la puissance réactive (b), le courant I_{sh} (c), et la forme RMS de tension au bus 2 avec l'UPFC basé sur PI classique, et FLC.

La supériorité de la régulation floue est aussi remarquable sur la figure V.12, cette dernière donne la variation de composante de courants dans le repère Park. Sur la figure IV.12. (b), le suivi de la référence est clairement illustré, l'onduleur VSI génère des courants proches du courant de référence (le courant de référence c'est l'image de courant mesuré) par rapport au réglage classique (figure IV.12. (a)), à cause de l'efficacité de la commande floue.

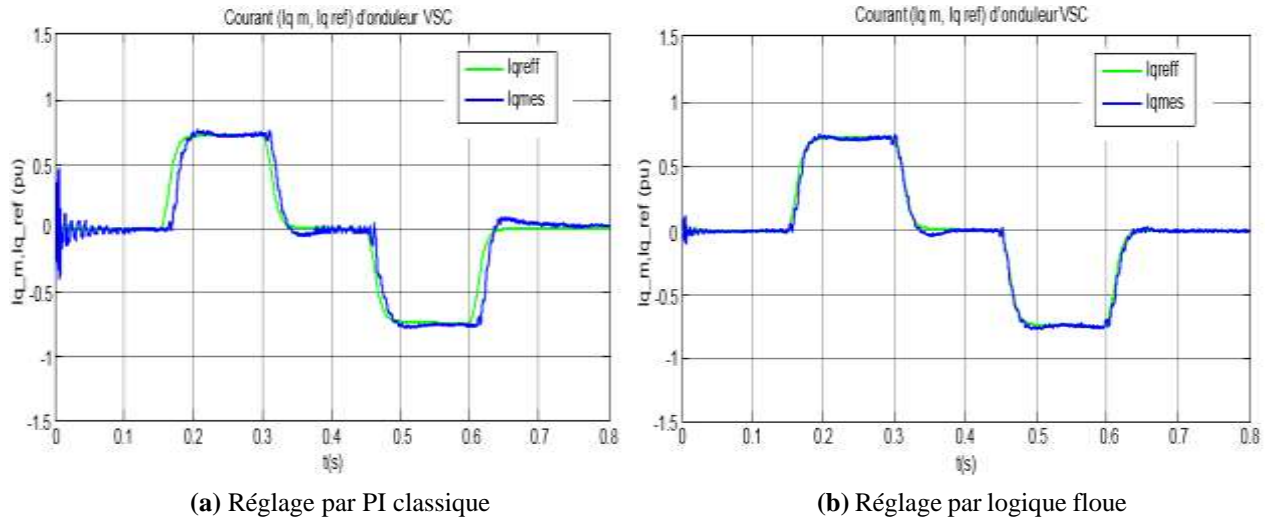


Figure V.12 : Courant (I_q m, I_q ref) d'onduleur VSC en fonction de temps.

L'action positive de la régulation par floue est nettement visible aussi sur la figure V.13 qui représente la forme d'onde de la tension du circuit continue V_{dc} liée aux études des étapes précédentes. Sur la figure V.13, le suivi de la tension continue est clairement illustré, la tension V_{dc} oscille approximativement à côté de la tension de référence ($V_{dc_ref} = 20$ kV). Dans le cas du régulateur PI, le V_{dc} oscille sous la tension de référence.

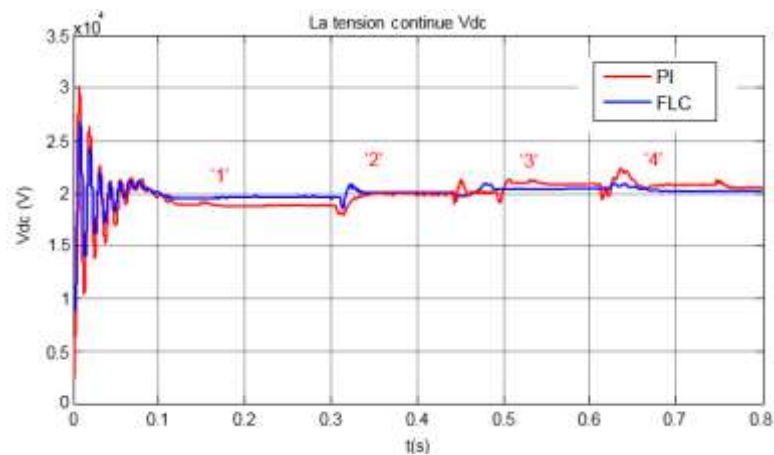


Figure V.13 : Tension (V_{dc}) en fonction de temps (s).

V.3.2.2. Test d'application 02

Dans le deuxième jeu de simulation (Test 02), en basant notre étude sur le même test d'application du troisième chapitre (figure III.15), les mêmes essais précédents avec les mêmes conditions de fonctionnement seront étudiés mais cette fois avec l'introduction des régulateurs intelligents à savoir la logique floue et l'optimisation par colonies de fourmis (ACO).

V.3.2.2.1. Cas 01 : Le cas de poursuite d'une référence de puissance

Nous rappelons ci-dessous les conditions qui ont été réalisées dans ce cas :

- $P_{ref} = 500$ MW pour $t < 0.3$ s,
- $P_{ref} = 1000$ MW pour $t > 0.3$ s,
- $Q_{ref} = 600$ MVAR pour $t < 0.3$ s,
- $Q_{ref} = 0$ MVAR pour $t > 0.3$ s.

a. Résultats de simulation en logique floue

Le système de contrôle de l'onduleur shunt et l'onduleur série de l'UPFC avec la logique floue sont donnés dans la figure.A.2 (annexe A).

La figure V.14, donne les résultats de la simulation du régime de contrôle des puissances avec les deux contrôleurs (PI, et FLC), tandis que la figure V.15, donne les zooms de chaque tronçon contiennent des variations. Les résultats de simulation dans le premier cas montrent qu'il y a une dynamique améliorée dans la réponse quand on utilise le contrôle type floue (voire Figure. IV. 14), nous remarquons que les puissances de la ligne ont suivi leur références parfaitement avec un bon couplage entre les deux puissances ce qui valide le bon fonctionnement des régulateurs de la partie série.

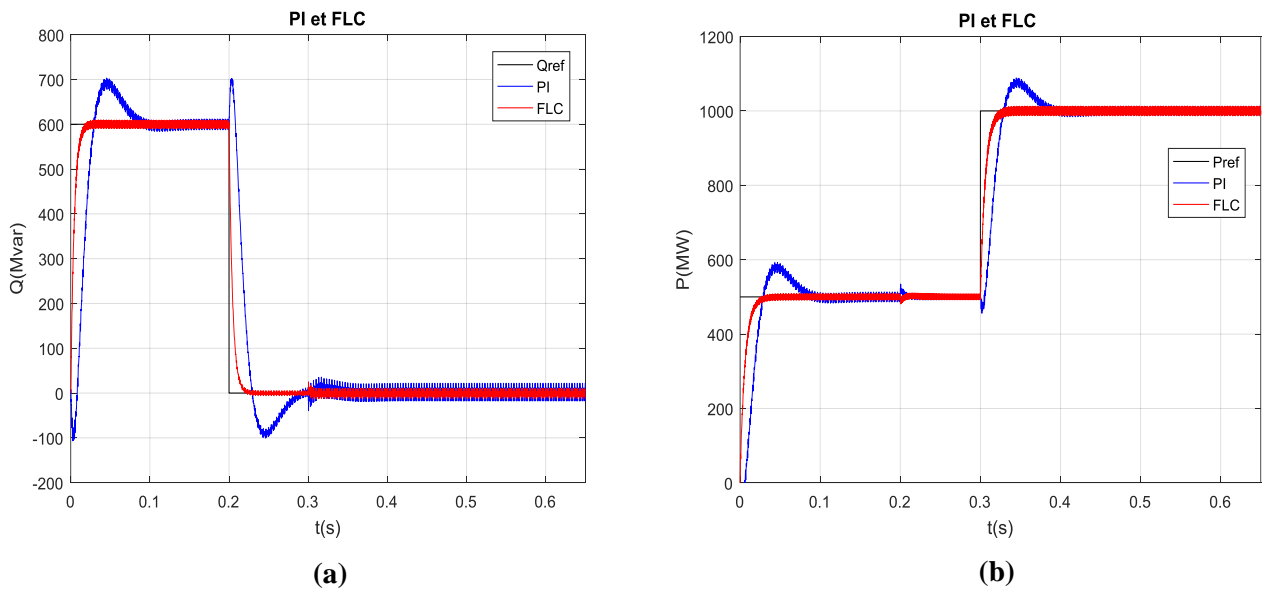


Figure V.14 : Variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI et FLC

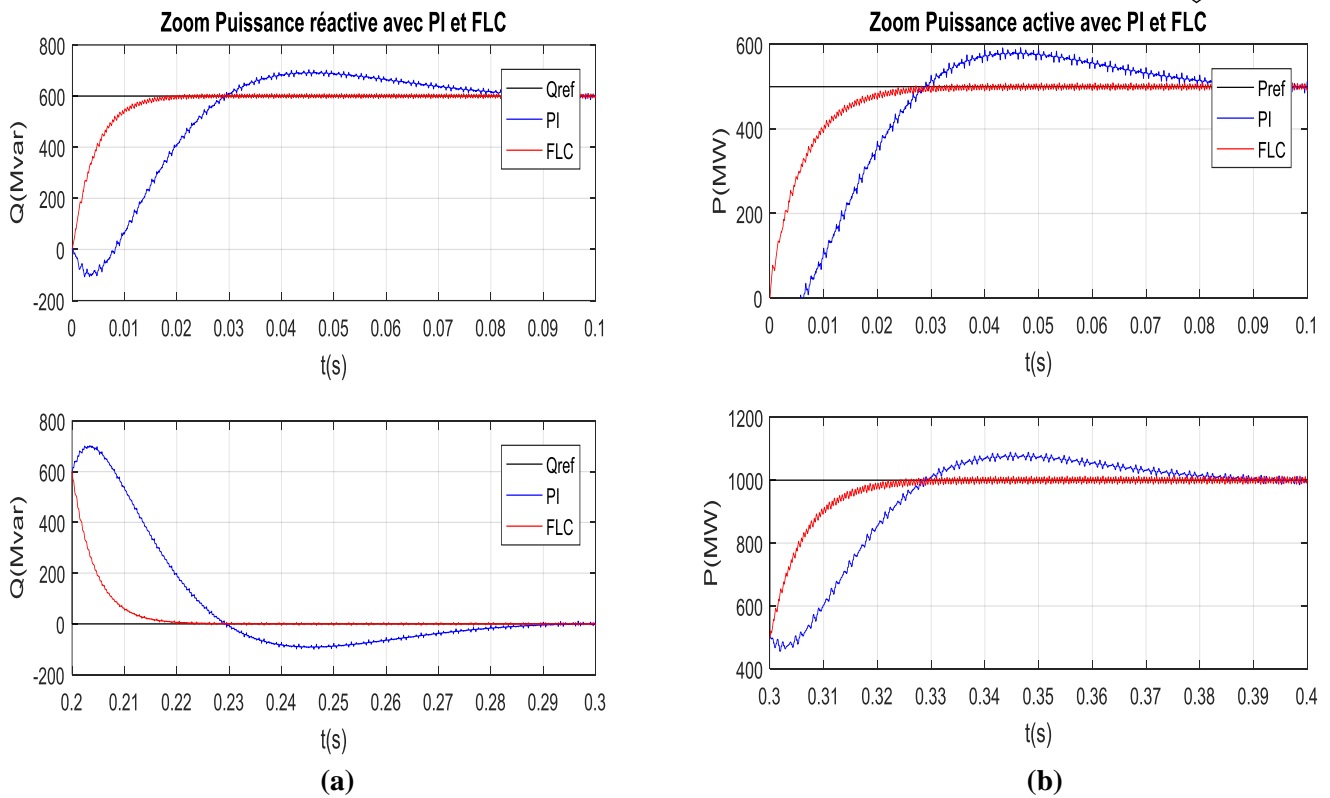
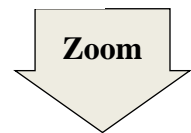


Figure V.15 : Figuration en zoom de variation de la puissance réactive (a) (temps pris entre : 0– 0.1 sec ,et 0.2– 0.3sec), et active (b) (temps pris entre : 0– 0.1sec, et 0.3– 0.4sec)

b. Résultats de simulation en méta-heuristiques

Maintenant, nous allons tester l'efficacité de l'UPFC à contrôler l'échange de puissance par l'ajustement flexible des paramètres de contrôle de l'UPFC en utilisant l'algorithme ACO. Le tableau ci-dessous présente les résultats de calcul obtenus par l'ACO programme tandis que la figure V.16 montrent la caractéristique de convergence pour atteindre la meilleure solution et ce vue de la nature stochastiques que présente cette algorithme.

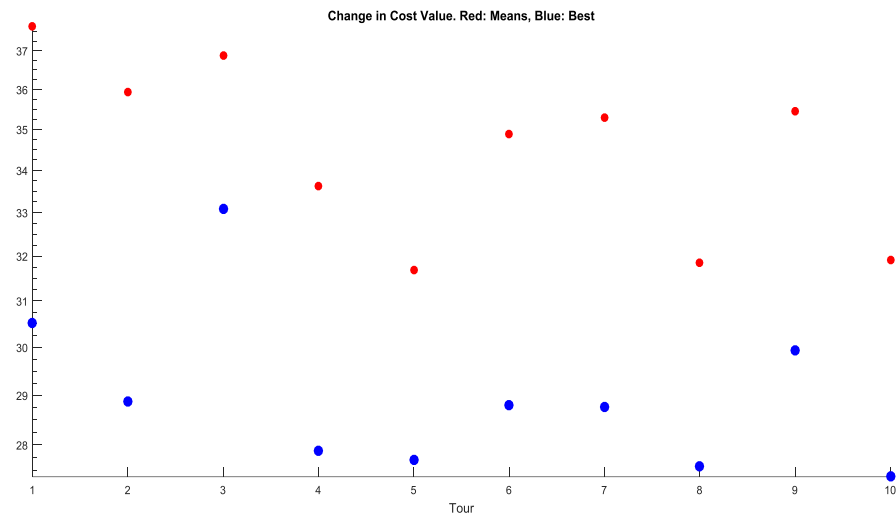


Figure V.16 : La caractéristique de convergence par l'algorithme ACO

Tableau. V.5 : Paramètres de simulation adoptée pour la méthode ACO

Paramètre de l'algorithme ACO	
Nombre de Fourmies	6
Phéromone	0.06
Paramètre d'évaporation	0.8
Phéromone Positive	0.2
Phéromone Négative	0.3
Maximum Tour	10
Valeur de la fonction objective	27.3749
Controller paramètres	
P	70.72
I	3943.8

⊕ **Résultats de simulation avec un régulateur PI optimisé (PI_ACO)**

Les figures V.17, et V.18 (Figure en zoom) représentent les résultats de la simulation du régime de contrôle des puissances avec les deux régulateurs (PI, PI_ACO).

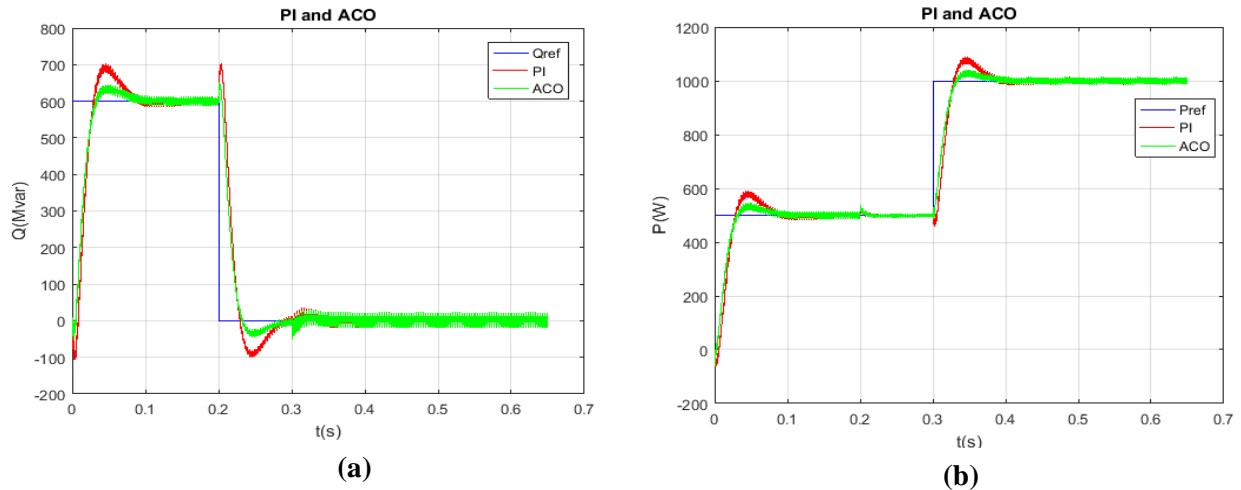


Figure V.17 : variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI et ACO

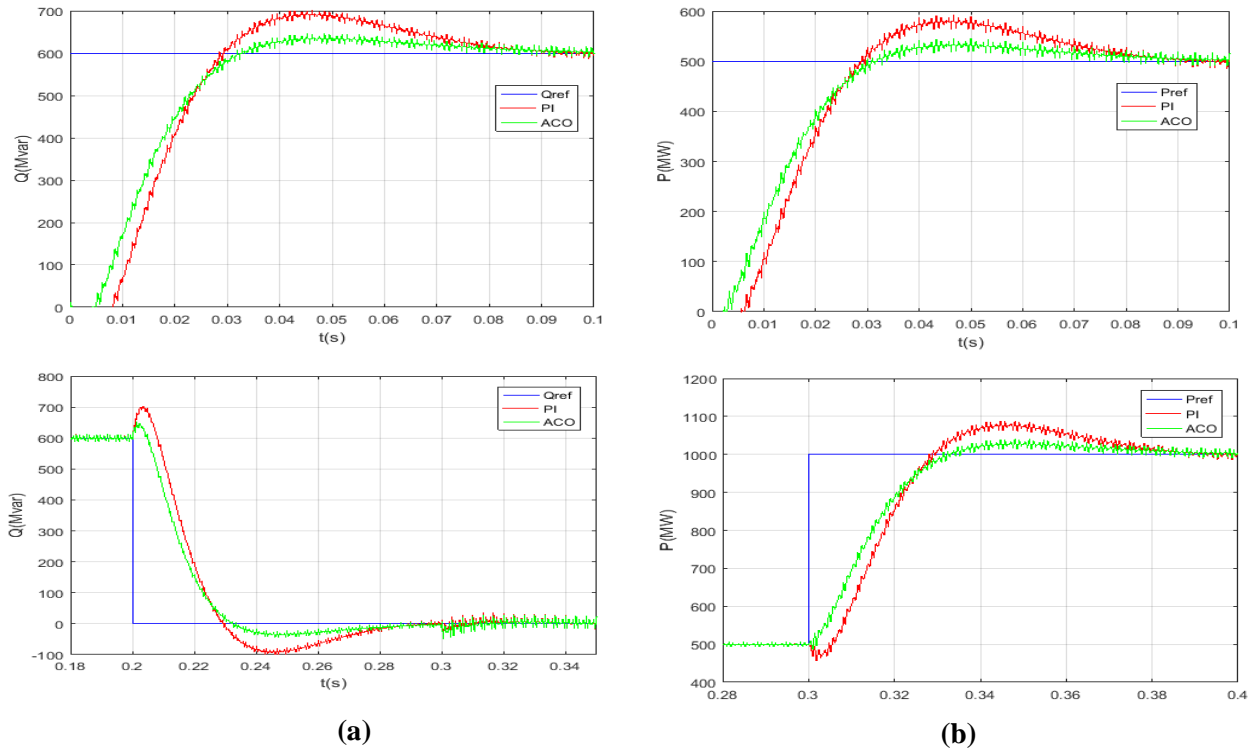
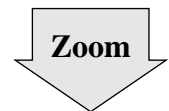


Figure V.18 : Figuration en zoom de variation de la réactive (a) (temps pris entre: 0– 0.1sec, et 0.18– 0.34sec), et la puissance active (b) (temps pris entre: 0– 0.1sec ,et 0.28– 0.4sec).

c. Comparaison des résultats et discussions

Les figures V.19, et V.20 (Figure en zoom) donnent les résultats de la simulation du régime de contrôle des puissances avec les trois régulateurs (PI, FLC et PI_ACO)

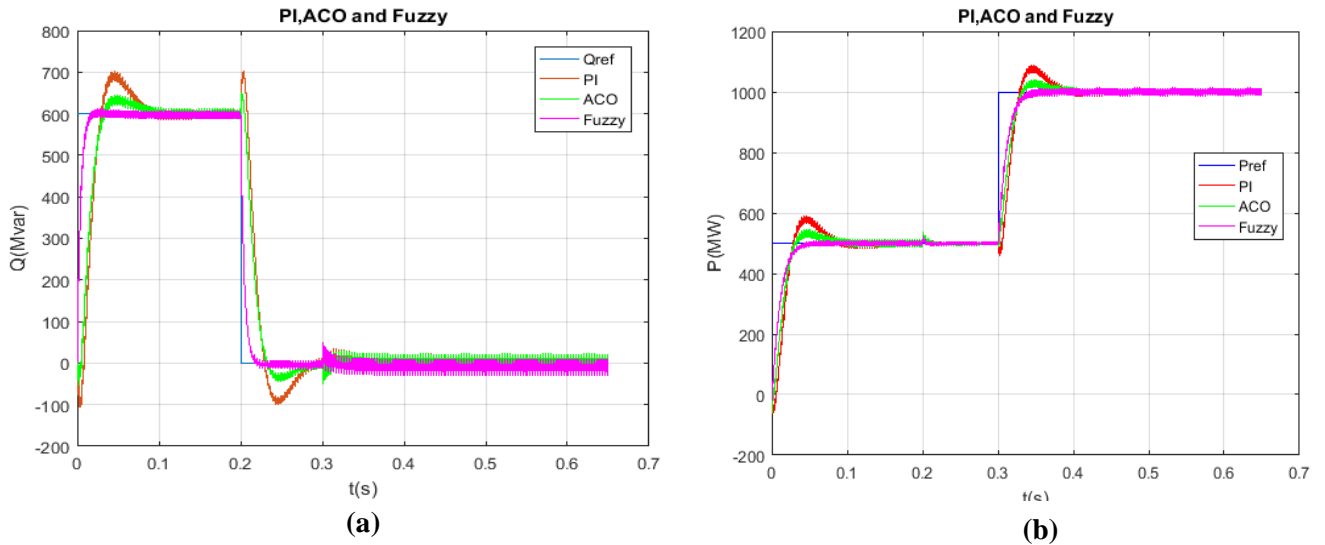


Figure V.19 : variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI ,ACO et FLC

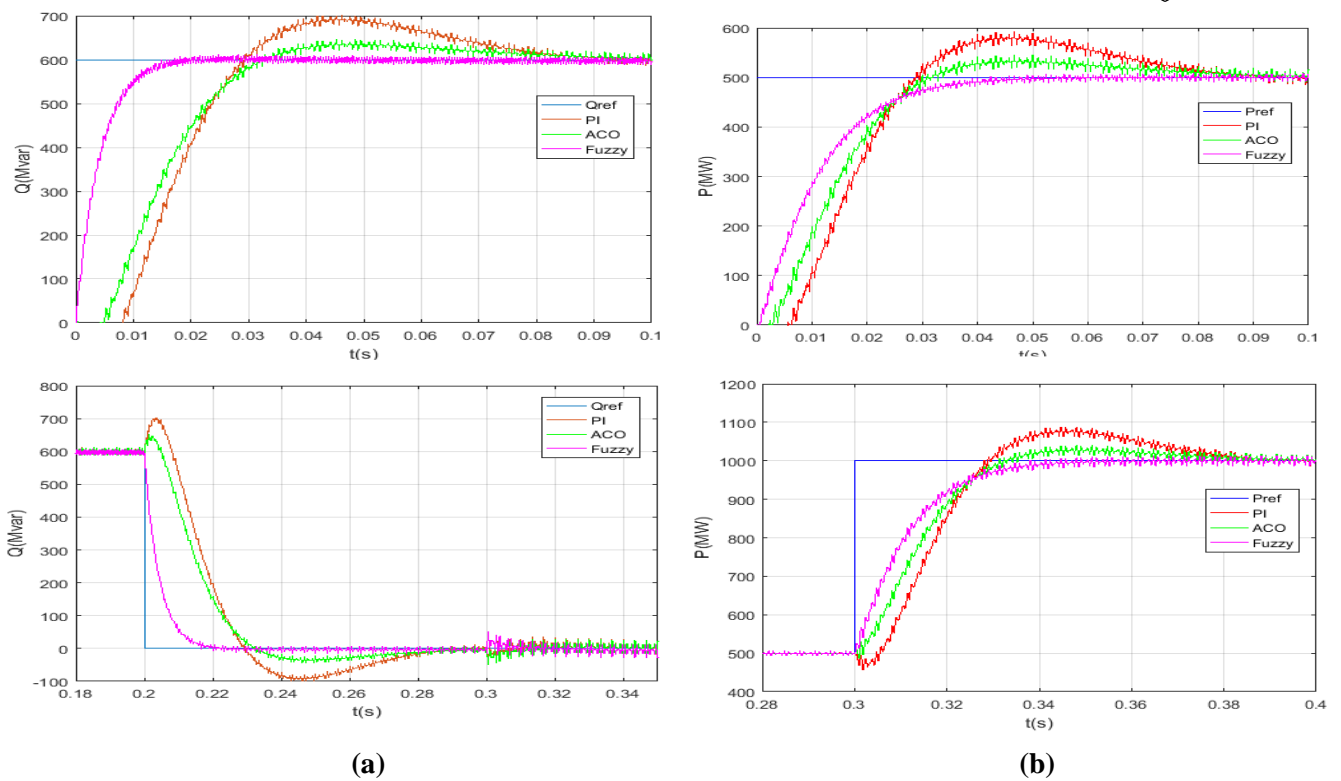


Figure V.20 : Figuration en zoom de variation de la réactive (a) (temps pris entre: 0– 0.1sec, et 0.18– 0.34sec), et la puissance active (b) (temps pris entre : 0– 0.1sec ,et 0.28– 0.4sec).

La présentation illustrée auparavant donne une comparaison entre les trois régulateurs utilisés (PI, FLC et PI_ACO). D'après ces résultats nous constatons que l'UPFC réussit à contrôler parfaitement l'échange de puissance entre les deux régions (amont et aval). Comme nous avons déclaré dans le chapitre III, les puissances de la ligne imposées suivent leurs consignes après une oscillation importante dans la phase transitoire (avec le PI). Cependant, l'apparition de petites oscillations dues à l'interaction entre la puissance active et réactive. Après avoir appliqué l'intelligence artificielle (la logique floue et l'ACO) nous remarquons une dynamique améliorée dans le signal de réponse, le temps de réponse et le dépassement sont diminués avec la nouvelle structure de contrôle.

La supériorité de réglage avancée est devenue plus remarquable dans les figures zoomé (Figure. V. 20). Dans le même contexte, Il faut noter que le contrôleur floue qui a été déjà traité précédemment a donné des résultats mieux que le PI optimisé puisque ce type de contrôle est simple et flexible, il ne nécessite pas une modélisation mathématique.

Le tableau suivant (Tableau V.6) résume tous les caractéristiques des régulateurs utilisés dans ce test d'application (temps de montée, le temps de réponse, le dépassement, le pic...etc.).

Tableau. V.6 : Caractéristiques et comparaison entre les contrôleurs (PI, PI_ACO et CLF)

Caractéristiques	Les régulateurs utilisés					
	PI	FLC	ACO	PI	FLC	ACO
	Contrôle de la puissance active (P)			Contrôle de la puissance réactive (Q)		
Temps de montée (s)	0.312	0.308	0.314	0.008	0.080	0.005
Temps de réponse (s)	0.381	0.324	0.378	0.649	0.649	0.649
Réponse Min (MW)	900.842	891.803	898.473	-100.476	-13.373	-49.732
Réponse Max (MW)	1.088e+03	1.013e+03	1.039e+03	703.202	15.471	651.455
Dépassement	8.869	1.293	3.991	3.124e+03	20.003	2.892e+03
Sous dépassement	6.323	0	5.966	488.839	5.473e+03	247.336
Pic (MW)	1.088e+03	1.013e+03	1.039e+03	703.202	609.954	651.455
Temps de pic (s)	0.344s	0.398s	0.348s	0.045s	0.034s	0.201s

V.3.2.2.2. Cas 02 : Cas de réseau perturbé

Dans ce cas de test 02, on va étudier le cas de réseau perturbé sur la performance d'un UPFC, ainsi que l'effet de la perturbation sur les puissances transitées.

⊕ Cas A : Creux de tension

Il faut noter que dans ce test, nous avons considéré qu'un creux de tension survienne sur le réseau en amont à l'instant $t=0.4-0.5$ s avec une profondeur de 40% par rapport à la tension nominale de 220 kV (voire Figure III.20). Le comportement de l'UPFC dans le contrôle du système est clairement visible dans la figure suivante (figure V.21). Aux instants de variation des consignes 0.2 s, 0.3 s et 0.4-0.5 s (temps de surtension), l'UPFC agit sur le système par ses convertisseurs. Le courant généré par le convertisseur parallèle qui est présenté sur la figure V.21 reproduit fidèlement les variations que ce soit au niveau des puissances de références ou bien au niveau du réseau amont où il est le siège d'un creux de tension triphasé entre 0.4 s et 0.5 s.

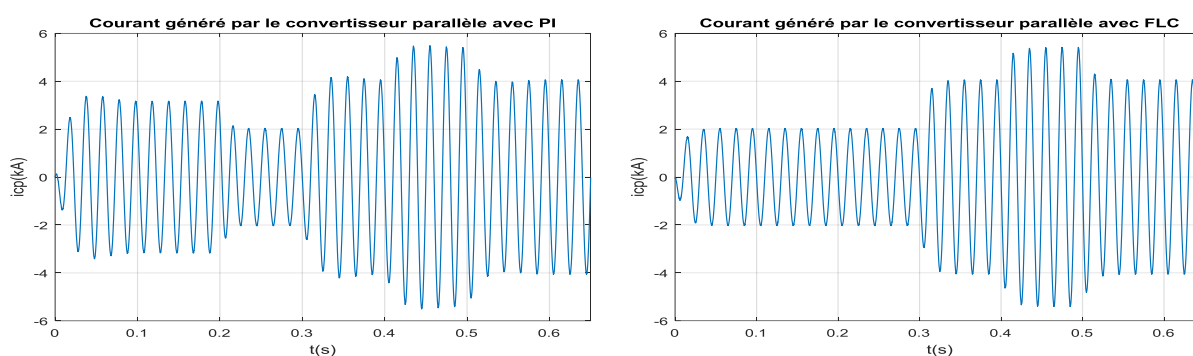


Figure V.21 : Formes d'ondes de courant injecté par le STATCOM (cas de creux de tension)

Nous gardons les variations au niveau des consignes des puissances (l'état de fonctionnement précédent), La figure V.22, illustre l'effet de la variation de tension (creux de tension) sur les puissances générées. Tandis que la figure V.23, donne les zooms de chaque tronçon contient des variations (variation des puissances, et le taux d'appliquer le creux de tension).

Les résultats présentés dans les figures 'Fig.IV.22, et Fig. V.23', montrent clairement l'action efficace de la régulation intelligente sur le système de contrôle de l'UPFC, ce dernier génère des puissances actives et réactives qui suivent les puissances de références du réseau aval avec des dépassements tolérables aux instants de variation des puissances réactives à $t=0.2$ s et actives à $t=0.3$ s, et aussi aux instants de l'apparition du creux de tension entre 0.4 s-0.5 s. on remarque un dépassement important dans les signaux de réponse avec un temps de réponse considérable aux instants de variation contrairement au chapitre III dans le cas de réglage classique. La logique floue prouve à nouveau son efficacité de réduire les problèmes produits par le régulateur classique en terme (dépassement, régime transitoire, temps de réponse, etc.). Dans les mêmes présentations, on remarque aussi que le régulateur flou réussit à ramener les deux pics de puissance active d'amplitude aux deux instants $t_1=0.4$ s et $t_2=0.5$ s à leurs valeurs de référence après la disparition du creux de tension.

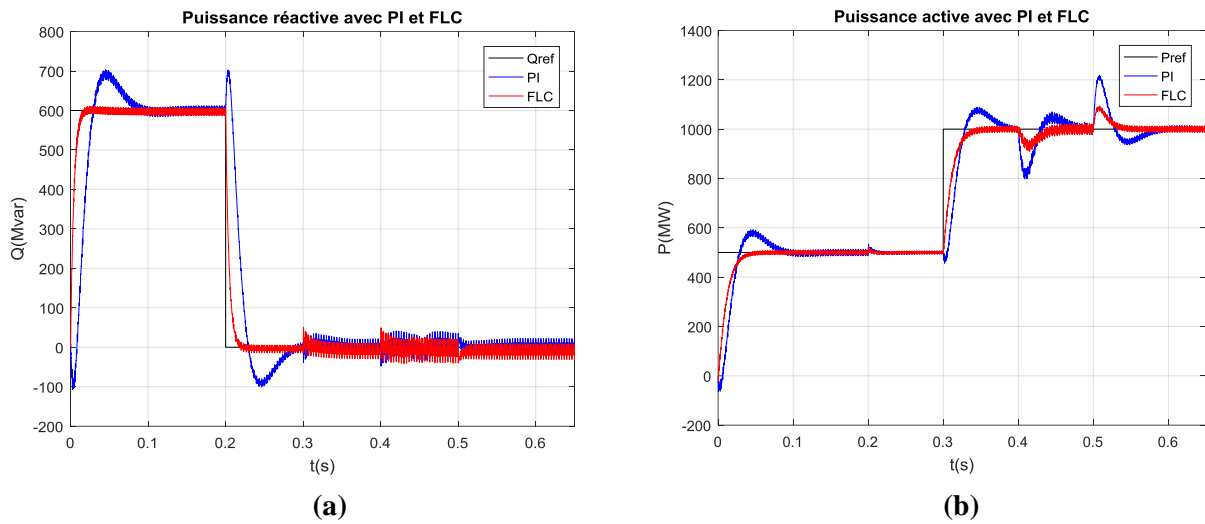


Figure V. 22 : Variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI et FLC (cas de creux de tension).

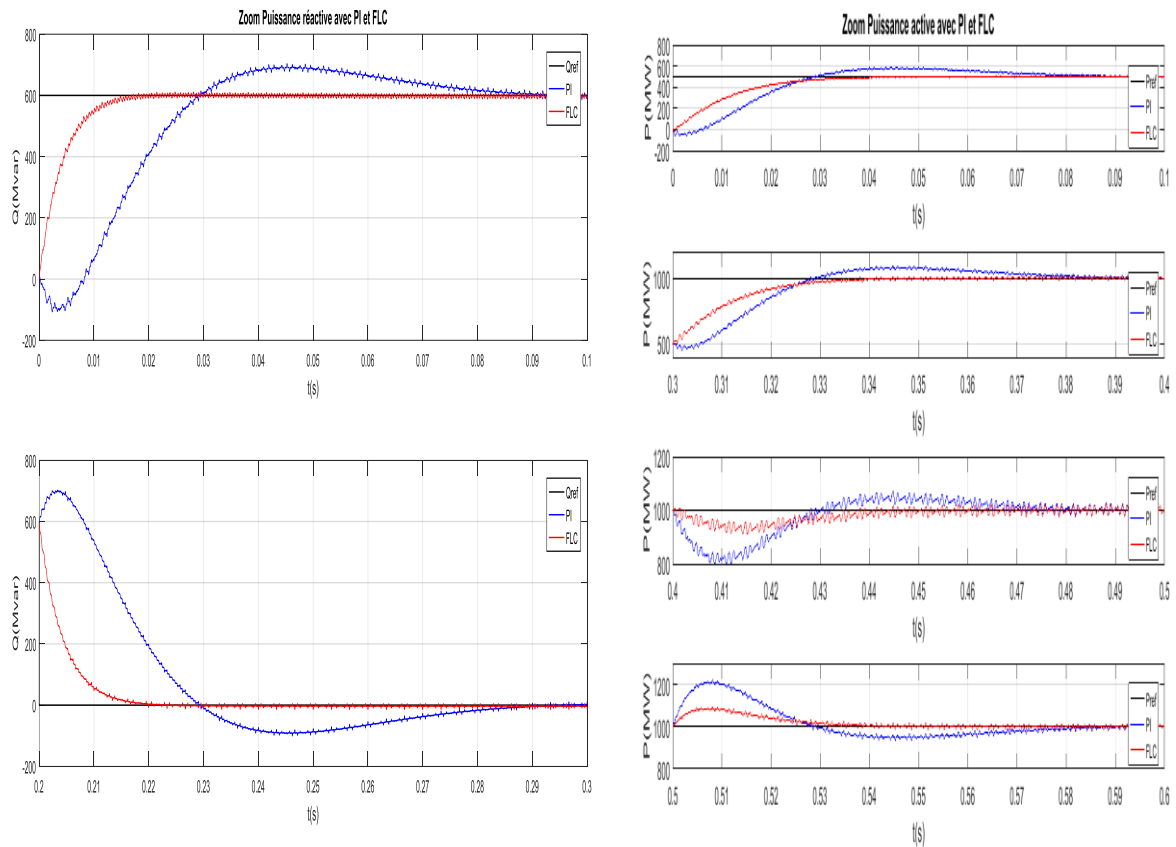


Figure V.23 : Figuration en zoom de variation de la puissance réactive (a) (temps pris entre :0– 0.1sec, et 0.2– 0.3sec), et active (b) (temps pris entre :0– 0.1sec, 0.3– 0.4sec, 0.4– 0.5sec, et 0.5– 0.6sec)

⊕ Cas B : Surtension

Dans ce test on suppose qu'une surtension survienne sur le réseau à l'instant $t=0.4-0.5$ s avec une profondeur de 20% par rapport à la tension nominale de 220 kV (voire Figure III.25). L'UPFC agit sur le système par ses convertisseurs aux instants de variation des consignes des puissances ($t=0.2$ s, 0.3 s), et la surtension est appliquée à ($t=0.4-0.5$ s).

La forme du courant généré par le convertisseur parallèle est présentée sur la figure V.24. Selon la figure V.24, le convertisseur parallèle reproduit fidèlement les variations que ce soit au niveau des puissances de références ou bien au niveau du réseau amont où il subit la surtension triphasée entre 0.4 s et 0.5 s. Selon la figure V.24, l'appel de courant est nettement remarquable entre 0.3s et 0.4s, ceci pour compenser l'appel de puissance active de réseau en aval. Dans la période ($t = 0.4$ s à $t=0.5$ s), où la surtension est appliquée on remarque que le courant délivré par la partie shunt est encore diminuée pour garder la tension dans la limite admissible, tous ces variations sont nécessaires pour rétablir l'état de fonctionnement précédent.

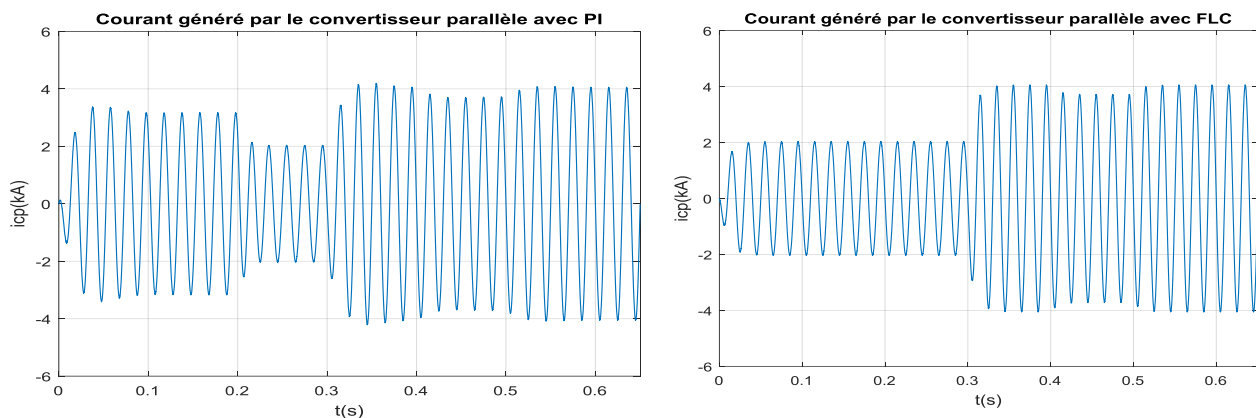


Figure V.24 : Formes d'ondes de courant injecté par le STATCOM (cas de surtension)

La figure V.25, illustre l'effet de la variation de tension (surtension) sur les puissances générées, tandis que la figure IV.26, donne les zooms de chaque tronçon contenant des variations (variation des puissances, et le taux d'appliquer la surtension). On observe les mêmes remarques que le cas précédentes (cas de creux de tension), l'UPFC avec la régulation floue à maintenir la puissance constante selon les références malgré les variations enregistrées au niveau du réseau amont à savoir la surtension triphasée apparu entre 0.4 s et 0.5 s.

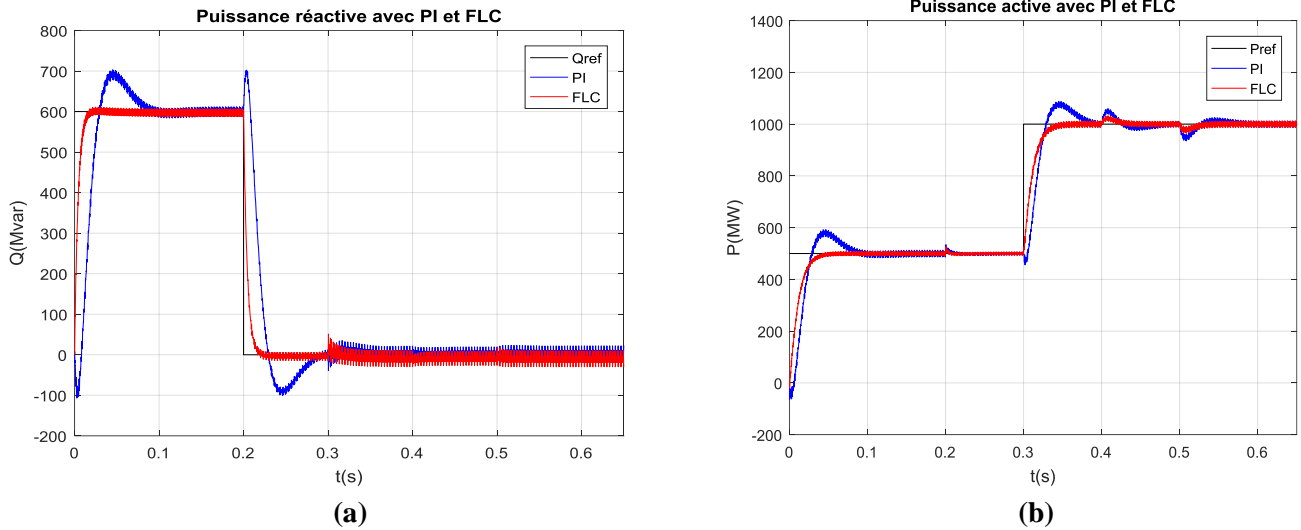


Figure V. 25 : Variation de puissances réactive (a) et active (b) , avec PI et FLC (cas de surtension).

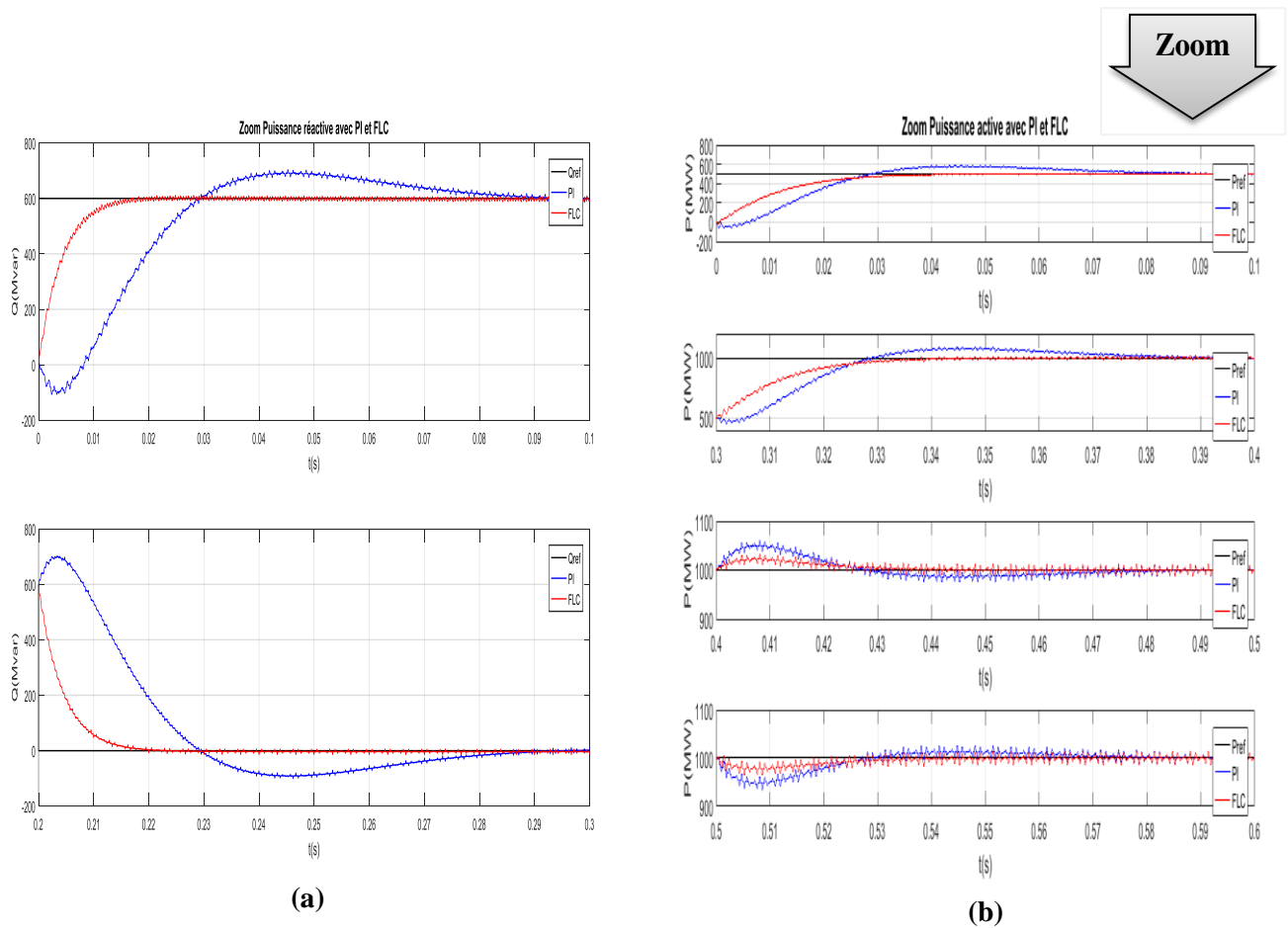


Figure V. 26 : **Figuration** en zoom de variation de la puissance réactive (a) (temps pris entre : 0– 0.1sec, et 0.2– 0.3sec) , et active (b) (temps pris entre : 0– 0.1sec, 0.3– 0.4sec, 0.4– 0.5sec, et 0.5– 0.6sec)

V.4. Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons testé à travers la simulation les différentes techniques avancées contribuant à la thèse pour améliorer la performance de l'UPFC dans une ligne de transmission et son efficacité à éliminer ou réduire les problèmes produits par le régulateur classique en terme (dépassement, régime transitoire, temps de réponse, etc.) afin d'assurer de bonnes performances de système de contrôle en termes de poursuite, robustesse et découplage.

L'étude du système de contrôle de l'UPFC dans ce chapitre nous a permis de comparer plusieurs types de commande : PI classique, logique floue (Mamdani, et Suggno), PSO, GA, PSO_SQP et ACO. Après avoir analysée globalement la réponse de l'UPFC piloté par les différents contrôleurs, les résultats de simulation permettent de conclure que l'implantation de l'intelligence artificielle prouvent sa qualité vis-à-vis les conditions de fonctionnement du réseau et offrant en général des résultats très satisfaisants avec des meilleures performances de réglage caractérisées par une diminution considérable de dépassement, aussi la stabilisation sur la phase transitoire reste très minime voire négligeable par rapport à ce qu'on a vu dans le cas de régulation classique par PI. Aussi d'après les résultats obtenus les réponses sont mieux quand on utilise les différents algorithmes d'optimisation, nous constatons une dynamique améliorée où les dépassements sont réduits voire négligeable par rapport à ce qu'on voie dans le cas de régulation par la logique floue.

Enfin, tous les résultats obtenus nous encouragent plus vers le développement de ces méthodes et la recherche d'une structure plus performante surtout avec le modèle détaillé de l'UPFC puisque c'est un modèle plus compliqué dans son contrôle.

*Conclusion Générale Et
Perspectives*

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les moyens de contrôle d'énergie dans les réseaux électriques sont des outils très importants et essentiels pour les gestionnaires de réseau, comme nous avons pu le constater tout le long de ce travail. Dans ce contexte, cette thèse intervient pour contribuer à l'amélioration de l'efficacité des réseaux électriques avec le contrôle flexible de l'énergie électrique par l'intégration des systèmes FACTS. En particulier, nous nous sommes intéressés à étudier le dispositif le plus puissant parmi les systèmes FACTS qui permet de contrôler les trois paramètres caractérisés une ligne électrique, c'est l'UPFC.

Les simulations réalisées dans cette thèse, expliquent l'importance que l'application de l'UPFC peut offrir dans le contrôle des réseaux électriques, trois tests d'application avec divers objectifs sont alors représentés ici. Premièrement nous avons commencé par les deux premiers tests d'application intitulé “ *Fonctionnement de l'UPFC en mode contrôle du flux de puissance, et la stabilisation de tension*”, pour vérifier et étudier l'aptitude de l'UPFC à contrôler le transit de puissances. Ainsi, il était nécessaire d'évaluer le problème de correction de tension qui est traité quand le réseau est perturbé, en vue d'évaluer l'effet de la compensation shunt (STATCOM) en tenant compte des perturbations et variations relativement importantes affectant le système (la conséquence d'une variation aux niveaux de tension). Ici, deux types de défauts ont été choisis (creux de tension, et surtension) pour valider les performances de l'UPFC aux défauts proposés. Les résultats trouvés expliquent l'importance d'appliquer l'UPFC à ce genre de problème, à travers les résultats l'UPFC a réussi de contrôler indépendamment ou simultanément le flux de puissance P et Q dans la ligne de transmission à différentes variations de références. En outre, dans les cas de réseau perturbé (cas de creux de tension et surtension), le régulateur PI arrive à maintenir la stabilité de tension du réseau. Le troisième test d'application nommé “ *amélioration du transit des puissances dans un réseau multi machine*”, qui est étudié dans le dernier partie de chapitre 03 pour définir l'apport d'intégration d'un UPFC dans un réseau multi machine 14 nœuds dont les objectifs sont d'une part, de simuler le modèle UPFC obtenu, et d'autre part d'analyser son effet dynamique sur les différents paramètres de réseau tel que : le flux de puissance qui est considéré comme la fonction de base de notre travail. Une discussion largement détaillée est élaborée pour comparer les différents résultats trouvés avant et après l'UPFC, les résultats obtenus graphiques ou bien numériques par cette comparaison sont encourageants. Ils montrent que, l'UPFC a réussi de contrôler et améliorer dynamiquement le flux de puissance dans le réseau multi machine, on a vu que l'UPFC peut renforcer la capacité de transport et modifier rapidement le flux de puissance des lignes de faible puissance, et sa position dans le réseau influe sur les pertes de puissance et le profil de la tension.

Les simulations réalisées dans le cinquième chapitre, ont permis de mettre en évidence les avantages associés à l'utilisation de l'intelligence artificielle dans le système de contrôle de l'UPFC. Les résultats de simulation tirés dans le cinquième chapitre ont permis d'apprécier l'apport de l'UPFC utilisant la logique floue dans la conduite du réseau. Les résultats des

simulations montrent que la logique floue donne une meilleure réponse transitoire avec un temps de réponse inférieure et un dépassement réduit, ce type de contrôle réussie parfaitement à contrôler le flux de puissance sous différentes variations de références ou l'indépendance entre P et Q a été aussi vérifiée. En outre, dans les cas de réseau perturbé, le régulateur flou arrive à maintenir la stabilité de tension du réseau dans un temps de réponse assez petit que celui du PI contrôleur.

La deuxième méthode développée et testée concernant la commande par les méthodes d'optimisation. Les simulations de fonctionnement de l'UPFC piloté par ces techniques sont encourageantes malgré la complexité de modèle de l'UPFC, ces techniques nous ont permis de réduire efficacement le dépassement et le régime transitoire comme nous avons pu le constater dans le cas de régulation par la logique floue. D'autre part, ils assurent une minimisation de l'interaction qui existe entre les deux puissances active et réactive.

En guise de conclusion, nous pouvons dire que cette thèse a démontré à travers les résultats obtenus par la simulation de l'UPFC, l'importance de ce dernier du point de vue performance et efficacité pour l'amélioration de la qualité d'énergie et le contrôle de transfert des puissances.

En perspective, et puisque les résultats sont très encourageants et nous motivent plus à continuer nos futurs travaux sur le même axe de recherche, on propose quelques tâches à traiter ultérieurement, comme :

- L'utilisation des autres méthodes de commande plus avancés qui pourraient améliorer grandement les performances du réseau telle que : La commande neuronale, ou bien des autres méthodes méta-heuristiques à savoir: Bat algorithme, Cuckoo search algorithme...etc.
- L'utilisation de l'outil RT-LAB dans la simulation en temps réel pour la simulation des system FACTS notamment l'UPFC.

Concernent le modèle étudié dans ce thèse (l'UPFC + le réseau 14 nœuds) on propose en plus:

- D'insérer un différente FACTS périphériques dans le grand réseau (exemple 14 nœud). Par exemple, dans les nœuds les plus faibles en tension peuvent être installés un STATCOM, cela va aussi déterminer en outre si la performance de l'installation UPFC est meilleure ou quand elle est combinée avec d'autres dispositifs FACTS.
- L'utilisation des techniques intelligentes pour bien déterminer l'emplacement optimal de l'UPFC dans les réseaux électrique afin de bénéficier de maximum de ces caractéristiques.

**Annexes
Et
Bibliographie**

Annexe –A-

Représentation des modèles Tests sous MATLAB/SIMLUK

A.1. Test d'application 1 (Le réseau 4 nœuds multi-machines)

Les figures suivantes (Figure.A.1 et A.2.), montrent le sous system de contrôle de l'UPFC.

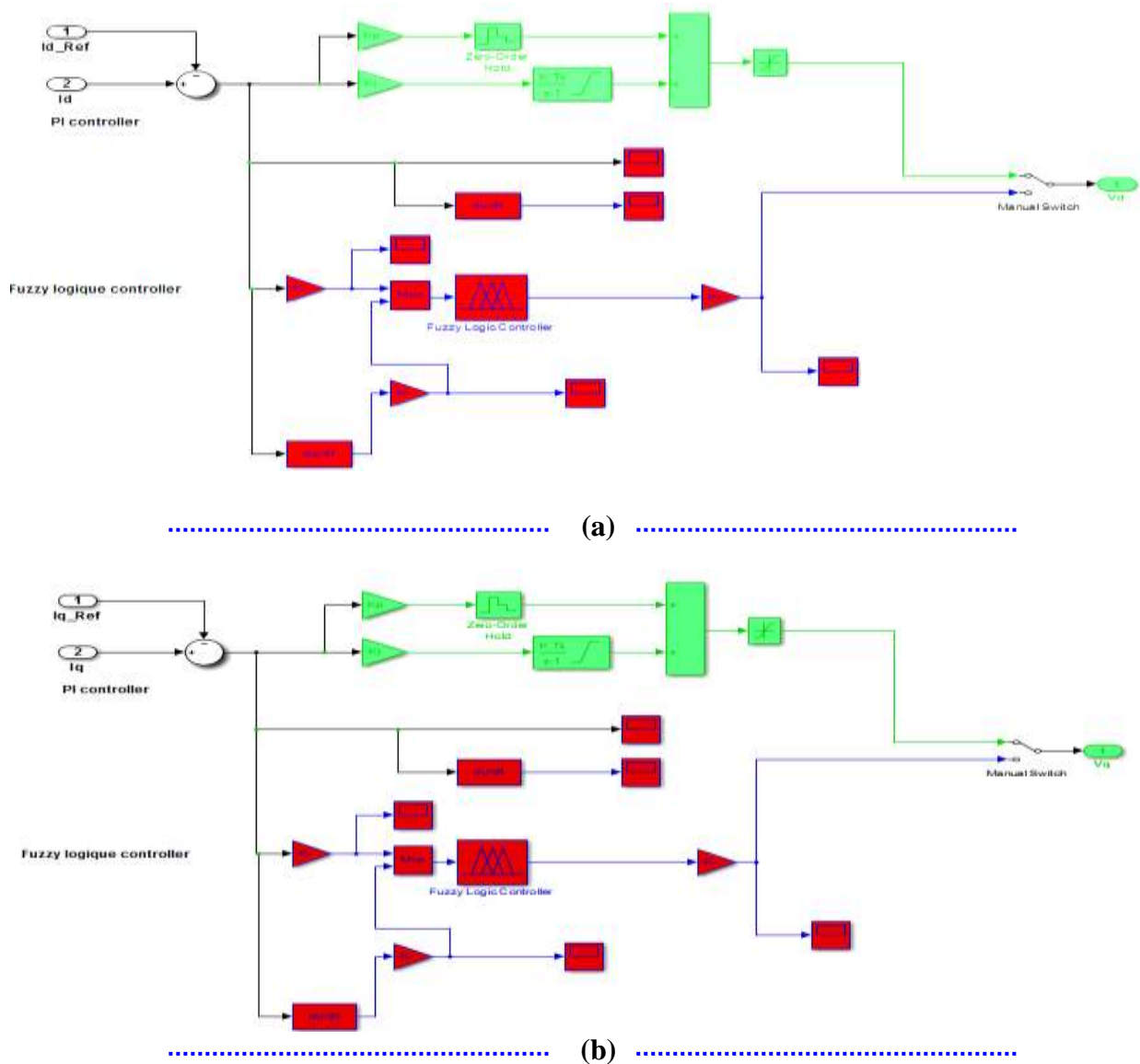


Figure A.1: Sous blocs Simulink de commande de l'UPFC : a) commande de signal V_d , et b) commande de signal V_q

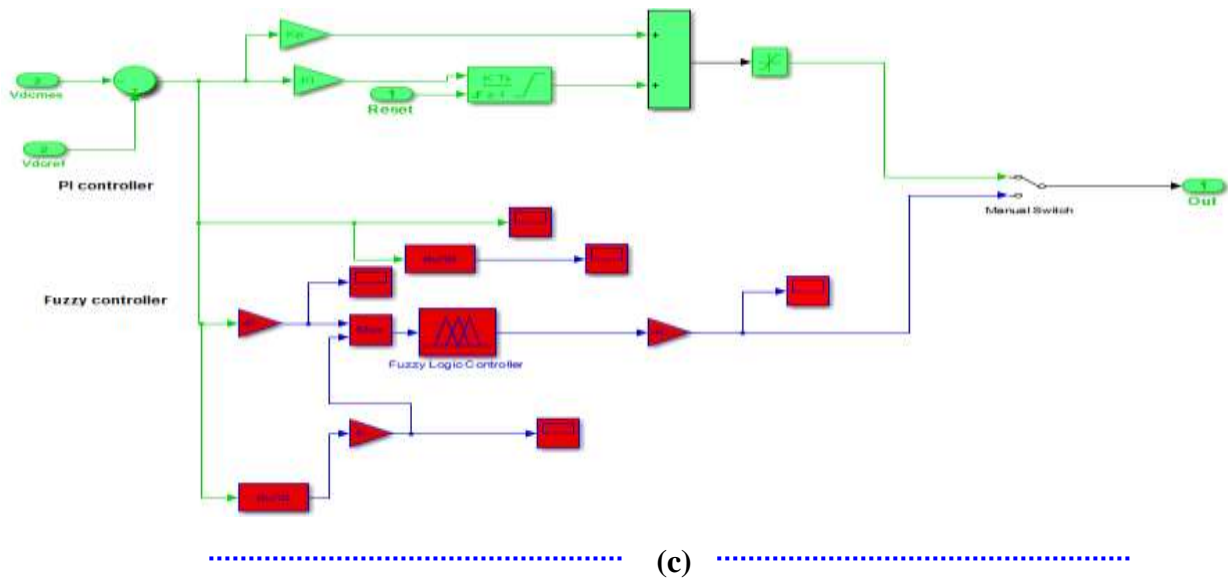


Figure A.2: Sous blocs Simulink de commande de la partie DC

Les caractéristiques du réseau 4 nœuds sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau. A.1: Valeurs des paramètres principaux du réseau électrique associé à un UPFC

Le réseau électrique	
Les sources	Source 1 : $V_{S1}= 5e3v$, $S1=8500$ MVA Source 2 : $V_{S2}= 5e3v$, $S2=6500$ MVA Source 3 : $V_{S3}= 5e3v$, $S3=9000$ MVA $f = 60Hz$
Les Charges	Ch1 : 300 MW Ch2 : 200 MW
Les Lignes	Ligne 01 : 200 Km Ligne 02 : 75 Km Ligne 03 : 180 Km
Le system FACTS (UPFC)	
Type de l'onduleur	2 Onduleur de tension (thyristors GTO) à trois niveaux 48 impulsions
La puissance réactive (Générée/Absorbée)	$Q_{générée}, Q_{absorbée} = +100$ Mvar/ -100 Mvar
Capacité de l'UPFC (Coté DC)	$C_1=C_2= 2500\mu F$
La tension injectée	10% de la tension nominale (28,87 kV)

A.2. Test d'application 02 (réseau avec deux sources de tension V_s , et V_r)

Les deux Figures suivantes (Figs: A.3, et A.4), montres l'espace de travail concernant les schémas bloc du circuit série et shunt de l'UPFC sur l'axe-d (rouge), et sur l'axe-q (bleu).

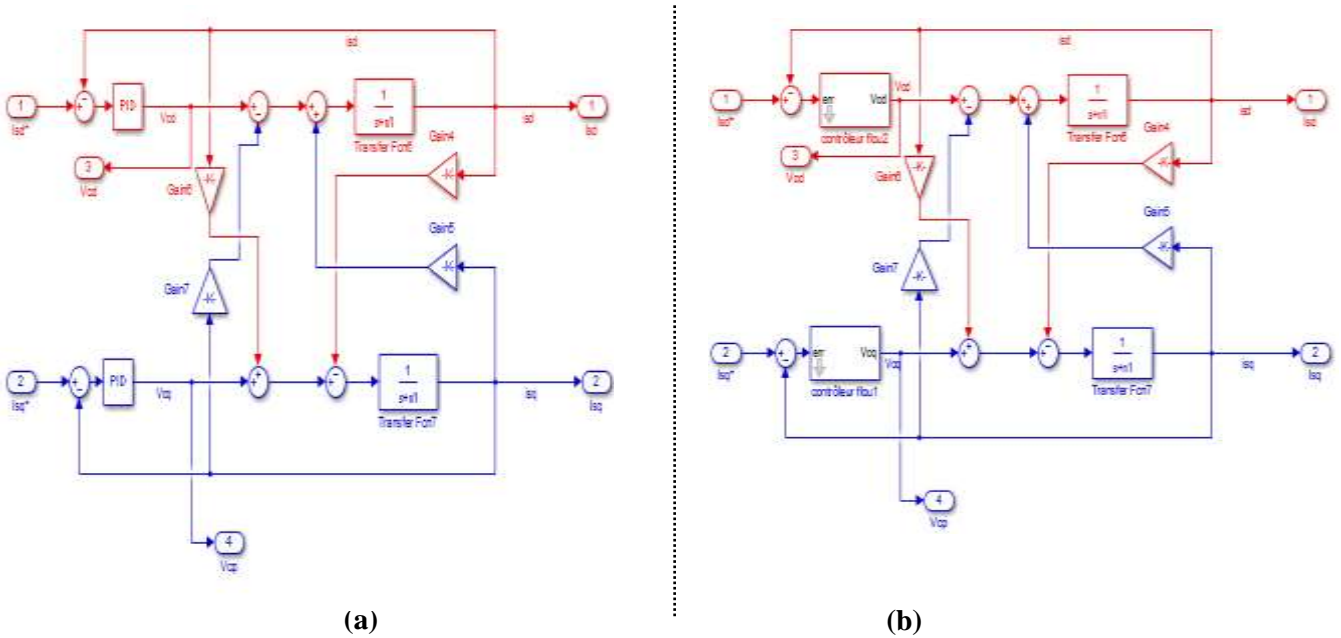


Figure A.3: Sous blocs Simulink de commande de l'UPFC Série : a) La commande classique par PI, et b) La commande intelligente par la logique floue.

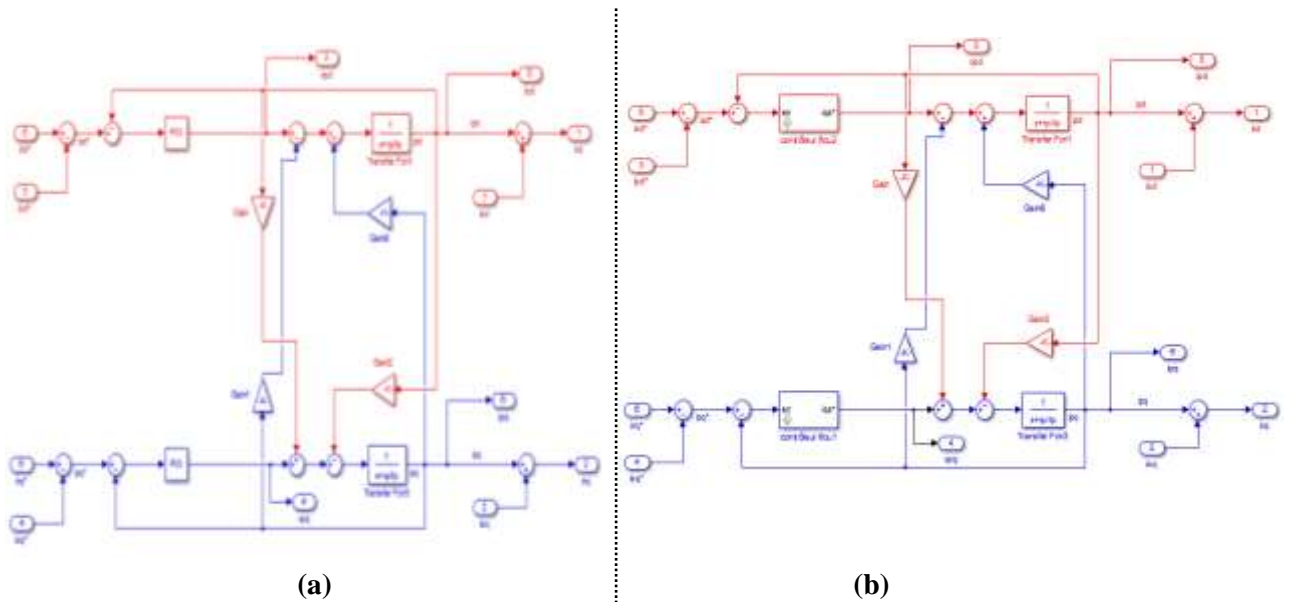


Figure A.4: Sous blocs Simulink de commande de l'UPFC shunt : a) La commande classique par PI, et b) La commande intelligente par la logique floue.

A.3. Test d'application 03 (Le réseau multi-machines 14 nœuds)

La figure suivante montre le bloc de raccordement de l'UPFC avec le réseau Test (IEEE_14 nœuds) via la ligne N°17 (la ligne 9-14).

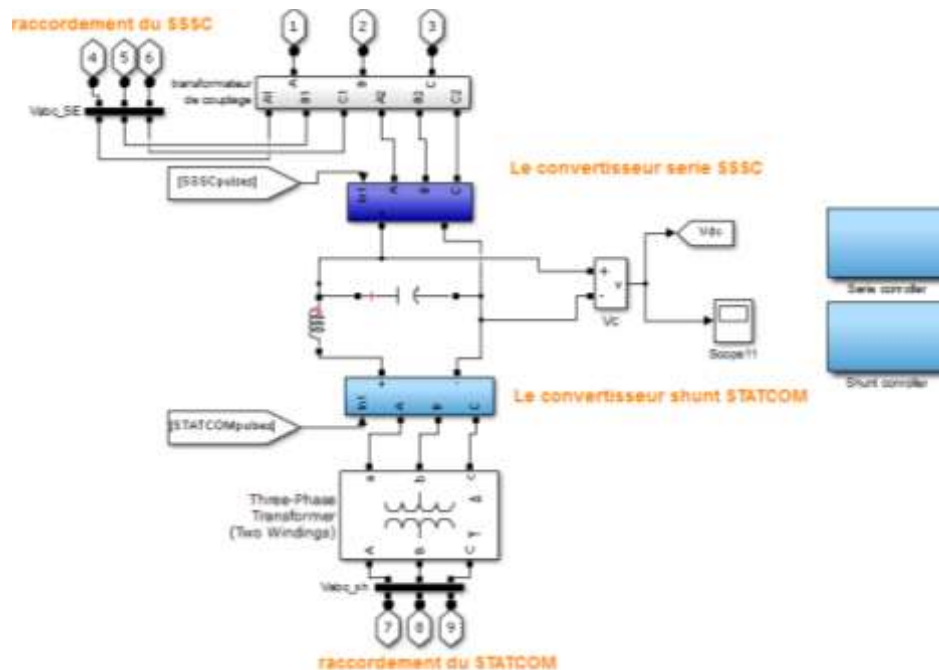


Figure A.5: Schéma visuel de l'intégration du circuit UPFC avec le réseau 14 nœuds.

Le Tableau suivant (Tableau .A.2) donne les paramètres des convertisseurs shunt et série de l'UPFC utilisés pour améliorer à la fois le flux de puissance transitée dans les lignes, et le profil de la tension dans les différents nœuds du réseau 14 nœuds.

Tableau. A.2 : Valeurs des paramètres principaux de l'UPFC

Le réseau électrique
V=138KV, F=50Hz
Le dispositif UPFC
Vdc (La tension de circuit DC de l'UPFC) =10 KV Capacité de l'UPFC (Coté DC)= 1800 μ F
Le transformateur de couplage shunt (Transformateur de couplage triphasé Y / Δ)
La capacité de Transformateur: 100 MVA La tension de la ligne (RMS): 138 kV/ 27 kV Fuite de réactance : 0.02 pu Air core réactance: 0.8 pu
Le transformateur de couplage série (Trois transformateurs d'isolation monophasés)
La capacité de Transformateur : 100 MVA Fuite de réactance : 0.2 pu Réactance de l'air: 0.4 pu

La configuration du circuit de réglage de contrôleur série (SSSC) de l'UPFC sous SIMULINK plateforme est donnée dans la figure suivante.

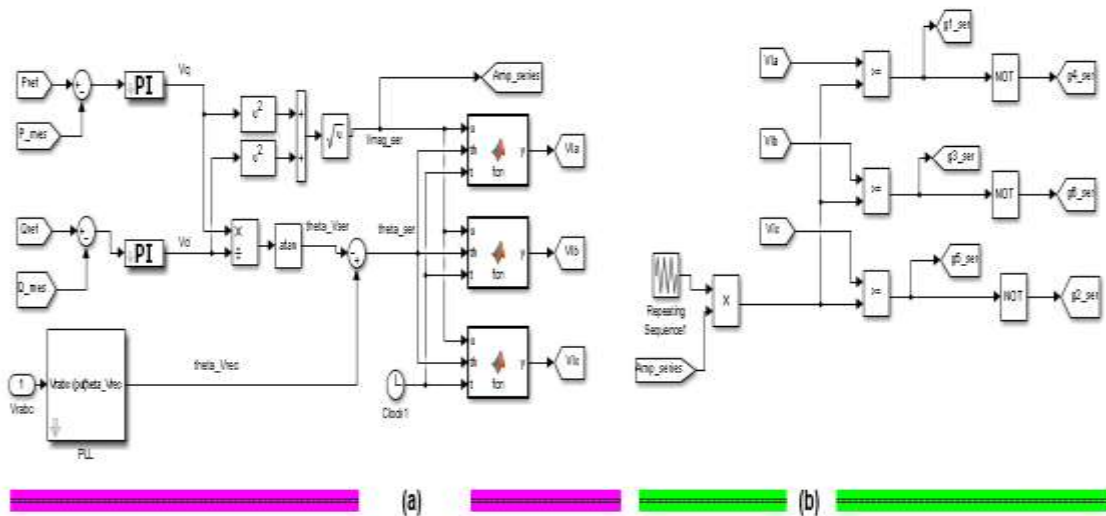


Figure A.8: Configuration du circuit de réglage du SSSC réalisé avec des blocs Simulink,
 a)- PI du flux de puissance active et réactive pour générer la tension série (en module et en angle)
 b)- Technique PWM pour générer des signaux de déclenchement pour le convertisseur série

❖ Convertisseur shunt du modèle UPFC sous Sim Power System

La figure suivante (Figure A.9) montre le schéma du convertisseur shunt de l'UPFC sous MATLAB/Simulink.

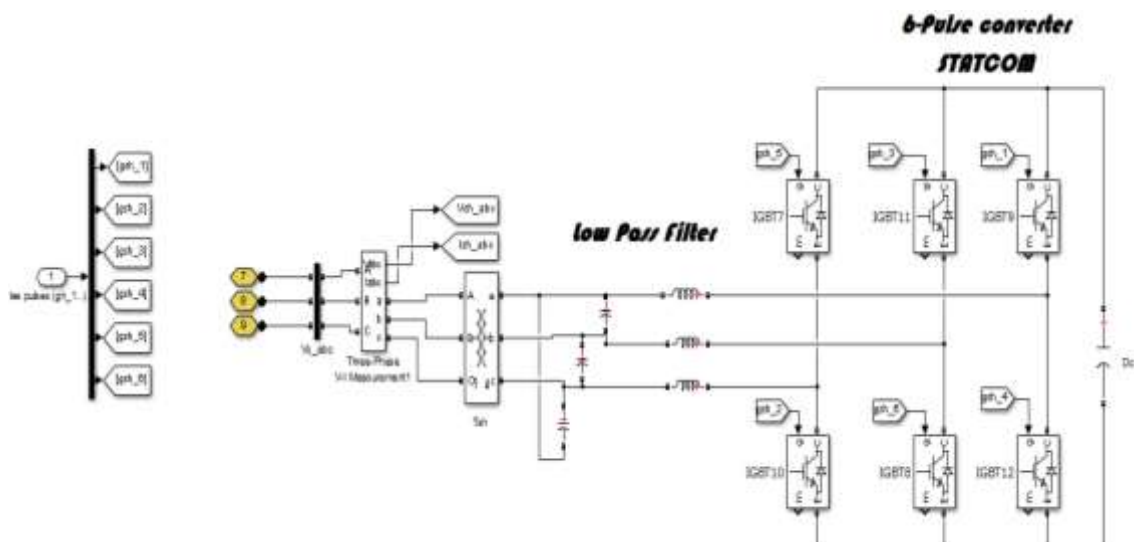


Figure A.9: Schéma du convertisseur shunt (pour les 3 phases).

La figure A.10 montre, le schéma de principe de l'algorithme de commande du convertisseur shunt de l'UPFC.

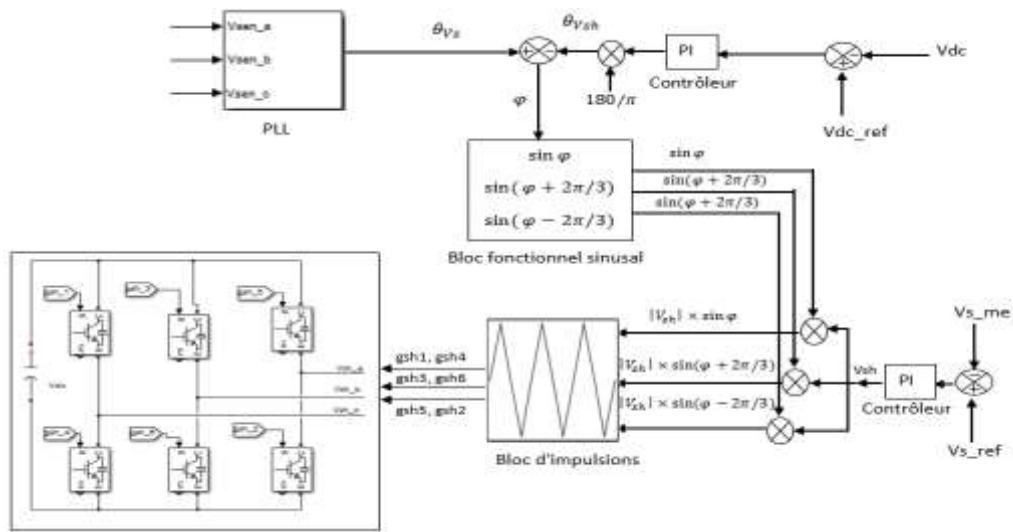


Figure A.10: Algorithme de contrôle proposé pour l'onduleur shunt de l'UPFC

La configuration du circuit de réglage de contrôleur shunt (STATCOM) de l'UPFC sous SIMULINK plateforme est donnée dans la figure suivante (Figure A.11).

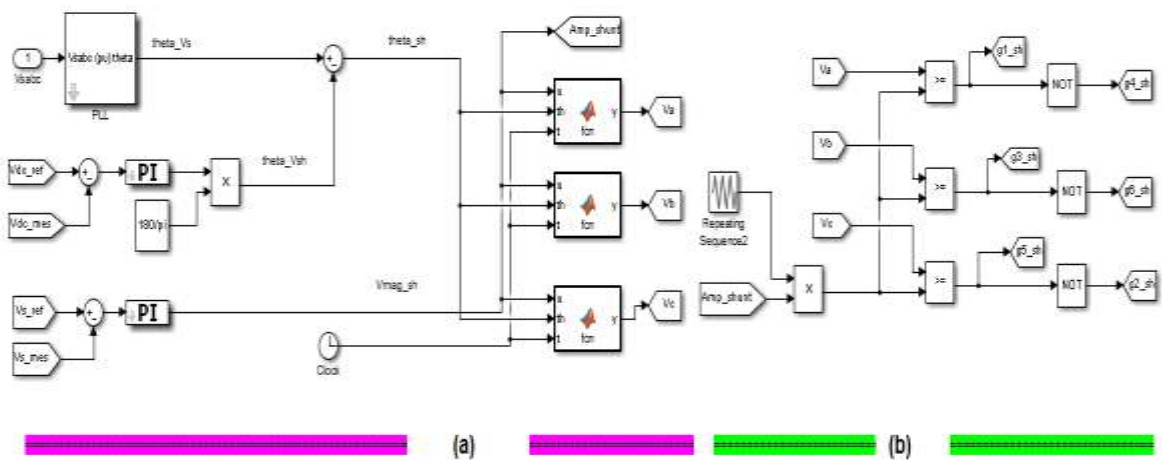


Figure A.11: Configuration du circuit de réglage du STATCOM réalisé avec des blocs Simulink,
 a)- PI de la tension de condensateur du circuit intermédiaire et de la tension de sortie pour générer l'amplitude et l'angle de phase de la tension shunt.
 b)- Technique PWM pour générer des signaux de déclenchement pour le convertisseur shunt.

Annexe –B-

Résultats de flux de puissance sans et avec compensation

Les blocs de mesure trouvés dans la Bibliothèque MATLAB/Simulink sont utilisés pour faciliter les mesures numériques des différents paramètres constituent notre réseau test (14 nœuds). Ces mesures reflètent l'image des tensions nodales (V), le flux des puissances transmises (P , et Q) pour chaque ligne connectée entre deux nœuds, et les pertes aux différentes lignes. Les Figures suivantes (B.1.....B4), montrent les blocs Simulink réalisées, grâce à ce système l'écoulement de puissance, la tension aux différents nœuds a été effectuée instantanément.

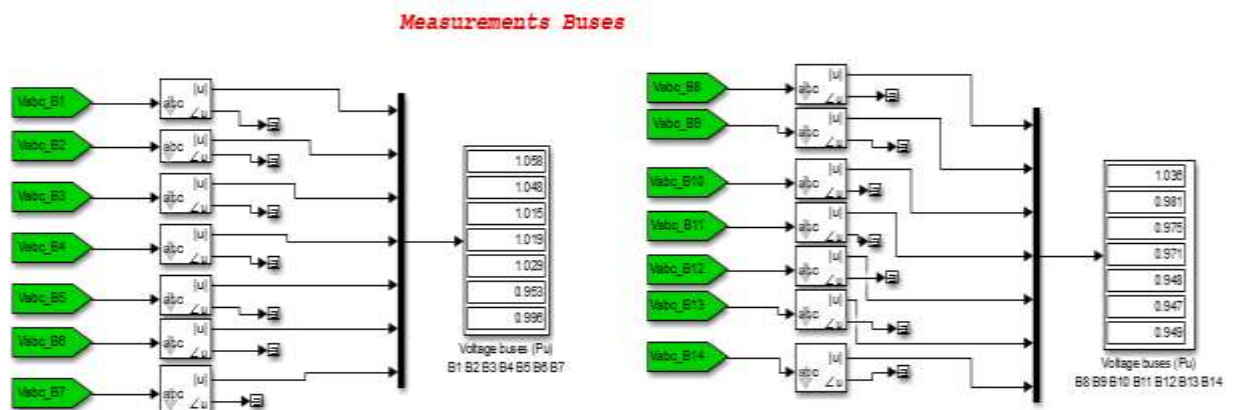


Figure B.1: Profile de la tension sans compensation (Sans UPFC)

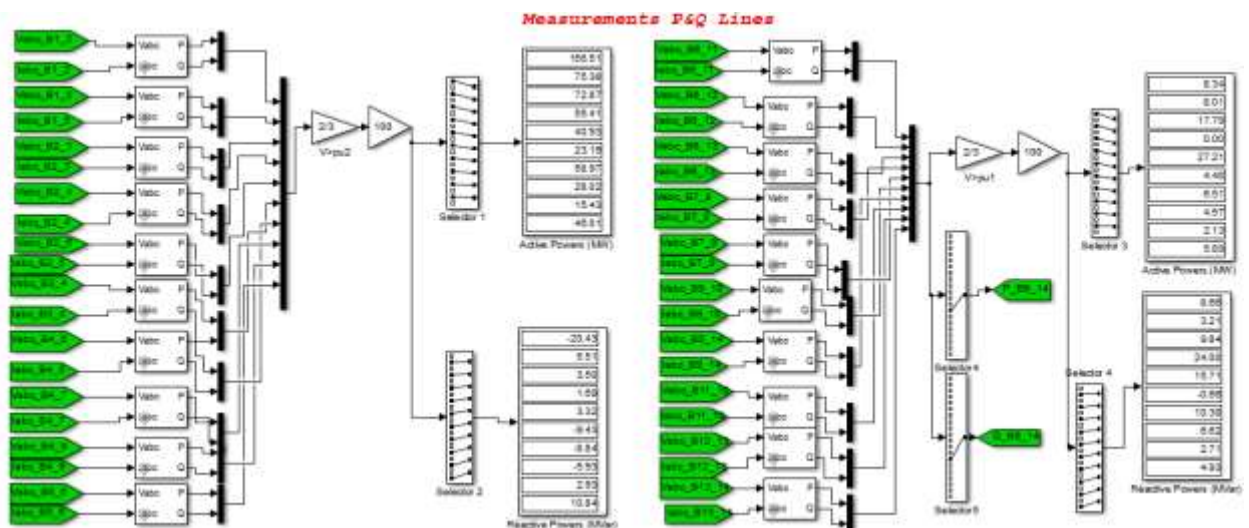


Figure B.2: Résultats de flux de puissance sans compensation (Sans UPFC)

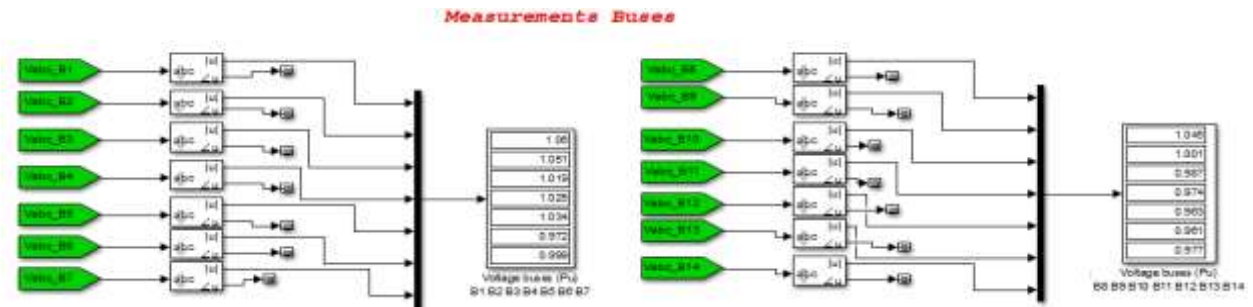


Figure B.3: Profile de la tension avec compensation (Avec UPFC dans la ligne N°17)

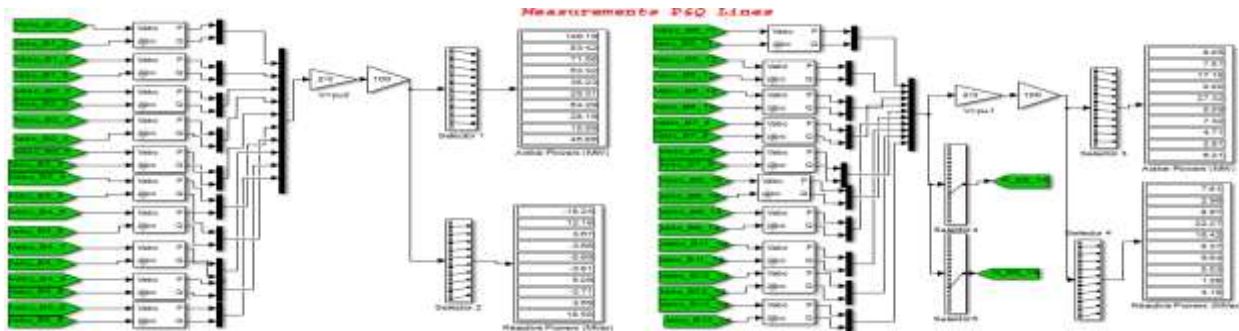


Figure B.4: Résultats de flux de puissance avec compensation (Avec UPFC dans la ligne N°17)

Les mesures des paramètres: V , P , Q , P_{pert} et Q_{pert} pour le réseau 14 nœuds est données par le tableau suivant :

a. Le résultat de flux de puissance (analyse dynamique)

Tableau B.1 : Résultat de flux de puissance dans le réseau IEEE-14 nœuds						
Ligne N°	Du	Vers	La puissance mesurée Sans UPFC		La puissance mesurée Avec UPFC	
			P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
1	1	2	156.51	-20.43	149.19	-18.24
2	1	5	75.38	5.51	83.42	12.18
3	2	3	72.87	3.50	71.56	3.67
4	2	4	55.41	1.69	53.32	-3.66
5	2	5	40.93	3.32	38.23	-5.69
6	3	4	23.19	-9.43	25.31	-3.81
7	4	5	58.97	-8.84	64.29	5.09
8	4	7	28.02	-5.93	28.19	-3.71
9	4	9	15.43	2.93	15.59	3.69
10	5	6	46.01	10.84	45.86	18.58
11	6	11	8.34	8.66	8.05	7.61
12	6	12	8.01	3.21	7.87	2.96
13	6	13	17.97	9.84	17.18	8.97
14	7	8	0	24	0	22.27
15	7	9	27.21	15.71	27.32	16.42
16	9	10	4.48	-0.66	5.09	0.37
17	9	14	6.51	10.3	7.32	9.64
18	10	11	4.57	6.62	4.71	5.53
19	12	13	2.13	2.71	2.91	1.28
20	13	14	5.89	4.93	6.21	4.18

Les Valeurs en gras pour mettre en évidence le changement résulte après l'UPFC installé dans la ligne N°17

b. Le résultat de profil de la tension (analyse dynamique)

Tableau B.2: Profil de la tension dans le réseau IEEE 14 nœuds

Nœud N°	La Tension mesurée Sans UPFC	La Tension mesurée Avec UPFC
	V(p.u.)	V (p.u.)
1	1.058	1.060
2	1.048	1.051
3	1.015	1.019
4	1.019	1.025
5	1.029	1.034
6	0.953	0.972
7	0.996	0.999
8	1.036	1.045
9	0.981	1.001
10	0.975	0.987
11	0.971	0.974
12	0.948	0.963
13	0.947	0.961
14	0.949	0.977

Les Valeurs en gras pour mettre en évidence le changement résulte avec l'UPFC installé dans la ligne N°17

c. Le résultat des pertes des puissances (analyse dynamique)

Tableau B.3: Résultat des pertes des puissances dans le réseau IEEE 14 nœuds

Ligne N°	Du	Vers	Les pertes de puissance Sans UPFC		Les pertes de puissance Avec UPFC	
			P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
1	1	2	2.864	8.746	2.859	8.730
2	1	5	2.486	10.240	1.880	7.350
3	2	3	1.681	6.493	1.533	5.461
4	2	4	1.043	3.166	1.033	2.135
5	2	5	0.676	1.761	0.563	1.243
6	3	4	0.281	0.719	0.268	0.584
7	4	5	0.386	0.902	0.278	0.778
8	4	7	0.476	1.945	0.376	1.640
9	4	9	0.616	5.173	0.516	4.696
10	5	6	0.170	3.509	0.090	3.120
11	6	11	0.130	0.272	0.126	0.264
12	6	12	0.047	0.098	0.035	0.074
13	6	13	0.155	0.305	0.115	0.226
14	7	8	0.061	0.210	0.022	0.190
15	7	9	0.123	0.109	0.110	0.102
16	9	10	0.051	0.137	0.051	0.116
17	9	14	0.127	0.270	0.139	0.213
18	10	11	0.088	0.219	0.085	0.131
19	12	13	0.005	0.045	0.004	0.003
20	13	14	0.301	0.212	0.091	0.185
Pertes Totale (MW, Mvar)			11.767	44.531	10.144	37.421

Les Valeurs en gras pour mettre en évidence le changement résulte avec l'UPFC installé dans la ligne N°17

Références Bibliographiques

- [1] Berbaoui Brahim , « *Amélioration De La Qualité De L'énergie Electrique par L'UPLC (Universal Active Power Line Conditioner) A Commande Intelligente* », thèse de doctorat, université de Béchar, 2013.
- [2] Abdelaàli ALIBI, « *Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)* », Mémoire magister, université de BATNA, 2009
- [3] Jean Christophe, « *Interactions des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques* », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 1998.
- [4] SEBAA Morsli, « *Commande Robuste d'un UPFC dans un Réseau d'Énergie Électrique Multi Machines*», thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2012.
- [5] CIGRE TASK FORCE 38-01 .06 « *Load Flow control in high voltage power systems using FACTS controllers*» , CIGRE, January 1996 (document).
- [6] DJILANI KOBIBI Youcef Islam, « *Incorporation de l'UPFC dans le calcul de la répartition des puissances dans un réseau électrique*», thèse de doctorat, université DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2016.
- [7] Amar HAMACHE, « *Investigation sur les Modèles de Commande d'un UPFC en vue de Réguler le Flux de Puissance dans une Interconnexion THT d'un Réseau Electrique*», thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2015.
- [8] Abdelouahed Touhami, Zidi Sid Ahmed, Fadi M. Albatsh, « *Performance Evaluation of Fuzzy-Logic Controller applied to a UPFC Transmission System*», in *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, vol. 66, no. 1, pp 122-131, ISSN 1582-5175, 2018.
- [9] FADI M. R. ALBATSH, « *dynamic power flow control of transmission network using fuzzy based unified power flow controller*», these doctoral, UNIVERSITY OF MALAYA, 2015.
- [10] Kazemi, A., & Sohrforouzani, M. V, « *Power system damping using fuzzy controlled facts devices*», in *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 5, 349-357, 2006.
- [11] Saribulut, L., Teke, A., & Tümay, M., « *Dynamic control of unified power flow controller under unbalanced network conditions*», *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 19, no. 2, 817-836, 2011.
- [12] Gholipour, E., & Saadate, S, « *Improving of transient stability of power systems using UPFC*», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20 no. 2, 1677-1682, 2006.
- [13] Padiyar, K., & Kulkarni, A. (1998) , « *Control design and simulation of unified power flow controller*», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 4, 1348-1354, 1998.
- [14] M.N.Tanjaoui , « *Etude de l'Apport des FACTS dans un Réseau Distribué*», thèse de doctorat, université de Béchar, 2014.
- [15] HADJI Boubakeur « *Contribution à l'Amélioration de l'Efficacité des Réseaux Electriques par l'Intégration et le Contrôle Flexible de l'Energie Eolienne et des Systèmes FACTS* », thèse de doctorat, université de Biskra, 2017.
- [16] BOUDIAF Mohamed, « *Contribution de l'IPFC à la stabilisation des réseaux électriques* » thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2014.

- [17] M. Karim Sebaa, «*Commande intelligente pour l'amélioration de la stabilité dynamique des réseaux d'énergie électrique*», thèse de doctorat, l'Université des Sciences & des Technologies Houari Boumediene (USTHB), 2008.
- [18] D. Jovicic, «*Control of High Voltage DC and Flexible AC Transmission Systems*», Thèse de doctorat en Philosophie de l'Énergie Électrique, Université de Auckland-New Zealand, décembre 1999.
- [19] Nabil MANCER, «*Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)* », thèse de doctorat, l'Université de Biskra, 2012.
- [20] E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E. Miller, «*Power Electronic Control in Electrical Systems*», NEWNES, Printed and bound in Great Britain, ISBN 075065126 1, 2002.
- [21] S.V Ravi Kumar & S. Siva Nagaraju, «*Simulation of D-STATCOM and DVR in Power Systems*», ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol.2, NO.3, ISSN 1819- 6608, JUNE 2007.
- [22] M.N.Tanjaoui, «*Contribution à l'Étude d'un DVR (Dynamic Voltage Restorer)* », Mémoire magister, université de Bechar, 2009.
- [23] «*Power Module TM Power Converters for Today's OEMs and Integrators*», American Superconductor, Inc. 2008.
- [24] V.G. Agelidis, G.D. Demetriades, N. Flourentzou, «*Recent Advances in HVDC Power Transmission Systems*», Paper Presented in ABB, AB SE-721 78 VASTERAS, Sweden.
- [25] Eskandar GHOLIPOUR SHAHRAKI, «*Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques*», thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2003.
- [26] DELENDI louardi , «*contrôle de l'écoulement de puissance active par système FACTS*», Mémoire magister, université de BATNA, 2009.
- [27] K. Belacheheb, «*Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport* », Thèse de doctorat de l'université de HENRI POINCARÉ NANCY I, 2001.
- [28] Erwan LE PELLETER, «*Outil d'électronique de puissance pour le maillage / bouclage des réseaux de distribution : application au contrôle des flux de puissance et la limitation des courants de courtcircuit*», thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble 2007.
- [29] A. Lashkar A. & S. A. Nabavi N., «*Comparison of the FACTS Equipment Operation in Transmission and Distribution Systems CIRED*», 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, 12-15 May 2003.
- [30] «*Flexible AC Transmission Systems (FACTS) for Utilities*», American Superconductor, 2007.
- [31] ABDELOUAHED Touhami, Zidi Sid Ahmed ,and HADJERI Samir, «*Control of a wind energy conversion system equipped by a STACOM for power quality improvement*», 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC-2016) Algiers, November 15-17, 2016 978-0-9567157-6-0 © IEEE 2016 pp 115-121.
- [32] Abdelouahed Touhami , Zidi Sid Ahmed, FADI. M. Albatsh and HADI Ali, «*Improved Dynamic Performance of Wind Energy Conversion System by STATCOM*», Published in: the Proceedings of engineering and technology- PET vol 35pp 9-15 Conférence internationale en automatique & traitement de signal (ATS-2018), Maroc.

- [33] X. Zhang, C. Rehtanz et B. Pal, «*Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*», New York: Springer Science and Business Media, 2012.
- [34] Acharya, N., Sode-Yome, A., & Mithulananthan, N, «*Facts about flexible AC transmission systems (FACTS) controllers: practical installations and benefits* », Paper presented at the Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Australia, 2005.
- [35] Siemens,«*Discover the world of Facts technology*», www.siemens.com/energy/facts, 2012.
- [36] ABB, «*Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS)*», <http://www.abb.com/FACTS>, 2012.
- [37] Baofeng, T., Hui, F., Xiaowei, W., Xiao, Y., & Cuiyan, H, «*The dynamic simulation research on application of SVC in the south Hebei power grid*», Paper presented at the China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2010.
- [38] Jianzong, M., Mingli, W., & Shaobing, Y, «*The application of SVC for the power quality control of electric railways*», Paper presented at the International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN, 2009.
- [39] Bachmann, U., Berger, F., Reinisch, R., Erlich, I., Häusler, M., Lösing, M., Schnurr, N, «*Possibilities of Multifunctional FACTS Application in the European Electric Power System under the Changing Conditions of the Liberalized Electricity Market*», CIGRE Session, Germany, 2002.
- [40] Gama, C., Ängquist, L., Ingeström, G., & Noroozian, M, «*Commissioning and operative experience of TCSC for damping power oscillation in the Brazilian north-south interconnection*», Paper presented at the Proc. CIGRE Session, 2000.
- [41] Holmberg, D., Danielsson, M., Halvarsson, P., & Ängquist, L, «*The Stode thyristor controlled series capacitor*», CIGRE. Paris: CIGRE, 1998.
- [42] Ren.H., Watts.D., Mi.Z., Lu.J., Mi.Z., & Lu.J, «*A review of FACTS practical consideration and economic evaluation*», Paper presented at the Power and Energy Engineering Conference, APPEEC. Asia-Pacific, 2009.
- [43] Oskoui.A., Mathew.B., Hasler.J., Oliveira.M., Larsson.T., Petersson. A., & John. E, «*Holly STATCOM-FACTS to replace critical generation, operational experience*», Paper presented at the Transmission and Distribution Conference and Exhibition, IEEE PES, 2006.
- [44] Paserba, J. J., «*How FACTS controllers-benefit AC transmission systems*», Paper presented at the Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES, 3, 949-956, 2003.
- [45] Renz, B., Keri, A., Mehraban, A., Schauder, C., Stacey, E., Kovalsky, L., Edris, A., «*AEP unified power flow controller performance*», IEEE Transactions on Power Delivery, 14(4), 1374-1381, 1999.
- [46] Han, Y., Suh, I., Kim, J., Lee, H., Choo, J., & Chang, B., «*Commissioning and Testing of the Kang Jin UPFC in Korea*», Hyosung Corporation and Korea Electric Power Research Institute, 2004.
- [47] Chang, B.H; Kim S.Y. ; Yoon J.S.; Moon S.P.; Baek D.H.; Choo J.B, «*Control strategies study for KEPCO UPFC operation automation in Korean subtransmission system Cigré*», , B4-306, 2006.
- [48] MEZAACHE Mohamed, «*Contribution à l'Etude du Choix Optimal de l'Emplacement du Dispositif UPFC dans les Réseaux Electriques en Utilisant une des Méthodes Artificielles* » thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2016.

- [49] D. Stéphanie, "L'électronique de Puissance dans les Réseaux de Transport, les Systèmes Flexibles de Transport d'Énergie en Courant Alternatif, FACTS", Journée d'Étude du Groupe de Contact FNRS-GREPES, Faculté Polytechnique de Mons, Belgique, 22 Mars 2006.
- [50] Chang, B.H.; Kim S.Y. ; Yoon J.S.; Moon S.P.; Baek D.H.; Choo J.B, « *Control strategies study for KEPCO UPFC operation automation in Korean subtransmission system Cigré*», , B4-306, 2006.
- [51] Renz, B.A. ; Keri, A.J.F.; Menhraban Kessinger, J.P.; Schauder; C.D.; Gyugyi; L.; Kovalsky, L.J.; Edris, A.A.: «*World's First Unified Power Flow Controller on the AEP System Cigré*», 1998, 14-107.
- [52] Cigré WG, « *Static Synchronous Series Compensator (SSSC)* », B4-40,February 2009.
- [53] KHALED CHIKHI, «*Contribution à l'analyse de la qualité de l'énergie électrique dans le cas de la stabilité de tension*», Thèse de Doctorat, université de El HadjLakbdar Batna, 2007.
- [54] Fadi M. Albatsh, Shameem Ahmad , Saad Mekhilef , Hazlie Mokhlis , M. A. Hassan, « *Optimal Placement of Unified Power Flow Controllers to Improve Dynamic Voltage Stability Using Power System Variable Based Voltage Stability Indices*», PLOS ONE | DOI:10.1371/journal.pone.0123802,2015.
- [55] N. Hingorani et L. Gyugyi, «*Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems* ». New York, USA: IEEE Press, 2000.
- [56] NDIGUI NTAMACK Pauline Stéphanie, «*apport de L'UPFC sur l'amélioration transit de puissance : cas du corridor ouest du risc*», Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de professeur d'enseignement technique de deuxième grade (DIPETII), UNIVERSITE DE DOUALA,2009.
- [57] N. Dizdarević, «*Unified Power Flow Controller in Alleviation of Voltage Stability Problem*», Thèse de doctorat, Université Zagreb, 2001.
- [58] S. Zebirate, A. Chaker, A. Feliachi, S. Himmi, «*Neural network generalized predictive control of the unified power flow controller (UPFC)* », Conférence Nationale sur le Génie Electrique, CNGE 2004, Université Ibn Khaldoun, Tiaret, 29 Novembre au 1e Décembre 2004.
- [59] ABDELOUAHED Touhami and Zidi Sid Ahmed, «*Modeling and transient simulation of Unified Power Flow Controllers (UPFC) in power system*». Published in: Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2015), Boumerdes, December 13th – 15th, ©2015IEEE .<http://ieeexplore.ieee.org/>, DOI: 10.1109/INTEE.2015.7416851
- [60] ABDELOUAHED TOUHAMI and Zidi Sid Ahmed, «*Control Design and Simulations of Unified Power Flow Controllers (UPFC) in Power System- Modeling and Case Study* »,Published in: Proceedings of the Mechanical Engineering and Technologies Conference (MECHATECH 16), May 17- 18, 2016 in Istanbul, Turkey.
- [61] Bouanane Abdelkrim, Chaker Abdelkader, Addadi Zoubida, Amara Mohamed , « *Neural adaptive control by state space system UPFC (SSNN) for compensation of active And reactive power*», nternational Journal of Scientific & Engineering Research Volume 3, Issue 3, March - 2012, ISSN 2229-5518.
- [62] ABDELOUAHED Touhami , ZIDI sid ahmed , and HADDI, ali, «*Enhancement of Active and Reactive Power Flow Control over the Transmission Line using UPFC*», in international journal of computer science communication & information technology (CSCIT),2018, Vol.6 pp.1-8, ISSN 2356-5608.

- [63] A. HAMACHE et H. CHEKIREB, «*Adaptive Sliding Mode Control of HV Power System using UPFC*», Mediterranean Journal of Measurement and Control, Vol .9, No .3, pp. 92-100,2013, ISSN: 1743-9310.
- [64] A. HAMACHE et H. CHEKIREB, «*Centralized Sliding Mode Control of Power System with UPFC*», WSEAS Transactions on Systems and Control, Vol. 9, pp. 464- 472, 2014, ISSN: 1991-8763.
- [65] M.S. El-Moursi , A.M. Sharaf, «*Novel reactive power controllers for the STATCOM and SSSC*», Electric Power Systems Research, pp. 228–241, 2006.
- [66] S. Gusia, « *Modélisation des systèmes électroniques de puissance à commande MLI* », Thèse de Doctorat, Université catholique de LOUVAIN, Septembre 2005.
- [67] P. Zhu, L. Liu, X. Liu, Y. Kang and J. Chen, «*Analysis and Comparison of two Control Strategies for UPFC*», Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES, pp. 1-7.
- [68] Q. Yu, S. D. Round, L. E. Norum and T. M. Undeland, «*Dynamic Control of a Unified Power Flow Controller*», Power Electronics Specialists Conference. Vol. 1, 1996, pp. 508-514.
- [69] M. Ghanbari and S. M. Hosseini, «*Dynamic SVD Controller Design of UPFC for Power Flow Control Considering Interractions*», IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT 2008, pp. 1-6.
- [70] C. M. Yam and M. H. Haque , «*A SVD based controller of UPFC for power flow control*” , Electric Power Systems Research, Vol. 70, June 2004, pp. 76-84.
- [71] G. Saravanailango and C. Nagamani, «*A Non-linear Control Technique for Unified Power Flow Controller Based on Feed-back Linearization*», Electric Power Components and Systems, Vol. 36, 2008, pp. 432-447.
- [72] H. Alasooly and M. Redha, «*Optimal control of UPFC for load flow control and voltage flicker elimination and current harmonics elimination*», Computers and Mathematics with Applications, Vol. 60, 2010, pp. 926-943.
- [73] A. Zangeneh, A. Kazemi, M. Hajatipour and S. Jadid, «*A Lyapunov theory based UPFC controller for power flow control*», Electrical Power and Energy Systems, Vol. 31, 2009, pp. 302-308.
- [74] K. Wang, B. Yan, M. L. Crow, D. Gan, «*A Feedback linearization based unified power flow controller internal controller for power flow control*», Electr Power Compon Syst 2012; 40: pp. 628 – 647.
- [75] G. S. Ilango, C. Nagamani and D. Aravindan, «*Independent Control of Real and Reactive Power Flows using UPFC based on Adaptive Back Stepping*», TENCON 2008, IEEE Region 10 Conference, pp. 1-6.
- [76] Monteiro, J., Silva, J., Pinto, S., & Palma, J., « *Linear and Sliding Mode Control Design for Matrix Converter Based Unified Power Flow Controllers*»,2013.
- [77] M. E. A. Putrus and G. A. Farrag, «*Design of an Adaptive Neuro fuzzy Inference Control System for the Unified Power-Flow Controller*», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, 2012, pp. 53-61.
- [78] N. Talebi and A. Akbarzadeh, «*Damping of Low Frequency Oscillations in Power Systems with Neuro-Fuzzy UPFC Controller*», 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011, pp. 1- 4.

- [79] Farrag, M. E. A., & Putrus, G. A., «*Design of an Adaptive Neurofuzzy Inference Control System for the Unified Power-Flow Controller*», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27(1), 53-61. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2171061, 2012.
- [80] Venayagamoorthy, G. K., & Kalyani, R. P., «*Two separate continually onlinetrained neurocontrollers for a unified power flow controller*», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.41(4), 906-916, 2005.
- [81] Mishra, S., «*Neural-network-based adaptive UPFC for improving transient stability performance of power system*», IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 17(2), 461-470., 2006.
- [82] Tiwari, S., Naresh, R., & Jha, R., «*Neural network predictive control of UPFC for improving transient stability performance of power system*», Applied Soft Computing, Vol. 11(8), 4581-4590, 2011, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2011.08.003>.
- [83] MOHAMED JALBOUB, «*Investigation of the Application of UPFC Controllers for Weak Bus Systems Subjected to Fault Conditions*», these doctoral , School of Engineering, Design and Technology University of Bradford, 2012.
- [84] Shameem Ahmad , Fadi . Albatsh , Saad Mekhilef , Hazlie Mokhlis , «*Fuzzy based controller for dynamic Unified Power Flow Controller to enhance power transfer capability*», Energy Conversion and Management, Vol. 79 (2014) 652–665
- [85] Gitizadeh M, Kalantar M, «*A novel approach for optimum allocation of FACTS devices using multiobjective function*», Energy Conversion and Management, Vol. 50 (2009) 682–90.
- [86] Mahdad B, Bouktir T, Srairi K, EL Benbouzid M, «*Dynamic strategy based fast decomposed GA coordinated with FACTS devices to enhance the optimal power flow*», Conversion and Management 2010;51:1370–80.
- [87] Sirjani R, Mohamed A, Shareef H, «*Optimal allocation of shunt Var compensators in power systems using a novel global harmony search algorithm*», Int Journal Electrical Power Energy System 2012;43:562–72.
- [88] Nagalakshmi S, Kamaraj N, «*Secured loadability enhancement with TCSC in transmission system using computational intelligence techniques for pool and hybrid model*», Applied Soft Computing 2011;11:4748–56.
- [89] Basu M, «*Multi-objective optimal power flow with FACTS devices*», Conversion and Management 2011;52:903–10.
- [90] Chansareewittaya S, Jirapong P, «*Power transfer capability enhancement with optimal maximum number of facts controllers using evolutionary programming*», 37th Annual conference on IEEE industrial electronics society, IECON; 2011. p. 4733–8.
- [91] Chansareewittaya S, Jirapong P, «*Power transfer capability enhancement with multitype FACTS controllers using particle swarm optimization*», IEEE Region 10 conference, TENCON; 2010. p. 42–7.
- [92] Manikandan BV, Raja SC, Venkatesh P, «*Available transfer capability enhancement with FACTS devices in the deregulated electricity market*», J Elect Eng Technol 2011;6:14–24.
- [93] Lashkar Ara A, Kazemi A, Nabavi Niaki SA, «*Modelling of optimal unified power flow controller (OUPFC) for optimal steady-state performance of power systems*», Energy Convers Manage 2011;52:1325–33.
- [94] A. Laifa et M. Boudour, «*Optimal placement and parameter settings of unified power flow controller device using a perturbed particle swarm optimization*», IEEE International Energy Conference and Exhibition (EnergyCon), 2010, pp. 205 - 210.

- [95] Meng W, Qinxiang G, Leiting C, Liqiang L et Caiyun Z, « *Mathematical Model and Control Strategy of UPFC* », Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, IEEE. pp. 391 – 393, 2014.
- [96] Power Systems Test Case Archive. University of Washington. Available: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>
- [97] Fadi M. Albatsh, Shameem Ahmad , Saad Mekhilef , Hazlie Mokhlis , M. A. Hassan, « *Optimal Placement of Unified Power Flow Controllers to Improve Dynamic Voltage Stability Using Power System Variable Based Voltage Stability Indices* », PLOS ONE | DOI:10.1371/journal.pone.0123802,2015.
- [98] Albatsh F M, Ahmad S, Mekhilef S, Mokhlis H, Hassan M, « *DQ model of Fuzzy based UPFC to control power flow in transmission network* », 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, (PEMD), Manchester, UK, 2014; pp. 1–6.
- [99] L.A. Zadeh, « *Fuzzy Sets, information and control* », vol 8, pp 338-353, 1965.
- [100] Ghaleb Abdellatif, « *Commande floue d'un UPFC à trois niveaux pour améliorer la stabilité transitoire d'un réseau multimachines* », Mémoire magister, université des sciences et de la technologie «Mohamed Boudiaf » ORAN, 2012.
- [101] B.bouchn, « *la logique floue et ses application* », France 1994.
- [102] E .H.Mamdani, « *Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamics plant* », IEE proc N°21, 1974.
- [103] H. Bühler, « *réglage par logique floue* », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne,1999.
- [104] Berrahal Khoukha, « *Modélisation et simulation d'un système FACTS : UPFC* », Mémoire magister, université de BATNA, 2009.
- [105] H.P. Geering, « *Introduction to Fuzzy Control* », Swiss Federal institute of technology (ETH) CH-8092, Zürich, 2nd edition, October 6, 1992.
- [106] H.J. Zimmermann, « *Fuzzy sets Theory and its applications* », Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London 1991.
- [107] T.J. Ross, « *Fuzzy Logic with Engineering Applications* », 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd., 2005.
- [108] Samira DIB, « *Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique par l'utilisation d'un UPQC* », Thèse de Doctorat, université de Bechar, 2010.
- [109] Mohammed Y. Hassan, Waleed F. Sharif, « *Design of FPGA based PID-like Fuzzy Controller for Industrial Applications* », IAENG International Journal of Computer Science, 34:2, IJCS_34_2007.
- [110] CHAIB amina, « *Optimisation des paramètres d'un régulateur PID flou par les algorithmes génétique* », Mémoire magister 2009, université de Annaba.
- [111] KESSAL Abdelhalim, « *Correction du facteur de puissance a l'entrée d'un convertisseur AC/DC* », thèse de doctorat, université de Sétif, 2012.
- [112] GASBAOUI BRAHIM, « *Optimisation de la puissance réactive dans un réseau d'énergie électrique* », Mémoire magister, université de Bechar, 2008.
- [113] LAROUCI BENYEKHFLEF, « *Contribution à l'étude d'un contrôleur universel de puissance(UPFC) pour l'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique* », Mémoire magister, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2011.

- [114] TOUAL Belkacem, «*Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable*», Mémoire de Magister en Electrotechnique, Spécialité Machines Electriques, Université de Batna, Algérie, 17 Octobre 2010.
- [115] J.Godjevac, «*Idées nettes sur la logique floue*». Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Première édition, Lausanne 1999, ISBN 2-88074-378-8.
- [116] Walid Tfaili, «*Conception d'un algorithme de colonie de fourmis pour l'optimisation continue dynamique*», thèse de doctorat, de l'université paris 12-val de marne 2007.
- [117] S.L. AVILA, «*Optimisation multiobjectif et analyse de sensibilité appliquées à la conception de dispositifs* », Thèse de doctorat l'Université Fédérale de Santa Catarina (Brésil) 2006.
- [118] Alain Berro, «*Optimisation multiobjectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique*», Thèse présentée à l'Université des Sciences Sociales Toulouse I, 2001.
- [119] P. Siarry, J. Dréo, A. Pétrowski, E. Taillard., «*Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*», 2006, Eyrolles .
- [120] Y. Shi, R. Eberhart., «*Parameter Selection in Particle Swarm Optimization* », Proceedings of the 7th Annual Conference on Evolutionary Programming, 1998, pp. 591-600, LNCS 1447, Springer
- [121] R.C. Eberhart, Y. Shi., «*Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization*», Proceedings of the 6th IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 84-88, 2000, IEEE Press.
- [122] H.Y. Fan, Y. Shi., «*Study on Vmax of particle swarm optimization, Proceedings of the Workshop on Particle Swarm Optimization*», Indiana University-Purdue University Indianapolis Press, 2001.
- [123] J. Kennedy., «*Small worlds and mega-minds : effects of neighborhood topology on particle swarm performance*», Proceedings of the 1999 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 1931- 1938, 1999, IEEE Press.
- [124] J. Kennedy, R.C. Eberhart., «*Particle Swarm Optimisation*», Proceedings of the IEEE International Conference On Neural Networks, 1995. 1942-1948, IEEE Press.
- [125] Y. Bazi, L. Bruzzone, F. Melgani., «*Image thresholding based on the EM algorithm and the generalized Gaussian distribution*», Pattern Recognition Journal, Vol. 40, 619_634, 2007.
- [126] D.J. Watts, S.H. Strogatz., «*Collective dynamics of small worlds networks*», Vol. 393, 440-442, 1998.
- [127] M. Clerc and J. Kennedy, «*The particle swarm-explosion, stability and convergence in a multidimensional complex space*», IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6 (1):58- 73, 2002.
- [128] P.N. Suganthan., «*Particle Swarm Optimizer with neighborhood operator*», Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, 1958-1962, IEEE Press, 1999.
- [129] F. Van den Bergh. , «*An analysis of Particle Swarm Optimizers*», PhD thesis, University of Pretoria, South Africa, 2002.
- [130] J. Holland, «*adaptation in natural and artificial systems*», university of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [131] Help Matlab R2016a.
- [132] FERGANE Manel , «*Les Méthodes D'amélioration De La Stabilité Dynamique Dans Les Réseaux Electriques*», Mémoire magister, Université de Sétif, 2014

- [133] M. Dorigo, «*Optimization, learning and natural algorithms*», Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- [134] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colnari. «*Ant system : optimization by a colony of cooperating agents*». IEEE Trans. on Man. Cyber. Part B, 26 :29–41, 1996.
- [135] M. Dorigo, C. Blum, «*Ant colony optimization theory : A survey Theoretical Computer*», 344 :243–278, 2005.
- [136] P. S. Shelokar, P. Siarry, V.K. Jayaraman, and B.D. Kulkarni, «*Particle swarm and ant colony algorithms hybridized for improved continuous optimization*», Applied Mathematics and Computation, 188 :129– 142, 2007.
- [137] M. D. Toksari, «*Ant colony optimization for finding the global minimum*», Applied Mathematics and Computation, 176 :308–316, 2006.
- [138] Hanaâ HACHIMI, «*hybridations d'algorithmes métaheuristiques en optimisation globale et leurs applications* », Thèse de Doctorat, Université Mohammed V – Agdal, Rabat, 2013.
- [139] M. Dorigo and L. M. Gambardella, «*Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem*», IEEE Trans on Evolutionary Computation, vol. 1,(1), pp. 53–66, 1997.
- [140] Stützle, T. and Hoos, H, «*The MAX-MIN Ant System and local Search for Combinatorial Optimization Problems*», Towards Adaptive Tools for Global Optimization ‘. 2nd Metaheuristics Inter Conf, Sophia- Antipolis, France, 1997.
- [141] M. Dorigo and T. Stützle. «*The ant colony optimization metaheuristic: Algorithms, applications, and advances*», in Fred Glover and Gary A. Kochenberger, editors, Handbook of Metaheuristics, Inter Series in ORM Science, pp 251-285. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [142] M. Dorigo, T. Stützle. «*Ant Colony Optimization*», MIT Press, Cambridge, MA, 2004
- [143] Y. Kao, E. Zahara. «*A hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization for multimodal functions*», Applied Soft Computing, 8 :849–857, 2008.
- [144] P. S. Shelokar, P. Siarry, V.K. Jayaraman, and B.D. Kulkarni, «*Particle swarm and ant colony algorithms hybridized for improved continuous optimization*», Applied Mathematics and Computation, 188 :129– 142, 2007.

Résumé -La planification et l'exploitation des réseaux électriques souffrent par le souci de l'augmentation des transits de puissance. Ces problématiques ont conduit à l'introduction des dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems) pour remédier des différentes anomalies électriques affectant ces réseaux, notamment le contrôle des flux de puissance, le maintien de la tension transmise, l'augmentation de la puissance transmissible maximale et l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques. Dans ce contexte, notre travail est serré sur l'un des plus puissants des composants FACTS, est l'UPFC (Unified Power Flow Contrôler). Ce dispositif est capable d'agir sur les trois paramètres (tension, impédance et angle de transport), qui régissent le transit de puissance dans une ligne électrique. Parmi les différentes fonctions de l'UPFC, on s'intéresse dans cette thèse sur deux fonctions principales à savoir : le contrôle de la tension transmise et l'amélioration de flux de puissance pour divers réseaux électriques. Les performances de fonctionnement de l'UPFC sont adaptées par le régulateur classique PI et sont améliorées par des techniques de commande avancée (Intelligence Artificielle) spécifiquement la logique floue. Pour plus avancer aux développements des résultats obtenus, les méthodes méta-heuristiques à savoir les algorithmes : de génétiques, d'essais de particules, de colonies de Fourmis occupent un intervalle major à l'application dans le système de régulation de l'UPFC afin d'améliorer ses performances et d'atteindre à des valeurs plus optimums pour un fonctionnement vitale des réseaux électriques. En termes de performance dynamique, l'étude comparative des résultats de simulation pour différents tests révèle que la commande utilisant l'intelligence artificielle et les méthodes d'optimisation sont les meilleures, ils assurent de bonnes performances de system de contrôle en termes de poursuite, robustesse et découplage.

Mots clés : Réseau électrique, FACTS, UPFC, flux de puissance, performance dynamique, intelligence artificielle logique Floue, méthodes d'optimisation.

Abstract -The planning and operation of power grids is in the process of increasing power transits. These problems have led to the introduction of FACTS (Flexible AC Transmission Systems) devices to remedy the various electrical anomalies affecting these networks, including power flow control, voltage maintenance increasing the power transfer and improve the stability of power grids. In this context, our work is tight on one of the most powerful FACTS components, is the UPFC (Unified Power Flow Control). This device is capable of acting on the three parameters (tension, impedance and transport angle), which govern the transit of power in a power line. Among the various functions of the UPFC, we are interested in this thesis on two main functions: the control of the voltage transmitted and the improvement of power flows control for various electrical networks. The operating performance of the UPFC is adapted by the classic PI regulator and is improved by advanced control techniques (artificial intelligence) specifically the fuzzy logic. To further advance the development of the results obtained, the meta-heuristic methods, namely algorithms: genetics, swarms of particles, colonies of ants occupy a major interval to the application in the regulatory system of UPFC to improve their performance and achieve more optimal values for vital power grids. In terms of dynamic performance, the comparative study of simulation results for different tests reveals that the control using the artificial intelligences and optimization methods are the best, they ensure good performance of control system in terms of tracking, robustness and decoupling.

Keywords: Power grid, FACTS, UPFC, power flow, dynamic performance, artificial intelligence Fuzzy Logic, optimization methods.

ملخص - يعاني تخطيط وتشغيل شبكات الطاقة من قلق زيادة عبور الطاقة. أدت هذه المشكلات إلى إدخال أجهزة FACTS (أنظمة نقل التيار المتردد المرنة) لمعالجة مختلف الحالات الشاذة الكهربائية التي تؤثر على هذه الشبكات، ولا سيما التحكم في تدفقات الطاقة، وصيانة الفولتية المرسل، وزيادة الحد الأقصى من القدرة المنقولة وتحسين استقرار شبكات الكهرباء. في هذا السياق، عملنا يركز على واحد من أقوى مكونات FACTS، هو UPFC (التحكم في تدفق الطاقة الموحد). هذا الجهاز قادر على العمل وفقاً للمعايير الثلاثة (الجهد، المعاوقة وزاوية النقل)، والتي تحكم نقل الطاقة في خط النقل الكهربائي. من بين وظائف UPFC المختلفة، نحن مهتمون في هذه الأطروحة على وظيفتين رئيسيتين هما: التحكم في الجهد المنقول وتحسين تدفق الطاقة لشبكات الكهرباء المختلفة. يتم تكييف الأداء التشغيلي للـ UPFC بواسطة منظم PI الكلاسيكي، ويتم تعزيزه بواسطة تقنيات التحكم المتقدمة (الذكاء الاصطناعي) بشكل خاص المنطق الغامض. للمضي قدماً في تطورات النتائج التي تم الحصول عليها، تحتل طرق التحسين التي تعتمد على الخوارزميات مثل: الجينات، أسراب الجسيمات، مستعمرات النمل نطاقاً رئيسياً للتطبيق في نظام التحكم في UPFC لتحسين أدائه والوصول إلى المزيد من القيم المثلى لعملية حيوية للشبكات الكهربائية. من حيث الأداء الديناميكي، تكشف مقارنة نتائج المحاكاة للاختبارات المختلفة أن التحكم باستخدام الذكاء الاصطناعي وطرق التحسين عن طريق الخوارزميات هي الأفضل، فهي تضمن الأداء الجيد لنظام التحكم من حيث التتبع والمثانة والفصل.

الكلمات المفتاحية: شبكة الطاقة، FACTS، UPFC، تدفق الطاقة، الأداء الديناميكي، الذكاء الاصطناعي، المنطق الضبابي، طرق التحسين