

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

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



THESE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique

THÈME

**Contribution d'un BtB-STATCOM et
D'un SSSC à la Stabilisation des
Réseaux Electriques Intelligents**

Préparé par : MM BELHACEL Kheira

Devant le Jury composé de :

Nom et prénoms	Grade	Etablissement	Qualité
NEGADI Karim	Pr	Univ de Tiaret	Président
BOUDIAF Mohamed	Pr	Univ de Djelfa	Encadreur
BERKANI Abderrahmane	MCA	Univ de Tiaret	Co-encadreur
CHERRON Lakhmissi	Pr	Univ de Djelfa	Examineur
GUETTAF Yacine	Pr	Univ d'ElBayadh	Examineur
ALLAOUI Tayeb	Pr	Univ de Tiaret	Examineur

Année universitaire 2023 /2024

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé sous la direction de Monsieur Mohamed BOUDIAF, Professeur à l'Université Ziane Achour - Djelfa et Monsieur Abderrahmane BERKANI Maître de Conférences à l'Université Ibn Khaldoun - Tiaret. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma gratitude pour leurs conseils et leur patience.

Je tiens à les remercier chaleureusement de l'aide précieuse et des conseils éclairés qu'ils m'ont apportés tout au long de ce travail.

Je remercie sincèrement à Monsieur NEGADI Karim, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun - Tiaret, de l'honneur qu'il me fait de présider le jury de soutenance de ma thèse.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur CHERRON Lakhmissi, Professeur à l'Université Ziane Achour - Djelfa, à Monsieur GUETTAF Yacine, Professeur à l'Université d'El Bayadh et à Monsieur T. ALLAQUI, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun - Tiaret d'avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail et être membres du jury de soutenance.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance à tous ceux que j'aime particulièrement :

à mon père

à ma mère

à mon marie

à mes enfants

à mes frères

et à tous mes amis

Sommaire

Sommaire

Nomenclature	I
Liste des figures et des tableaux	III
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes flexibles de transmission à courant alternatif	4
1.1 Introduction	5
1.2 FACTS	5
1.3 FACTS de type parallèle	5
1.3.1 Principe de fonctionnement	6
1.3.2 Les différents types des compensateurs parallèles	6
1.3.2.1 SVC	6
1.3.2.2 STATCOM	7
1.3.2.2 STATCOM	8
1.3.3 Les conséquences des compensateurs parallèles	9
1.4 FACTS de type série	10
1.4.1 Principe de fonctionnement	10
1.4.2 Les différents types de compensateur série	11
1.4.2.1 TCSC	11
1.4.2.2 Réactance série contrôlée par thyristors TCSR	12
1.4.2.3 Compensateur statique série synchrone SSSC	13
1.4.3 Les conséquences des compensateurs séries	13
1.5 FACTS type déphaseur statique	14
1.6 FACTS type hybride	14
1.6.1 TCPAR	14
1.6.2 IPFC	15
1.6.3 UPFC	15
1.7 Conclusion	16
Chapitre 2 : Modélisation, commande et application du SSSC	17
2.1 Introduction	18
2.2 Description du SSSC	18
2.2.1 Avantages des SSSC	19
2.2.2 Fonctionnement du SSSC	19
2.3 Modélisation et commande du SSSC	22
2.3.1 Modèle mathématique simplifié	22
2.3.2 Circuit de réglage d'un SSSC	23
2.3.3 Synthèse par PI classique	24
2.4 Résultats de réglage du SSSC	25
2.5 Application du SSSC pour améliorer la stabilité transitoire d'un réseau monomachine	27
2.5.1 Modélisation du réseau de test mono machine	27
2.5.1.1 Modélisation de l'alternateur	27

2.5.1.2	Modèle de la ligne	30
2.5.2	Étude de la stabilité de réseau de test mono machine	30
2.5.2.1	Stabilité transitoire et en petits mouvements des machines tournantes	31
2.5.2.2	Etudes de l'influence des petits mouvements (variation de la charge)	32
2.5.2.3	Etudes de l'influence des grands mouvements (défaut court- circuit symétrique)	33
2.5.3	Application du SSSC sur le réseau de test	33
2.5.3.1	Comportement du réseau avec le défaut	34
2.5.3.2	Comportement du réseau avec le défaut équipé d'une régulation classique	35
2.5.3.3	Comportement du réseau avec défaut équipé d'une régulation classique et un SSSC	37
2.6	Conclusion	43
Chapitre 3 : Modélisation, commande et application du BtB-STATCOM		44
3.1	Introduction	45
3.2	Description de back-to-back STATCOM (btb-STATCOM)	45
3.3	Modélisation et commande d'un BtB-STATCOM	45
3.3.1	Structure et Modélisation de BtB STATCOM	45
3.3.2	Réglage du BtB STATCOM	47
3.4	Résultats de simulation de la commande	49
3.4.1	Coté STATCOM 1 (Onduleur)	49
3.4.2	Coté STATCOM 2 (Redresseur)	51
3.4.3	Comportement de réglage de la tension du bus continu Vdc	53
3.4.4	Variation de grandeurs alternatifs	53
3.5	Application du BtB STATCOM pour améliorer de la stabilité transitoire d'un réseau électrique mono-machine (SMIB)	55
3.5.1	Caractéristiques du réseau	56
3.5.2	Caractéristiques de BtB-STATCOM	58
3.6	Conclusion	61
Chapitre 4 : Contrôle intelligent du réseau électrique en utilisant d'un BtB-STATCOM		62
4.1	Introduction	63
4.2	Réseaux de neurones	63
4.2.1	Réseau de neurone naturel	63
4.2.2	Principe d'un réseau de neurone artificiel	65
4.2.3	Fonctions d'activation	66
4.2.4	Architecture des réseaux de neurones	67
4.2.5	Réseaux de neurones bouclés	68
4.2.6	Apprentissage des réseaux de neurones	68
4.2.6.1	Type d'apprentissage	69
4.2.6.2	Méthodes d'apprentissages	69
4.3	Application d'un réseau de neurone par la conduite d'un réseau électrique en régime statique	73
4.3.1	Réseau électrique de test	75
4.3.2	Insertion du btb STATCOM sur le réseau électrique	75
4.3.3	Simulation du système électrique sans BtB STATCOM	76
4.3	Simulation du système électrique avec BtB STATCOM	77

4.3.4	Caractéristiques du système électrique avec BtB STATCOM	80
4.3.5	Caractéristiques du contrôleur BtB STATCOM	82
4. 4	Conclusion	86
	Conclusion générale	87
	Annexe	89
	Bibliographie	94
	Résumé	

Nomenclature

FACTS : Flexible Alternatif Curant Transmission Systems

IGBT : InsulatedGateBipolar Transistors

SPS : S t a t i c P h a s e Shifter

IGCT : InsulatedGateCommutated Thyristors

STATCOM : StaticSynchronousCompensator

SSSC : StaticSynchronousSeriesCompensator

TCSR : Thyristor SwitchedSerieReactor

TCSC : Thyristor-ControlledSeriesCapacitor.

DVR : Dynamic Voltage Restorer

UPFC : Unified Power Flow Controller

VSC : Voltage Source Converter

BtBSTATCOM:Back-to-Back STATCOM

DC :la tension du bus DC

PI : Proportionnel Intégral (régulateur)

V_s : Tension du jeu de barre de génération (sending voltage).

V_r : Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage).

P_s : Puissance active fournie par la source

Q_s : Puissance réactive fournie par la source

P_r : Puissance active demandée par la charge

Q : Puissance réactive demandée par la charge

P_l : Puissance active transportée par la ligne

Q_l : Puissance réactive transportée par la ligne

θ : Angle de charge entre V_s et V_r

R : Résistance de la ligne de transport

X : Réactance de la ligne de transport

Φ : Déphasage du courant de la ligne

V_{sh} : Tension (shunt) injectée par le STATCOM

I_{sh} : Courant (shunt) injecté par le STATCOM

R_{sh} : Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM

X_{sh} : Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM

P_{sh} : Puissance active délivrée par le STATCOM

Q_{sh} : Puissance réactive délivrée par le STATCOM

V_{se} : Tension (série) injecté par le SSSC

I_{se} : Courant (série) injecté par le STATCOM

U_{dc} : Tension continu aux bornes du condensateur

I_{dc} : Courant dans le circuit continu

d : (indice) la composante sur l'axe d du repère d - q

q : (indice) la composante sur l'axe q du repère d - q

pu : (indice) la grandeur en unité relative (grandeur réduite)

Liste des figures :

Figure 1.1 circuit équivalent du compensateur shunt	06
Figure 1.2 Schéma du SVC	06
Figure 1.3 Caractéristique du SVC	07
Figure 1.4 Application : SVC – Ferroviaire Realisation	07
Figure 1.5 Schéma du STATCOM	08
Figure 1.6 Schéma du SMES	09
Figure 1.7 Une bobine Supraconductrice de stockage d'énergie de 2MJ	10
Figure 1.8 Circuit simplifié d'une phase avec compensateur série	11
Figure 1.9 Schéma du TCSC	11
Figure 1.10 Application de TCSC	12
Figure 1.11 Schéma du TCSR	12
Figure 1.12 Schéma du SSSC	13
Figure 1.13 Application d'un compensateur SSSC [19]	13
Figure 1.14 Schéma du RPI	14
Figure 1.15 Schéma du TCPAR	14
Figure 1.16 Schéma de l'IPFC	15
Figure 1.17 Schéma d'un variateur de charge universel	16
Figure 2.1 SSSC en détail	18
Figure 2.2 Schéma équivalent d'une compensation SSSC	18
Figure 2.3 Configuration de base d'un compensateur Série synchrone statique (SSSC)	20
Figure 2.4 Caractéristique statique du SSSC	20
Figure 2.5 Schéma équivalent d'un SSSC dans un réseau simple	21
Figure 2.7 Schéma équivalent de L'SSSC	23
Figure 2.8 Circuit de réglage d'un SSSC	23
Figure 2.9 Système en boucle ouverte	24
Figure 2.10 Schéma de découplage	25
Figure 2.11 Réglage du compensateur parallèle avec découplage	25
Figure 2.12 Variation de tension continue Vdc	26
Figure 2.13 Variation de Puissance active transmise sur la ligne électrique PL	26
Figure 2.14 Variation de la puissance réactive transmise sur la ligne électrique QL	27
Figure 2.15 Schéma global de réseau étudié	27
Figure 2.17 Schéma bloque de modèle statorique	28
Figure 2.16 Modèle de PARK de l'alternateur	28
Figure 2.18 Représentation schématique de la commutation entre les grandeurs Electriques et les grandeurs mécaniques	30
Figure 2.19 Schéma en π d'une ligne de transmission	30
Figure 2.20 Réponse du système pour le changement de P_e en fonction de δ	31
Figure 2.21 Schéma d'un système mono machine perturbé	32
Figure 2.22 Réponse du système pendant les trois régimes de fonctionnement	32
Figure 2.23 Localisation de défaut court-circuit dans le réseau étudié	33
Figure 2.24 Réseau test équipé d'un SSSC	33
Figure 2.25 Tension de sortie en (pu)	34

Figure 2.26 La vitesse de rotation en (pu)	34
Figure 2.27 Variation de l'angle de charge en (pu)	35
Figure 2.28 Puissance active de sortie en (pu)	35
Figure 2.29 La tension de sortie en (pu)	36
Figure 2.30 Vitesse de rotation en (pu)	36
Figure 2.31 Angle de charge en (pu)	37
Figure 2.32 La puissance active de sortie en (pu)	37
Figure 2.33 Variation de puissance active en (pu)	38
Figure 2.34 Tension continu Vdc du SSSC en (pu)	38
Figure 2.35 Puissance active injecté par SSSC en (pu)	39
Figure 2.36 Puissance réactive injecté par SSSC en (pu)	39
Figure 2.37 Courant direct Id de la ligne en (pu)	40
Figure 2.38 Courant quadratique Iq de la ligne en (pu)	40
Figure 2.39 Tension de SSSC en (pu)	41
Figure 2.40 Variation de la tension de sortie en (pu)	41
Figure 2.41 Variation de la vitesse de rotation en (pu)	42
Figure 2.42 Variation de l'angle de charge en (pu)	42
Figure 2.43 Variation de la puissance active de sortie en (pu)	43
Figure 3.1 Structure d'un système back-to-back STATCOM	45
Figure 3.2 Configuration du BtB STATCOM	46
Figure 3.3 Circuit équivalent de BtB STATCOM	46
Figure 3.4 Contrôle des courants avec découplage PI	47
Figure 3.5 Commande PI pour tension continue	48
Figure 3.6 Schéma synoptique de contrôle du BtB STATCOM	48
Figure 3.6 Puissance active coté STATCOM 1	50
Figure 3.7 Puissance réactive coté STATCOM 1	50
Figure 3.8 Courant quadrature iq1 coté STATCOM 1	51
Figure 3.9 Courant direct id1 coté STATCOM 1	51
Figure 3.10 Puissance réactive coté STATCOM 2	52
Figure 3.11 Composante du courant iq2	52
Figure 3.12 Composante du courant id2	52
Figure 3.13 Variation de tension continue	53
Figure 3.14 Tensions AC coté STATCOM 1	53
Figure 3.15 Tensions AC coté STATCOM 2	54
Figure 3.16 Courants AC coté STATCOM 1	54
Figure 3.17 Courants AC coté STATCOM 2	55
Figure 3.18 Schéma fonctionnel du réseau de test mono machine de test (SMIB)	55
Figure 3.19 Le réseau de test SMIB en présence du BtB-STATCOM	56
Figure 3.20 Variation de vitesse de rotation	56
Figure 3.21 Variation de l'angle de charge	57
Figure 3.22 Variation de la puissance active	57
Figure 3.23 Variation de la tension de sortie du générateur	58
Figure 3.24 Variation de la puissance active P1 coté STATCOM 1	58
Figure 3.25 Variation de la puissance réactive q1 coté STATCOM 1	59

Figure 3.26 Variation du courant Id1 coté STATCOM 1	59
Figure 3.27 Variation du courant Iq1 coté STATCOM 1	59
Figure 3.28 Variation de la puissance réactive q2 coté STATCOM 2	60
Figure 3.29 Variation du courant Id2 coté STATCOM 2	60
Figure 3.30 Variation du courant Iq2 coté STATCOM 2	60
Figure 4.1 Neurone biologique	64
Figure 4.2 Le modèle d'un neurone biologique	65
Figure 4.3 Neurone Artificiel	65
Figure 4.4 Structure d'un réseau neurone non bouclés	67
Figure 4.5 Réseau de neurones bouclés	68
Figure 4.6 Diagramme synoptique du système btb STATCOM contrôlé par les réseaux de neurones	73
Figure 4.7 Architecture du réseau de neurones utilisé	74
Figure 4.8 Réseau électrique de test	75
Figure 4.9 Association du BtB STATCOM sur le réseau électrique de test	75
Figure 4.10 Flux de puissances pour (Puissance active de la charge C2 = 300 MW)	76
Figure 4.11 Flux de puissances pour (Puissance active de la charge C2 = 500 MW)	77
Figure 4.12 Flux de puissances pour : Puissance active de la charge C2=300MW et $P_{BiBSTATCOM}=0MW$	78
Figure 4.13 Flux de puissances pour : Puissance active de la charge C2=300MW et $P_{BiBSTATCOM}=200MW$	79
Figure 4.14 Flux de puissances pour : Puissance active de la charge C2=500MW et $P_{BiBSTATCOM}=200MW$	80
Figure 4.15 Variation de vitesse du générateur (pu)	81
Figure 4.16 Variation de l'angle de charge du générateur (deg)	81
Figure 4.17 Variation de puissance active du générateur (pu)	82
Figure 4.18 Variation de tension du générateur (pu)	82
Figure 4.19 Variation de la puissance active de l'onduleur (pu)	83
Figure 4.20 Variation de tension dans le bus AC de l'onduleur (pu)	83
Figure 4.21 Variation de la puissance réactive de l'onduleur (pu)	84
Figure 4.22 Variation de tension du bus continu (pu)	84
Figure 4.23 Variation de tension dans le redresseur de bus AC (pu)	85
Figure 4.24 Variation de la puissance réactive du redresseur (pu)	85
Figure 4.25 Variation de puissance active du redresseur (pu)	86

Liste des tableaux :

Tableau 4.1 Fonctions de transfert $a=f(n)$	66
Tableau 4.2 Adaptation des mesures avec les entrées du réseau de neurones	74
Tableau 4.3 Base d'apprentissage	74

Introduction générale

Introduction générale

L'augmentation rapide de la charge électrique due à l'évolution technologique et démographique, rend le réseau électrique incapable d'assurer et de transporter cette demande. Pour y faire face ; deux solutions sont possibles : la première est la construction de nouvelles centrales électriques, transformateurs, lignes de transport et de distribution et la deuxième solution représente l'augmentation de la capacité de fonctionnement des réseaux électriques proche de leurs limites admissibles. L'avantage de cette solution, est l'exploitation efficace des réseaux électriques déjà installés, toute fois elle exige l'utilisation des moyens de contrôle très avancés (FACTS) pour assurer une conduite saine et sécurisée des réseaux électriques plus chargés. Plusieurs types de FACTS existent dans l'industrie, le choix de tel dispositif approprié dépend des objectifs visés.

Le STATCOM est un membre important de la famille FACTS, utilisé pour le contrôle dynamique de la tension et pour améliorer du transport électrique [1]. On estime que le nombre total d'installations STATCOM dans le monde est beaucoup plus élevé que celui des autres systèmes FACTS [2]. Les principaux attributs sont une grande flexibilité opérationnelle, un temps de réponse rapide et de bonnes caractéristiques dynamiques dans diverses conditions de fonctionnement [1]. Le convertisseur de source de tension à semi-conducteurs (VSC) est l'épine dorsale du STATCOM, qui est à l'origine des performances de fonctionnement supérieures. Alternativement, Back-to-Back STATCOM (BtB-STATCOM) est une version étendue de STATCOM et un membre de la famille multi-convertisseur FACTS, dans laquelle deux VSC ou plus sont couplés ensemble via leurs liaisons DC [3]. Cette caractéristique unique ouvre de nouvelles tendances telles que le transfert de puissance active et réactive, entre les VSC.

La limite thermique d'une ligne de transmission est définie en termes de capacité de transport de courant maximale. La quantité excessive de courant circulant sur la ligne produit de la chaleur entraînant des résultats indésirables, tels qu'un recuit et une perte progressive de la résistance mécanique du conducteur causée par des températures extrêmes et une augmentation de l'affaissement et une diminution de la distance à la terre en raison de la dilatation du conducteur à des températures plus élevées. Ainsi, la ligne de transmission ne peut être utilisée au mieux que si elle est chargée jusqu'à sa limite thermique, ce qui ne peut être fait normalement sans compensation de ligne.

Cette thèse décrit l'implantation du système BtB STATCOM en utilisant des convertisseurs sources de tension et son modèle mathématique. Nous proposons une stratégie de contrôle pour les trois variables de contrôle suivantes : la puissance active, la puissance réactive et la tension continue. Nous présentons aussi l'implantation d'un autre FACTS appelé le SSSC pour augmenter la stabilité du système électrique et également pour évaluer les performances élevées du BtB-STATCOM. Des études de stabilité transitoire du réseau électrique sont également abordées dans cette thèse.

L'objectif principal de ce travail est la reconfiguration optimale de distribution des charges sur les lignes électrique en utilisant du système BtB-STATCOM, en même temps l'intégration de l'intelligence artificielle (Plus précisément les réseaux de neurones artificiels) pour assurer la flexibilité et la souplesse de la commande.

Dans ce travail, nous nous intéressons à deux types de FACTS : le BtB-STATCOM et un compensateur série synchrone (SSSC) pour identifier le meilleur choix dans la synthèse des réseaux électriques.

Cette thèse est subdivisée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, les FACTS ont été introduits dans lequel certains dispositifs FACTS sont mis en évidence, le rôle important qu'ils jouent dans le fonctionnement et la gestion des réseaux électriques est abordée, leur mise en place, leurs principes de fonctionnement et leurs applications sont présentés.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la modélisation, la commande et la simulation d'un système SSSC : Nous décrivons l'implantation du SSSC point de vue commande et également l'impact sur la stabilité d'un réseau mono machine.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation, la commande et la simulation d'un BtB-STATCOM : On va montrer l'effet de ce système pour la conduite d'énergie dans le réseau électrique.

Dans le quatrième chapitre, le cadre de la dynamique associée aux boucles de contrôle est établi et il est démontré que BTB-STATCOM peut effectuer la répartition optimale des puissances dans le réseau électrique au-delà de sa limite thermique. Dans ce chapitre, nous introduisant le contrôle avancé par les réseaux de neurones artificiels pour assurer la gestion dynamique de flux d'énergie en fonction de la perturbation statique de la charge.

Enfin, une conclusion générale est tirée et quelques recommandations pour les travaux futurs sont proposées.

Chapitre 01 :
**Généralités sur les systèmes flexibles
de transmission à courant alternatif**

1.1 Introduction

Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques.

De plus, elles peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voire en améliorant, la stabilité des réseaux. Dans ce chapitre, nous présentons la classification, la structure et le principe de fonctionnement de différents systèmes FACTS [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10].

1.2 FACTS

Les FACTS permettant de modifier très rapidement l'équilibre des couples agissant sur les arbres des groupes de production de l'énergie électrique, par modification des puissances électriques échangées entre nœuds du réseau, on comprend qu'ils puissent jouer un rôle dans l'amortissement des oscillations (oscillations électromécaniques et oscillations hyposynchrones). Un tel rôle a d'ailleurs été mis en évidence dans le passé par action rapide sur les liaisons à haute tension continue, ascendants des FACTS [4], [5].

Il existe toute une panoplie de dispositifs possibles désignés par des acronymes de manière un peu confuse et généralement d'origine anglaise. Certains dispositifs sont actuellement en service dans des conditions normales d'exploitation ou sur des applications pilotes, d'autres sont en projet.

Il existe quatre types de FACTS

- **Les compensateurs parallèles** : appelés aussi compensateurs de puissance réactive (par le contrôle du flux de puissance réactive dans la ligne), ils permettent de maintenir la tension du réseau au point de connexion dans une plage bien déterminée pour le bon fonctionnement du réseau.
- **Les compensateurs séries** : ou compensateurs d'impédance, par l'ajustement de l'impédance de la ligne, ce type de compensateurs, est capable de contrôler le transit de puissance active dans la ligne.
- **Les compensateurs déphaseurs** : Le système RPI
- **Les compensateurs hybride** : Ces compensateurs modifient le flux de puissance active et réactive, sur une ligne en changeant seulement son angle électrique de transport.

1.3 FACTS de type parallèle

Les systèmes de compensation conventionnels, tels que les bancs de condensateurs et les inductances actionnées mécaniquement, ont longtemps été utilisés pour augmenter le transit de puissance en régime permanent en contrôlant le profil de la tension le long des lignes de transport. Il a été prouvé que la stabilité transitoire ainsi que la stabilité en régime permanent d'un réseau électrique peuvent être améliorées si le dispositif de compensation peut réagir rapidement en utilisant des thyristors comme interrupteurs et contrôle électrique [11], et en particulier les nouveaux composants commandables tant à l'ouverture qu'à la fermeture (GTO, IGBT).

1.3.1 Principe de fonctionnement

Le circuit de la figure 1.1 montre le compensateur shunt en amont d'un utilisateur. Le réseau situé à gauche du point (1) a été remplacé par une réactance équivalente X_{eq} et une tension équivalente E_{eq} . Cette simplification est possible grâce au théorème de Thévenin [12], la tension équivalente E_{eq} comprend la composante fondamentale e_c à fréquence par exemple 50 Hz et une tension e_d qui présente toutes les tensions aléatoires et les tensions harmoniques.

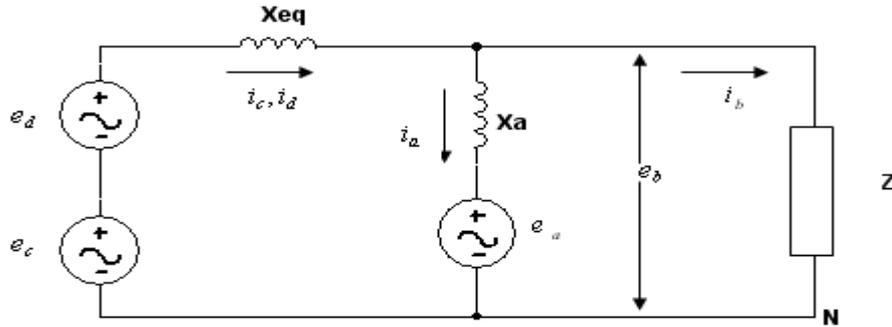


Figure 1.1 circuit équivalent du compensateur shunt

La figure 1.1.b est une réplique de la figure 1.1.a sauf que le compensateur est remplacé par son symbole et l'utilisateur est représenté par une impédance Z . Le disjoncteur SSB est fermé.

1.3.2 Les différents types des compensateurs parallèles

Les compensateurs parallèles les plus courants sont les suivants :

1.3.2.1 SVC

Le compensateur statique de puissance réactive SVC rend possible le contrôle rapide de La tension. Figure 1.2 ci- dessous indique le schéma d'un tel dispositif.

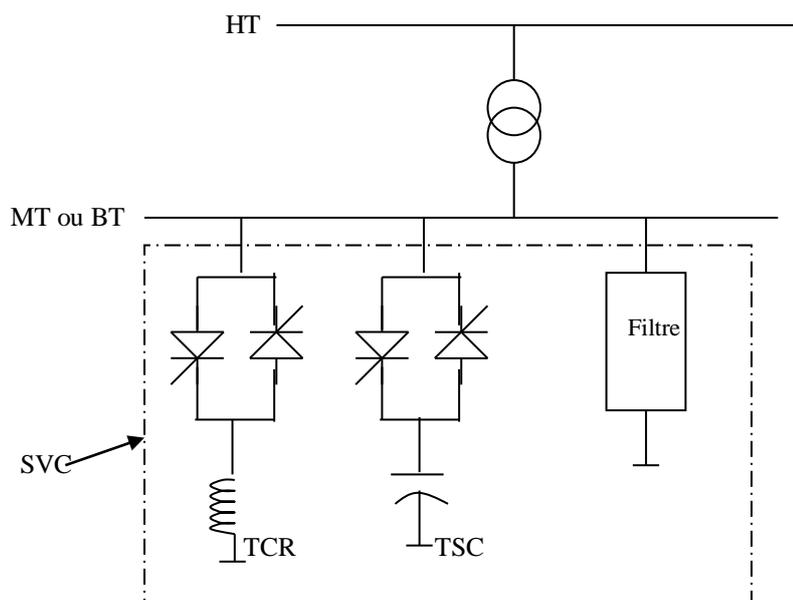


Figure 1.2 Schéma du SVC

Le SVC est l'association d'une inductance commandée par thyristor (Thyristor-Controlled Reactor : TCR), d'un condensateur commuté par thyristor (Thyristor- Switched Capacitor : TSC) et d'un filtre d'harmoniques. La caractéristique statique de ce type de FACTS est donnée par la figure 1.3.

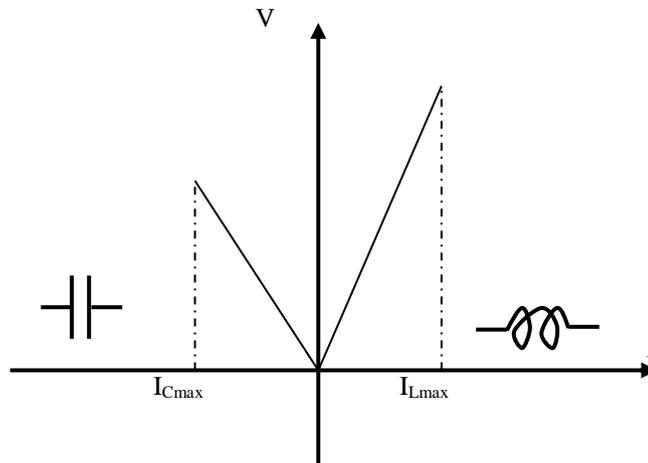


Figure 1.3 Caractéristique du SVC

I_{Cmax} et I_{Lmax} sont les courants limites que peuvent supporter respectivement le TCR et le TSC

L'un des exemples d'implantation de ce type de FACTS dans le réseau électrique, situé dans la Wilaya de (Rio Grande do Norte), au nord-est du Brésil. Cette installation est dimensionnée pour $-75/+150$ Mvar MVAR et branchée sur le réseau 230 kV [13].



Figure 1.4 Application : SVC – Ferroviaire Réalisation [13]

1.3.2.2 STATCOM

Le compensateur statique synchrone STATCOM est constitué d'un convertisseur à source de tension, d'un transformateur de couplage et de circuit de commande. Dans cette application, la source d'énergie DC peut être remplacée par un condensateur C, de sorte que

l'échange d'énergie en régime permanent entre le compensateur statique et le réseau soit uniquement réactive, comme illustré par la figure 1.5 où I_q est le courant de sortie du convertisseur, perpendiculaire à la tension du convertisseur V_i . L'amplitude de la tension de convertisseur et la sortie réactive du convertisseur sont réglables. Si V_i est supérieure à la tension V_t du réseau le compensateur statique fournit de la puissance réactive au système, si V_i est inférieure à V_t le compensateur statique absorbe de la puissance réactive [14].

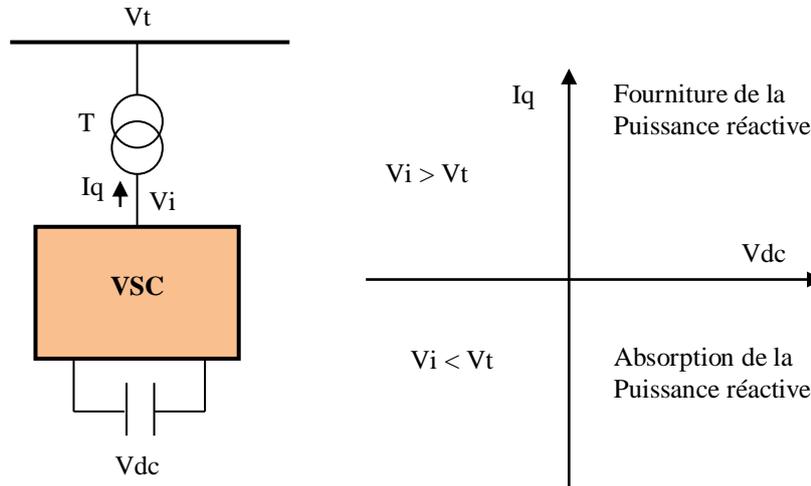


Figure 1.5 Schéma du STATCOM

1.3.2.3 SMES

La figure 1.6 ci-dessous donne le schéma de principe d'un tel dispositif. Dont la bobine supraconductrice ne présente aucune résistance : tout courant qui y est induit, en appliquant par exemple une tension à ses bornes puis en la court-circuitant, va se maintenir jusqu'à ce qu'une tension de polarité inverse soit appliquée ou qu'une résistance soit introduite dans le circuit pour la décharger. Si l'inductance de la bobine est L_{sm} , elle accumulera une énergie W_{sm} et se charge conformément aux équations (1.1) et (1.2) :

$$W_{sm} = \frac{1}{2} L_{sm} I_{sm}^2 \quad (1.1)$$

$$V_{sm} = L_{sm} \frac{dI_{sm}}{dt} \quad (1.2)$$

I_{sm} et V_{sm} sont respectivement le courant de charge et la tension aux bornes de la bobine. L'association d'une bobine supraconductrice utilisée comme accumulateur magnétique supraconducteur d'énergie et d'un convertisseur à commutation forcée de grande puissance constitue le SMES. Les échanges de puissances active et réactive entre la bobine supraconductrice et le réseau électrique à travers le convertisseur convenablement commandé font que le SMES réalise les deux fonctions de régulation, à savoir la régulation de vitesse et celle de tension [15], [16].

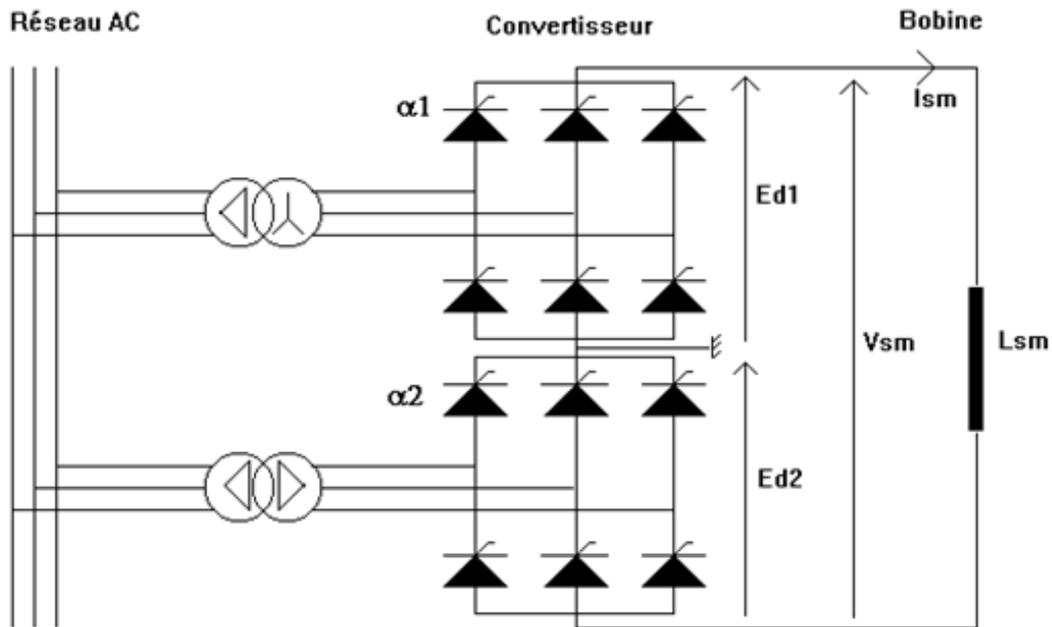


Figure 1.6 Schéma du SMES

1.3.3 Les conséquences des compensateurs parallèles

Le compensateur shunt peut servir à des fins multiples :

- Régulariser la tension ;
- Fournir de l'énergie lors d'une panne momentanée ;
- Éliminer la distorsion de tension ;
- Corriger le facteur de puissance ;
- Agir comme filtre actif.

Il existe actuellement plusieurs firmes dans le monde qui s'intéressent au SMES et à sa réalisation. ACCEL, une firme allemande, en est une. L'une de ses équipes de recherche a mis au point un SMES de 2MJ pour l'amélioration de la qualité de la puissance du laboratoire The Dortmunder Elektrizitäts und Wasserwerke en Allemagne. La figure 1.7 donne un aperçu de ce dispositif [17].



Figure 1.7 Une bobine Supraconductrice de stockage d'énergie de 2MJ [17]

Les caractéristiques de ce dispositif sont les suivantes :

- Le courant du SMES: 1000 A
- L'énergie stockée: 2.1MJ
- Puissance max: 300Kw
- Temps de tenue du dispositif: 8s
- Tension coté continu: >800V
- Champ magnétique généré: 4.5 T

1.4 FACTS de type série

Ces FACTS en série avec le réseau peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci.

1.4.1 Principe de fonctionnement

Le compensateur série est semblable au compensateur shunt ; la principale différence est qu'il est connecté en série avec l'article au lieu d'être en parallèle. En tenant compte du transformateur T, le compensateur est effectivement interposé entre la source et le récepteur,

la figure 1.8 montre le circuit équivalent de cette partie du réseau de distribution. Le centre est représenté par l'impédance Z , le compensateur par la tension e_a et l'altère par la réactance x_c . La source comprend une tension e_c sinusoïdale mais variable, et la tension de distorsion par e_d .

Examinons le comportement du compensateur, premièrement comme régulateur de tension, et deuxièmement comme dispositif éliminant la distorsion aux bornes de la charge. Le principe est simple : il suffit que le compensateur génère une tension e_a de sorte que la tension e_b aux bornes de la charge soit constante et sinusoïdale [12].

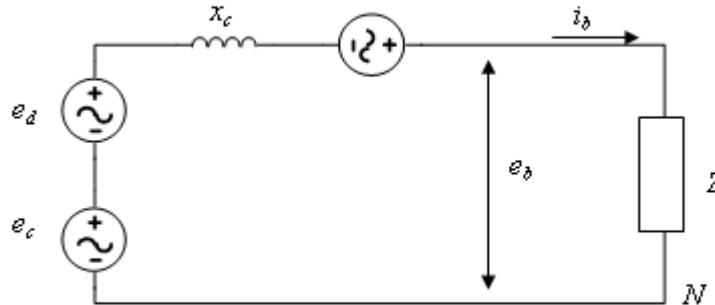


Figure 1.8 Circuit simplifié d'une phase avec compensateur série

1.4.2 Les différents types de compensateur série

Les compensateurs séries les plus courants sont les suivants :

1.4.2.1 TCSC

Le TCSC fait partie des condensateurs séries à qui ont été utilisés avec succès pendant de nombreuses années pour améliorer la stabilité et les capacités de charge des réseaux de transport haute tension. La figure 1.9 donne la configuration d'un TCSC. Il travaille par l'insertion de la tension capacitive pour compenser la chute de tension inductive sur les lignes de transport.

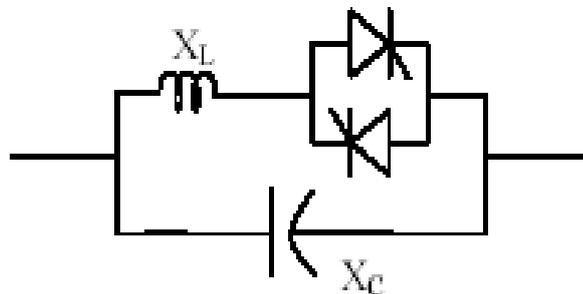


Figure 1.9 Schéma du TCSC

Un exemple réel d'application sur le TCSC : Installation sur une interconnexion de transport électrique (sur un double terre Rourkela-Raipur) de 400 kV entre les régions est-ouest du réseau – Acheté par la société Ltd (PGCIL)-India et réalisé par ABB-Electric [18]:

Compensation réactive a 71 Mvar - 1550 A



Figure 1.10 Application de TCSC [18]

1.4.2.2 Réactance série contrôlée par thyristors TCSR

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable.

Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristors est de 180 degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable X_1 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.

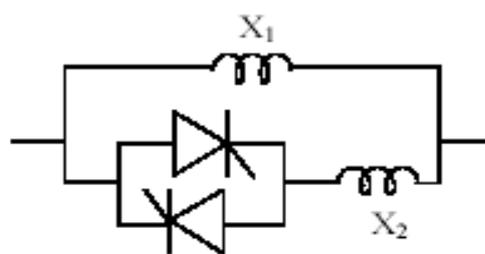


Figure 1.11 Schéma du TCSR

1.4.2.3 Compensateur statique série synchrone SSSC

Le SSSC 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 de tension comme montré à la figure 1.12.

Le SSSC injecte en série une tension alternative avec une amplitude et un angle de phase réglable dans la ligne de transport à l'aide d'un transformateur série. Le SSSC peut produire ou absorber de la puissance réactive suivant la commande de convertisseur statique.

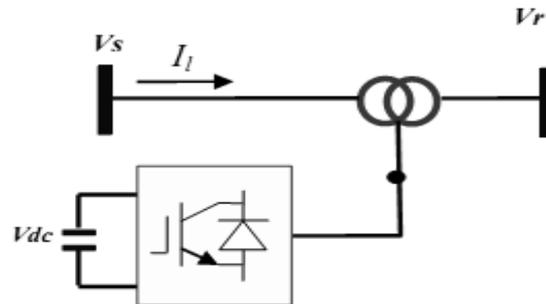


Figure 1.12 Schéma du SSSC

1.4.3 Les conséquences des compensateurs séries

Le compensateur série peut servir à des fins multiples :

- régulation de la tension
- limitation du courant de court-circuit.

La figure 1.13 montre un exemple d'application réel sur le SSSC : Compensateur statique série synchrone de 47,8MVAR, ligne de 220kV à Torres del Segre (Espagne), société espagnole de transport d'énergie électrique Red Eléctrica España [19].



Figure 1.13 Application d'un compensateur SSSC [19]

1.5 FACTS type déphaseur statique

Les Systèmes de Transmission Flexibles en Courant Alternatif (FACTS) actuels ne permettent pas de gérer le problème largement répandu des niveaux de court-circuit trop élevés. La solution traditionnelle, qui consiste à fractionner les réseaux, nuit à leur flexibilité d'exploitation, voire à leur fiabilité. Le Régulateur de Puissance Interphases (RPI) constitue une solution innovatrice pour les environnements à niveaux de court-circuit élevés. Le RPI gère, de manière passive, les régimes permanents. On peut aussi lui adjoindre des modules d'électronique de puissance, selon les besoins en régime dynamique. La figure 1.14 montre le schéma d'un tel dispositif raccordé en série avec la ligne.

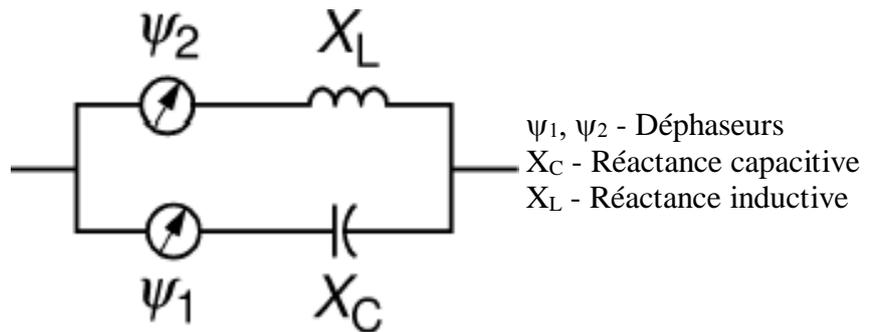


Figure 1.14 Schéma du RPI

1.6 FACTS type hybride

Ces compensateurs modifient le flux de puissance, active et réactive, sur une ligne de transport électrique [20].

Les compensateurs hybrides les plus courants sont les suivants :

1.6.1 TCPAR

La figure 1.15 montre le schéma du TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)

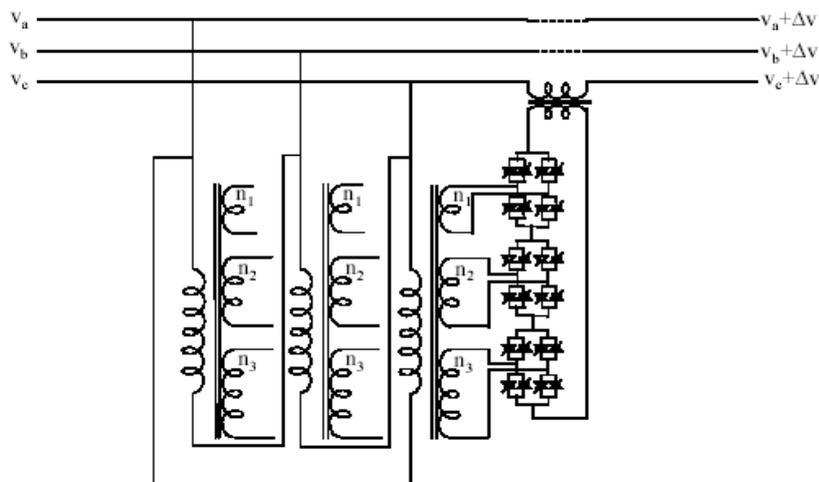


Figure 1.15 Schéma du TCPAR

C'est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à régulateur en charge (LTC ; Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. Ce dernier possède différents rapports de transformation (n_1 , n_2 , n_3). Ces deux transformateurs sont reliés par l'intermédiaire des thyristors. Son principe de fonctionnement est d'injecter, sur les trois phases de la ligne de transmission, une tension en quadrature avec la tension à déphaser. Il a l'avantage de ne pas générer d'harmoniques car les thyristors sont commandés en interrupteurs en pleine conduction. Par contre comme le déphasage n'a pas une variation continue, il est nécessaire d'y adjoindre un compensateur shunt, ce qui entraîne des surcoûts d'installation. L'amplitude de la tension injectée est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle dont les rapports de transformation sont n_1 , n_2 , n_3 .

1.6.2 IPFC

C'est un contrôleur de charge interligne (Interligne Power Flow Contrôler). La figure 1.16 représente le schéma d'un tel dispositif [20].

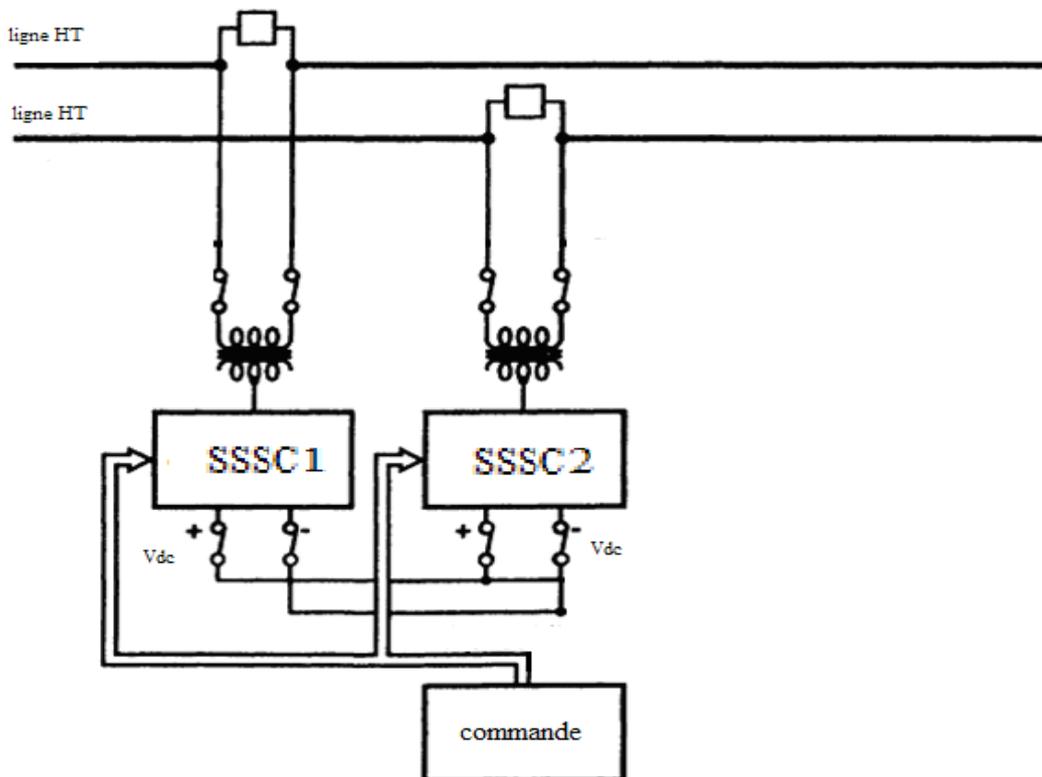


Figure 1.16 Schéma de l'IPFC

1.6.3 UPFC

La configuration de l'UPFC donnée par la figure 1.17 ci-dessous peut faire varier la puissance active et réactive circulant sur une ligne à haute tension. L'onduleur (1), onduleur parallèle, connecté à la ligne par le transformateur (T_p) fonctionnant comme un redresseur

quatre quadrants maintient la tension V_{dc} fixe sur le condensateur tampon (C). Un deuxième onduleur (2), onduleur série, connecté au réseau par le transformateur (T_s) et alimenté par la tension V_{dc} permet d'injecter une tension en série V_s sur le réseau. Cette tension additionnelle V_s étant variable en module et en phase, il est possible de varier la tension V' . Ainsi on peut modifier statiquement le flux des puissances active et réactive transmise sur la ligne [21].

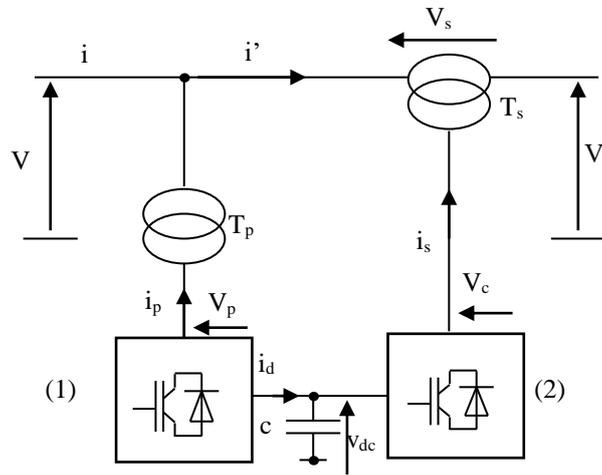


Figure 1.17 Schéma d'un variateur de charge universel

1.7 Conclusion

Ce chapitre a posé les bases essentielles pour comprendre les systèmes FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems). Nous avons exploré les principes fondamentaux de ces systèmes, leur rôle crucial pour le contrôle des tensions et des puissances dans les réseaux électriques. Nous avons également examiné les différents types de dispositifs FACTS, notamment les compensateurs en série, les compensateurs en parallèle et les dispositifs combinés, en soulignant leurs caractéristiques, leurs avantages et leurs applications potentielles. Ce chapitre sert de base solide pour la suite de notre étude, qui se concentrera sur des aspects plus spécifiques des systèmes FACTS, leurs performances dans des situations réelles, et leurs implications dans l'amélioration de la fiabilité et de l'efficacité des réseaux électriques. Il est évident que les systèmes FACTS jouent un rôle de plus en plus essentiel dans la gestion de l'énergie électrique, et leur compréhension approfondie est cruciale pour relever les défis croissants de l'approvisionnement en énergie électrique dans le monde moderne. Dans le chapitre suivant, nous présentons la modélisation et l'application d'un système FACTS type série (SSSC).

Chapitre 02 :
Modélisation, commande et application
du SSSC

2.1 Introduction

Le SSSC a été proposé par **Gyugyi** en 1989; et jusqu'au récent progrès qu'a connus les semi-conducteurs de puissance, le SSSC n'est pas utilisée dans la majorité des cas de besoins de compensation série à cause de son prix très accru [22].

Dans ce chapitre, nous rappellerons d'abord la structure, la modélisation et la commande d'un SSSC. Et, également l'analyse du réseau électrique de test en cas d'un défaut en grand mouvement (court-circuit sur la ligne de transmission). Nous étudions l'impact du SSSC sur le réseau perturbé et comparons ses performances avec celles de la régulation classique.

2.2 Description du SSSC

Ce type de compensateur série est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur comme illustrer la figure 2.1 [23].

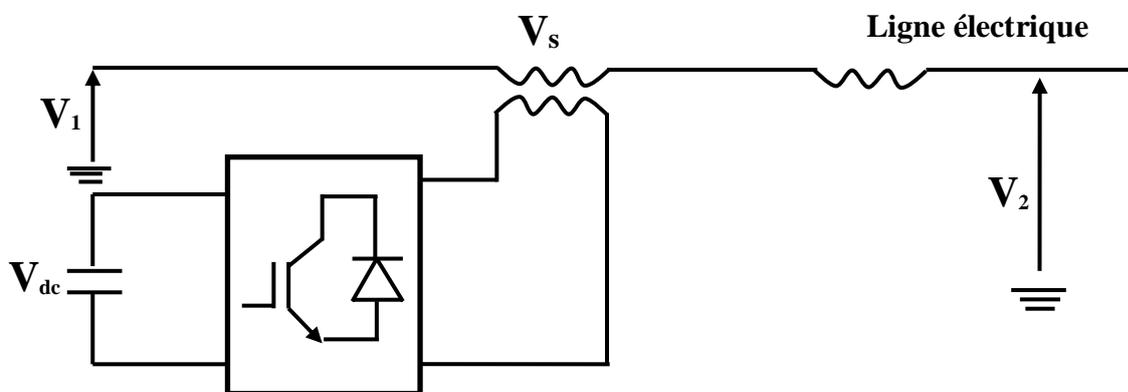


Figure 2.1 SSSC en détaille

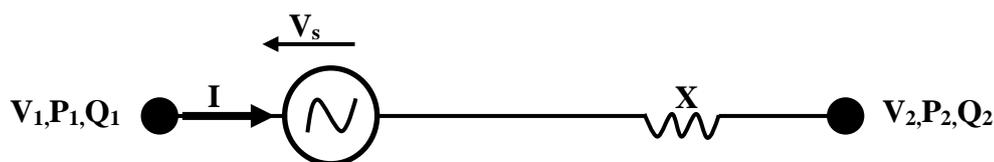


Figure 2.2 Schéma équivalent d'une compensation SSSC

Le rôle de ce compensateur est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. Cette dernière est injectée pour l'augmentation ou la diminution de la tension qui traverse l'impédance inductive de la ligne et par conséquent le courant fondamental ainsi que la puissance transitée.

- Si l'injection de la tension s'effectue avec un angle de 90° en arrière par rapport au courant de la ligne, on obtient une compensation série qu'est équivalente à un condensateur série à la fréquence fondamentale.

➤ Si par contre, la tension injectée est en avance de 90° par rapport au courant, la compensation a le même effet que celui d'augmenter l'impédance réactive de la ligne. Le SSSC est appliqué pour la commande dynamique du flux de puissance et de la tension ainsi que pour la stabilité de l'angle de transport.

Le fait que le SSSC puisse produire autant de tensions capacitatives qu'inductives sur une ligne ceci élargit le domaine d'application de ce dispositif lors de la commande du flux de puissance, un SSSC peut être utilisé pour augmenter ou réduire ce flux. [23]

2.2.1 Avantages des SSSC

Les avantages des SSSC sont brièvement résumés comme suit [24] :

- ✓ capables de générer une tension de compensation contrôlable dans une plage identique capacitive et inductive, indépendamment de l'amplitude du courant de la ligne.
- ✓ capables de fournir la compensation pour la résistance R de la ligne en injectant une puissance active et pour la réactance X de la ligne en injectant une puissance réactive afin de maintenir la valeur effective X/R au niveau élevé, indépendamment du niveau de compensation de la ligne en série.
- ✓ avec le stockage d'énergie, capables d'améliorer effectivement la caractéristique d'amortissement en ajustant la compensation réactive de la ligne et en injectant simultanément une impédance réelle alternativement positive et négative afin d'absorber et de fournir la puissance active de la ligne.

2.2.2 Fonctionnement du SSSC

Monter un convertisseur à source de tension branché en série sur une ligne de transport via transformateur. Une source d'énergie est nécessaire pour fournir la tension CC à travers le condensateur et pour compenser les pertes du VSC.

En principe, un SSSC est capable d'échanger de la puissance active et de la puissance réactive avec le système de puissance. Pourtant, si on ne désire que la compensation de puissance réactive, la source d'énergie peut être très petite. Si la source d'énergie est suffisamment puissante, la tension injectée peut être commandée en amplitude et en phase. En cas de compensation de puissance réactive, seule l'amplitude de la tension est commandable, puisque le vecteur de la tension injectée est perpendiculaire au courant de la ligne. Dans ce cas, la tension injectée en série peut faire avancer ou retarder le courant de la ligne de 90 degrés. Cela signifie que le SSSC peut être commandé en douceur à une valeur d'avance ou de retard quelconque à l'intérieur de la plage de travail du VSC.

Ce faisant, un SSSC peut se comporter de manière analogue à un condensateur série et à une inductance série réglables. La différence fondamentale réside dans le fait que la tension injectée par un SSSC n'est pas en relation avec le courant de la ligne et qu'elle peut être réglée indépendamment de celui-ci. Cette caractéristique importante signifie que le SSSC peut être utilisé efficacement, tant pour les petites charges que pour les charges élevées [25].

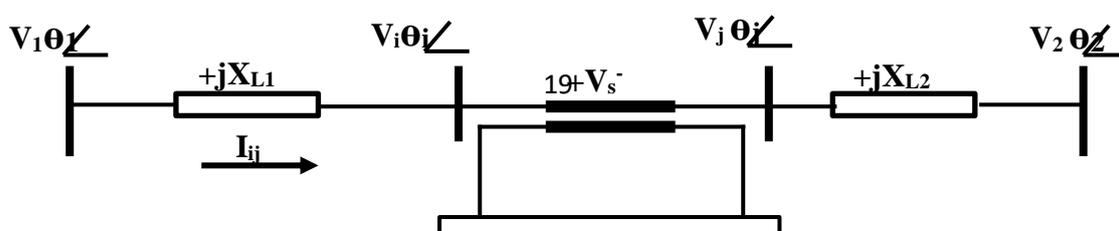


Figure 2.3 Configuration de base d'un compensateur Série synchrone statique (SSSC)

La caractéristique statique d'un Compensateur Synchrone Statique Série est donnée sur la figure suivante [25]:

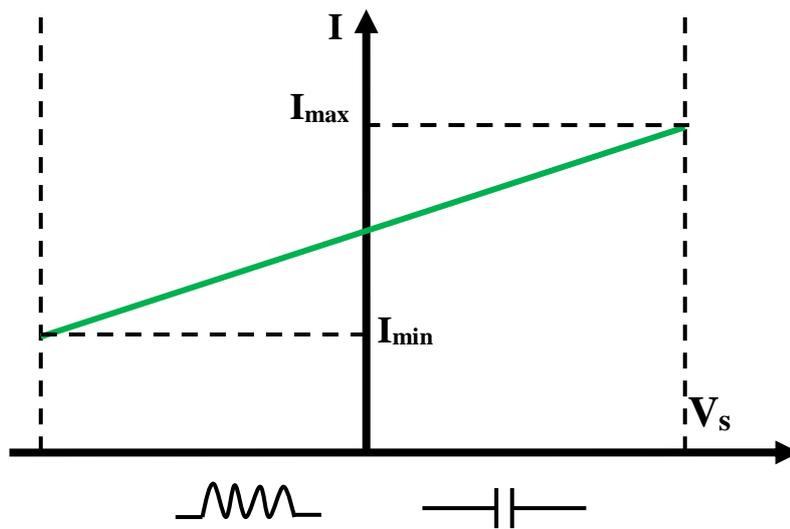


Figure 2.4 Caractéristique statique du SSSC

On peut expliquer les différents modes de compensation capacitive et inductive en se référant aux diagrammes vectoriels de la figure 2.4 qui suit en admettant le schéma équivalent d'un SSSC installé dans un réseau électrique simple représenté sur Figure 2.5 [26].

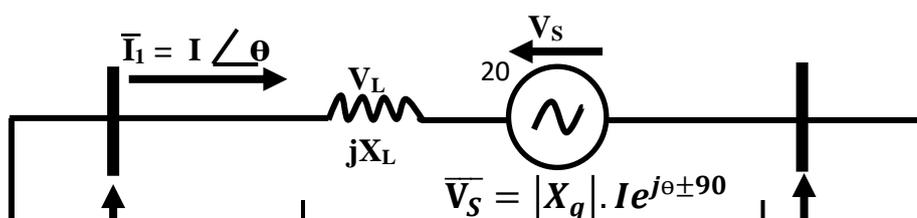


Figure 2.5 Schéma équivalent d'un SSSC dans un réseau simple

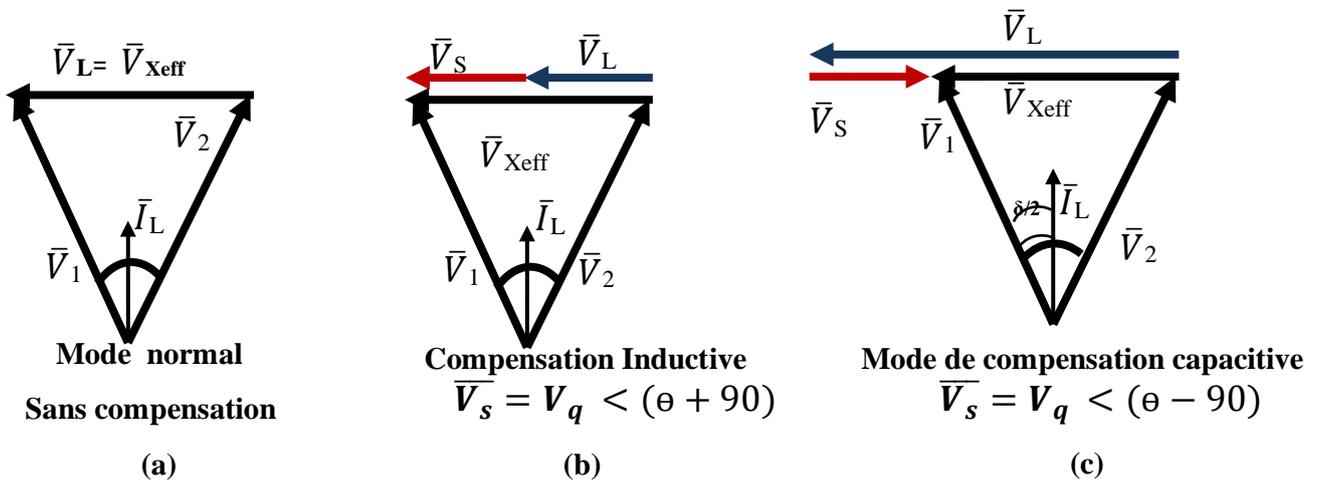


Figure 2.6 Diagrammes de phase des différents modes de fonctionnement de l'SSSC

- Le diagramme de la figure 2.6 (a) présente l'état de fonctionnement normal du réseau (état d'équilibre), la tension à la borne de la réactance effective V_{xeff} est égale à la tension aux bornes de la ligne de transport sans compensation là où le degré de compensation K est nul. $K = \% \text{ compensation} = \frac{X_q}{X_L} * 100$ avec: $X_q = \frac{X_q}{I_L}$.
- Dans le mode de compensation inductif, le courant de la ligne I_L diminue en augmentant le degré de compensation K de 0% à 100%. Du diagramme (b) on voit que pour maintenir V_1 , V_2 et δ constants la variation dans l'amplitude de V_s se répercute directement sur la tension V_L et chaque augmentation dans V_s entraîne une diminution dans V_L et par conséquent dans le courant I_L .
- En mode capacitif le courant dans la ligne augmente avec l'augmentation du niveau de compensation, la tension injectée en antiphase avec la tension V_L (-90° en arrière du courant I_L) force la tension V_L à augmenter pour garder l'angle de charge constant ainsi que les tensions aux extrémités de la ligne. (Figure 2.6 (c)).

Dans la compensation série en considérant le schéma équivalent de la figure 2.5 le courant dans la ligne est donné par l'équation 2.1 :

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_s \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2 - \bar{V}_s}{jX_L} \quad (2.1)$$

Dans l'hypothèse d'une ligne sans perte la puissance injectée dans cette dernière par le SSSC est :

$$S_{SSSC} = (\bar{V}_2 - \bar{V}_1) \cdot \bar{I}_s^* = \frac{|\bar{V}_1 - \bar{V}_2|^2 - (\bar{V}_1 - \bar{V}_2) \cdot \bar{V}_s^*}{jX_L} = P_{SSSC} + jQ_{SSSC} \quad (2.2)$$

D'où on peut tirer les formules des puissances active et réactive injectées par le SSSC dans la ligne:

$$P_{SSSC} = \frac{V_s (V_2 \sin \theta_2 - \alpha) - V_1 \sin(\theta_1 - \alpha)}{X_L} \quad (2.2.a)$$

$$Q_{SSSC} = \frac{-V_s (V_1 - V_s \cos(\theta_1 - \alpha)) + V_2 (V_2 + V_s \cos(\theta_2 - \alpha) - V_1 V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2))}{X_L} \quad (2.2.b)$$

Avec : V_1 et θ_1 sont le module et la phase de la tension \bar{V}_1 , V_2 et θ_2 sont le module et la phase de la tension \bar{V}_2 , V_s et α sont le module et la phase de la tension \bar{V}_s respectivement.

Pour que ce dispositif (le SSSC) n'échange aucune puissance active avec le réseau, il doit satisfaire la condition $P_{SSSC}=0$ et donc d'après l'équation (2.2.a)

$$V_2 \sin(\theta_2 - \alpha) - V_1 \sin(\theta_1 - \alpha) = 0 \quad (2.3)$$

L'équation (2.3) est une condition sur la phase de la tension de l'SSSC, la tension série injectée doit être toujours orthogonale au courant de la ligne pour assurer une pure compensation réactive [17].

2.3 Modélisation et commande du SSSC

2.3.1 Modèle mathématique simplifié

Le convertisseur de tension est maintenant connecté en série avec la ligne de transmission. Son schéma équivalent consiste donc en une source de tension en série avec l'impédance de la ligne ainsi que l'impédance du transformateur de couplage comme le présente le schéma de la figure 2.7.

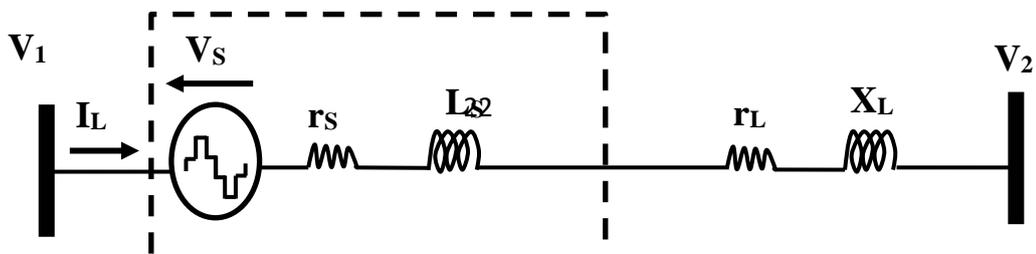


Figure 2.7 Schéma équivalent de L'SSSC

2.3.2 Circuit de réglage d'un SSSC

La figure 2.8 suivante représente la configuration par (PI) des circuits de réglage d'un SSSC.

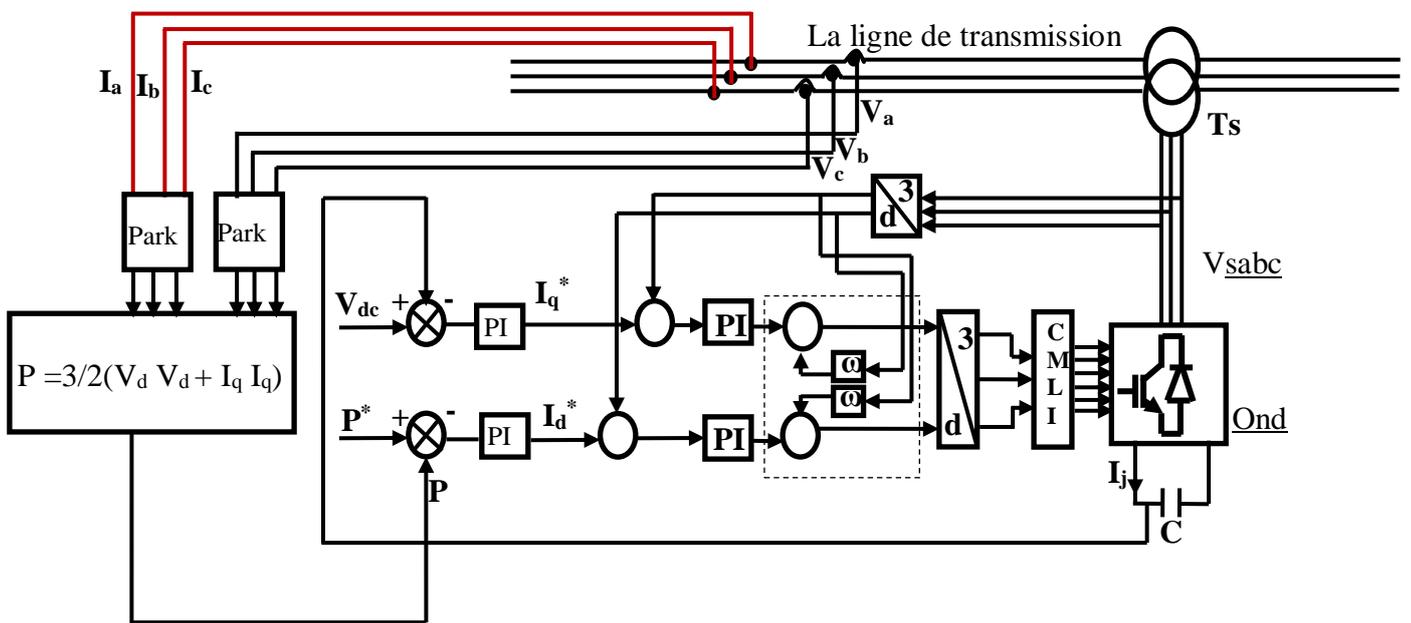


Figure 2.8 Circuit de réglage d'un SSSC

On y retrouve l'onduleur (onds) branché sur le réseau au travers d'un transformateur (Ts). au côté continu il y a le condensateur tampon (C) qui permet de maintenir la tension continue afin que l'onduleur puisse fonctionner correctement. L'onduleur est commandé par le dispositif (CMLI) à l'aide des trois signaux de commande (V_{sa}^* , V_{sb}^* , V_{sc}^*) en MLI. Le réglage des courants i_{Ld} et i_{Lq} se fait à l'aide des régulateurs PI. Les deux tensions dans le repère de Park sont les signaux de commande. Les courants de références sont générés à l'aide d'un étage de réglage (PI) de tension continue V_{dc} et de puissance active P . Un bloc de découplage est utilisé pour découpler entre les courants et les puissances active et réactive [19], [27], [28].

2.3.3 Synthèse par PI classique

Pour régler les courants de réseau nous découplons les deux axes (d) et (q).

Dans la partie modélisation de SSSC, et dans un repère d, q (PARK), on a :

$$\frac{di_{Ld}}{dt} = -\frac{r_s}{L_s} i_{Ld} - \omega \cdot i_{Lq} + \frac{1}{L} (V_d - V_{sd} - V'_q) \quad (2.4)$$

$$\frac{di_{Lq}}{dt} = -\frac{r_s}{L_s} i_{Lq} + \omega \cdot i_{Ld} + \frac{1}{L} (V_q - V_{sq} - V'_d) \quad (2.5)$$

On pose :

$$X_1 = \frac{1}{L_s} (V_d - V_{sd} - V'_d) \quad (2.6)$$

$$X_2 = \frac{1}{L_s} (V_q - V_{sq} - V'_q) \quad (2.7)$$

La figure suivante représente le schéma bloc équivalent de système en boucle ouverte et montrant qu'il y a un couplage entre les deux courants i_{pd} et i_{pq} par l'interaction des signaux X_1 et X_2 .

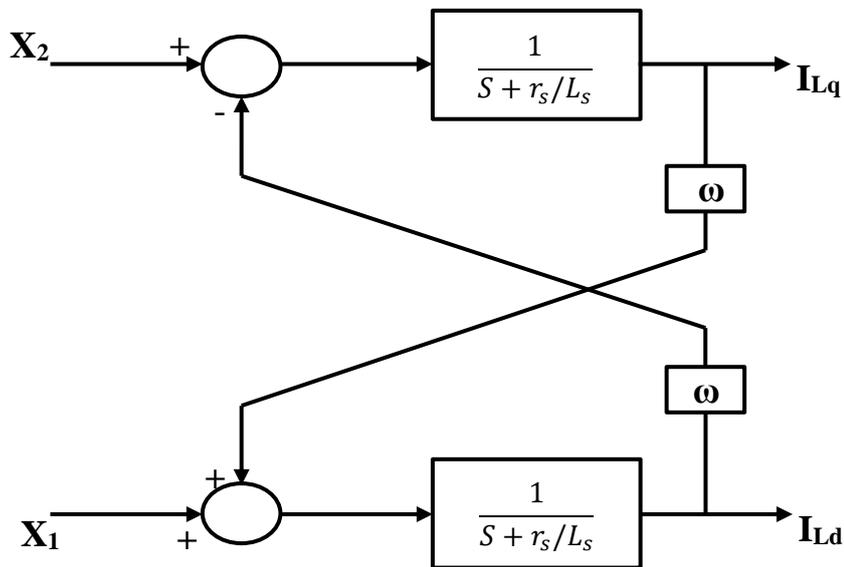


Figure 2.9 Système en boucle ouverte

L'injection des termes de couplage avec des signes opposés permet de rendre les deux axes (d, q) complètement indépendants. La méthode de découplage utilisée est dite découplage par compensation. La figure ci-dessous montre ce type de découplage.

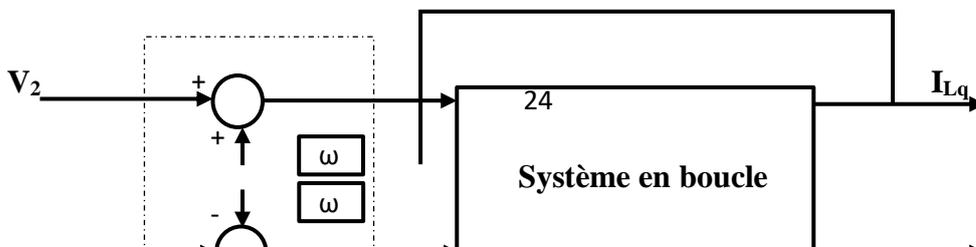




Figure 2.10 Schéma de découplage

V1 et V2 sont les sorties des régulateurs type PI analogique. Les courants de référence en fonction des puissances et des tensions sont tels que :

$$i_{Ld}^* = \frac{2 P_L^* V_d - Q_L^* V_q}{3 (V_d^2 + V_q^2)} \tag{2.8}$$

$$i_{Lq}^* = \frac{2 P_L^* V_q - Q_L^* V_d}{3 (V_d^2 + V_q^2)} \tag{2.9}$$

On peut donc sur cette base construire le schéma de commande indiquée par la Figure 2.11 ci-dessous :

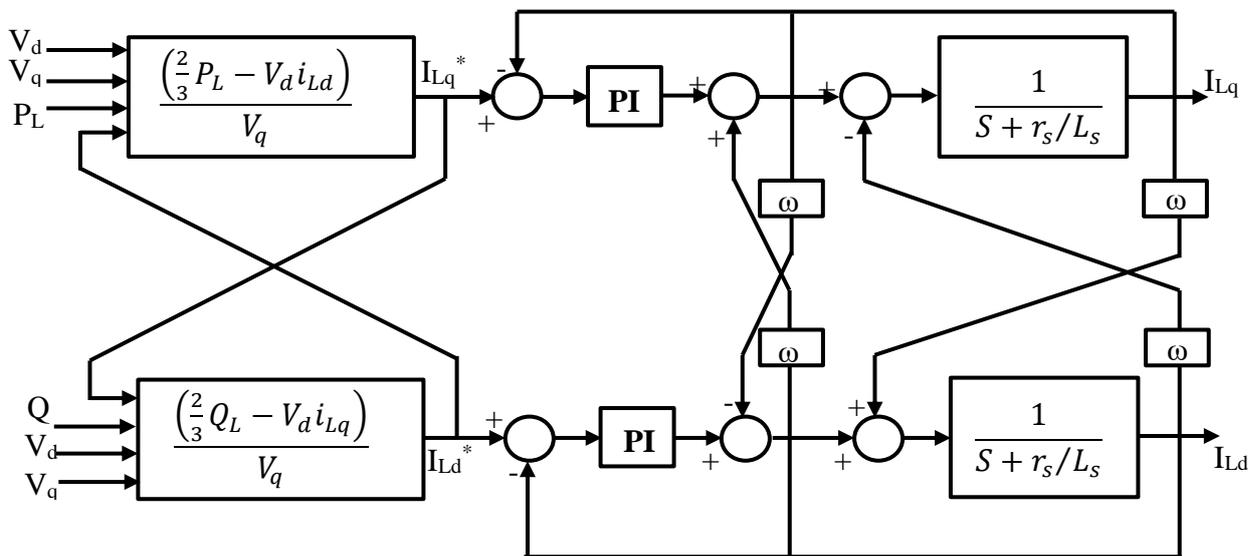


Figure 2.11 Réglage du compensateur parallèle avec découplage

2.4 Résultats de réglage du SSSC

Les figures 2.12, 2.13 et 2.14 ci-dessous montrent successivement le réglage de tension continue Vdc, le réglage de puissance active et la variation de puissance réactive dans un

système SSSC. On remarque, la poursuite de la consigne sur les réponses de puissance active et la tension continue, et un balancement aléatoire sur la puissance réactive. On trouve aussi une perturbation transitoire sur la tension continue à l'instant de variation de puissance active, ce qui explique que le découplage par PI n'est pas parfait.

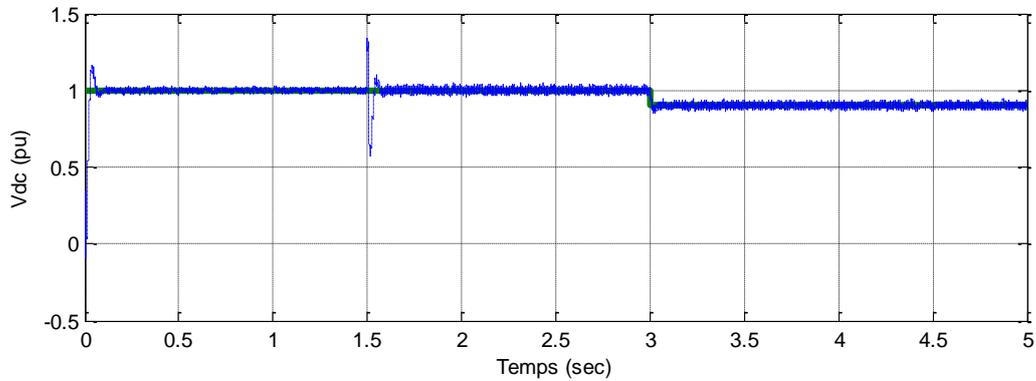


Figure 2.12 Variation de tension continue V_{dc}

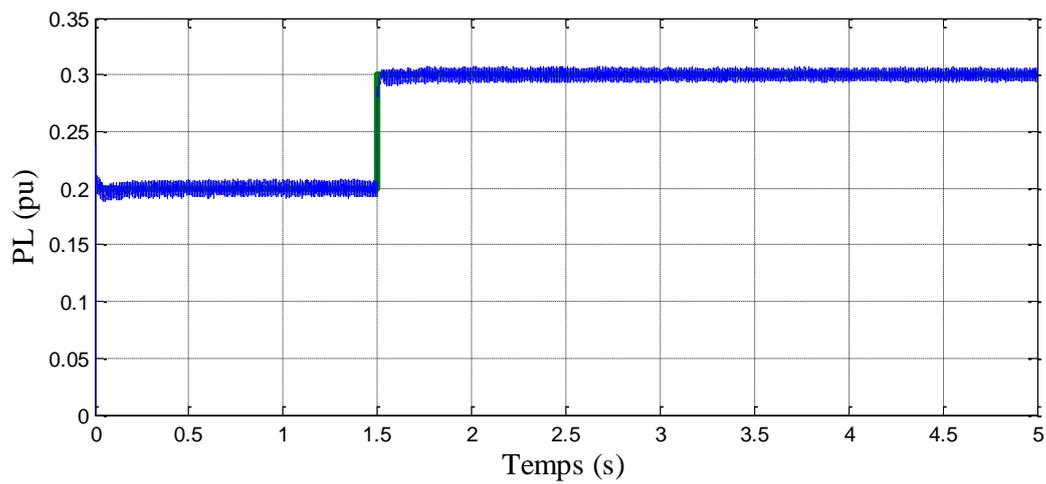


Figure 2.13 Variation de Puissance active transmise sur la ligne électrique PL

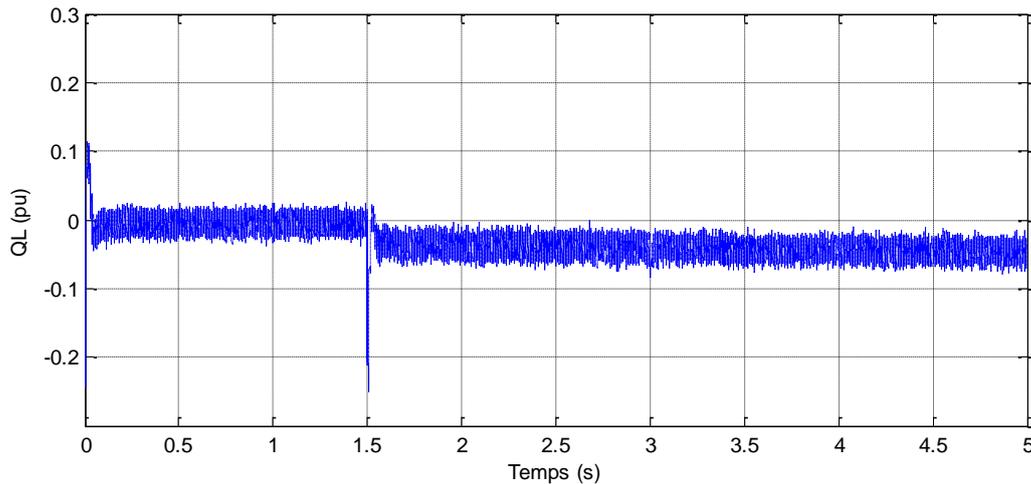


Figure 2.14 Variation de la puissance réactive transmise sur la ligne électrique QL

2.5 Application du SSSC pour améliorer la stabilité transitoire d'un réseau mono machine

Le réseau pris comme réseau test est un réseau mono machine. La connexion de l'alternateur au réseau à puissance infinie est assurée par un transformateur et une ligne constituée d'une liaison double terna (d'une longueur 300 km). Le schéma représentant le réseau est donné par la figure 2.15 ci-dessous :

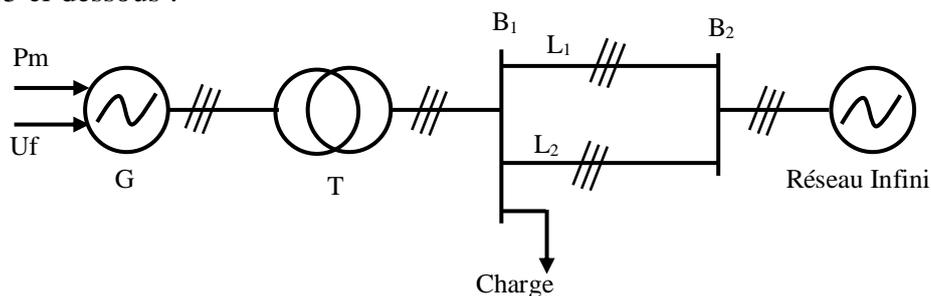


Figure 2.15 Schéma global de réseau étudié

2.5.1 Modélisation du réseau de test monomachine

2.5.1.1 Modélisation de l'alternateur

L'alternateur du système étudié est une machine synchrone constituée de trois enroulements statoriques identiques déphasés de $2\pi/3$, généralement couplés en étoile, d'un enroulement rotorique d'excitation et de deux circuits amortisseurs représentés par deux enroulements en court-circuit en quadrature. L'utilisation de la transformation de PARK permet une représentation bipolaire équivalente de la machine synchrone triphasée, dont les nouvelles inductances deviennent indépendantes de la rotation. La figure 2.16 montre la représentation de la machine dans le repère de PARK [25].

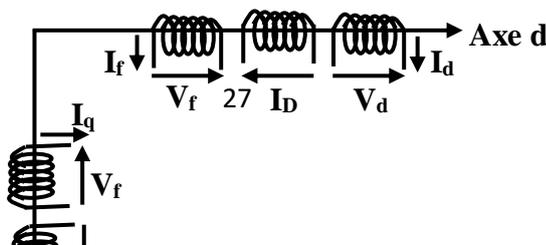


Figure 2.16 Modèle de PARK de l'alternateur

a) Modèle à deux axes de l'alternateur

Le modèle à deux axes est souvent utilisé avec une précision très acceptable. En considérant les termes de transformation négligeables devant ceux liés à la rotation et en supposant la pulsation de rotation ω voisine de la pulsation synchrone ω_s , on obtient les équations du modèle à deux axes de la machine. Les composantes de la tension aux bornes de la machine suivant les axes q et d sont telles que :

$$V_q = E'_q - rI_q + X'_d I_d \tag{2.10}$$

$$V_d = E'_d - rI_d + X'_q I_q \tag{2.11}$$

Où $X'_d = \omega.L'_d$ et $X'_q = \omega.L'_q$ sont respectivement les réactances transitoires directe et en quadrature de l'alternateur.

La variation de la f.é.m. derrière la réactance transitoire selon les axes d et q est donnée par:

$$T'_{do} \dot{E}'_q = -E'_q + (X_d - X'_d)I_d + E_{fd} \tag{2.12}$$

$$T'_{qo} \dot{E}'_d = -E'_d + (X_q - X'_q)I_q \tag{2.13}$$

Où $X_d = \omega L_d$ et $X_q = \omega L_q$ sont les réactances synchrones directe et en quadrature.

La figure 2.17 représente le diagramme de block de modèle statorique sur le plan de PARK.

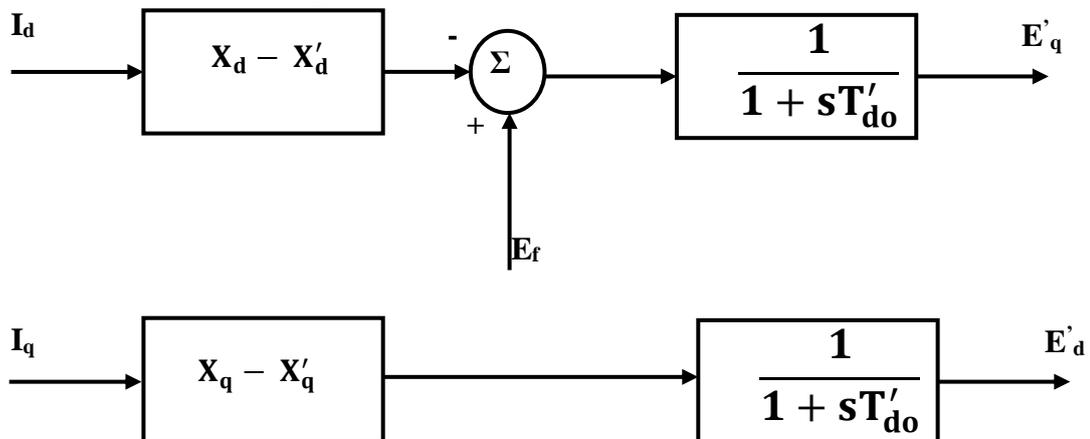


Figure 2.17 Schéma bloque de modèle statorique

b) Equation de mouvement de la machine

L'équation de mouvement du rotor de la machine est donnée par la relation:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_m - T_e - T_d \quad (2.14)$$

avec:

J: moment d'inertie de l'ensemble des masses rotorique (kg.m²)

Θ_m: Position angulaire du rotor par rapport à un axe de référence fixe lié au stator (radian)

T_m: couple mécanique d'entraînement de la machine sans les pertes dues à la rotation (N.m)

T_e: couple électromagnétique (N.m)

T_d: couple d'amortissement tenant compte des frottements (N.m)

On définit la constante d'inertie de la machine, exprimée en seconde, par la relation:

$$H = \frac{\omega_c}{S_{mach}} \quad (2.15)$$

Où ω_c est l'énergie cinétique de la machine à la vitesse de synchronisme donnée par la relation :

$$W_c = \frac{1}{2} J \omega_{sm}^2 \quad (2.16)$$

S_{mach} désigne la puissance apparente nominale de la machine synchrone.

La variation de vitesse est donnée par la relation suivante:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} (P_m - P_e - D_w) \quad (2.17)$$

et :

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.18)$$

Avec : $\omega = P\omega_m$, $\omega_s = P\omega_{sm}$, $\delta = P\delta_m$

P est le nombre de paires de pôles de la machine. P_m , P_e et D_w sont exprimés en P.U par rapport à la puissance de base S_{mach} . D_w est la puissance tenant compte des frottements. D est appelé coefficient d'amortissement.

La figure suivante représente la computation entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques [19].

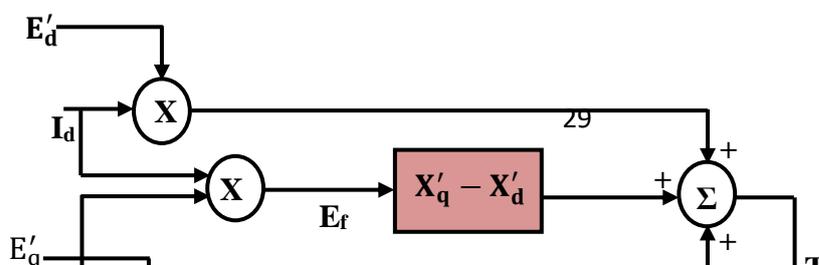


Figure 2.18 Représentation schématique de la commutation entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques

2.5.1.2 Modèle de la ligne

Les lignes sont représentées par un quadripôle symétrique donné par un schéma en π (nommée ("tie line")) de (la figure 2.19) où P_{ij} et Q_{ij} désignent respectivement les puissances active et réactive transitant du nœud i vers le nœud j . r_{ij} , x_{ij} et b_{ij} sont respectivement la résistance, la réactance et la demi-susceptance transversale (coté i) de la ligne i - j [19].

L'admittance élémentaire de la ligne i - j est donnée par la relation:

$$\bar{y}_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + jX_{ij}} \quad (2.20)$$

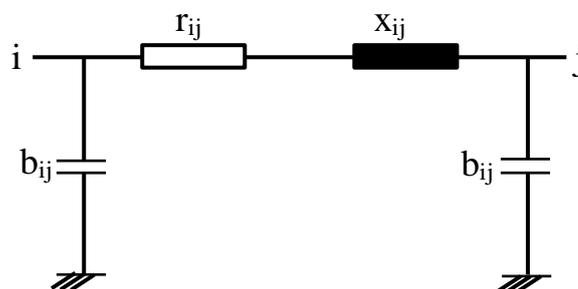


Figure 2.19 Schéma en π d'une ligne de transmission

2.5.2 Étude de la stabilité de réseau de test monomachine

Les problèmes de la stabilité transitoire résultent du passage de la machine d'un état stable à un autre. Nous supposons que la réactance de liaison varie brutalement de X à X' (ouverture d'une ligne par exemple), le point de fonctionnement passe brutalement en A' sur la courbe donnant la puissance électrique P_e en fonction de δ (voir figure 2.19) pour la nouvelle valeur de l'impédance X' . L'accélération en A' est positive. Le système accélère et accumule de l'énergie cinétique différentielle jusqu'en A'' où la vitesse est $\left[\frac{d\delta}{dt}\right]_{A''}$.

Le mouvement continue et l'accélération devient négative. Le mouvement s'arrête en C lorsque $\left[\frac{d\delta}{dt}\right]_C = 0$.

D'après le théorème des aires, le point C est tel que l'énergie cinétique différentielle accumulée entre A et A'' est restituée entre A'' et C, ceci correspond à l'égalité des aires S1 et S2. On retrouvera un point de fonctionnement stable en régime établi si S2 est inférieur à l'aire A'' C B comprise entre Pe (X') et Pm. Ce point correspond à $P_m = P_e(X')$ c'est-à-dire au point A' (stable) [19].

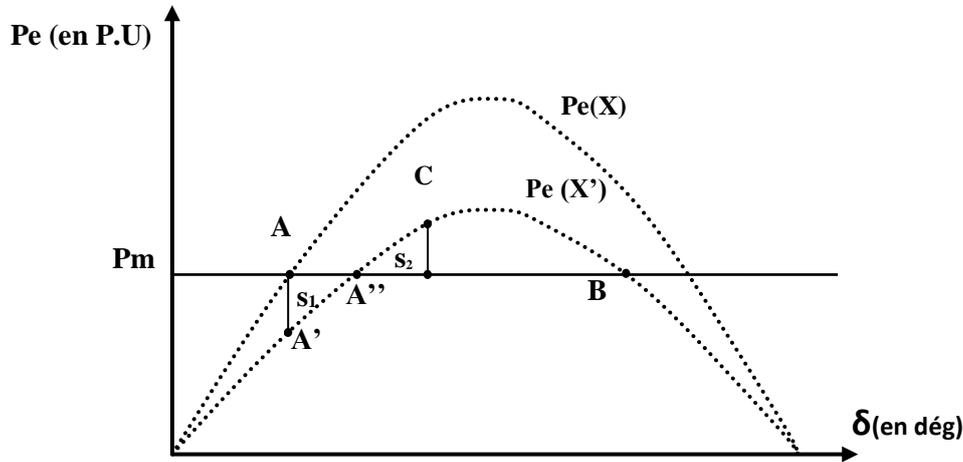


Figure 2.20 Réponse du système pour le changement de Pe en fonction de δ

2.5.2.1 Stabilité transitoire et en petits mouvements des machines tournantes

Le fonctionnement normal d'une machine synchrone raccordée au réseau exige une vitesse de rotation constante, déterminée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine ainsi que nous l'avons vu précédemment. Le fonctionnement à vitesse constante requiert l'équilibre entre le couple mécanique fourni par la machine d'entraînement, et le couple électromagnétique assurant la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique fournie au réseau. Tout déséquilibre entraîne des oscillations autour de la position d'équilibre correspondant au régime synchrone [29], [30], [31]. Le comportement de la machine raccordée au réseau est analogue à celui d'un pendule. Les déséquilibres proviennent généralement de perturbations, tels des courts-circuits dans le réseau qui modifient brusquement le couple électromagnétique des machines. Ces oscillations peuvent aller jusqu'à la perte de synchronisme de la machine avec le réseau ce qui nécessite sa déconnexion du réseau, voire entraîner par enchaînement un effondrement (black-out).

L'étude de la stabilité des machines sur le réseau comporte deux aspects :

a) La stabilité aux grandes perturbations ou stabilité transitoire : comme lors de courts-circuits, pour laquelle le retour au synchronisme n'est pas toujours assuré. L'un des problèmes essentiels dans l'étude du raccordement d'une machine synchrone au réseau est de déterminer le degré de sévérité au-delà duquel le retour au synchronisme n'est plus assuré.

b) La stabilité aux petites perturbations : qui correspond au régime normal de fonctionnement synchrone du réseau en présence des fluctuations normales de faibles amplitudes des grandeurs

électriques ou mécaniques (variations de charges ou de productions, manœuvres d'appareils, ...). Le système doit toujours conserver ou retrouver une position d'équilibre en marche synchrone pour l'ensemble des machines du réseau interconnecté. Une machine peut en effet perdre sa stabilité en s'écartant d'une manière monotone de sa position d'équilibre ou par oscillation non suffisamment amortie autour de la position d'équilibre. Pour ce type de stabilité les régulateurs équipant les machines jouent un rôle important.

Signalons enfin que pour l'étude de ce problème l'ensemble des équations peut être linéaire autour de la position d'équilibre.

Le schéma suivant montre un exemple d'un défaut. La ligne L_1 est en exploitation et la ligne L_2 est sous tension et ouvert, l'impédance équivalente du réseau après l'élimination du défaut n'est pas modifiée [11].

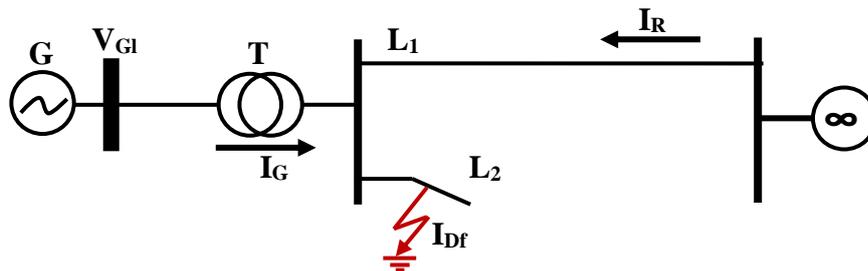


Figure 2.21 Schéma d'un système mono machine perturbé

2.5.2.2 Etudes de l'influence des petits mouvements (variation de la charge)

En augmentant la charge, la surface A_1 augmentera, par contre A_2 diminuera. Par conséquent le réseau risque de devenir instable en cas de défaut. En revanche si on diminue la charge, la marge de stabilité augmente. La valeur de la charge pour laquelle $A_1=A_2$ s'appelle "la charge critique". Dans les prochaines parties nous allons étudier la méthode de calcul de la charge critique, ainsi que l'effet de la diminution de la charge sur l'amélioration de la stabilité transitoire.

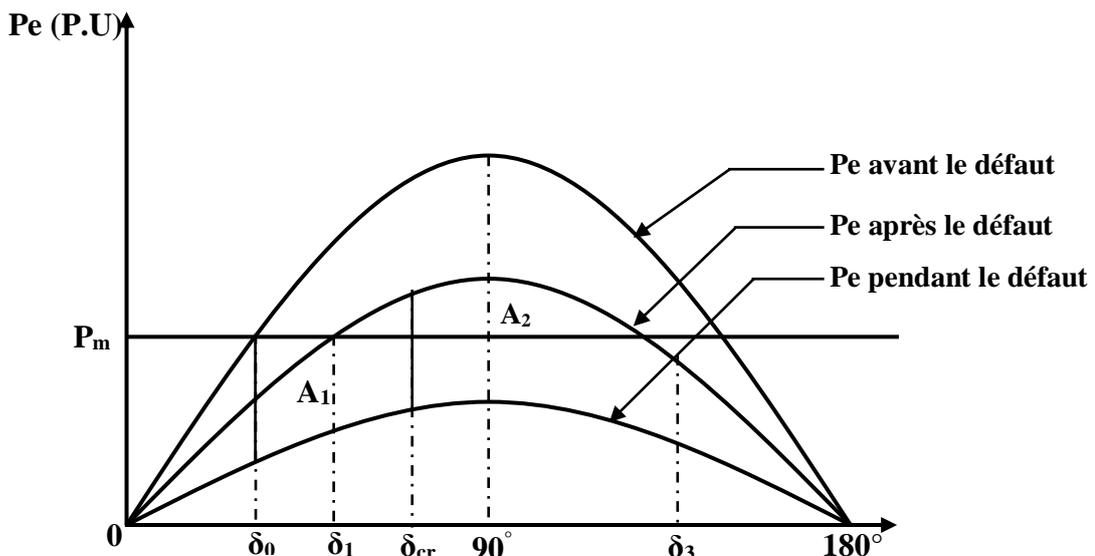


Figure 2.22 Réponse du système pendant les trois régimes de fonctionnement

2.5.2.3 Etudes de l'influence des grands mouvements (défaut court-circuit symétrique)

La figure suivante montre le schéma équivalent du réseau étudié menacé par un défaut de Court-circuit triphasé.

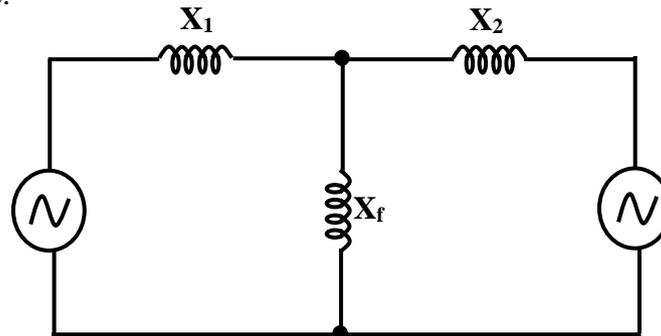


Figure 2.23 Localisation de défaut court- circuit dans le réseau étudié

La réactance équivalente de la ligne durant le défaut X_{Lf} .

Alors :

$$X_{LF} = X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_f} \quad (2.21)$$

Lors d'un court-circuit triphasé, nous avons $X_f = 0$, par conséquent $X_{Lf} = \infty$.

Et donc la puissance active à la sortie du générateur est presque nulle et le courant est inductif. Pendant le court-circuit, nous pouvons récrire l'équation mécanique comme suit :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m}{M} = \text{constante} = \lambda D \text{ où } \delta = \frac{1}{2} \lambda t^2 + \delta_0 \quad (2.22)$$

2.5.3 Application du SSSC sur le réseau de test

Un court-circuit triphasé est localisé au point C situé à 50 Km de l'alternateur et éliminé au bout de 200 ms. Le SSSC est connecté au réseau à 100 Km de l'alternateur (voir la figure 2.24) [25]. Les résultats de simulation sont effectués dans les 3 scénarios suivants :

- En absence de toutes les moyennes de régulation,
- En présence de la régulation conventionnelle,
- En présence de la régulation classique et le compensateur SSSC.

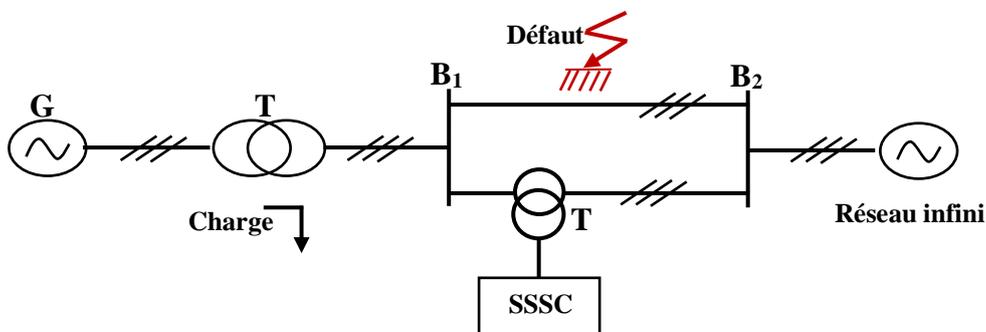


Figure 2.24 Réseau test équipé d'un SSSC

2.5.3.1 Comportement du réseau avec le défaut

Les figures 2.25, 2.26, 2.27 et 2.28 montrent le comportement de la tension de sortie, la vitesse de rotation, l'angle de charge et la puissance active respectivement en présence de défaut et en absence de toutes les moyennes de régulation classique.

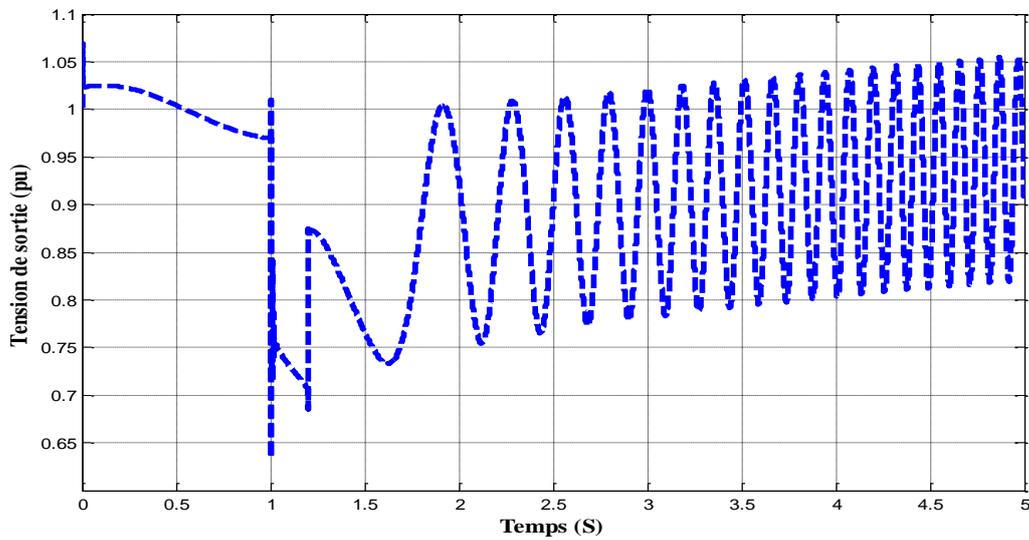


Figure 2.25 Tension de sortie en (pu)

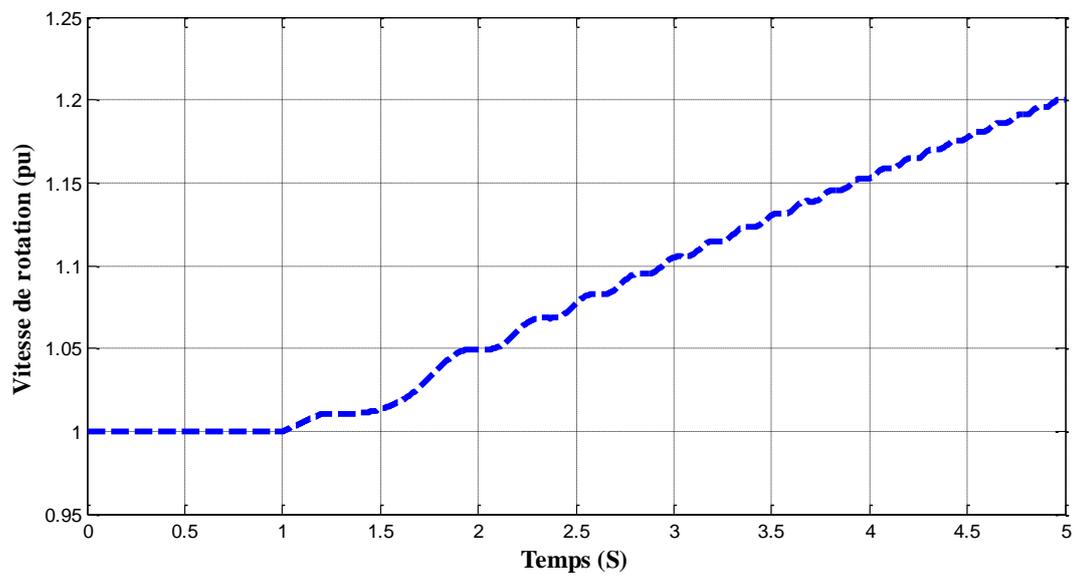


Figure 2.26 La vitesse de rotation en (pu)

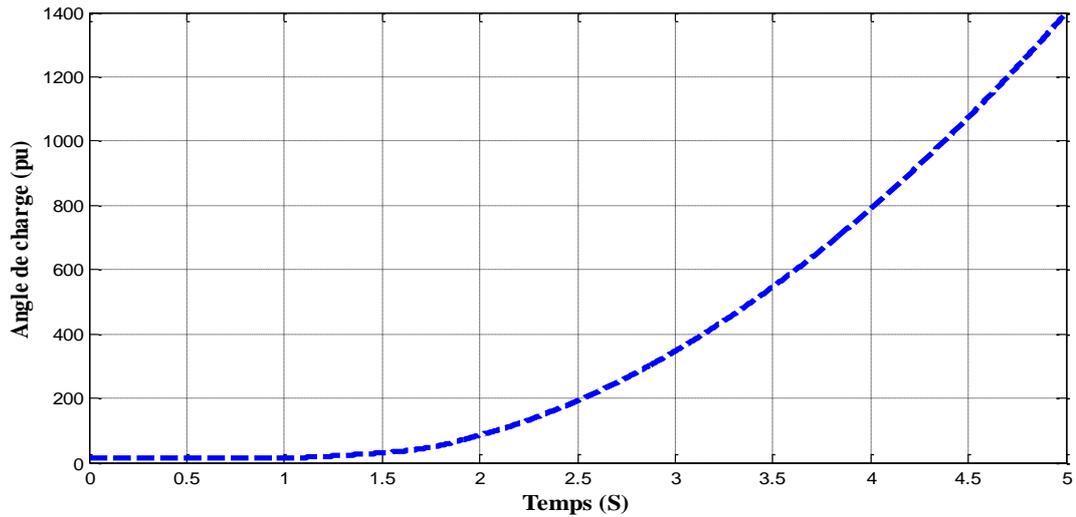


Figure 2.27 Variation de l'angle de charge en (pu)

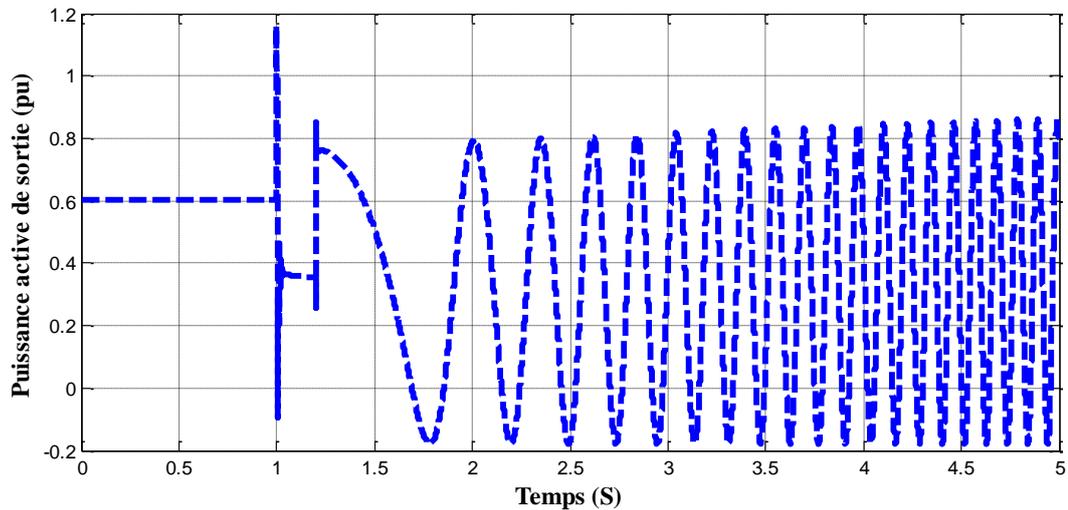


Figure 2.28 Puissance active de sortie en (pu)

Sur les figures précédents on trouve un effondrement total du système tel que : la divergence de la vitesse et l'angle de charge (qui indique l'état instable du réseau). Ainsi que la dégradation de la tension et la puissance à cause de la décharge de l'énergie vers la terre.

2.5.3.2 Comportement du réseau avec le défaut équipé d'une régulation classique

Les figures 2.29, 2.30, 2.31 et 2.32 montrent le comportement dynamique du système précédent en présence de la régulation conventionnelle.

Les courbes en rouge représentent les grandeurs électrique en absence d'une régulation classique et celle en bleu représentent les grandeurs en présence de la régulation classique.

On constate que la régulation classique permet d'améliorer les performances de la tension de réseau électrique (figure 2.29).

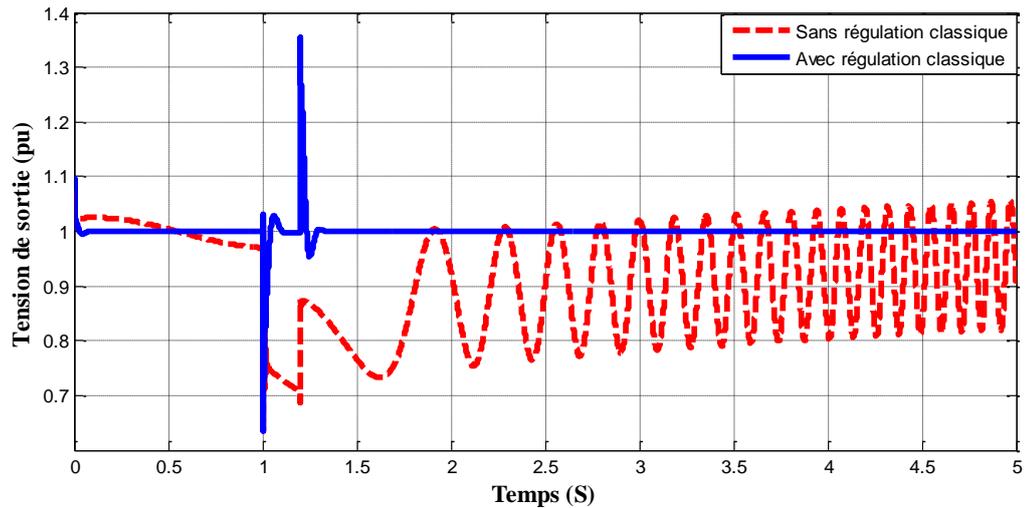


Figure 2.29 La tension de sortie en (pu)

Les figures 2.30 et 2.31 expliquent l'importance de la régulation classique pour rendre le système à son état d'équilibre en comparaison avec le cas de l'absence de la régulation classique.

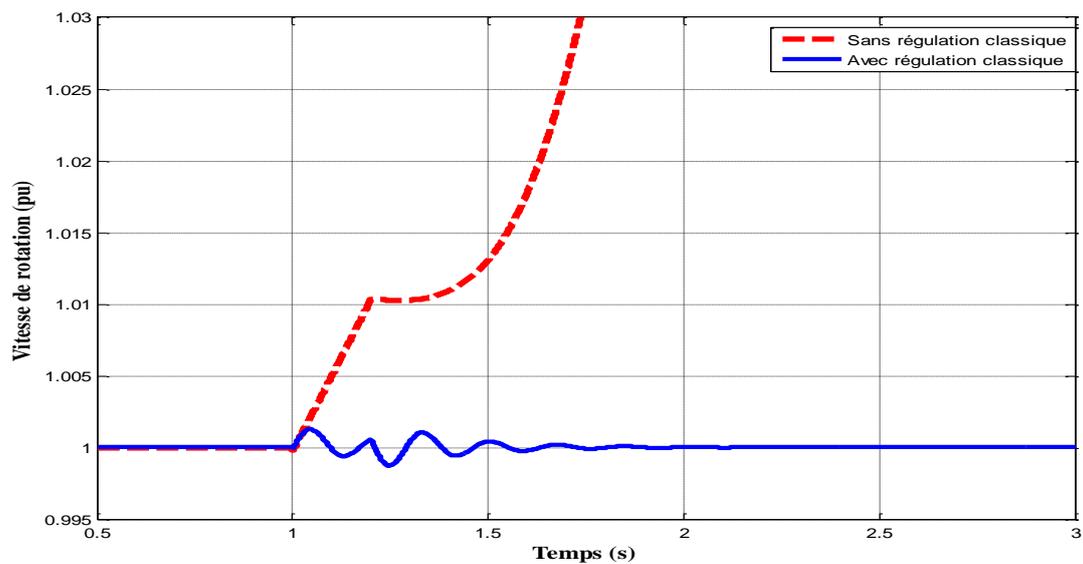


Figure 2.30 Vitesse de rotation en (pu)

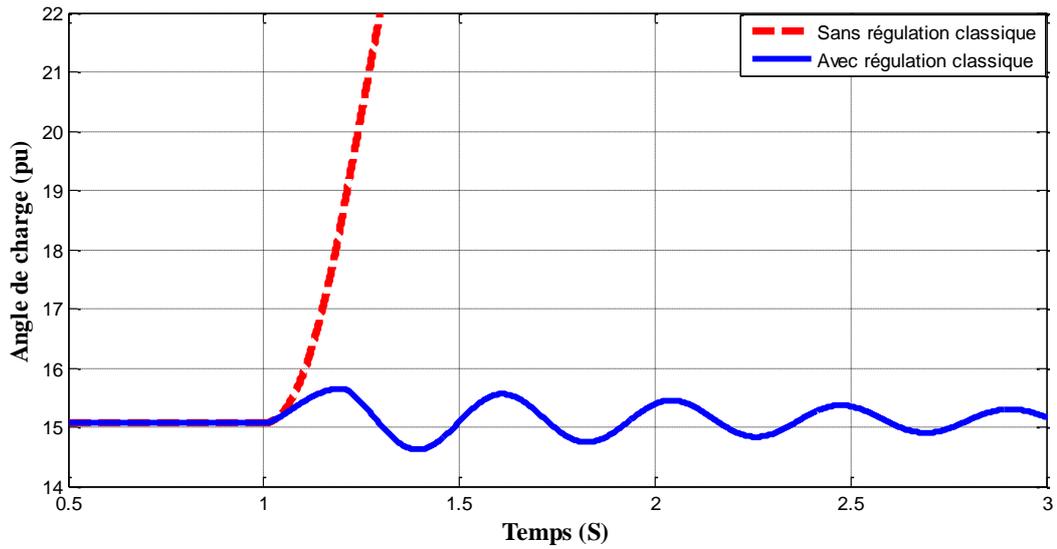


Figure 2.31 Angle de charge en (pu)

L'amélioration de comportement de la vitesse à cause de l'amélioration de comportement de la puissance.

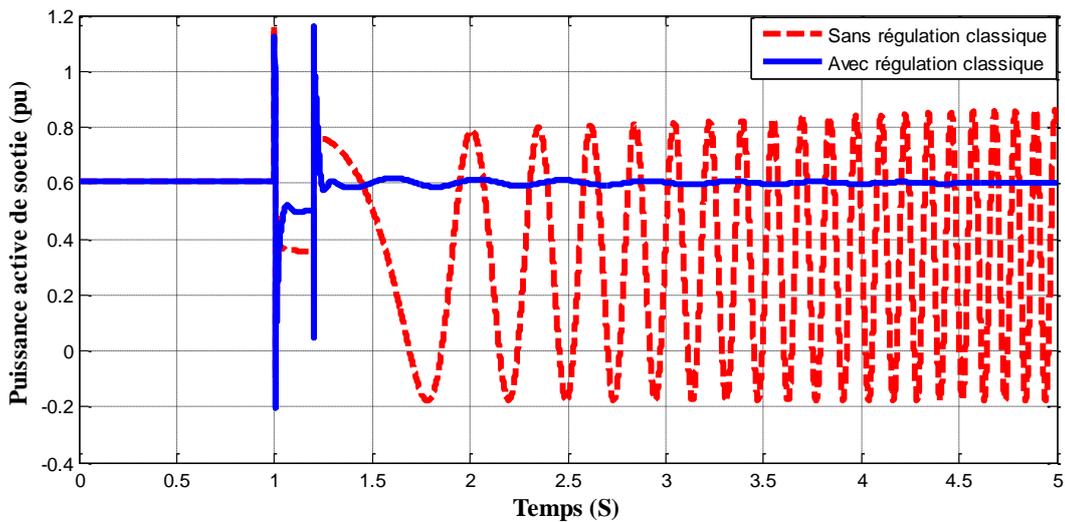


Figure 2.32 La puissance active de sortie en (pu)

On constate que la régulation classique est moyen efficace pour stabiliser du système étudié.

2.5.3.3 Comportement du réseau avec défaut équipé d'une régulation classique et un SSSC

a) Comportement du SSSC

Les figures 2.33, 2.34, 2.35, 2.36, 2.37 et 2.38 montrent le comportement de réglage avec SSSC Suivant les conditions ci-dessous :

La puissance active de référence $P_L^* = 1$ pu et la tension continue de référence aux bornes du condensateur $V_{dc}^* = 1$ pu.

Les courbes en vert représentent les grandeurs de référence (la consigne) et les courbes en bleu représentent les grandeurs réelles (la réponse).

Les figures 2.33 et 2.34 montrent les performances de la puissance active et la tension continue aux bornes de condensateur, la réponse poursuite la consigne pour chaque variation. La variation de la tension continue à cause de la charge et la décharge du condensateur.

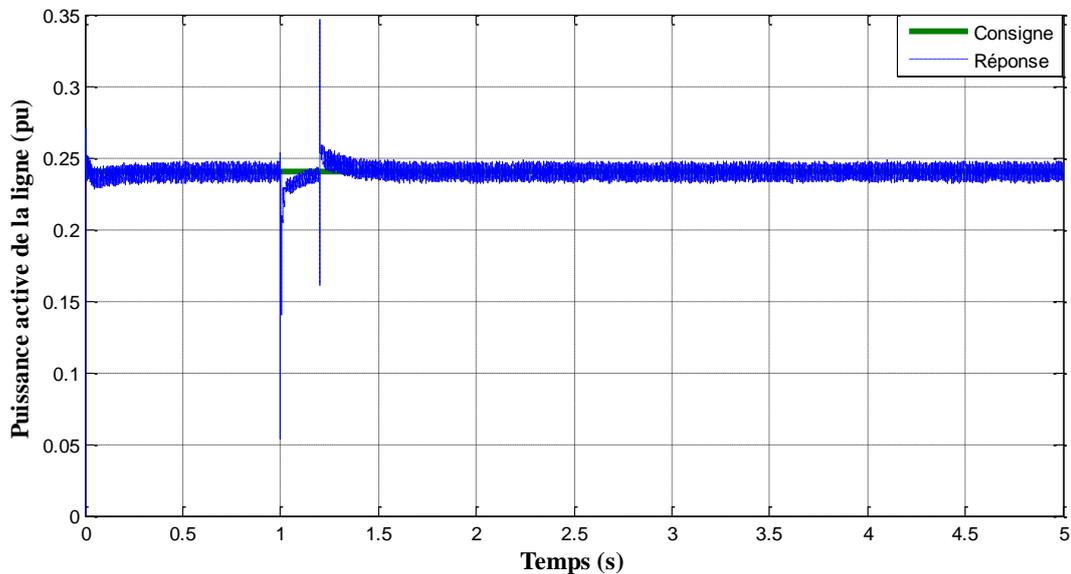


Figure 2.33 Variation de puissance active en (pu)

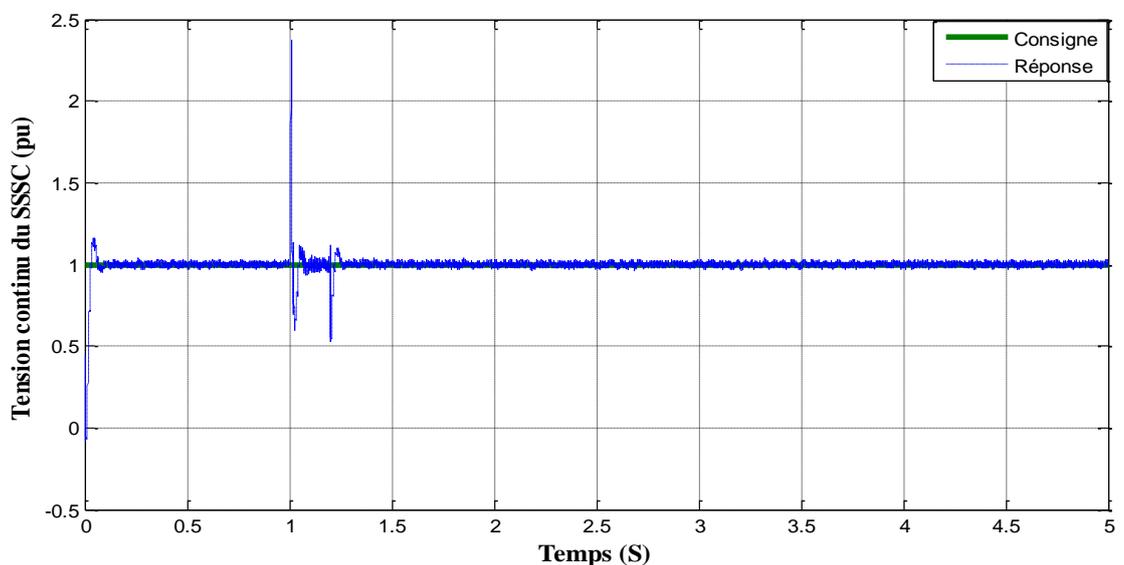


Figure 2.34 Tension continu V_{dc} du SSSC en (pu)

Les figures 2.35 et 2.36 illustrent respectivement les variations des puissances active et réactive injectées (nécessaires) par le SSSC. Le SSSC intervient pour injecter d'une puissance active dans le but de charger de condensateur et également intervient pour injecter d'une puissance réactive dans le but de modifier de l'impédance de la ligne.

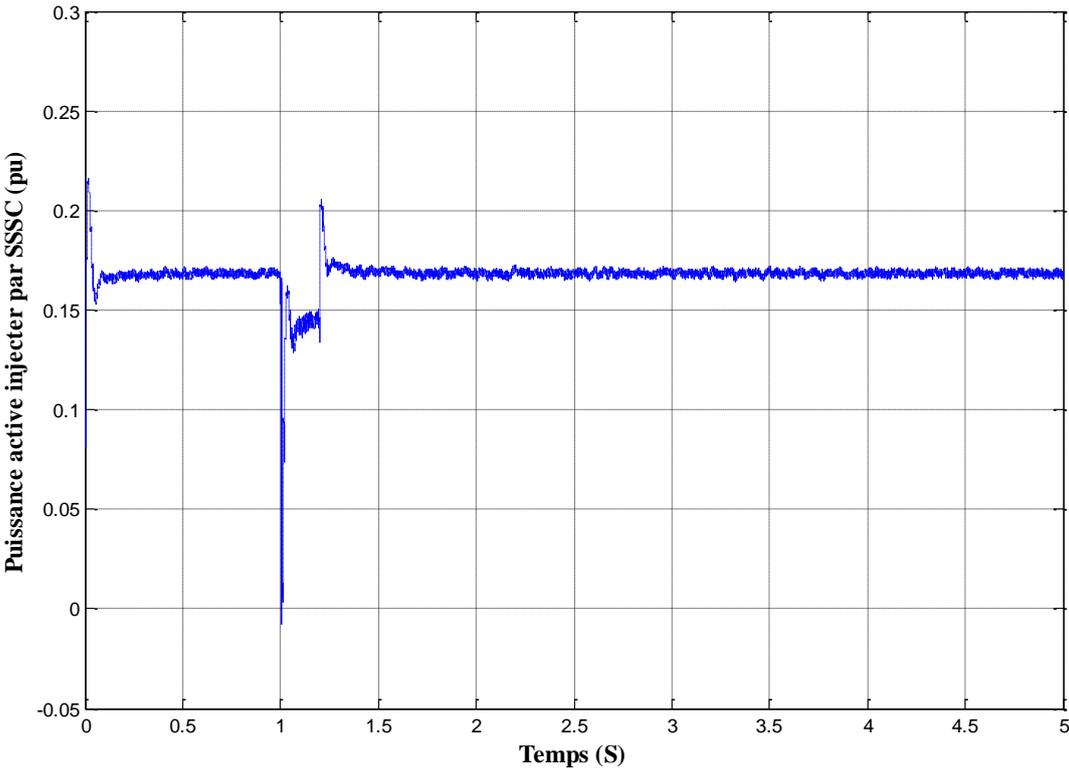


Figure 2.35 Puissance active injecté par SSSC en (pu)

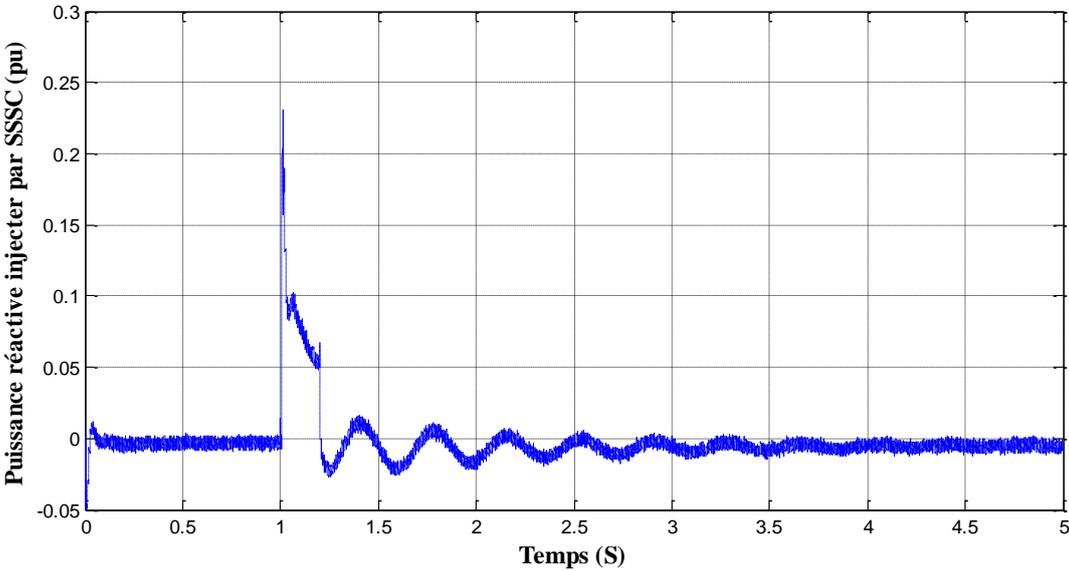
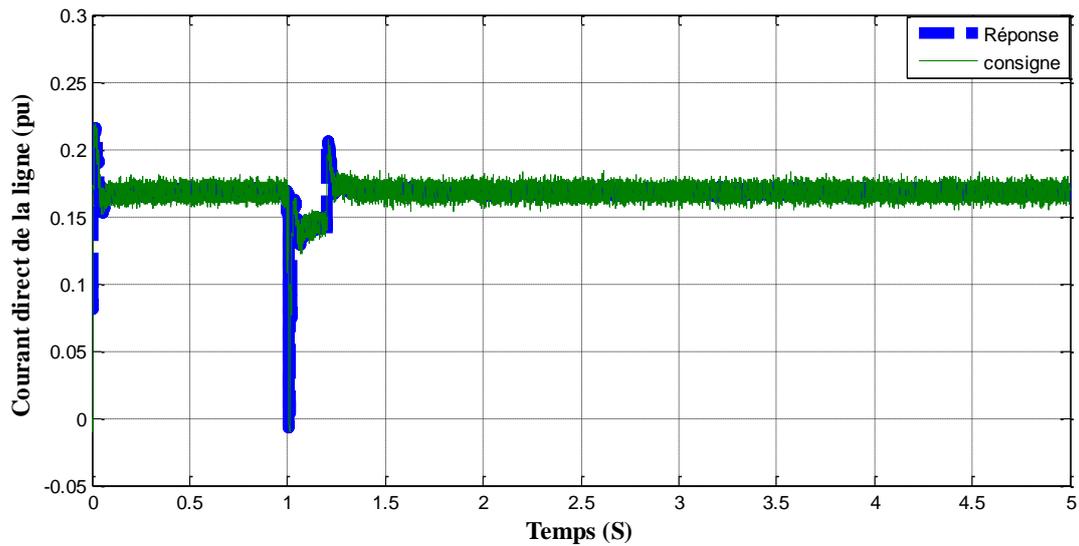
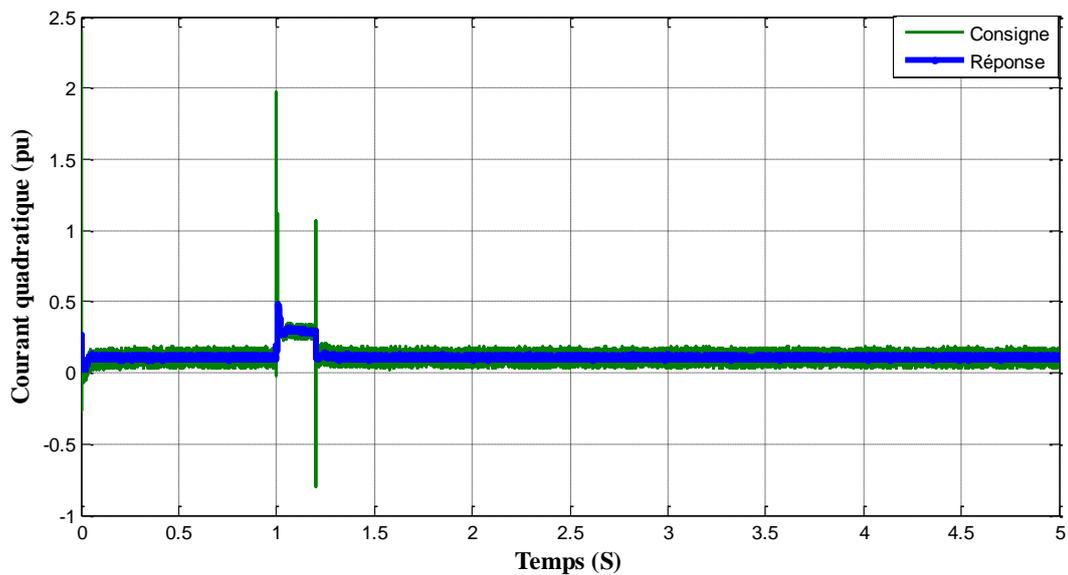


Figure 2.36 Puissance réactive injecté par SSSC en (pu)

La variation de courant observée et montrée par les figures 2.37 et 2.38 est due évidemment à la relation courant-puissance.

Figure 2.37 Courant direct I_d de la ligne en (pu)Figure 2.38 Courant quadratique I_q de la ligne en (pu)

La figure 2.39 montre la variation de tension de compensation V_s assurant le réglage et l'équilibrage de comportement du système (avec modification de l'impédance de la ligne de transmission).

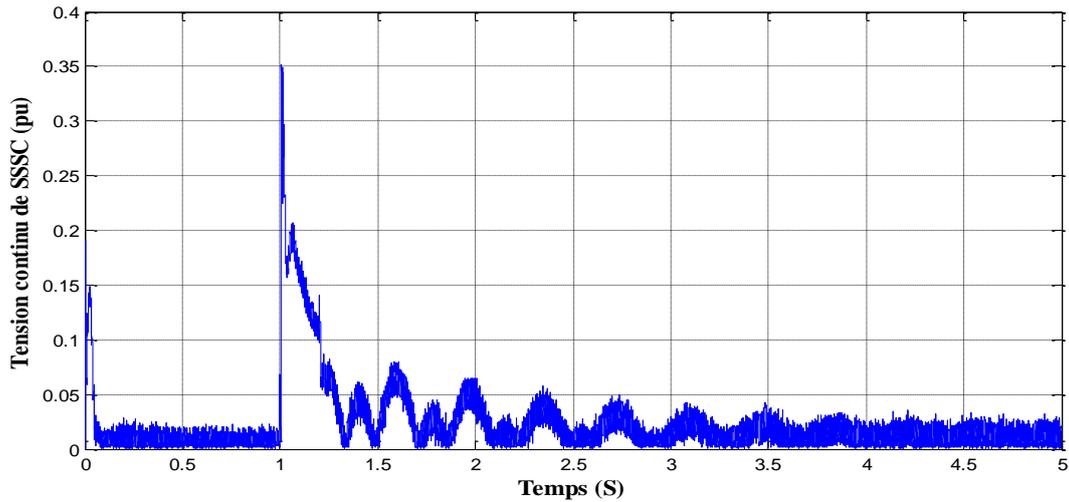


Figure 2.39 Tension de SSSC en (pu)

b) Comportement transitoire du réseau

Les figures 2.40, 2.41, 2.42, et 2.43 montrent le comportement transitoire de la tension de sortie, la vitesse de rotation, l'angle de charge et la puissance active de sortie respectivement en présence de la régulation classique et le compensateur statique SSSC (installer à 50km par rapport le nœud générateur).

La variation de la puissance réactive injectée par le SSSC influe sur les caractéristiques de sortie de la machine synchrone. Les courbes en rouge montrent représentent les grandeurs en absence d'une régulation et en bleu représentent les grandeurs en présence de la régulation classique et celle qui sont en vert représentent les grandeurs en présence de la régulation classique et du SSSC.

On présence du SSSC on remarque le meilleur comportement transitoire tel que :

- Le retour rapide de la stabilité,
- La réduction des oscillations,
- Meilleur qualité des allures en comparaison avec de la régulation classique.

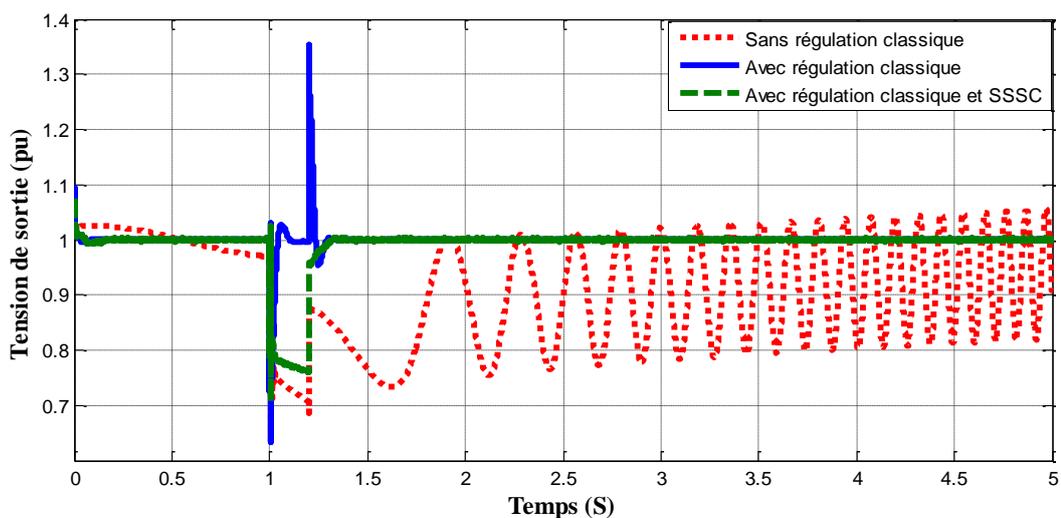


Figure 2.40 Variation de la tension de sortie en (pu)

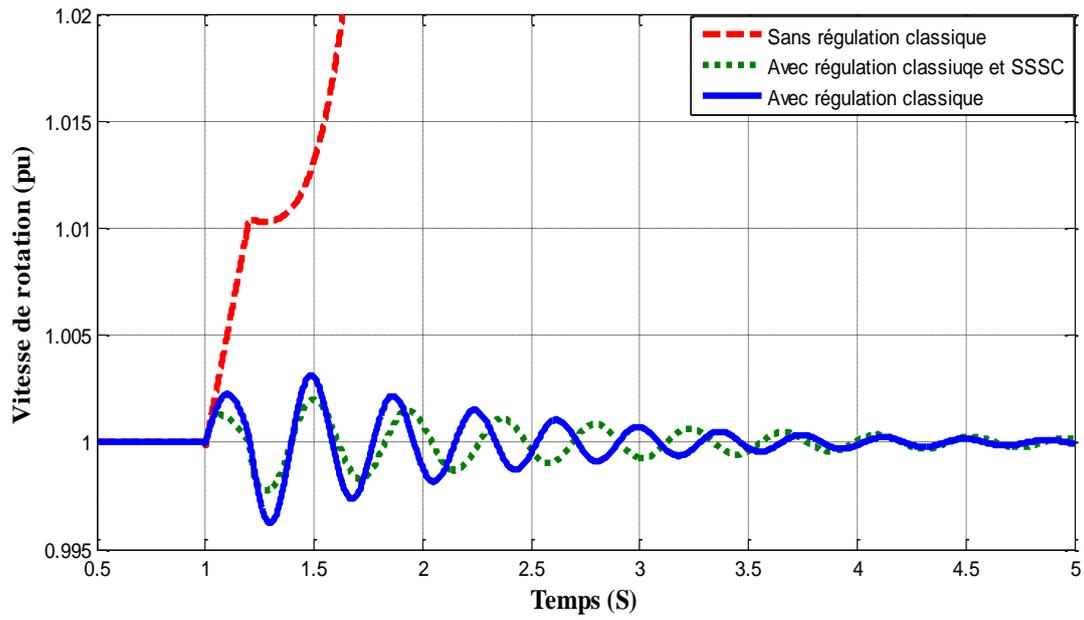


Figure 2.41 Variation de la vitesse de rotation en (pu)

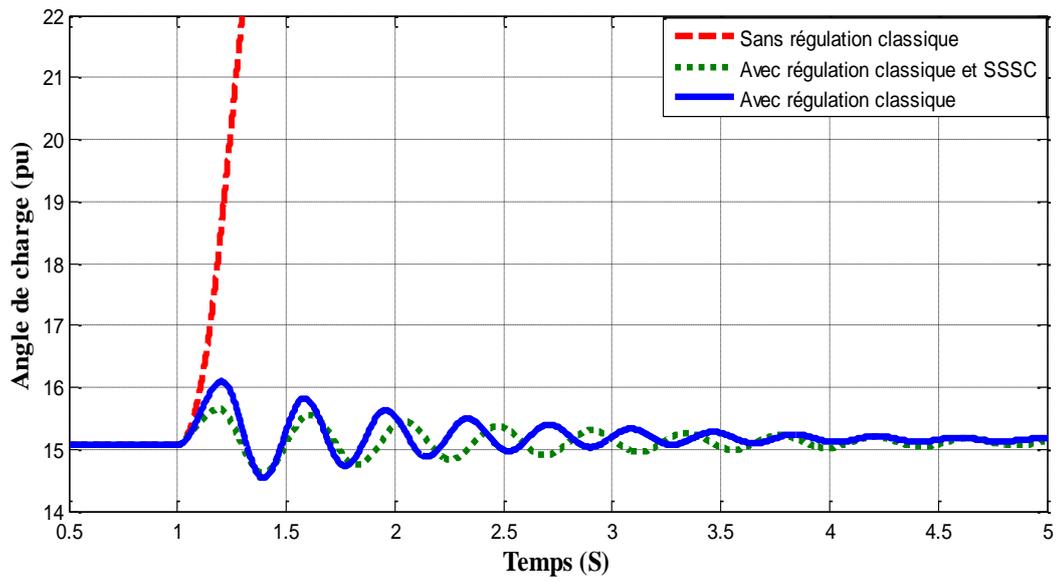


Figure 2.42 Variation de l'angle de charge en (pu)

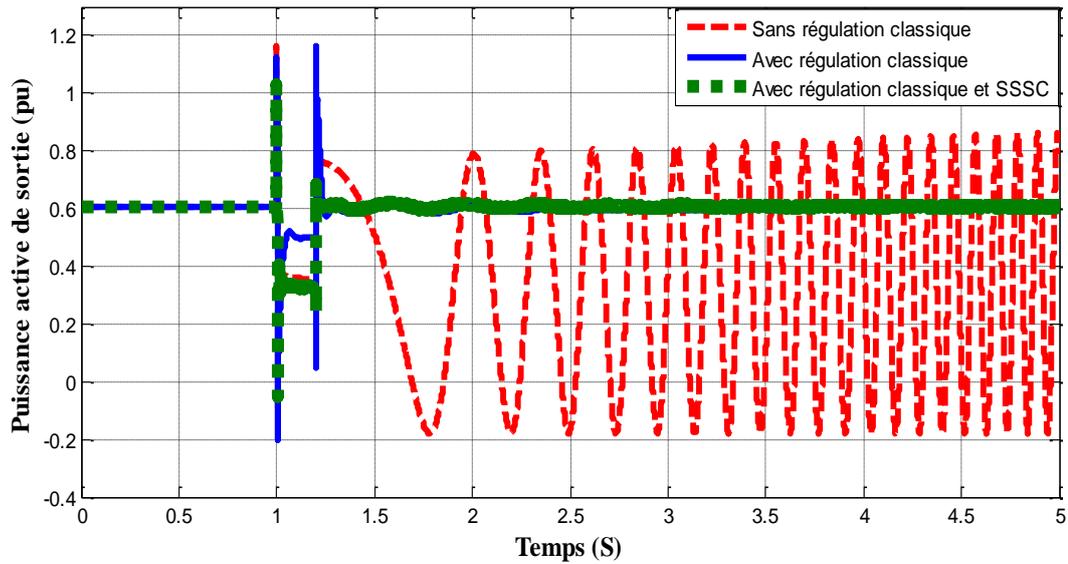


Figure 2.43 Variation de la puissance active de sortie en (pu)

L'utilisation de la régulation classique en association avec un SSSC permet d'assurer une bonne stabilité des caractéristiques électriques et dynamiques de la machine comme la montre les figures précédentes. On observe l'augmentation de la marge de la stabilité.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit le contrôleur SSSC afin de compenser la puissance réactive et maintenir la puissance active de la ligne où il est connecté sur un réseau électrique monomachine. Les performances du SSSC comparées à celles de la régulation classique s'avèrent être les meilleures en permettant une tenue de réseau électrique dans des plages acceptables de stabilité. Mais, le problème majeur du SSSC est le contrôle d'une seule grandeur (la puissance active) et dans un seul sens de circulation : Ça, pose un autre problème de l'incontrôlabilité de la puissance réactive (Variation aléatoire) dans le réseau électrique dans tous les régimes de fonctionnement. Alors, dans le 3eme chapitre, on présentera une autre configuration spécifique utilisée dans les réseaux électriques pour fournir des fonctionnalités de contrôle de tension, de compensation de puissance réactive et de régulation de fréquence.

Chapitre 03 :
Modélisation, commande et application
du BtB-STATCOM

3.1 Introduction

L'étude de la stabilité est considérée l'une des études les plus complexes de réseau électrique, et particulièrement la stabilité transitoire en raison des caractéristiques complexes du système d'une part, d'autre part à l'objectif de ce type d'étude qui vise à l'analyser de comportement du système électrique en présence des grandes perturbations (la non-linéarité du système) [32], [33], [34], [35].

Dans ce chapitre, une étude de stabilité transitoire du réseau équipé de moyens conventionnels de réglage est menée et ce en vue de comparer les performances du réglage conventionnel et celles du réglage par BtB-STATCOM.

3.2 Description de back-to-back STATCOM (btb-STATCOM)

Dans un système de transmission de puissance "back-to-back STATCOM", le redresseur (convertisseur AC - DC) et l'onduleur (convertisseur DC - AC) sont d'une part localisée dans une même station et d'autre part reliée par l'intermédiaire d'une inductance en série pour les convertisseurs CSC ou d'un condensateur en parallèle pour les convertisseurs VSC. Cette catégorie de système est couramment utilisée pour interconnecter deux systèmes AC asynchrones qui peuvent soit opérer à des fréquences nominales différentes, soit le faire sans être synchronisés. On peut utiliser ce système pour le conditionnement de l'énergie dans une ligne à courant alternatif. La figure 3.1 montre la configuration d'un tel système [32].

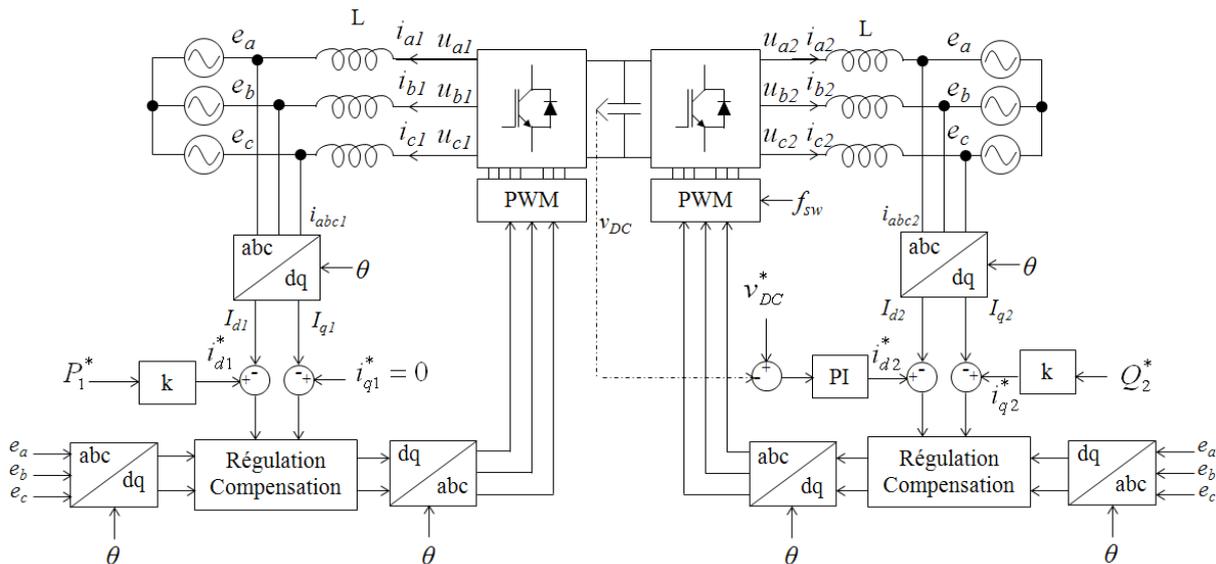


Figure 3.1 Structure d'un système back-to-back STATCOM

3.3 Modélisation et commande d'un BtB-STATCOM

3.3.1 Structure et Modélisation de BtB STATCOM

Le BtB STATCOM est constitué par deux convertisseurs DC-AC connectés (back-to-back) comme la montre la figure 3.2. Les régions **i** et **j** du réseau sont connectées au BtB STATCOM en utilisant des transformateurs de couplage parallèle T. Les bornes CC des convertisseurs sont reliées entre elles via une liaison CC commune. Le BtB STATCOM

permet le contrôle de la puissance réactive par compensation réactive et en même temps le réglage du transit de puissance active dans la ligne de transmission [33], [34].

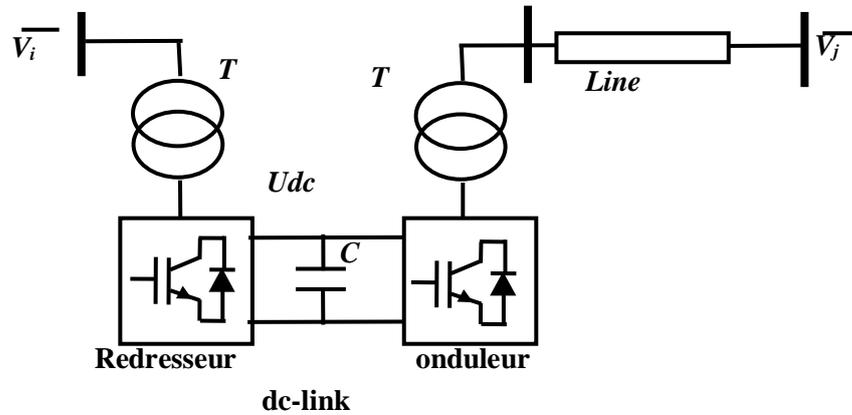


Figure 3.2 Configuration du BtB STATCOM

Le circuit équivalent du BtB STATCOM est illustré à la Figure 3.3.

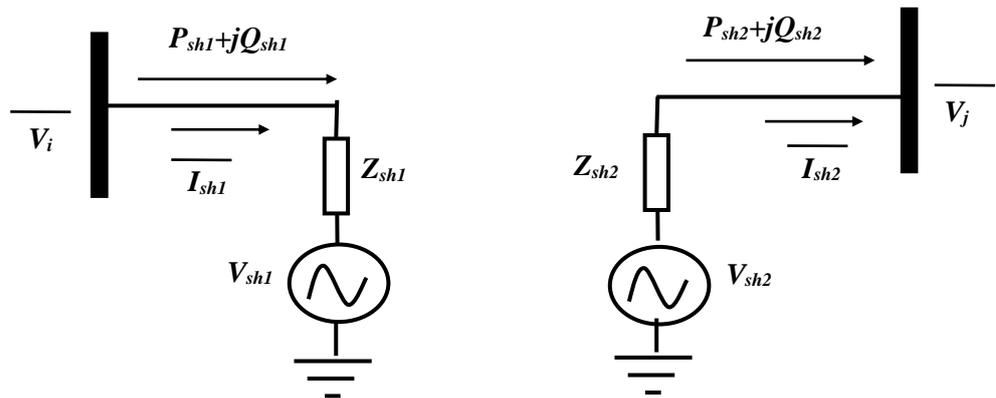


Figure 3.3 Circuit équivalent de BtB STATCOM

Les convertisseurs sont représentés par des sources de tension V_{sh1} et V_{sh2} respectivement. L'impédance shunt est modélisée par :

$$Z_{shi} = r_{shi} + jL_{shi}\omega \quad (i=1 \text{ ou } 2)$$

En effectuant la transformation de Park, la transmission du courant alternatif peut être décrite par les équations suivantes.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sh1d} \\ i_{sh1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{sh1}}{L_{sh1}} & \omega \\ -\omega & -\frac{r_{sh1}}{L_{sh1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sh1d} \\ i_{sh1q} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh1}} \left(\begin{bmatrix} V_{id} \\ V_{iq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{sh1d} \\ V_{sh1q} \end{bmatrix} \right) \quad (3.1)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sh2d} \\ i_{sh2q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{sh2}}{L_{sh2}} & \omega \\ -\omega & -\frac{r_{sh2}}{L_{sh2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sh2d} \\ i_{sh2q} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh2}} \left(\begin{bmatrix} V_{sh2d} \\ V_{sh2q} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{jd} \\ V_{jq} \end{bmatrix} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2CU_{dc}} (V_{sh1d}i_{sh1d} + V_{sh1q}i_{sh1q} - V_{sh2d}i_{sh2d} - V_{sh2q}i_{sh2q}) \quad (3)$$

$$P_{sh} = \frac{3}{2} (V_d \cdot i_{shd} + V_q \cdot i_{shq}) \quad (4)$$

$$Q_{sh} = \frac{3}{2} (V_q \cdot i_{shd} - V_d \cdot i_{shq}) \quad (5)$$

ish = ish1 et V = Vi pour le redresseur ish = ish2 et V = Vj pour l'onduleur.

3.3.2 Réglage du BtB STATCOM

On utilise le découplage dans la commande de l'onduleur pour contrôler simultanément la tension nodale de la première région et la tension continu du Bus CC. Le convertisseur redresseur du BtB STATCOM assure le contrôle simultané de la puissance active et de la tension alternative (ou puissance réactive) dans la deuxième région. Le contrôle du flux de puissance est alors maintenu en utilisant des contrôleurs classiques pour pousser les courants de ligne à suivre leurs références. On souhaite obtenir une réponse rapide avec une interaction minimale entre la puissance active et la réactive ainsi qu'un fort amortissement de perturbation transitoire. Selon les équations (1) et (2). L'interaction entre les boucles de courant est provoquée par le terme de couplage ωL_{sh} . Le découplage est obtenu en réinjectant ce terme avec des valeurs opposées [35], [36], [37]. La Figure 3.4 montre le schéma de commande en découplage.

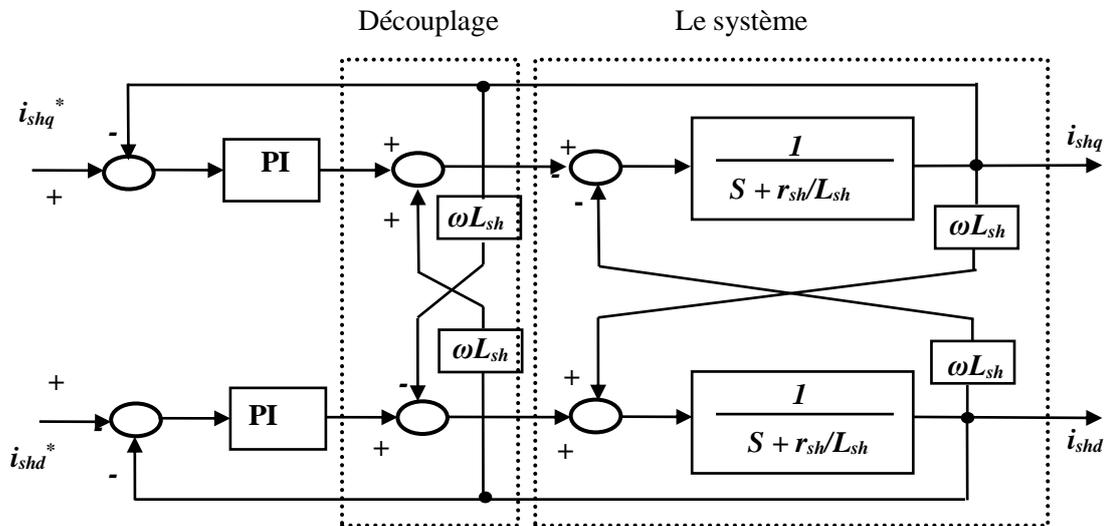


Figure 3.4 Contrôle des courants avec découplage PI

Pour simplifier le circuit de commande, on peut utiliser les deux équations (3.6) et (3.7) suivantes pour calculer les courants de référence en fonction des tensions nodales et des puissances électriques (actives et réactives) au lieu d'utilisation des régulateurs PI.

$$i_{shd}^* = \frac{2 (P_{sh}^* V_d - Q_{sh}^* V_q)}{3 (V_d^2 + V_q^2)} \quad (3.6)$$

$$i_{shq}^* = \frac{2 (P_{sh}^* V_q + Q_{sh}^* V_d)}{3 (V_d^2 + V_q^2)} \quad (3.7)$$

L'équation du réseau est donnée par :

$$U_{dc}^2 = \frac{P_{dc}}{CS} \quad (3.8)$$

$$P_{dc} = P_{sh1} - P_{sh2} \quad (3.9)$$

La figure 3.5 montre la boucle de réglage de la tension continue Udc.

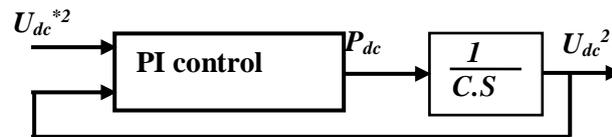
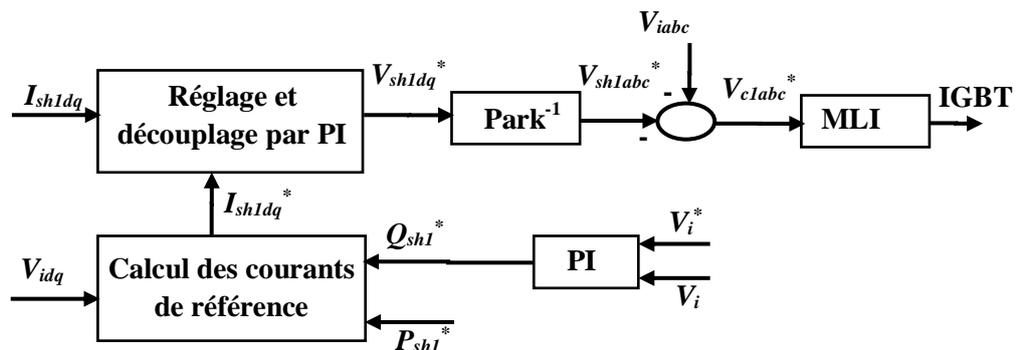
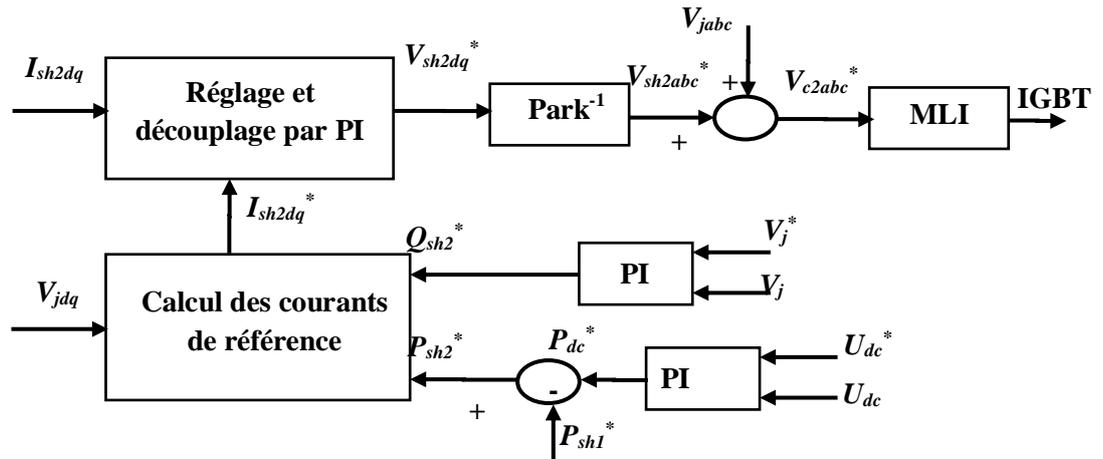


Figure 3.5 Commande PI pour tension continue

Le schéma global des circuits de contrôle de BtB STATCOM est présenté dans la figure 3.6.



(a) Circuit de commande du redresseur.



(b) Circuit de commande de l'onduleur

Figure 3.6 Schéma synoptique de contrôle du BtB STATCOM

3.4 Résultats de simulation de la commande

Ces résultats ont été relevés en régime permanent et transitoire, dans le fonctionnement normal et dans le cas d'absence de défaut...

On peut citer la nomenclature les grandeurs comme suit :

- V : la tension du réseau ;
- I : le courant du réseau ;
- P est la puissance active et sa référence ;
- Q est la puissance réactive et sa référence ;
- i_d est la composante directe (repère dq) du courant et sa référence ;
- i_q est la composante quadrature (repère dq) du courant et sa référence.

3.4.1 Coté STATCOM 1 (Onduleur)

La figure 3.6 représente la variation de la puissance active cotée STATCOM1. On remarque la réponse suivre l'ordre avec des perturbations transitoire dans l'instant de changement de consigne et des légères variations dans les instants 2 sec et 2.5sec à cause de variation de puissance réactive et la tension du bus continu.

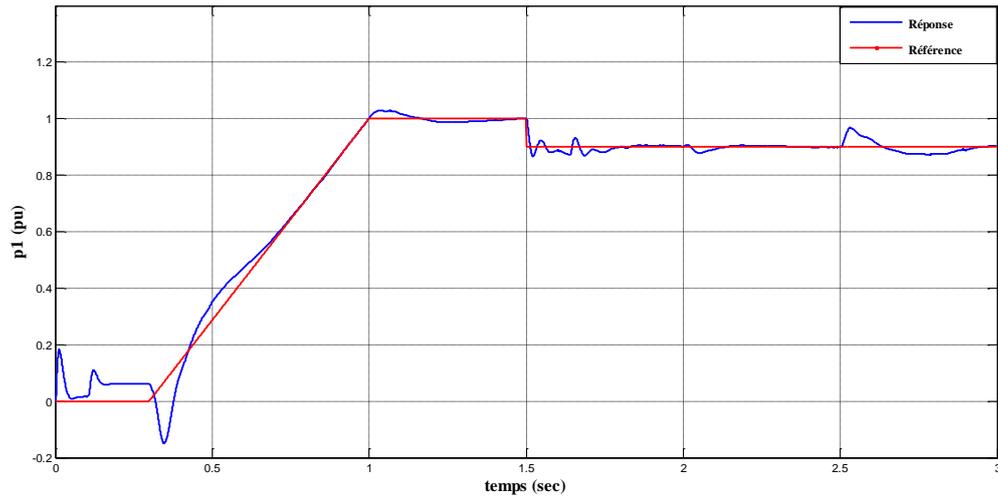


Figure 3.6 Puissance active coté STATCOM 1

La figure 3.7 exprime la variation de la puissance réactive cotée STATCOM1. On observe une perturbation initiale majeure entre le moment de départ et le moment 0.4 sec, ainsi que secondaire entre 1.5 sec ; 1.7 sec : À cause de variation de puissance active et la tension du bus continu.

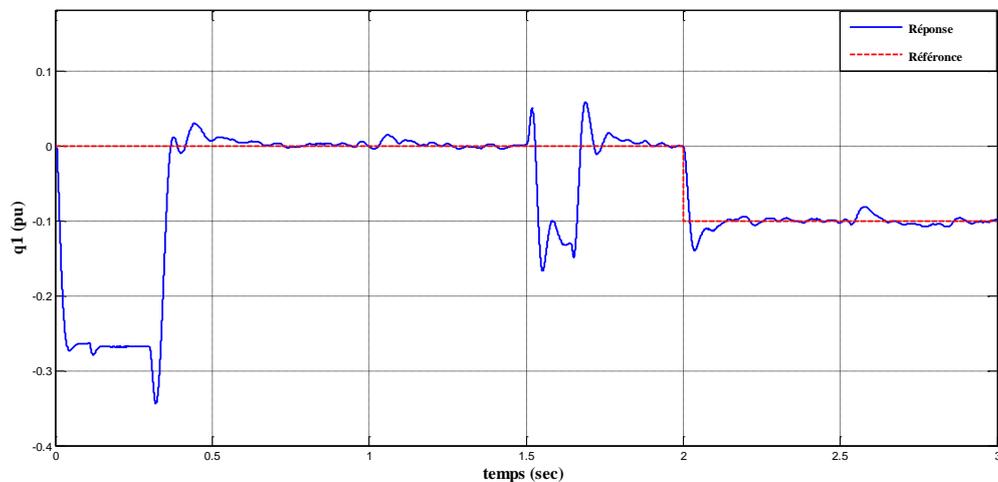
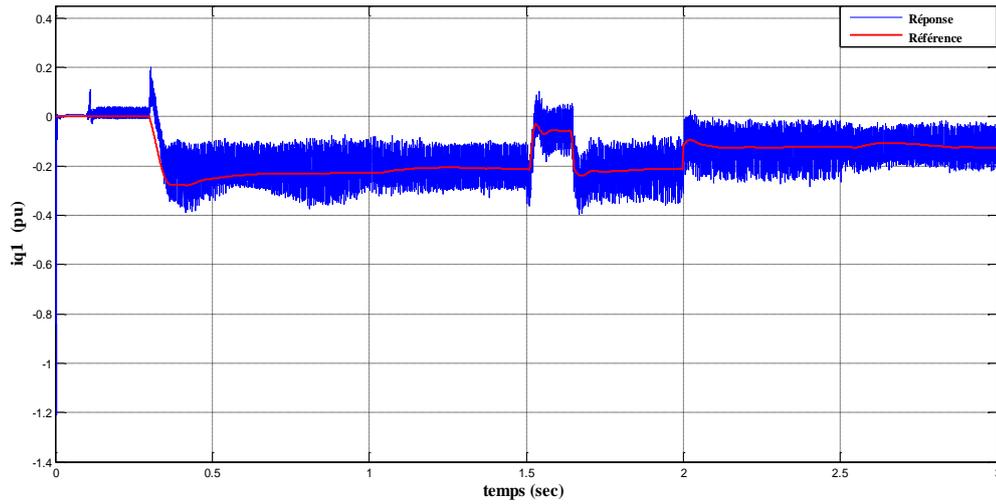
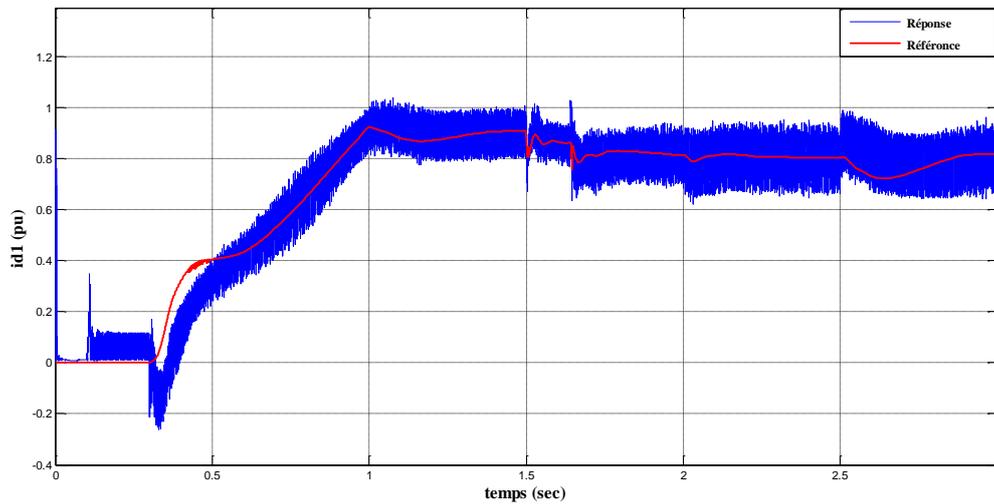


Figure 3.7 Puissance réactive coté STATCOM 1

Les figures 3.8 et 3.9 montrent successivement la variation du courant i_{q1} et i_{d1} coté STATCOM1. On remarque que la réponse suit l'ordre une largeur ondulatoire à cause de l'effet hystérèse du régulateur.

L'apparition des ondulations sur la forme du courant de réponse À cause de l'effet hystérèse sur le régulateur.

Figure 3.8 Courant quadrature i_{q1} coté STATCOM 1Figure 3.9 Courant direct i_{d1} coté STATCOM 1

3.4.2 Coté STATCOM 2 (Redresseur)

La figure 3.10 montre la variation de la puissance réactive au coté STATCOM2. Toujours la réponse respect l'ordre de la commande avec des simples perturbations transitoires dans les instants active (Variation d'autre grandeur).

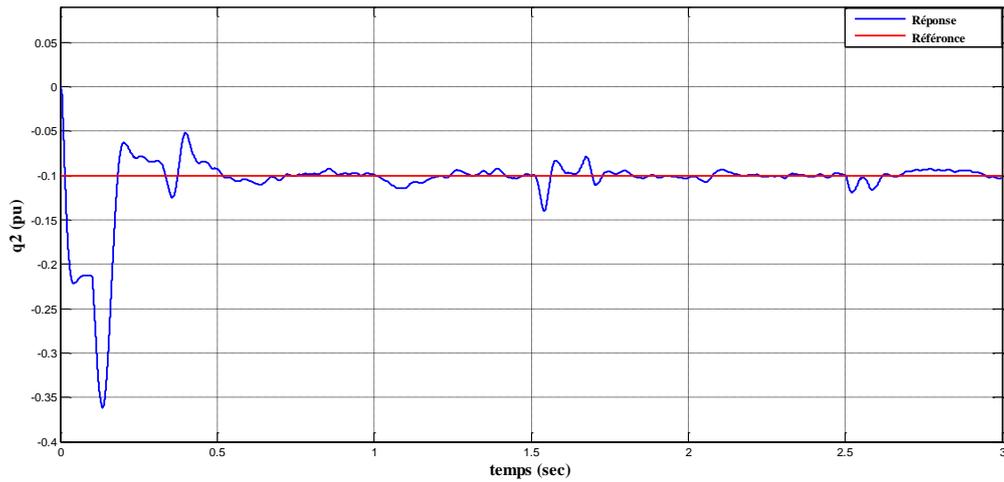


Figure 3.10 Puissance réactive coté STATCOM 2

Les figures 3.11 et 3.12 ci-dessous représentent le comportement de réglage de courants i_{q2} et i_{d2} coté STATCOM2. On remarque que les deux courbes ‘réponse, référence’ sont compatibles à tout moment de contrôlabilité.

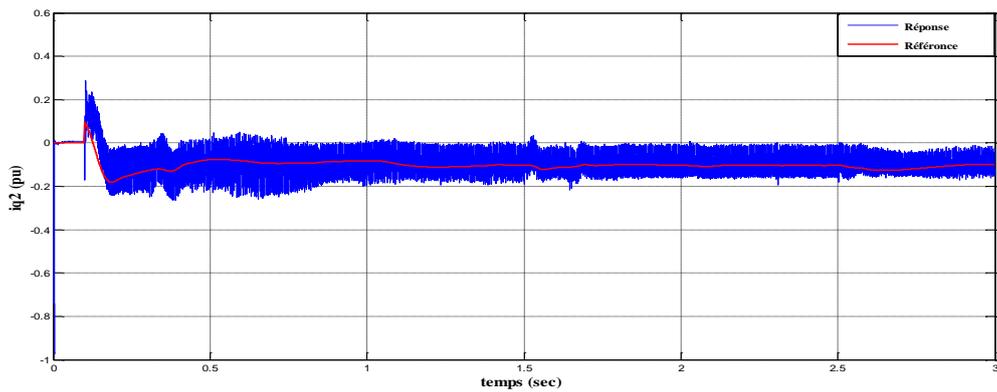


Figure 3.11 Composante du courant i_{q2}

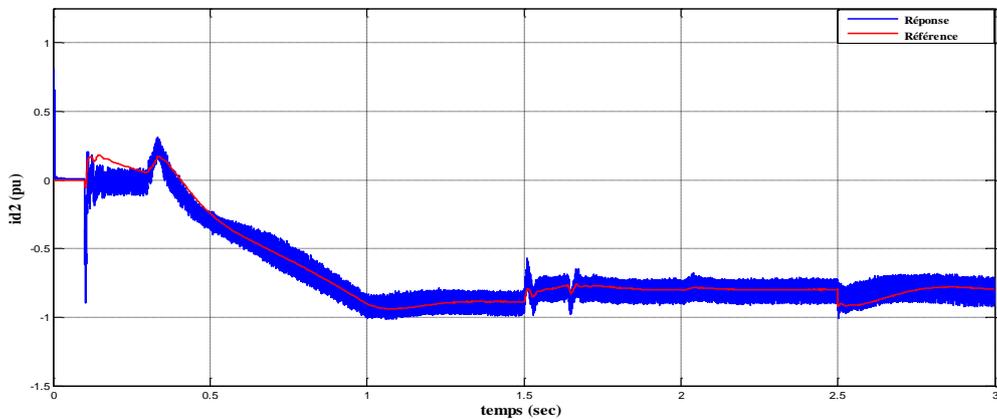


Figure 3.12 Composante du courant i_{d2}

3.4.3 Comportement de réglage de la tension du bus continu Vdc

La figure 3.13 expose la variation de la tension continue du bus continu entre les deux STATCOM (1 et 2). On applique une variation de consigne à l'instant $t = 2.5$ sec comme un test d'asservissement. On remarque, toujours la réponse reste réglable autour de sa consigne dans toutes les conditions de fonctionnement. quel que soit la perturbation le système suit la consigne

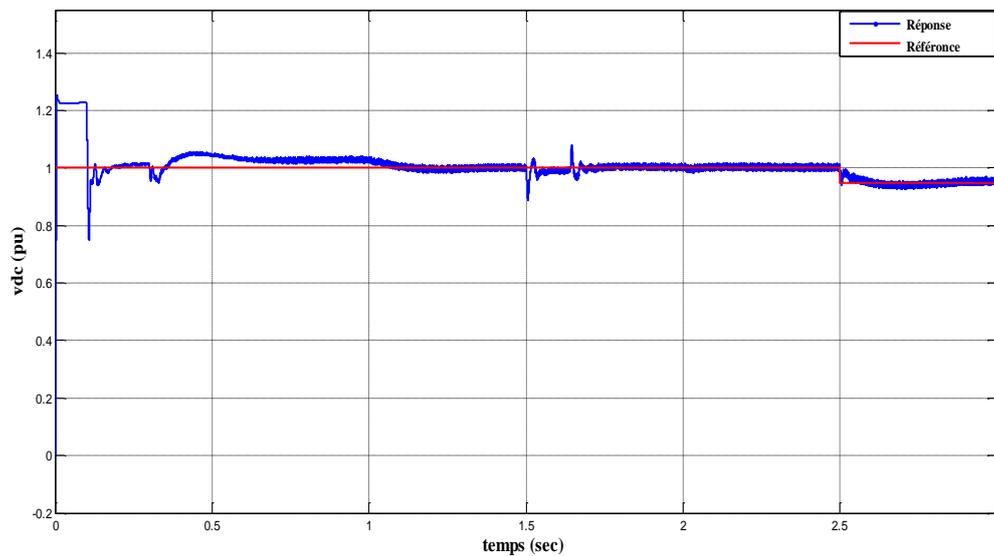


Figure 3.13 Variation de tension continue

3.4.4 Variation de grandeurs alternatifs

Les figures 3.14 et 3.15 montrent que les allures des tensions alternatives des deux côtés STATCOM 1 et 2 ont des formes équilibrées. La valeur est comprise entre 1 pu et -1 pu. Sauf pour une perturbation légère et immédiate dans le temps estimé de 1.5 sec sur le premier côté du générateur (STATCOM 1).

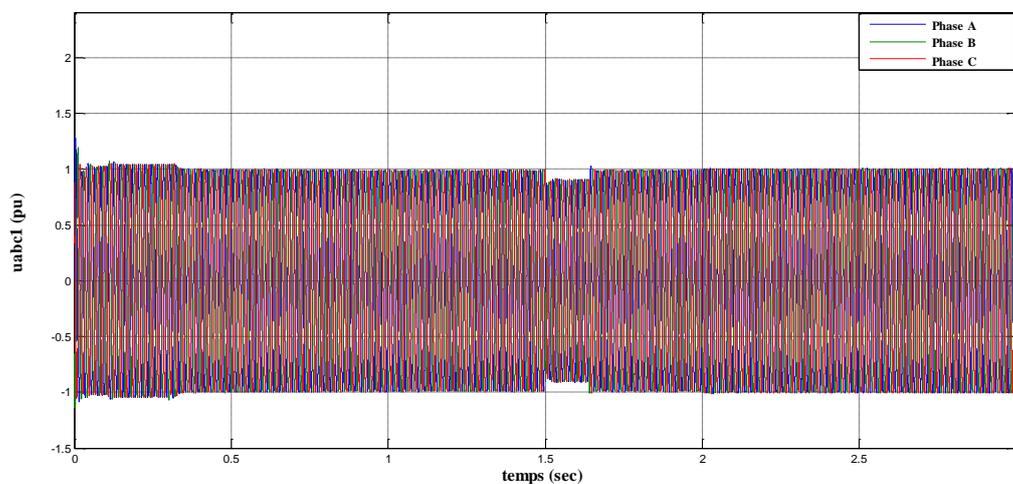


Figure 3.14 Tensions AC coté STATCOM 1

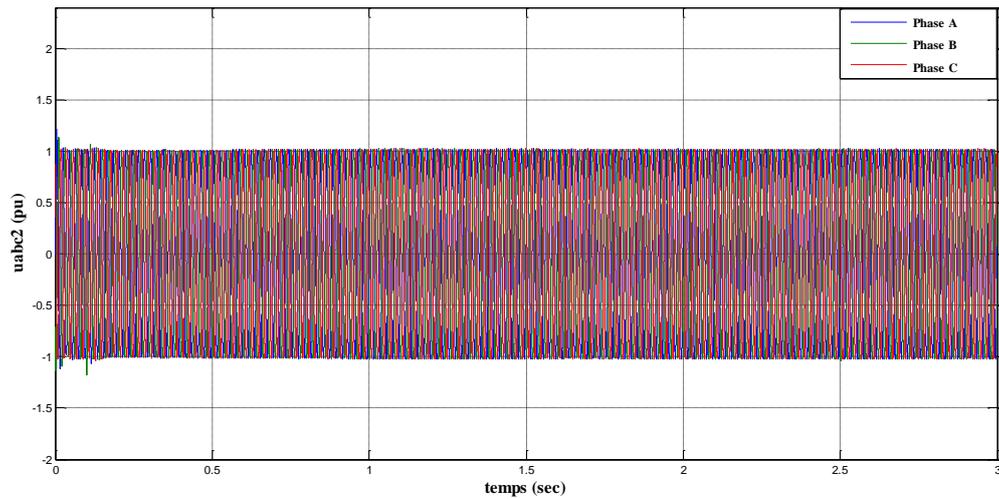


Figure 3.15 Tensions AC coté STATCOM 2

Les figures 3.16 et 3.17 décrivent les allures des courants alternatifs de côté redresseur et de côté onduleur. On observe la variation des amplitudes des courants dans les instants de variation de consignes de puissances active, réactive ou bien la tension continue.

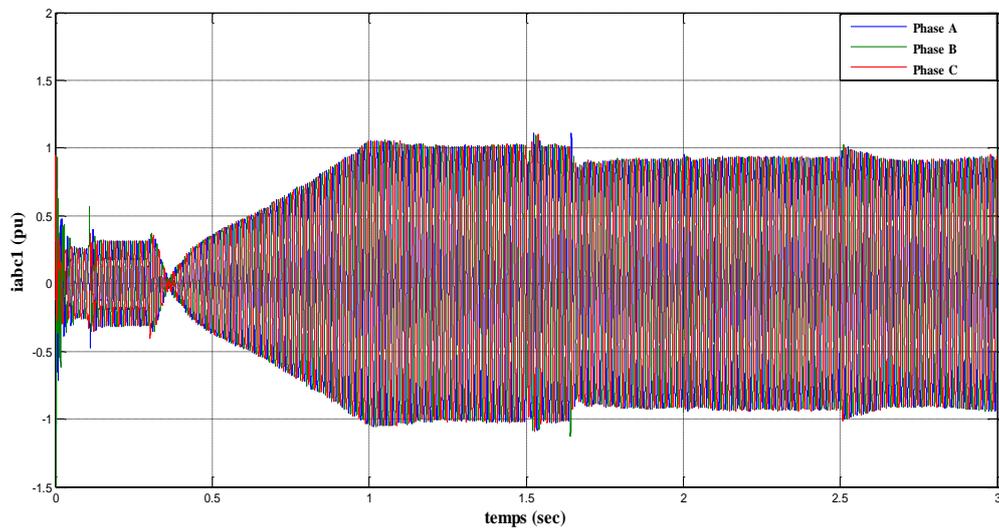


Figure 3.16 Courants AC coté STATCOM 1

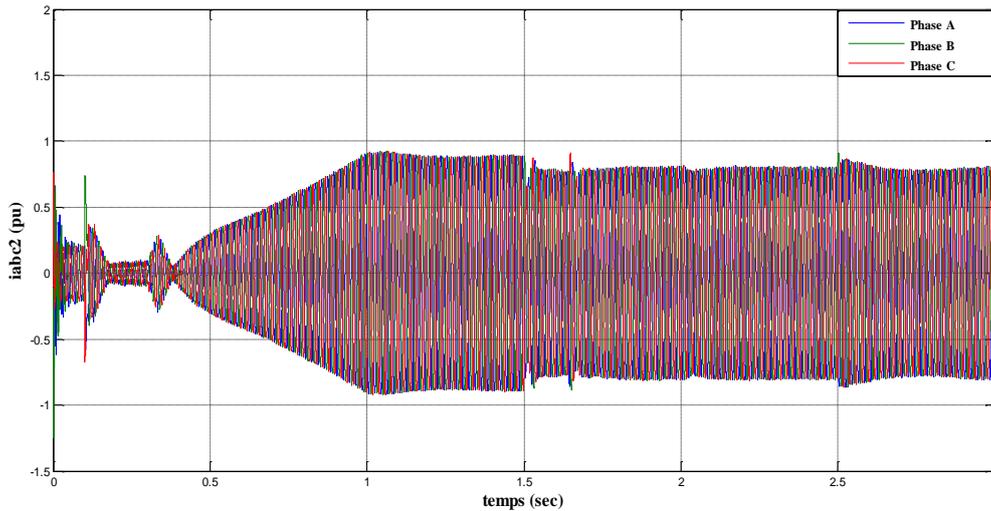


Figure 3.17 Courants AC coté STATCOM 2

3.5 Application du BtB STATCOM pour améliorer de la stabilité transitoire d'un réseau électrique mono-machine (SMIB)

Cette partie est consacré à l'étude de la stabilité transitoire, on y distingue essentiellement deux problèmes : l'évaluation du comportement du système électrique face à des perturbations importantes et sa commande (stabilisation) par rapport à des perturbations dangereuses [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46].

De même façon avec le chapitre 02, le réseau de test étudié est système mono machine SMIB (Single Machine infinite Bus) (Voire la figure 3.18). On applique un défaut de court-circuit triphasé CC à 50 km par rapport au nœud générateur JB2.

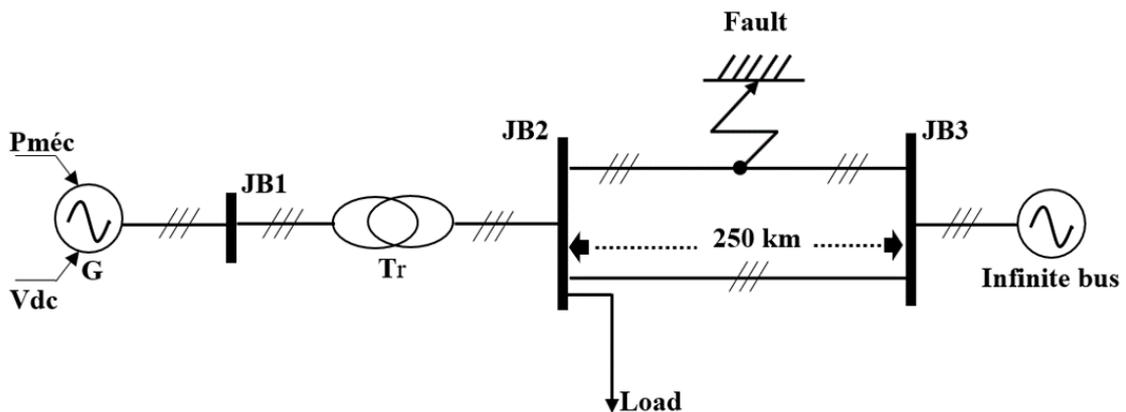


Figure 3.18 Schéma fonctionnel du réseau de test mono machine de test (SMIB)

Egalement, on installe un BtB-STATCOM au niveau de la deuxième ligne au voisin du jeu de barres générateur JB2 Figure 3.19.

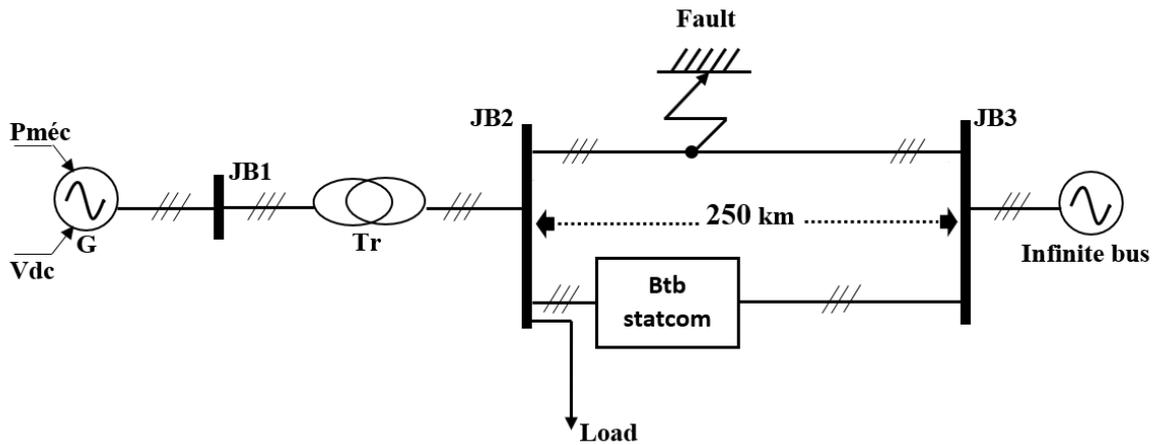


Figure 3.19 Le réseau de test SMIB en présence du BtB-STATCOM

Nous simulons le comportement du réseau avec le générateur équipé de la régulation conventionnelle (régulation de tension, régulation de vitesse). L'apparition d'un défaut front cc à 50 km par rapport JB2 avec une durée de 200 msec en absence et en présence du BtB-STATCOM permet d'obtenir les résultats ci-dessous.

3.5.1 Caractéristiques du réseau

Les figures (3.20) à (3.23) suivantes représentent successivement la courbe de vitesse ω (la fréquence), l'angle de charge delta, la puissance active p_e et la tension de sortie V du générateur en cas d'un défaut cc : les résultats obtenus quand le réseau n'est pas équipé de BtB-STATCOM (courbes en rouge) et quand celui-ci est introduit dans le réseau (courbes en bleu).

Les résultats montrent nettement l'apport bénéfique de BtB-STATCOM à la stabilité du réseau et ce par le meilleur amortissement des oscillations dans un temps n'excédant pas 7 sec.

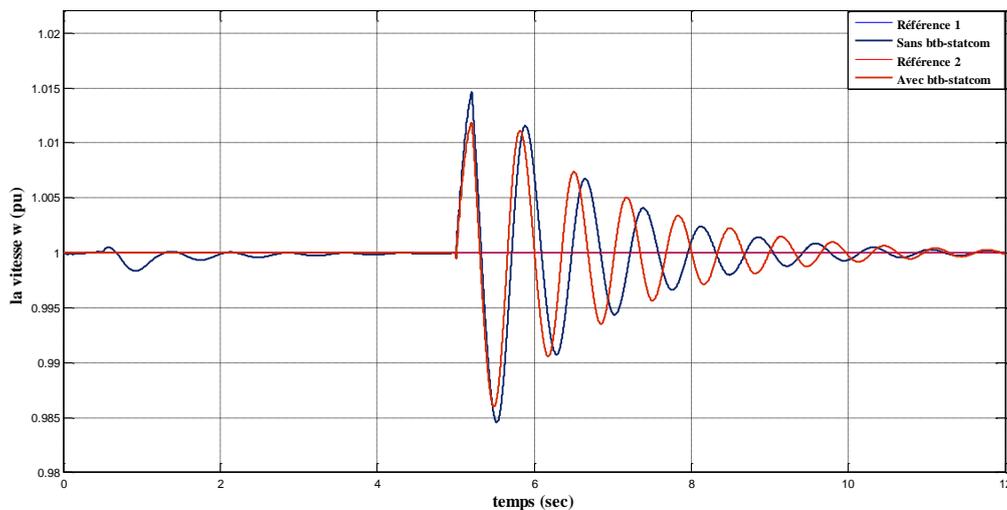


Figure 3.20 Variation de vitesse de rotation

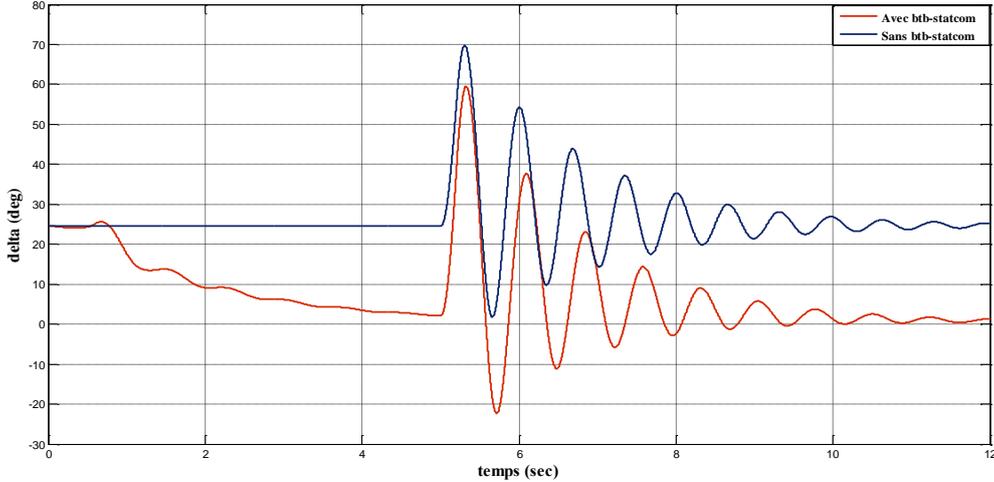


Figure 3.21 Variation de l'angle de charge

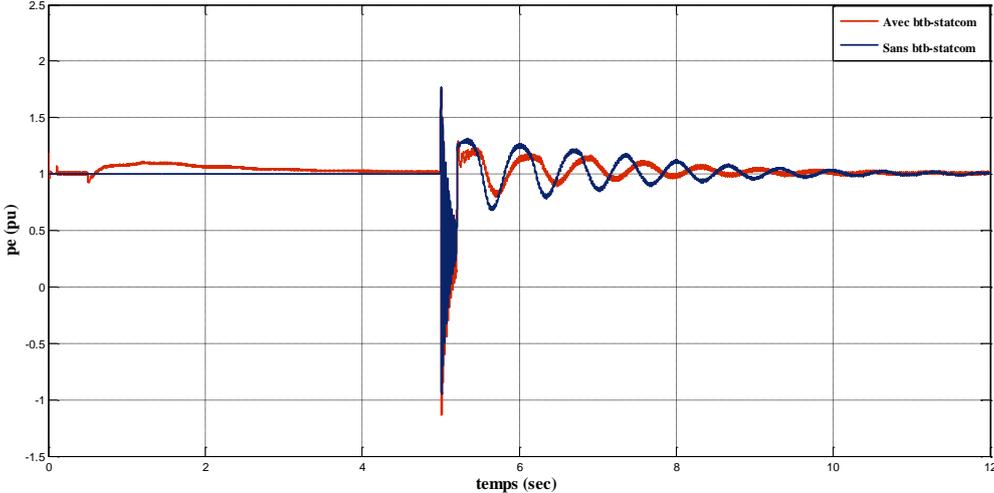


Figure 3.22 Variation de la puissance active

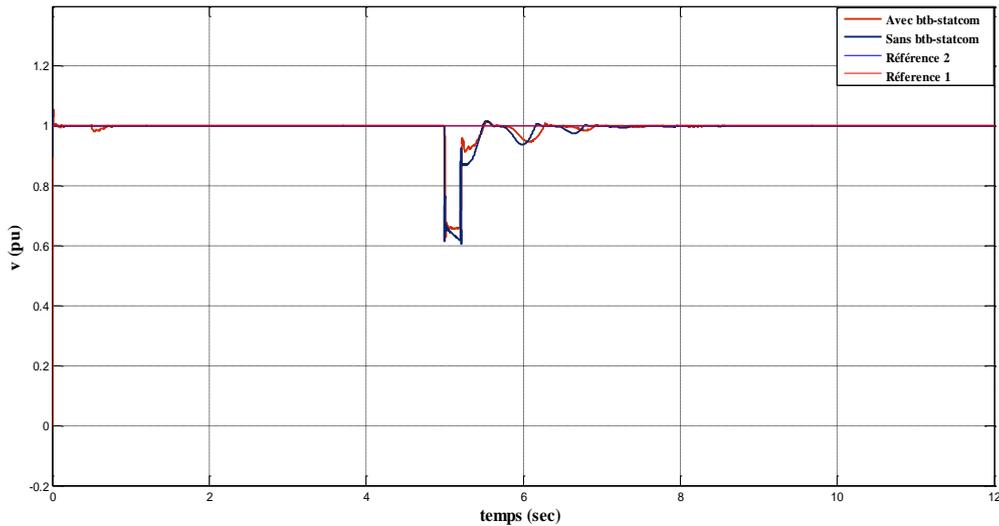


Figure 3.23 Variation de la tension de sortie du générateur

3.5.2 Caractéristiques de BtB-STATCOM

Les caractéristiques 3.24 à 3.30 représentent le comportement de réglage de différentes caractéristiques de BtB STATCOM. Sur les figures 3.24 et 3.25 on trouve les puissances active et réactive du STATCOM 1, dans les figures 3.26 et 3.27 les courants i_{d1} et i_{q1} du STATCOM 1, dans les la figure 3.28 la puissance réactive de STATCOM 2, dans les figures 3.29 et 3.30 les courants i_{d2} et i_{q2} du STATCOM 2. On peut situer les remarques suivantes :

- Le retour de chaque réponse à l'état initiale après l'élimination de défaut et après un certaine évolution transitoire.

- Le courant I_d représente une image pour la puissance active et le courant I_q représente une image pour la puissance réactive.

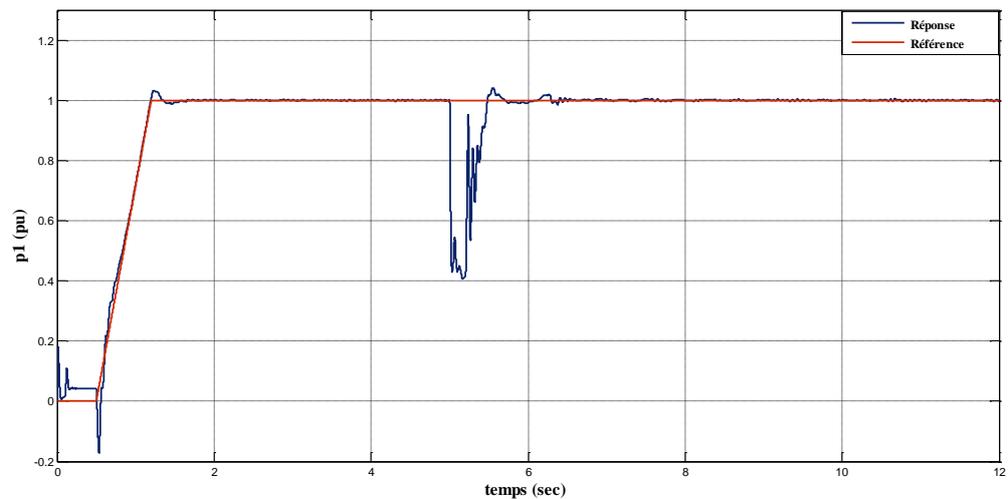


Figure 3.24 Variation de la puissance active P1 coté STATCOM 1

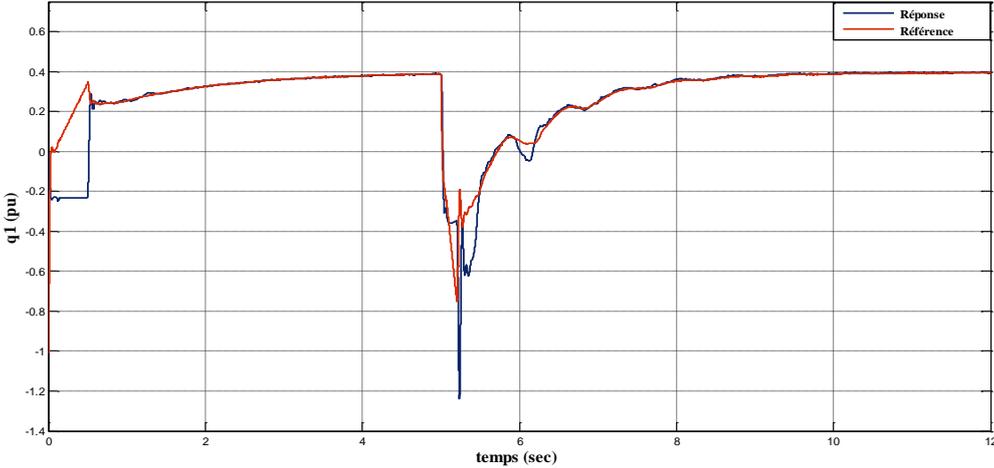


Figure 3.25 Variation de la puissance réactive q_1 coté STATCOM 1

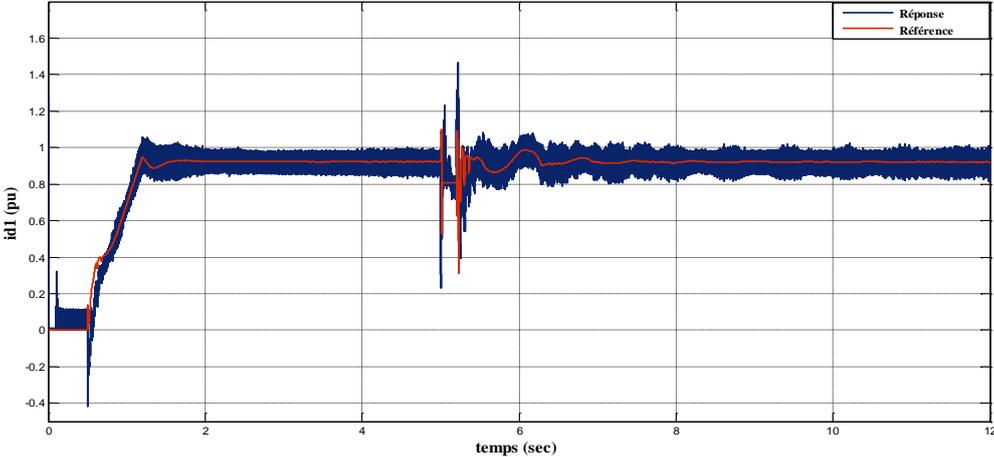


Figure 3.26 Variation du courant I_{d1} coté STATCOM 1

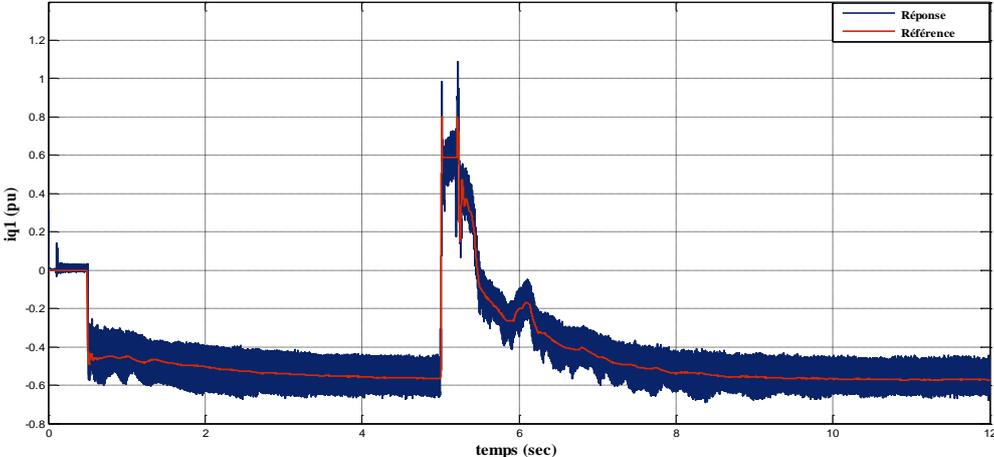


Figure 3.27 Variation du courant I_{q1} coté STATCOM 1

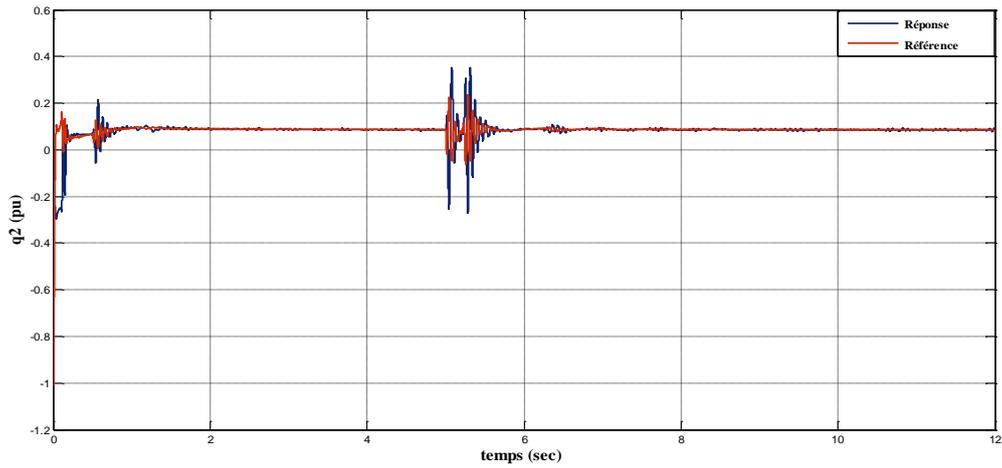


Figure 3.28 Variation de la puissance réactive q_2 coté STATCOM 2

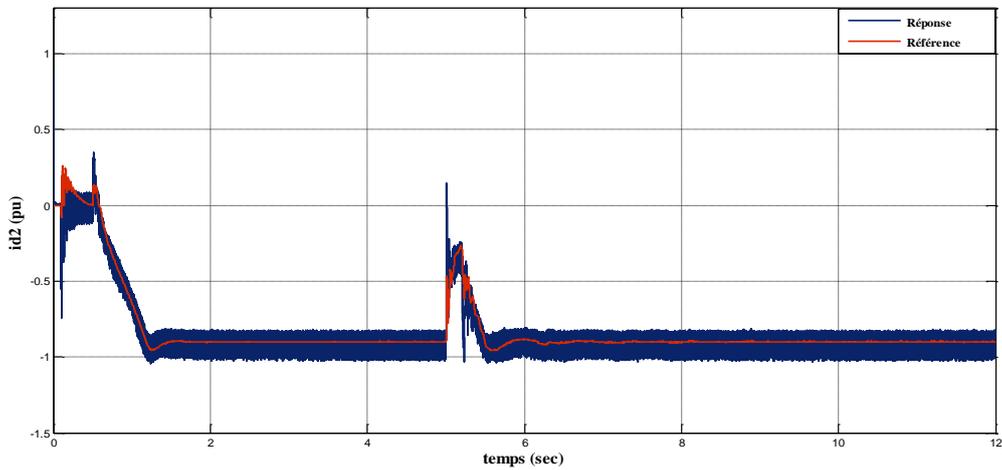


Figure 3.29 Variation du courant I_{d2} coté STATCOM 2

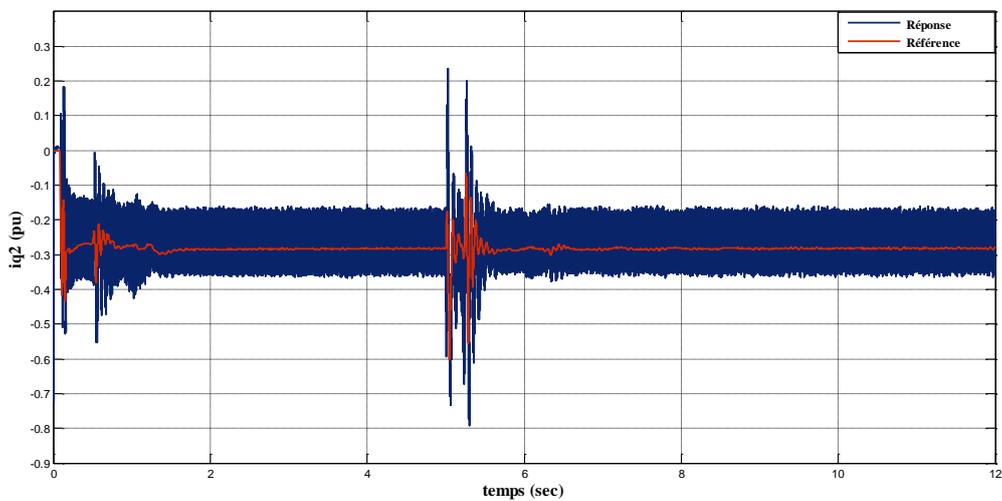


Figure 3.30 Variation du courant I_{q2} coté STATCOM 2

3.6 Conclusion

Dans ce travail, nous nous sommes attachés à montrer l'intérêt que peut susciter un système flexible de transport à courant alternatif (FACTS) tel qu'un btb-STATCOM; et l'impact positif qu'il peut avoir sur la stabilité d'un système électrique. Afin d'étudier le comportement du système btb-STATCOM. L'étude montre bien qu'un dispositif FACTS tel qu'un BTB-STATCOM améliore la stabilité d'un réseau électrique soumis à une grande perturbation. Nous avons montré des résultats de simulation en absence et en présence de BtB-STATCOM et en cas d'un défaut de court-circuit triphasé sur la ligne de transmission électrique.

D'après cette étude approfondie, nous avons constaté que le BtB-STATCOM est un outil assez puissant en comparaison avec le compensateur SSSC au chapitre 2 : Par ce que la SSSC capable pour contrôler d'une seule grandeur (Puissance active) dans un seul sens de circulation. Mais le BtB-STATCOM est un compensateur réversible en puissance : capable pour contrôler simultanément les puissances actives, les puissances réactives et les tensions nodales dans plusieurs régions. Automatiquement, on prend le BtB STATCOM comme le compensateur le plus efficace pour contrôler le réseau de test du chapitre 04 suivant.

Chapitre 04 :
**Contrôle intelligent du réseau
électrique en utilisant d'un BtB-
STATCOM**

4.1 Introduction

Indépendamment de la structure d'un système électrique, les flux de puissance à travers le réseau électrique sont largement répartis en fonction de l'impédance de la ligne de transmission. Une ligne de transmission à faible impédance permet des flux de puissance plus importants qu'une ligne de transmission à haute impédance. Aussi, des petites et des grandes perturbations électriques peuvent provoquer des instabilités statiques et transitoires du réseau électrique. L'incontrôlabilité des flux de puissance peut entraîner des pertes de puissance élevées dans les lignes de transmission et également des chutes de tensions nodales non admissibles. Si, aucune solution n'est trouvée à ces problèmes, un risque de déclenchement successif des centrales de production électrique qui conduit à un black-out [47], [48], [49]. L'utilisation de l'intelligence artificielle parallèlement avec l'intégration de la technologie des FACTS dans les réseaux électriques interconnectés deviennent l'une des solutions les plus efficaces et les plus flexibles pour contrôler le flux d'énergie ainsi que pour augmenter le niveau de protection des lignes de transport électrique [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58].

Dans ce chapitre, nous allons procéder à l'implantation d'un btb-STATCOM dans un réseau électrique en régime statique et en régime à faible perturbation (effet de changement de consignes) pour améliorer le comportement électrique d'énergie (transite de puissance) et les chutes de tensions. Dans cette application, on va synthétiser d'un réseau de neurone artificiel pour contrôler de changement de consignes du btb-STATCOM.

4.2 Réseaux de neurones

Les premières tentatives de modélisation du cerveau sont anciennes et précèdent même l'ère informatique. C'est en 1943 que Mc Culloch (neurophysiologiste) et Pitts (logicien) ont proposé les premières notions de neurone formel. Ce concept fut ensuite mis en réseau avec une couche d'entrée et une sortie par Rosenblatt en 1959 pour simuler le fonctionnement rétinien et tacher de reconnaître des formes. C'est l'origine du perceptron. Cette approche dite connexionniste a atteint ses limites technologiques, compte tenu de la puissance de calcul de l'époque, mais aussi théoriques au début des années 70.

4.2.1 Réseau de neurone naturel

Le cerveau se compose d'environ 1012 neurones interconnectés entre eux, avec 1000 à 10000 synapses par neurone. Les neurones ne sont pas tous identiques et ils n'ont pas le même comportement. Dans notre travail nous nous intéressons aux principes fondamentaux qui sont nécessaires à la compréhension du fonctionnement des réseaux de neurones. Un neurone est une cellule particulièrement complexe spécialisée dans le traitement des signaux électriques. Son rôle est de recevoir, stocker et transmettre l'information. On peut décomposer le neurone en trois régions principales (voir la figure 4.1): le corps cellulaire, les dendrites et l'axone [59].

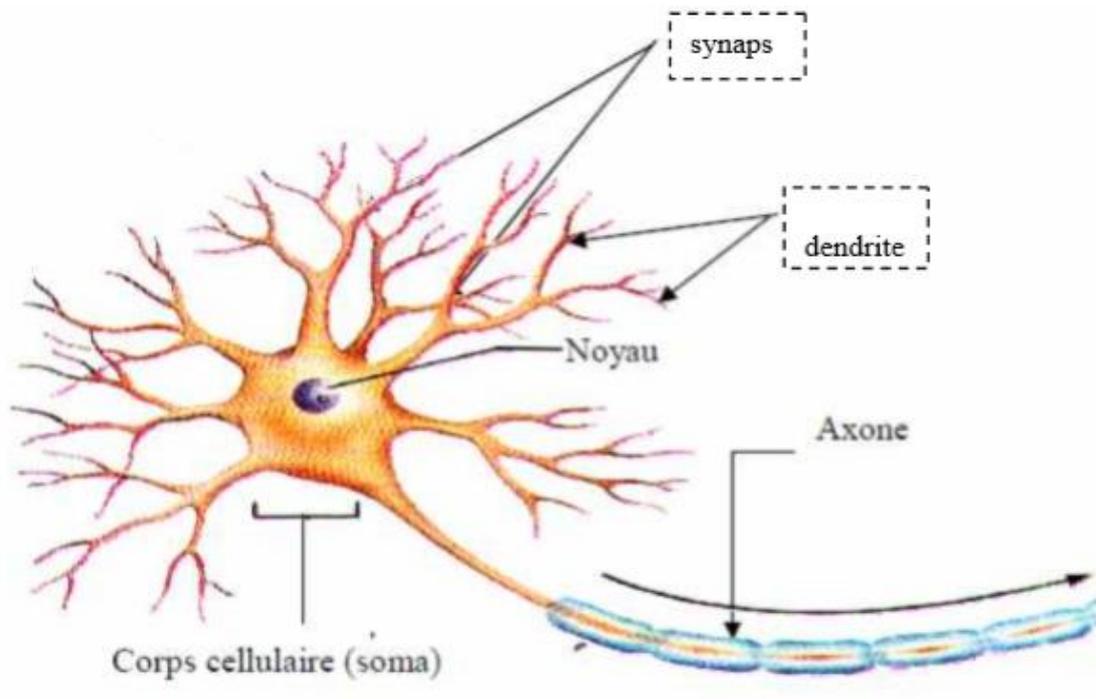


Figure 4.1 Neurone biologique

a. Le corps cellulaire

Il contient le noyau du neurone ainsi que la machine biologique nécessaire à la synthèse des enzymes. Ce corps cellulaire de forme sphérique ou pyramidale contient ainsi les autres molécules essentielles à la vie de la cellule. Sa taille est de quelques microns diamètre [60], [61].

b. Les dendrites

Ce sont des fines extensions qui se ramifient autour du neurone et forment une sorte de vaste arborescence. Les signaux envoyés sont captés par les dendrites. Leur taille est de quelques dizaines de micromètres de longueur.

c. L'axone

L'information traitée est transmise vers l'extérieur, le long de l'axone, les signaux partent du neurone grâce à l'arborescence terminale que possède l'axone ; contrairement aux dendrites qui se ramifient autour du neurone, l'axone est plus long et se ramifie à son extrémité où il se connecte aux dendrites des autres neurones. Sa taille peut varier entre quelques millimètres à plusieurs mètres.

La notion de synapse explique la transmission des signaux entre un axone et une dendrite. Au niveau de la jonction, il existe un espace à travers lequel le signal électrique ne peut pas se propager. Les transmissions se font alors par l'intermédiaire des substances chimiques (les neurotransmetteurs). Quand un signal arrive de la synapse, il provoque l'émission des neurotransmetteurs qui vont se fixer sur des récepteurs de l'autre côté de l'espace inter

synaptique. Quand suffisamment de molécules se sont fixés, un signal électrique est émis de l'autre côté (Figure 4.2), il y a donc une transmission [60], [61].

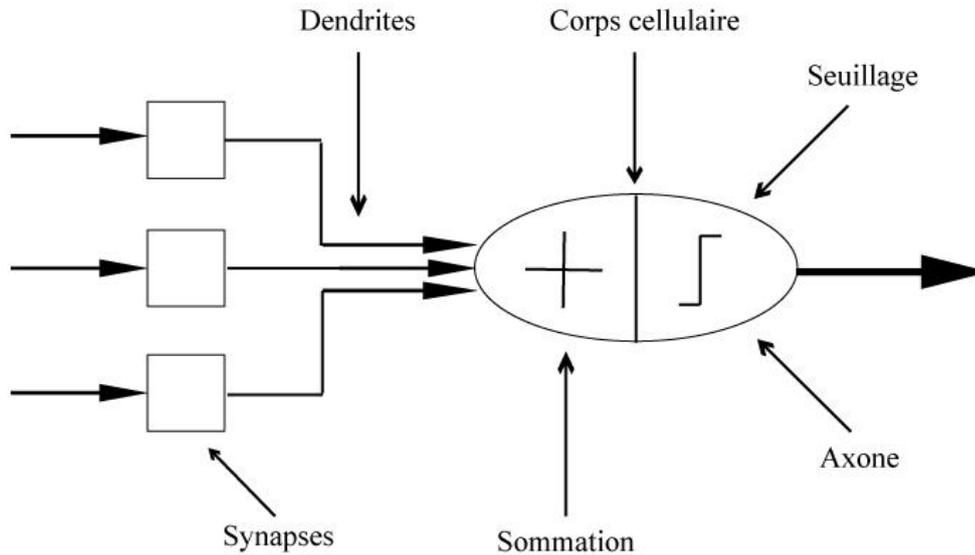


Figure 4.2 Le modèle d'un neurone biologique

4.2.2 Principe d'un réseau de neurone artificiel

Principe du neurone artificiel : Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones en amont ou des capteurs composant la machine dont il fait partie. A chacune de ses entrées est associé un poids représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones en aval. A chaque connexion est associé un poids (La figure 4.3).

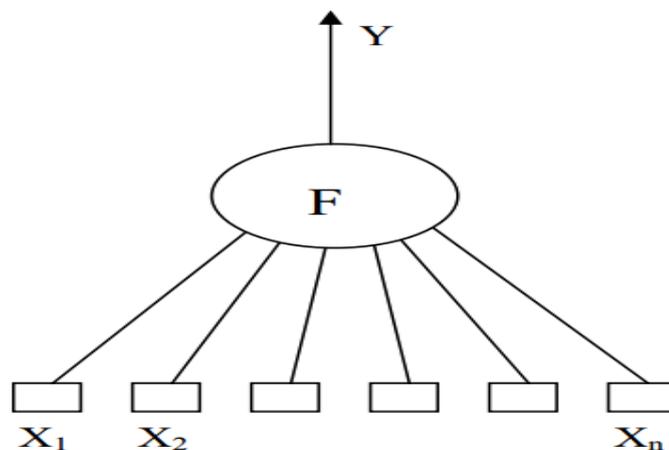


Figure 4.3 Neurone Artificiel

Un réseau neuronal est l'association, en un graphe plus ou moins complexe, d'objets élémentaires, les neurones formels. Les principaux réseaux se distinguent par l'organisation du graphe (en couches, complets. . .), c'est-à-dire leur architecture, son niveau de complexité (le nombre de neurones, présence ou non de boucles de rétroaction dans le réseau), par le type des neurones (leurs fonctions de transition ou d'activation) et enfin par l'objectif visé : apprentissage supervisé ou non, optimisation, systèmes dynamiques...

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit [62], [63].

4.2.3 Fonctions d'activation

Différentes fonctions de transfert pouvant être utilisées comme fonction d'activation du neurone sont énumérées au tableau 4.1. Les trois les plus utilisées sont les fonctions «seuil» «hard limit», «linéaire» et «sigmoïde» [64].

Nom de la fonction	Relation d'entrée / sortie	Icône	Nom Matlab
Seuil	$a = 0 \text{ si } n < 0$ $a = 1 \text{ si } n \geq 0$		hardlim
Seuil symétrique (seuils)	$a = -1 \text{ si } n < 0$ $a = 1 \text{ si } n \geq 0$		hardlims
Linéaire	$a = n$		purelin
Linéaire saturée	$a = 0 \text{ si } n < 0$ $a = n \text{ si } 0 \leq n \leq 1$ $a = 1 \text{ si } n > 1$		satlin
Linéaire saturée symétrique	$a = -1 \text{ si } n \leq 0$ $a = n \text{ si } -1 \leq n \leq 1$ $a = 1 \text{ si } n > 1$		Satlins
Linéaire positive	$a = 0 \text{ si } n < 0$ $a = n \text{ si } n \geq 0$		poslin
Sigmoïde	$a = \frac{1}{1 + \exp^{-n}}$		logsig
Tangente hyperbolique	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$		tansig
Compétitive	$a = 0 \text{ si } n \text{ maximum}$ $a = 0 \text{ autrement}$		compet

Tableau 4.1 Fonctions de transfert $a=f(n)$

4.2.4 Architecture des réseaux de neurones

On distingue deux structures de réseau, en fonction du graphe de leurs connexions, c'est-à-dire du graphe dont les nœuds sont les neurones et les arrêts les «connexions» entre ceux-ci :

- Les réseaux de neurones non bouclés.
- Les réseaux de neurones bouclés).

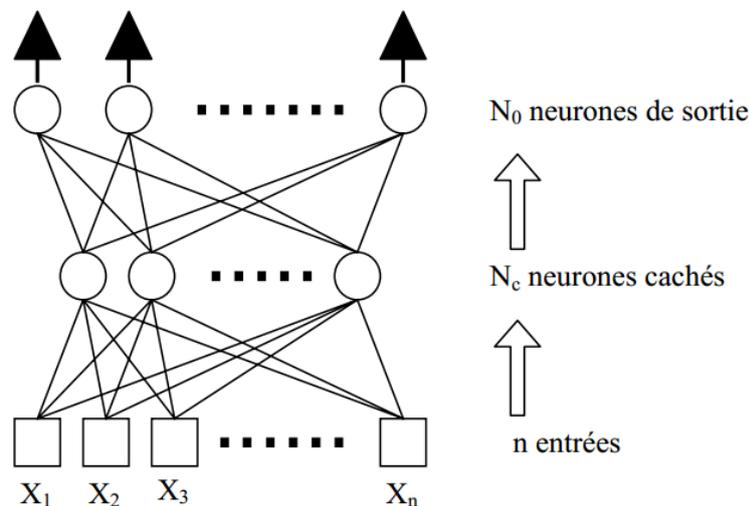


Figure 4.4 Structure d'un réseau neurone non bouclés

Un réseau de neurones non bouclé réalise une (ou plusieurs) fonction algébrique de ses entrées par composition des fonctions réalisées par chacun de ses neurones. Dans un tel réseau Figure 4.4, le flux d'information circule des entrées vers les sorties sans retour en arrière.

La Figure 4.4 montre un réseau de neurone a n entrées, une couche de N_c neurones cachés N_0 neurones de sortie.

Si l'on représente le réseau comme un graphe dont les nœuds sont les neurones et les arrêts les « connexions » entre ceux-ci, le graphe d'un réseau non bouclé est acyclique. Tout neurone dont la sortie est une sortie du réseau est appelé « neurone de sortie ». Les autres, qui effectuent des calculs intermédiaires, sont des « neurones cachés ». Il existe deux types de réseaux de neurones : les réseaux complètement connectés et les réseaux à couche. Le réseau de neurones à une couche cachée et une sortie linéaire est un cas particulier de ce dernier type.

Dans un réseau de neurones complètement connecté, les entrées puis les neurones (cachés et de sortie) sont numérotés, et, pour chaque neurone : Ses entrées sont toutes les entrées du réseau ainsi que les sorties des neurones de numéro inférieur. Sa sortie est connectée aux entrées de tous les neurones de numéro supérieur.

b. Réseaux de neurones à couches

Dans une architecture de réseaux à couches, les neurones cachés sont organisés en couches, les neurones d'une même couche n'étant pas connectés entre eux. De plus les connexions entre

deux couches de neurones non consécutives sont éliminées. Une telle architecture est historiquement très utilisée, surtout en raison de sa pertinence en classification.

4.2.5 Réseaux de neurones bouclés

L'architecture la plus générale pour un réseau de neurones est le « réseau bouclé », dont le graphe des connexions est cyclique : lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ (un tel chemin est désigné sous le terme de « cycle »). La sortie d'un neurone du réseau peut donc être fonction d'elle-même; cela n'est évidemment concevable que si la notion de temps est explicitement prise en considération. Ainsi, à chaque connexion d'un réseau de neurones bouclé (ou à chaque arrêt de son graphe) est attaché, outre un poids comme pour les réseaux non bouclés, un retard, multiple entier (éventuellement nul) de l'unité de temps choisie. Une grandeur, à un instant donné, ne pouvant pas être fonction de sa propre valeur au même instant, tout cycle du graphe du réseau doit avoir un retard non nul [65].

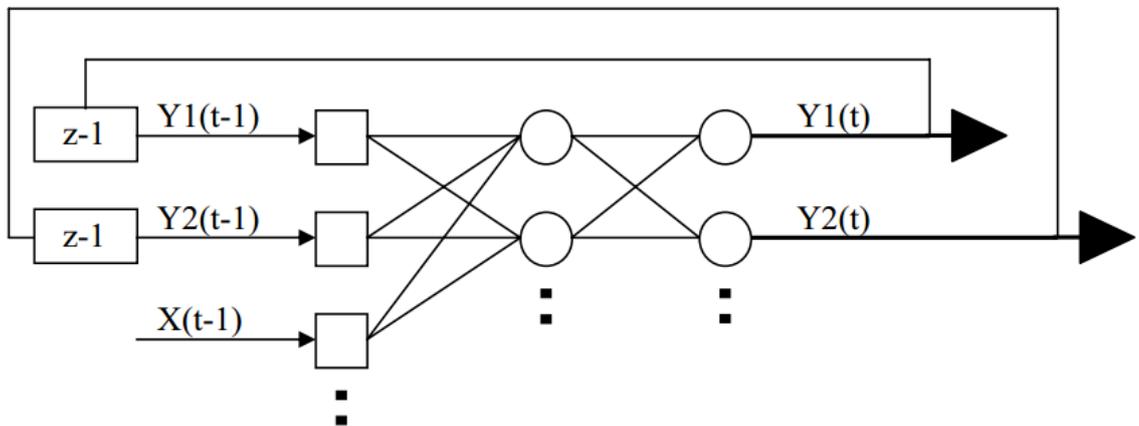


Figure 4.5 Réseau de neurones bouclés

4.2.6 Apprentissage des réseaux de neurones

Le point crucial du développement d'un réseau de neurones est son apprentissage. Il s'agit d'une procédure adaptative par laquelle les connexions des neurones sont ajustées face à une source d'information. Dans le cas des réseaux de neurones artificiels, on ajoute souvent à la description du modèle l'algorithme d'apprentissage. Le modèle sans apprentissage présente en effet peu d'intérêt. Sur la figure ci-dessous, on peut observer qu'au début de l'apprentissage, pour les premières itérations, l'erreur sur la base d'apprentissage est grande et peut légèrement augmenter étant donné que les poids initiaux sont choisis aléatoirement. Ensuite, cette erreur diminue avec le nombre d'itérations. L'erreur sur la base de test diminue puis augmente à partir d'un certain nombre d'itérations. Les poids retenus sont ceux qui minimisent l'erreur sur la base de test [66].

4.2.6.1 Type d'apprentissage

Il existe de nombreux types de règles d'apprentissage qui peuvent être regroupées en trois catégories: les règles d'apprentissage supervisé, non supervisé, et renforcé. Mais l'objectif fondamental de l'apprentissage reste le même : soit la classification, l'approximation de fonction ou encore la prévision .Dans l'optique de la prévision, l'apprentissage consiste à extraire des régularités (à partir des exemples) qui peuvent être transférées à de nouveaux exemples.

a. Apprentissage supervisé

Un apprentissage est dit supervisé lorsque l'on force le réseau à converger vers un état final précis, en même temps qu'on lui présente un motif. Ce genre d'apprentissage est réalisé à l'aide d'une base d'apprentissage, constituée de plusieurs exemples de type entrées-sorties (les entrées du réseau et les sorties désirées ou encore les solutions souhaitées pour l'ensemble des sorties du réseau). La procédure usuelle dans le cadre de la prévision est l'apprentissage supervisé (ou à partir d'exemples) qui consiste à associer une réponse spécifique désirée à chaque signal d'entrée. La modification des poids s'effectue progressivement jusqu'à ce que l'erreur (ou l'écart) entre les sorties du réseau (ou résultats calculés) et les résultats désirés soient minimisés. Cet apprentissage n'est possible que si un large jeu de données est disponible et si les solutions sont connues pour les exemples de la base d'apprentissage.

b. Apprentissage renforcé

L'apprentissage renforcé est une technique similaire à l'apprentissage supervisé à la différence qu'au lieu de fournir des résultats désirés au réseau, on lui accorde plutôt un grade (ou score) qui est une mesure du degré de performance du réseau après quelques itérations. Les algorithmes utilisant la procédure d'apprentissage renforcé sont surtout utilisés dans le domaine des systèmes de contrôle.

c. Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé consiste à ajuster les poids à partir d'un seul ensemble d'apprentissage formé uniquement de données. Aucun résultat désiré n'est fourni au réseau. Qu'est-ce que le réseau apprend exactement dans ce cas ? L'apprentissage consiste à détecter les similarités et les différences dans l'ensemble d'apprentissage. Les poids et les sorties du réseau convergent, en théorie, vers les représentations qui capturent les régularités statistiques des données. Ce type d'apprentissage est également dit compétitif et(ou) coopératif. L'avantage de ce type d'apprentissage réside dans sa grande capacité d'adaptation reconnue comme une auto organisation, « self-organizing». L'apprentissage non supervisé est surtout utilisé pour le traitement du signal et l'analyse factorielle [67], [68].

4.2.6.2 Méthodes d'apprentissages

a. Méthode de rétro-propagation du gradient de l'erreur

L'algorithme de rétro-propagation (back propagation) a été développé en particulier par Rumelhart et Parken et le Cun en 1985. Dès cette découverte, nous avons la possibilité de

réaliser une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables. Cet algorithme repose sur la minimisation de l'erreur quadratique entre les sorties calculées (réelle) et celles souhaitées (désirée). Le terme rétro-propagation du gradient provient du fait que l'erreur calculée en sortie est transmise en sens inverse vers l'entrée.

Le signal d'erreur à la sortie du neurone k à l'instant d'itération n est :

$$\theta_k(n) = d_k(n) - y_k(n) \quad (4.1)$$

Où y_k est la sortie à l'instant n du neurone k et d_k la réponse désirée. On définit alors l'énergie instantanée de l'erreur à l'instant n par

$$\zeta(n) = \frac{1}{2} \sum_{k \in C} e_k^2(n) \quad (4.2)$$

Où C'Est l'ensemble des neurones de la couche de sortie du réseau. L'énergie d'erreur moyenne peut alors être calculée par :

$$\zeta \text{ moy} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \zeta(n) \quad (4.3)$$

Pour minimiser ζ moy, on calcule son gradient par rapport à chaque poids w, puis on modifie les poids dans le sens inverse du gradient. Celle-ci peut être interprétée comme une fonction de coût qui traduit la performance de l'apprentissage. En effet l'objectif de l'apprentissage est d'ajuster les paramètres libres du réseau, à savoir poids synaptiques et biais, afin de minimiser ζ moy. L'algorithme de rétropropagation est basé sur une approximation similaire à celle de l'algorithme des moindres carrés. En effet, on estime que la correction à appliquer aux poids synaptiques w_{kj} de la couche i est proportionnelle à la dérivée partielle de l'énergie instantanée par rapport au poids synaptique :

$$\Delta w_{kj}^i = -\eta \frac{\partial \zeta(n)}{\partial w_{kj}^i} \quad (4.4)$$

η Est le taux d'apprentissage de l'algorithme de rétro-propagation. L'associativité des dérivées partielles permet d'obtenir la loi suivante :

$$\Delta w_{kj}^i = \eta \delta_k^i(n) y_k^i(n) \quad (4.5)$$

Où δ_k^i est le gradient local de la couche i défini par

$$\delta_k^i(n) = -\frac{\partial \zeta(n)}{\partial v_{kj}^i} = e_k^i(n) \varphi_k^i(v_k^i(n)) \quad (4.6)$$

Si i est une couche de sortie, l'erreur se calcule directement d'après la relation 4.6. Sinon on peut montrer que :

$$e_k^i(n) = \sum_j \delta_j^{i+1}(n) w_{jk}^{i+1}(n) \quad (4.7)$$

La fonction d'activation choisie pour les couches cachées est généralement la fonction sigmoïde ou tangente hyperbolique. Les fonctions d'activation de la couche de sortie sont choisies linéaires pour une tâche de régression [69].

L'application de l'algorithme de rétro-propagation pour l'entraînement d'un réseau de neurones :

1. Initiation du réseau

Choisir aléatoirement les poids synaptiques et les biais dans une distribution uniforme de moyenne nulle et de variance telle que les champs induits des neurones se trouvent dans la partie non saturée des fonctions d'activation sigmoïdales.

2. Présenter les entrées $\vec{x}(n)$ au réseau, calculer les sorties correspondantes et $\vec{e}(n)$

3. La propagation :

Calculer le champ induit local de chaque neurone k de chaque couche i :

$$v_k^i(n) = \sum_{j=0}^{m_k} w_{kj}^i(n) y_j^{i-1}(n) \tag{4.8}$$

4. La rétropropagation :

Calculer les gradients locaux de chaque neurone $\delta_k^i(n)$:

$$\delta_k^i(n) = -\frac{\partial \zeta(n)}{\partial v_{kj}^i} = e_k^i(n) \varphi_k^i(v_k^i(n)) \text{ si } i \text{ est une couche de sortie}$$

$$\delta_k^i(n) = \varphi_k^i(v_k^i(n)) \sum_{j=0}^{m_k} w_{kj}^i(n) y_j^{i-1}(n) \text{ sinon}$$

Puis mise à jour des poids synaptiques :

$$w_{kj}^i(n+1) = w_{kj}^i(n) + \eta \delta_k^i(n) y_j^{i-1}(n) \tag{4.9}$$

Où η est le taux d'apprentissage

5. Itération des étapes 2 à 4 jusqu'à avoir rencontré un critère d'arrêt.

b. Méthode de Levenberg-Marquardt

Cette méthode est particulièrement astucieuse car elle s'adapte d'elle-même à la forme de la fonction de coût. Elle effectue un compromis entre la direction du gradient et la direction donnée par la méthode de Newton. En effet, si η_{k-1} est grand, on reconnaît la méthode du gradient (dans ce cas la valeur du pas est donnée par $\frac{1}{\eta_{k-1}}$ et si η_{k-1} est petit, la modification des paramètres correspond à celle de la méthode de Newton. L'apprentissage d'un réseau de neurone par l'algorithme de Levenberg-Marquardt est très sensible à l'initialisation des poids

des neurones. Une mauvaise initialisation du réseau peut conduire à ce que l'optimum trouvé ne soit qu'un optimum local. Dans le cadre d'un entraînement hors ligne, cette situation peut être évitée par l'application de la validation croisée entre différents modèles ayant des paramètres d'initialisation différente [69].

1/Présenter les entrées $\vec{x}(n)$ au réseau, calculer les sorties correspondantes, le vecteur d'erreur $\vec{e}(n)$ et le calculer la fonction de coût

$$\zeta_n(\vec{w}) = \sum_{k=1}^N e_k^{(n)}(\vec{w}) \quad (4.10)$$

2/ Calculer la matrice jacobienne $J_n(\vec{w})$

3/ Mettre à jour les poids :

$$\vec{w}_{n+1} = \vec{w}_n - (J_n^T(\vec{w}_n)J_n(\vec{w}_n) + \mu_n I)J_n^T(\vec{w}_n)\zeta_n(\vec{w}_n) \quad (4.11)$$

4/ Calculer : $\zeta_n(\vec{w}_{n+1}) = \sum_{k=1}^N e_k^{(n)}(\vec{w}_{n+1})$:

Si $\zeta_n(\vec{w}_{n+1}) < \zeta_n(\vec{w}_n)$ alors $\mu_{n+1} = \mu_n - v$, où v est une constante, puis retourner à l'étape 1

Si $\zeta_n(\vec{w}_{n+1}) > \zeta_n(\vec{w}_n)$ alors $\mu_{n+1} = \mu_n + v$, puis retourner à l'étape 3 pour mettre à jour μ_{n+1} .

5/ Itération des étapes 2 à 4 jusqu'à avoir rencontré un critère d'arrêt.

c. Méthode d'apprentissage par renforcement

Cet algorithme d'apprentissage par renforcement est de type qualitatif par opposition aux apprentissages dits supervisé ou non supervisé. Il n'est pas nécessaire de disposer pour les exemples d'apprentissage des sorties désirées, seulement d'une appréciation "globale" du comportement du réseau pour chacun des exemples traités. Cet algorithme s'applique à toutes structures de réseaux. La seule condition est de disposer de neurones de sortie stochastiques (binaires). La réponse du réseau de neurones est ainsi fonction des entrées et, aussi, des neurones de sortie. On introduit donc à ce niveau une part d'aléatoire dans le comportement du système. Si la réponse fournie par le système est considérée comme bonne, l'algorithme tend à favoriser l'apparition de ce comportement en réduisant l'aléatoire. Dans le cas où la réponse du système globale est considérée comme mauvaise, on cherche à éviter l'apparition ultérieure de ce comportement. Ce processus est itéré jusqu'à l'obtention du comportement désiré pour l'ensemble du système :

1/ Les poids sont initialisés à de petites valeurs aléatoires qui placent les probabilités des neurones de sortie autour de 0.5.

2/ Une entrée $E_i = (e_1, \dots, e_n)$ est présentée,

3/ Une sortie correspondante possible x_i est calculée pour chaque neurone,

4/ La sortie globale produite est analysée de façon à générer un signal de retour r , positif ou négatif, et une sortie cible (désirée) est choisie :

$$d_i = x_i \quad \text{si } r = +1 \text{ (récompense)}$$

$$d_i = -x_i \quad \text{si } r = -1 \text{ (pénalité)}$$

5/ La modification des poids est réalisée par la classique méthode du gradient :

$$\partial w_{ij} = \mu \cdot r \cdot \text{erreur}_i \cdot x_j$$

En général, μ dépend de r et est pris 10 à 100 fois plus grand (μ^+) pour $r = +1$ que pour $r = -1$ (μ^-).

6/ Tant que la sortie du réseau n'a pas produit une séquence satisfaisante suffisamment longue, retour à 2 .

4.3 Application d'un réseau de neurone par la conduite d'un réseau électrique en régime statique

La figure 4.6 montre le diagramme de commande du BtB STATCOM. On trouve le réseau électrique comme un système complexe commandé par un système FACTS type BtB STATCOM. On utilise le réseau de neurone comme un algorithme de commande sous la direction de la méthode de l'apprentissage de Levenberg-Marquardt

Pour la synthèse de la commande intelligente, on utilise :

- Apprentissage du réseau de neurone par la méthode de Levenberg-Marquardt;
- Une structure du réseau à deux couches, une entrée (puissance de la charge :

$P_{\text{charge}} = P_{\text{ligne2-4}} + P_{\text{ligne3-4}}$) et une sortie (puissance $P_{\text{BtB STATCOM}}$);

- Un couche cachée à 20 neurones et une couche de sortie à un seul neurone ;

- Les fonctions d'activation de neurones cachées de type Sigmoides et la fonction d'activation de neurone de sortie de type linéaire.

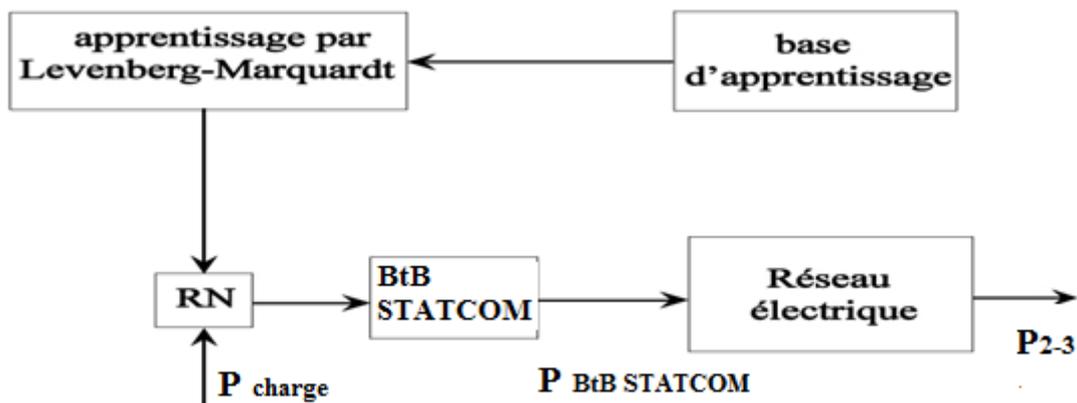


Figure 4.6 Diagramme synoptique du système btb STATCOM contrôlé par les réseaux de neurones

La figure 4.7 suivante montre l'architecture du réseau de neurones utilisé pour la gestion d'énergie et le contrôle du BtB STATCOM.

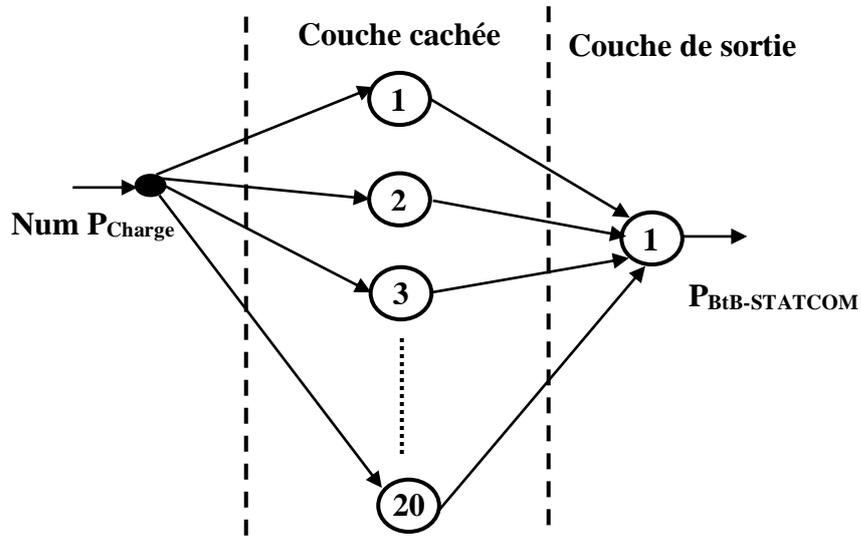


Figure 4.7 Architecture du réseau de neurones utilisé

Pour assurer un apprentissage fiable et pour simplifier la structure du réseau de neurones, on peut subdiviser la variation de puissance de la charge ($P_{charge} = P_{ligne2-4} + P_{ligne3-4}$) sous forme des intervalles et chaque intervalle à un numéro (Voir le tableau 4.2):

Intervalle de variation P_{Charge} [MW]	Numérotation par intervalles (spécification des entrées du réseau neuronal) Num P_{Charge}
$P_{Charge} = 0$	0
$0 < P_{Charge} \leq 200$	1
$200 < P_{Charge} \leq 300$	2
$300 < P_{Charge} \leq 400$	3
$400 < P_{Charge} \leq 500$	4
$P_{Charge} \geq 500$	5

Tableau 4.2 Adaptation des mesures avec les entrées du réseau de neurones

Le tableau 4.3 suivant présente la base d'apprentissage du réseau de neurones :

No	Num P_{Load}	P btb-STATCOM [MW]
1	0	0
2	1	50
3	2	100
4	3	150
5	4	200
6	5	250

Tableau 4.3 Base d'apprentissage

4.3.1 Réseau électrique de test

Le réseau de test de la figure 4.8 est un système mono-machine à 3 nœuds. Il est constitué d'un générateur relié à un réseau électrique de fréquence 50Hz par l'intermédiaire d'un transformateur T.

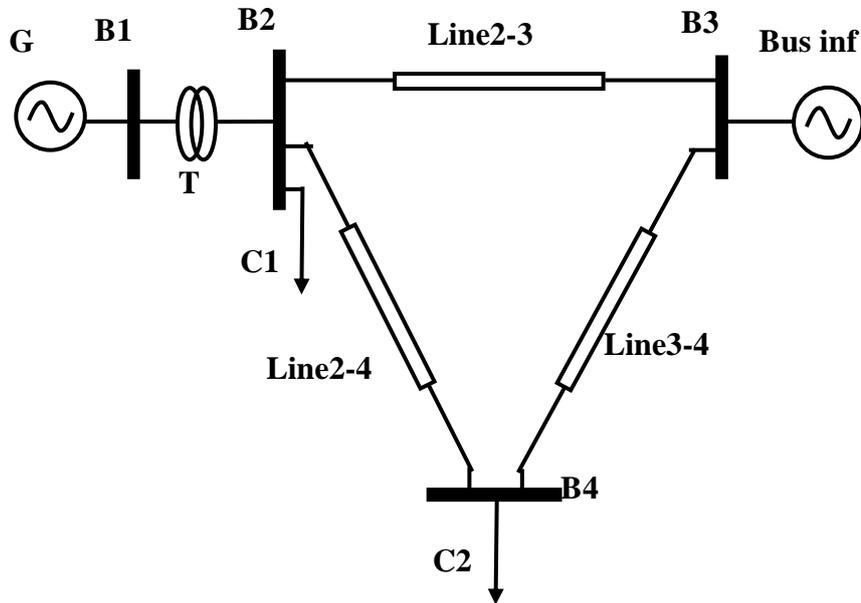


Figure 4.8 Réseau électrique de test

4.3.2 Insertion du btb STATCOM sur le réseau électrique

Le BtB STATCOM est installé sur la ligne 2-3 (côté bus 2) pour forcer le flux de puissance dans la direction souhaitée, comme la montre la figure 4.9.

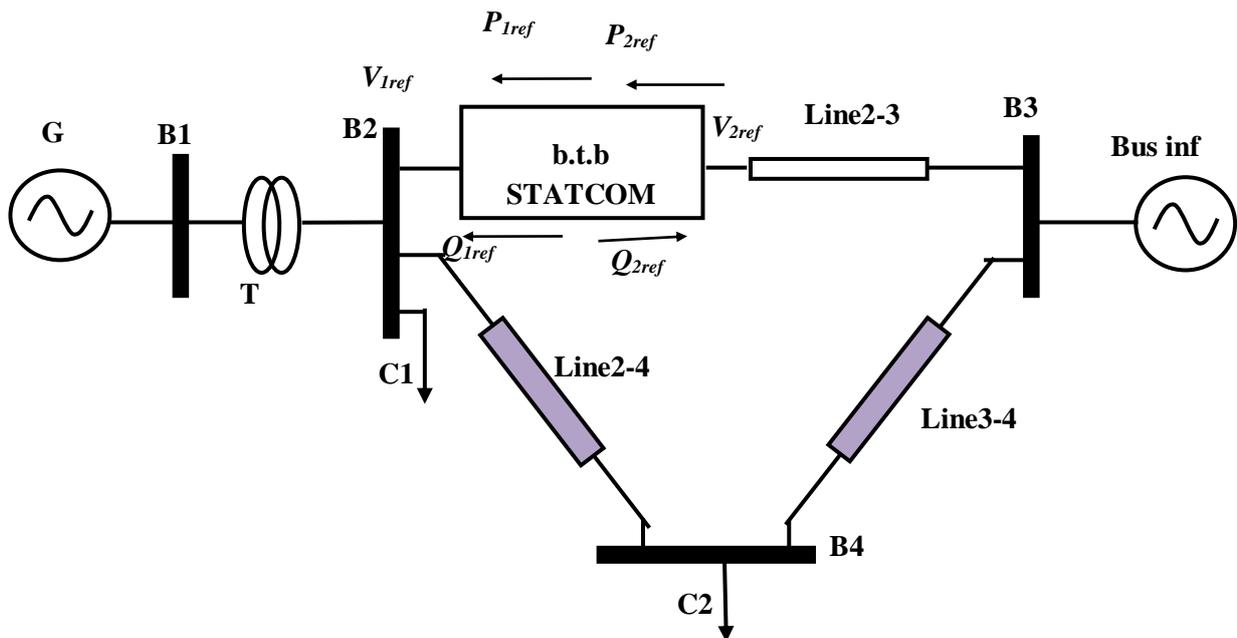


Figure 4.9 Association du BtB STATCOM sur le réseau électrique de test

Nous examinons l'effet du BtB STATCOM sur le réseau électrique en régime permanent afin d'évaluer ses performances. Le comportement du réseau électrique est également étudié lorsque le générateur est équipé d'un régulateur conventionnel [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77]. Nous étudions l'influence de la modification des consignes de BtB STATCOM sur la stabilité des caractéristiques électriques et dynamiques du réseau électrique. La puissance maximale transit admissible pour chaque ligne P_{max} est égale à 300 MW. Le comportement statique du réseau électrique est examiné en l'absence et en présence du BtB STATCOM. Dans tous les scénarios de simulation, on a :

- Pour la charge C1 : Puissance active = 1000 MW et puissance réactive = 0MVAR,
- Pour la charge C2 : Puissance active = valeur variable et puissance réactive = 0MVAR.

4.3.3 Simulation du système électrique sans BtB STATCOM

La figure 4.10 suivante montre le plan initial de tensions et de flux de puissances dans le réseau électrique de test. Pour cette configuration, les pertes de puissance active sont égales à 2,3 MW. On remarque une répartition non uniforme de l'énergie sur les lignes de transport : Un faible flux de puissances sur les lignes 2-3 et 2-4, mais la ligne 3-4 est plus chargée.

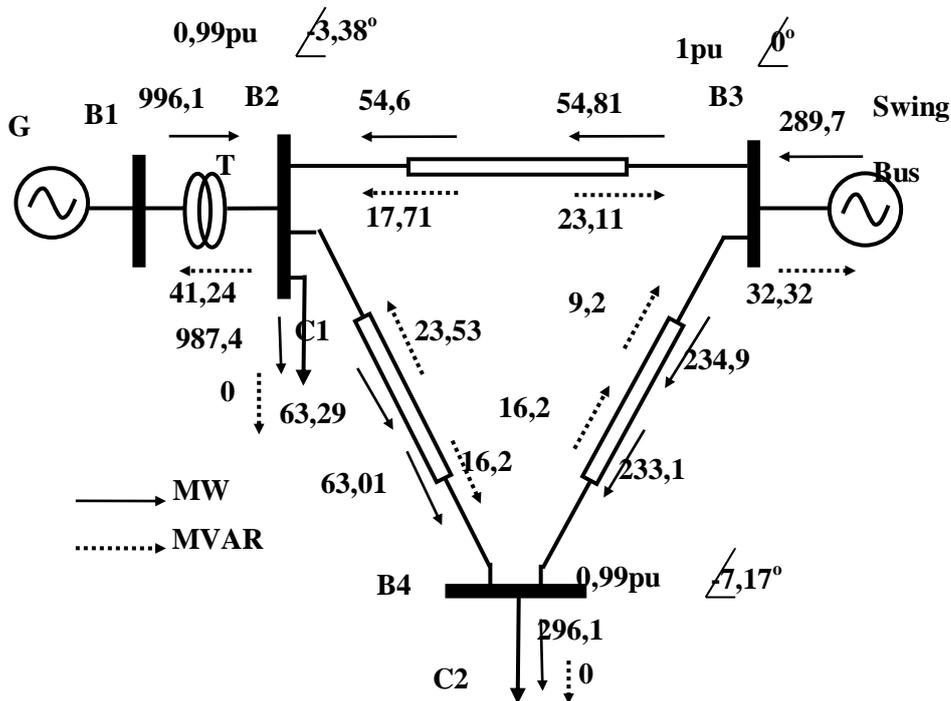


Figure 4.10 Flux de puissances pour (Puissance active de la charge C2 = 300 MW)

Le résultat de la figure 4.11 ci-dessous est obtenu en cas d'augmentation de la charge C2 à 500MW. La figure (4-11) présente un déséquilibre dans le flux de puissances et une augmentation des pertes de puissance active qui atteignent 6,35 MW. Le flux de puissance de la ligne 3-4 atteint 379,2 MW ce qui est supérieur à la puissance maximale admissible de transit

300MW : Alors, la ligne 3-4 est surchargée.

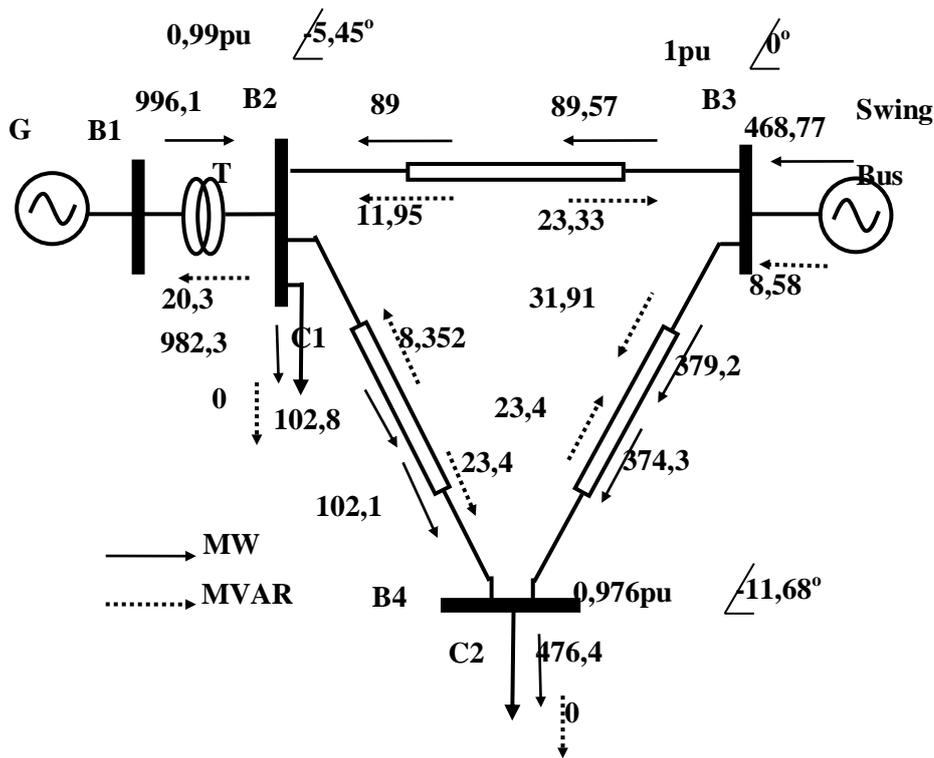


Figure 4.11 Flux de puissances pour (Puissance active de la charge C2 = 500 MW)

4.3 Simulation du système électrique avec BtB STATCOM

Dans cette étape, on applique une variation aléatoire de consigne de puissance active (Sans intervention de réseau de neurones : Choix aléatoire de consigne de puissance active).

Le BtB-STATCOM est installé dans le réseau électrique comme la montre les figures 4.12, 4.13 et 4.14. Les références de tensions AC et la tension de la liaison DC sont :

$$V1_{réf} = 1\text{ pu} = 230\text{ kV},$$

$$V2_{réf} = 1\text{ pu} = 230\text{ kV},$$

$$U_{dc} = 1\text{ pu} = 82\text{ kV}.$$

La Figure 4.12 montre le comportement statique du réseau dans les conditions suivantes : Charge C2 = 300MW et $P_{\text{BtB STATCOM}} = 0\text{ MW}$. On remarque que le transit de puissance active sur la ligne 2-3 respecte l'ordre de la commande $P_{23} = P_{1ref} = 0\text{ MW}$.

Par conséquent, le flux de puissance de la ligne 2-4 est diminué de 63,29 MW à 3,122 MW. De même, les deux tensions dans les deux côtés alternatifs de BtB STATCOM respectent les consignes de tension $V1 = V_{ref1} = 1\text{ pu}$ et $V2 = V_{ref2} = 1\text{ pu}$. Ainsi, le BtB STATCOM s'avère un contrôleur capable de modifier le transit de l'énergie électrique dans les lignes électriques en chargeant ou déchargeant ces dernières et ce selon les besoins du réseau électrique.

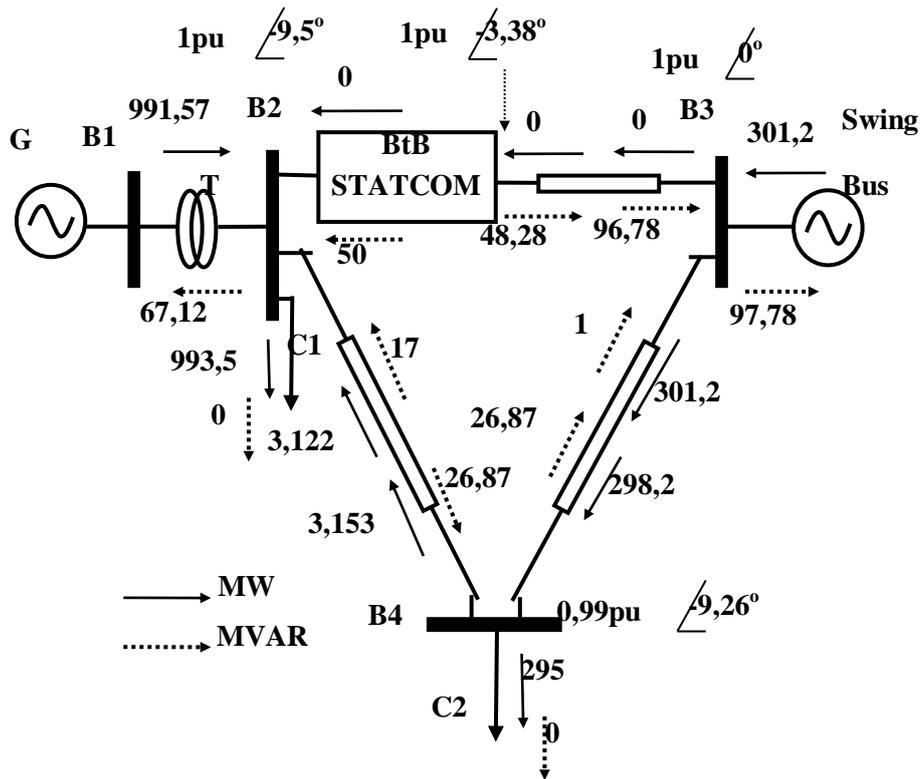


Figure 4.12 Flux de puissances pour : Puissance active de la charge C2=300MW et $P_{BtBSTATCOM}=0MW$

Maintenant, on utilise le réseau de neurones pour calculer de la valeur optimale de consigne de puissance active : La sortie du réseau de neurone $P_{BtBSTATCOM}=200MW$.

La Figure 4.13 montre le comportement statique du réseau dans les conditions suivantes : Charge C2 = 300MW et $P_{BtBSTATCOM}=200MW$. On remarque que la puissance active transmise par la ligne 2-3 suit toujours la consigne $P_{32}=P_{BtBSTATCOM} = 200MW$, même pour les références de tension $V1=Vref1=1pu$ et $V2=Vref2=1pu$. Nous notons également un équilibre acceptable dans le flux de puissance qui explique l'effet bénéfique du BtB STATCOM dans le contrôle du système électrique. Le BtB STATCOM injecte des puissances réactives dans les deux côtés alternatifs pour assurer la régulation des tensions V1 et V2.

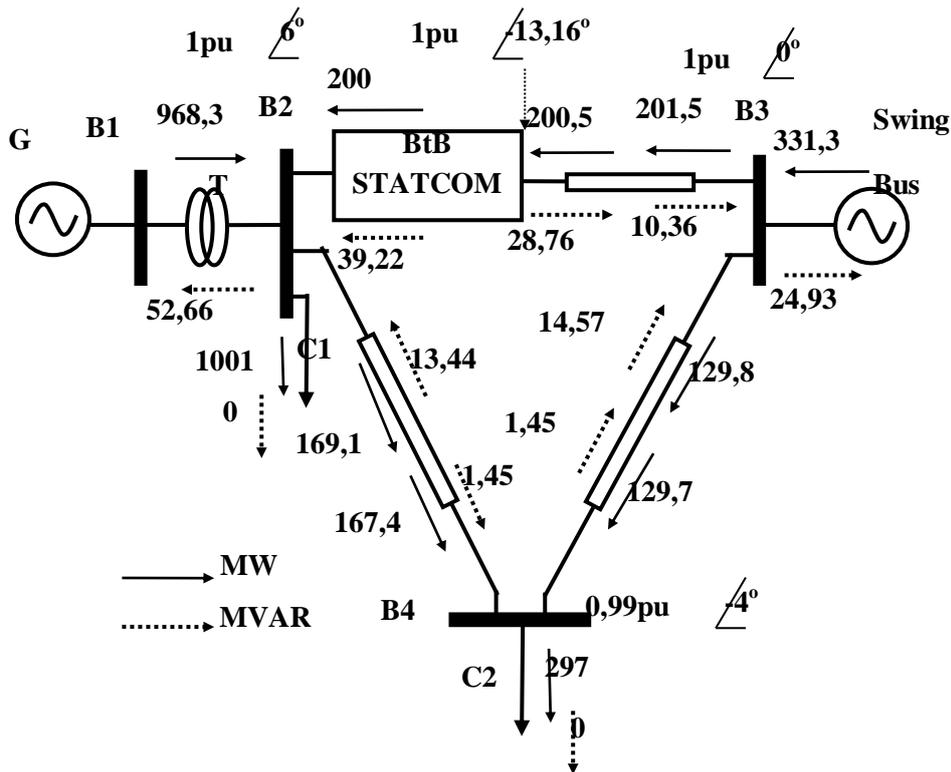


Figure 4.13 Flux de puissances pour : Puissance active de la charge $C2=300\text{MW}$ et $P_{\text{BtBSTATCOM}}=200\text{MW}$

La Figure 4.14 montre le comportement statique du réseau dans les conditions suivantes : Charge $C2 = 500\text{MW}$ et $P_{\text{BtBSTATCOM}}=200\text{MW}$.

On constate que toutes les paramètres $V1$, $V2$, $P23$ contrôlés par le BtB STATCOM respectent la commande (Voir la figure 4.14). En comparant les figures 14 et 11, on retrouve la capacité majeure du BtB STATCOM qui assure la protection des lignes électriques contre les surcharges et ce par :

- l'amélioration du transit d'énergie dans les 3 lignes de transport électrique,
- la réduction de la puissance $P34$ à une valeur admissible par la ligne $284,5\text{MW}$ laquelle est inférieure à 300MW
- la régulation de tension par injection de la puissance réactive dans le réseau électrique.

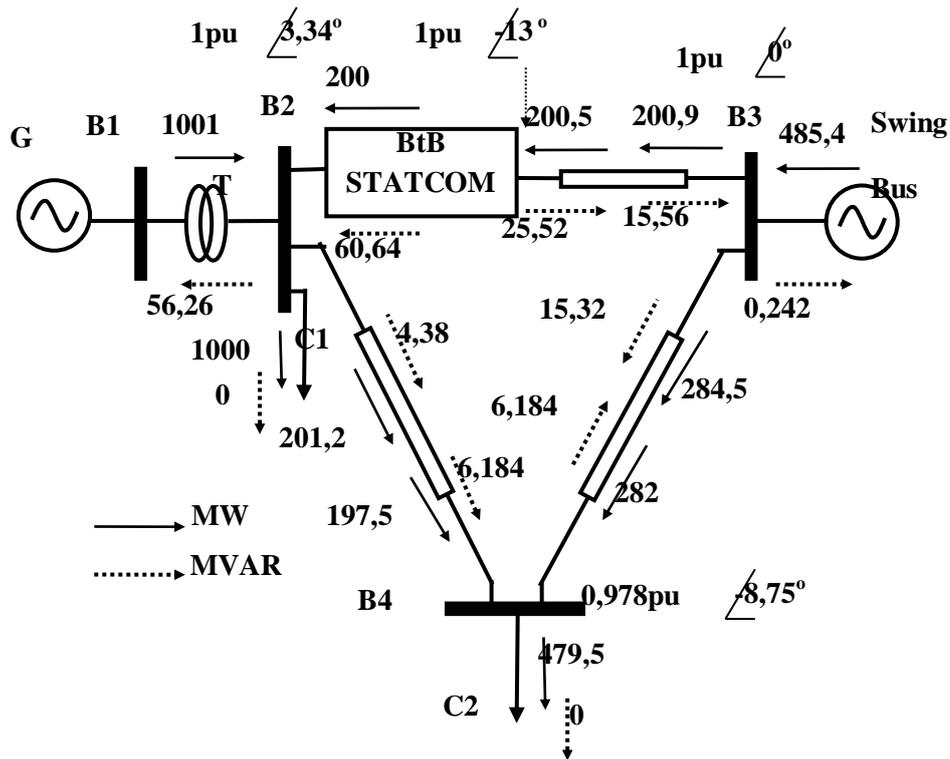


Figure 4.14 Flux de puissances pour : Puissance active de la charge C2=500MW et $P_{BtBSTATCOM}=200MW$

4.3.4 Caractéristiques du système électrique avec BtB STATCOM

Les figures 1.15 à 4.18 montrent le comportement des caractéristiques du générateur (vitesse de rotation, angle de charge, réponses de puissance électrique et tension de sortie du générateur) lorsque le système est équipé d'une régulation classique et BtB STATCOM.

Les conditions de simulation : avant de 0,5Sec une variation aléatoire et après de 0,5sec une variation calculer per le réseau de neurone artificiel.

On :

$$V_{1ref} = 1 \text{ pu}, V_{2ref} = 1 \text{ pu}$$

$$P_{sh1ref} = \begin{cases} = 0 \text{ pu} = 0 \text{ MW} & \text{if } t \leq 0,5 \text{ sec} \\ 1 \text{ pu} = 200 \text{ MW} & \text{if } t > 0,5 \text{ sec} \end{cases}$$

Dans les figures suivantes, la courbe rouge représente la référence et la courbe bleue représente la réponse. On observe le maintien de la stabilité et du synchronisme du système électrique après chaque variation de la référence P_{sh1ref} avec de légères perturbations transitoires.

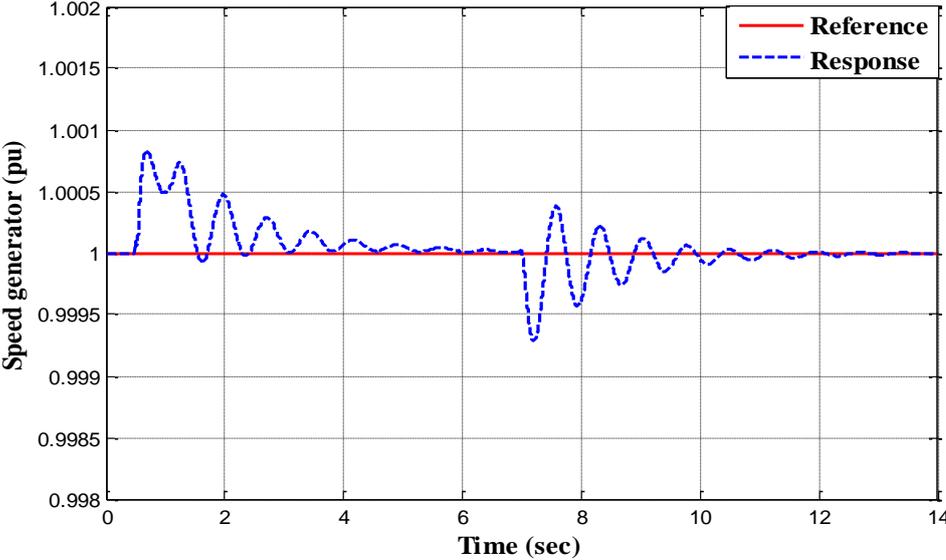


Figure 4.15 Variation de vitesse du générateur (pu)

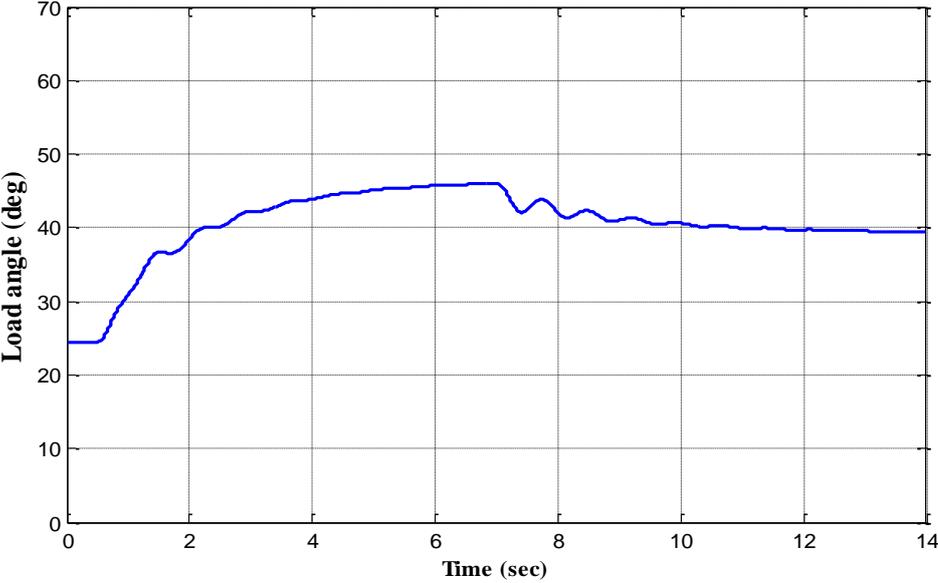


Figure 4.16 Variation de l'angle de charge du générateur (deg)

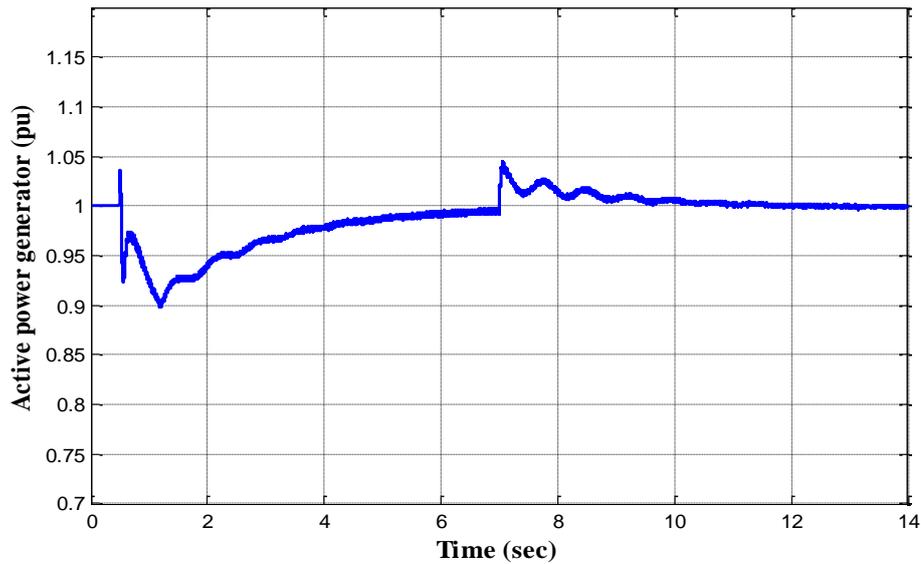


Figure 4.17 Variation de puissance active du générateur (pu)

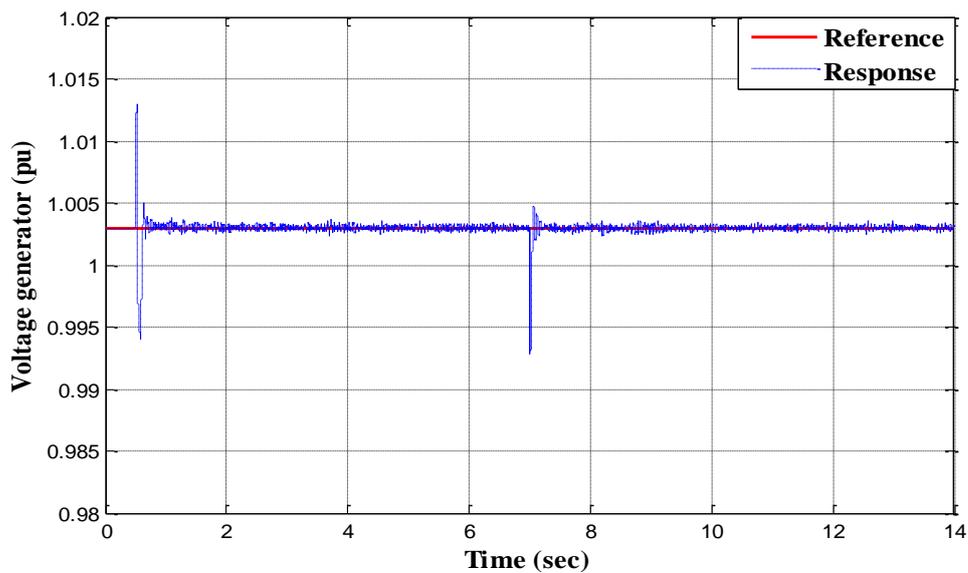


Figure 4.18 Variation de tension du générateur (pu)

4.3.5 Caractéristiques du contrôleur BtB STATCOM

Les figures 4.19, 4.20 et 4.21 représentent le comportement de puissance active, l'amplitude de tension alternative et la puissance réactive côté onduleur. Les caractéristiques montrent de bonnes performances régulatrices. En effet, chaque réponse suit l'ordre avec de légères perturbations à chaque variation de la consigne. La variation progressive de la puissance active permet d'éviter les pics transitoires dangereux.

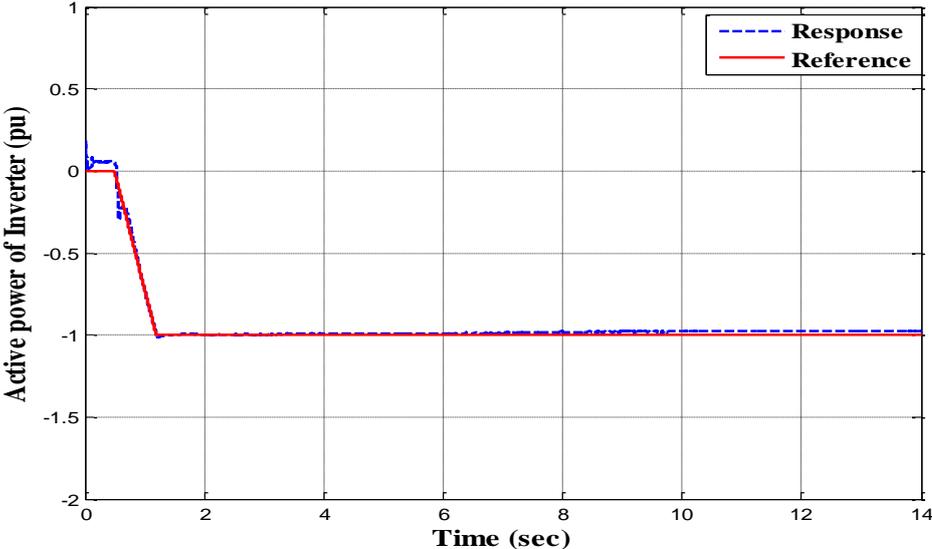


Figure 4.19 Variation de la puissance active de l'onduleur (pu)

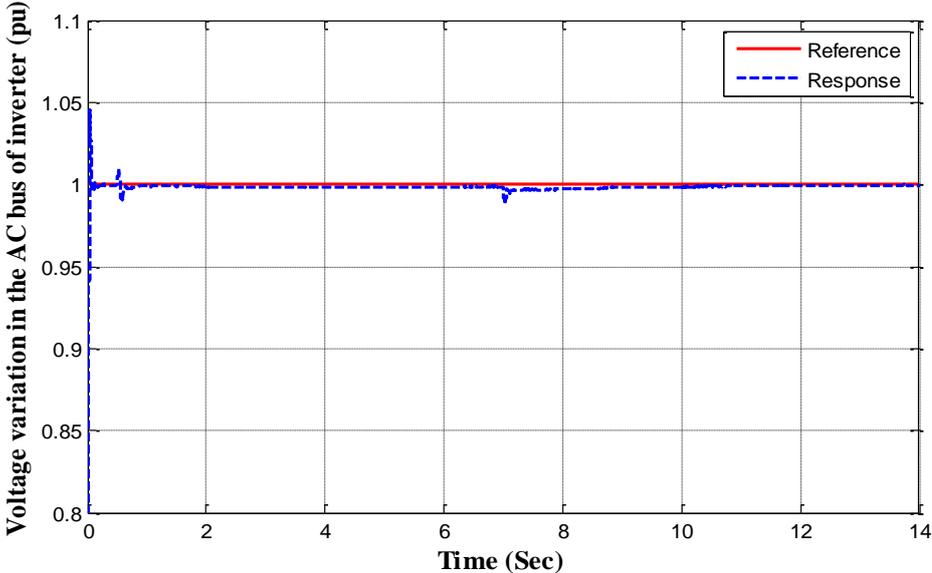


Figure 4.20 Variation de tension dans le bus AC de l'onduleur (pu)

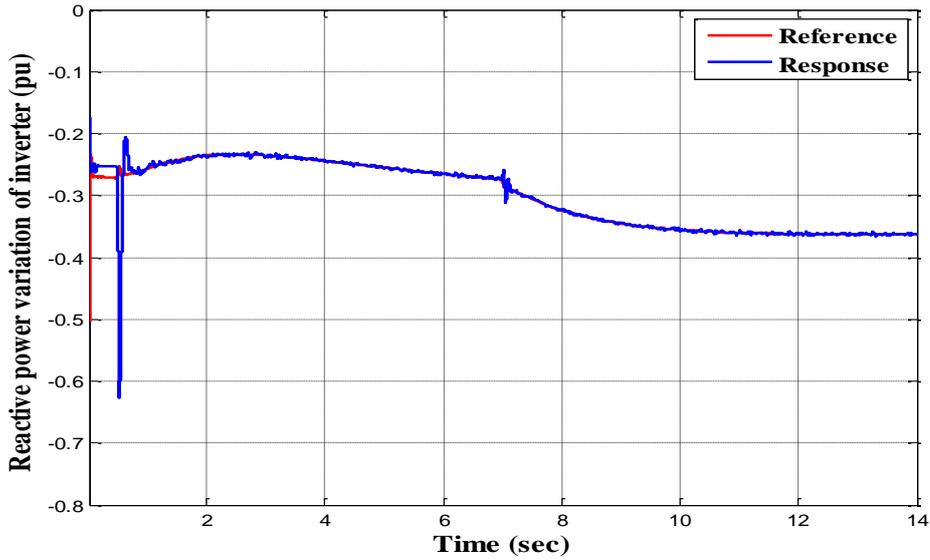


Figure 4.21 Variation de la puissance réactive de l'onduleur (pu)

Les figures 4.22, 4.23, 4.24 et 4.25 montrent les variations de tension du bus continu, l'amplitude de la tension alternative, la puissance réactive et la puissance active côté redresseur. On peut noter également les bonnes performances du contrôle. Chaque réponse caractéristique respecte l'ordre de la commande avec de légères perturbations à chaque variation de la consigne. La variation de puissance active du redresseur est confondue avec la puissance active de l'onduleur.

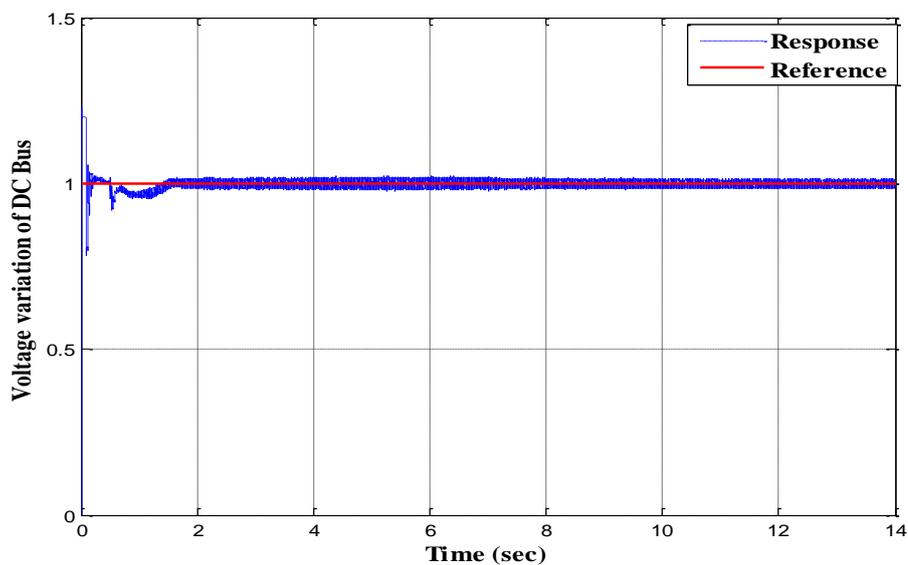


Figure 4.22 Variation de tension du bus continu (pu)

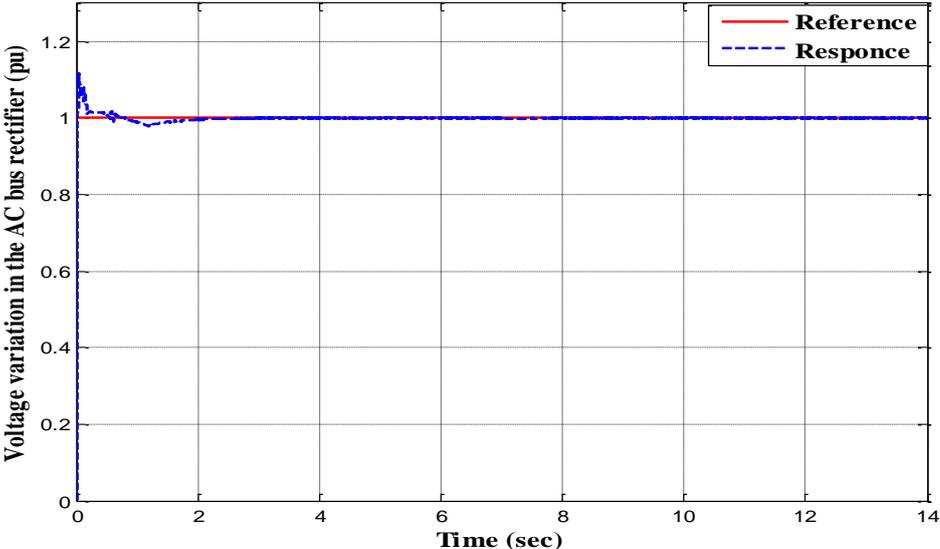


Figure 4.23 Variation de tension dans le redresseur de bus AC (pu)

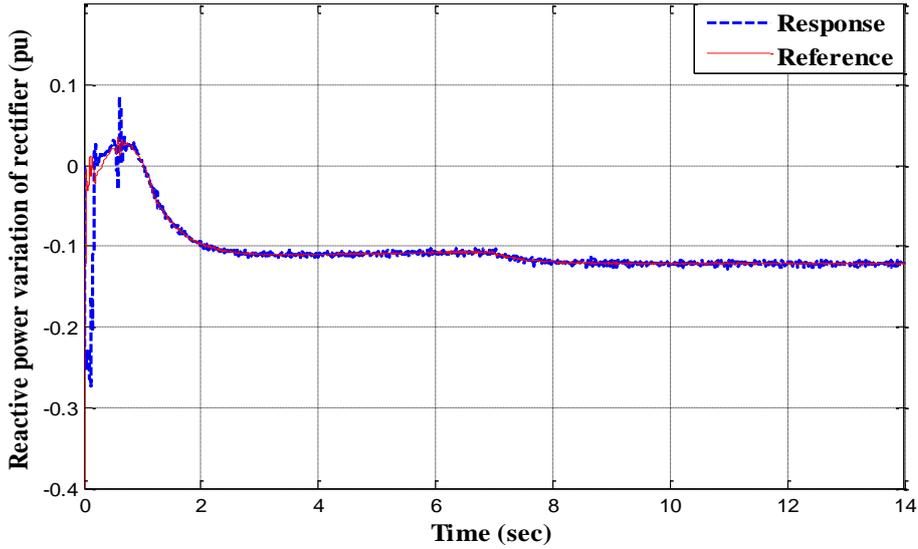


Figure 4.24 Variation de la puissance réactive du redresseur (pu)

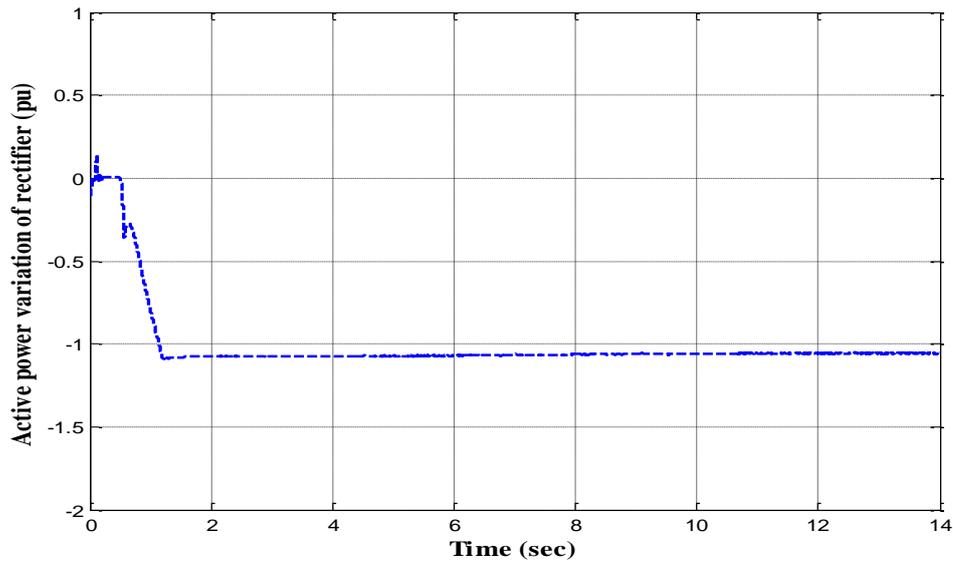


Figure 4.25 Variation de puissance active du redresseur (pu)

4. 4 Conclusion

Nous avons examiné dans ce chapitre le comportement du réseau électrique dans le régime statique en présence et en absence du BtB STATCOM. Les résultats de la simulation indiquent qu'en utilisant le BtB STATCOM connecté au point le plus faible du réseau électrique, la marge de manœuvre sur la charge peut être considérablement augmentée. Les résultats montrent également l'efficacité du BtB STATCOM dans l'amélioration transite de puissance dans le réseau électrique. L'analyse en mode transitoire prouve que l'impact de la variation de la consigne du BtB STATCOM sur les caractéristiques du système électrique est considérablement négligeable, sauf des petites perturbations. Ces considérations font qu'un BtB STATCOM est un outil très puissant pour la synthèse des réseaux électriques. L'existence du réseau de neurones artificiel ajoute une valeur importante pour déterminer le choix optimal de la consigne du BtB STATCOM.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude de la stabilité transitoire des réseaux de transport d'énergie électrique constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux. Ces dernières années, une nouvelle technologie à base d'électronique de puissance a été introduite dans la structure moderne des réseaux électriques. L'insertion d'une telle technologie demeure inévitable en vue de l'évolution récente des réseaux électriques soumis à des contraintes de plus en plus sévères d'où la nécessité de la mise en œuvre de systèmes de contrôle rapides. Nous avons montré dans ce travail que l'usage des technologies avancées telles que les FACTS dans les réseaux est primordial si on veut améliorer leurs conditions d'exploitation dans les conditions de plus en plus contraignantes que ce soit en régime permanent ou en régime perturbé.

Nous avons montré dans cette thèse la commande et l'implantation des contrôleurs FACTS : SSSC et BtB-STATCOM.

Nous avons présenté la modélisation et la simulation des onduleurs triphasés back-to-back avec prise en charge de la gestion des flux de puissances (active et réactive) et de la régulation de la tension du bus DC. La technique de commande utilisée offre la possibilité de contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Les deux boucles de régulation (courant et tension) sont complètement découplées et indépendantes.

Le BtB-STATCOM et le SSSC permettent respectivement le contrôle de transit de puissance de la ligne où ils sont connectés. Ainsi cette étude nous a permis de comprendre qu'il est possible d'avoir un contrôle systématique de la tension et la circulation de puissance du réseau ; et ceci en utilisant les deux dispositifs FACTS étudiés : Le BtB-STATCOM et le SSSC. La connaissance des paramètres de réglage de chaque dispositif permet d'aboutir aux résultats attendus.

La comparaison des performances en état d'équilibre du BtB-STATCOM et du SSSC est faite, telle que le BtB-STATCOM a donné des meilleurs résultats avec une meilleure flexibilité que le SSSC sur le contrôle d'énergie dans les réseaux électriques. L'intégration des réseaux de neurones artificiels ajoutent un rôle important pour le contrôle en temps réel et synchronisé avec la variation de répartition des charges.

Le travail mené ici laisse entrevoir d'autres perspectives de recherche qui concerneraient les thèmes suivants :

- ❖ Étude d'un réseau réel multimachine équipé d'un système FACTS tel que le réseau de transport de SONELGAZ
- ❖ Apport des FACTS dans la conduite des réseaux décentralisés où la production d'électricité d'origine renouvelable (éolien, solaire) est importante.
- ❖ Insertion de différents FACTS en différents endroits du réseau.
- ❖ Ébauche d'un micro-réseau muni d'un prototype FACTS (UPFC, SMES, SVC, ...).

Annexe

Annexes

1) Les données de réseau de test monomachine

Nous considérons d'abord la base du système en grandeur réduite comme suit :

$$S_{\text{base}} = 100 \text{ MVA} \quad \text{et} \quad U_{\text{base}} = 500 \text{ KV}$$

Par conséquent les deux autres bases du système (le courant et l'impédance), sont calculées de la manière suivante:

$$I_{\text{base}} = \frac{S_{\text{base}}}{\sqrt{3} U_{\text{base}}}$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{U_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}}$$

Le générateur G :

$$S_{\text{base}} = 2100 \text{ MVA}, \quad H = 3,7 \text{ s}, \quad V_B = 13,8 \text{ KV}, \quad F = 60 \text{ Hz}$$

$$P_{\text{oe}} = 0,75, \quad v_{\text{to}} = 1,0, \quad \delta_0 = 41,51^\circ, \quad R_S = 2,8544 \text{e}^{-3}, \quad x_d = 1,305, \quad x_d' = 0,296, \quad x_d'' = 0,252$$

$$X_q = 0,474, \quad X_q' = 0,243, \quad X_q'' = 0,18, \quad T_d = 1,01 \text{ s}, \quad T_d' = 0,053 \text{ s}, \quad T_{qo}'' = 0,1 \text{ s}.$$

La ligne de transmission :

La ligne de transmission de type "CURLEW"

3-Ph, 60 Hz, longueur = 300 km, $R_1 = 0,02546 \text{ } \Omega/\text{km}$, $R_0 = 0,3864 \text{ } \Omega/\text{km}$,

$L_1 = 0,9337 \text{e}^{-3} \text{ H/km}$, $L_0 = 4,1264 \text{e}^{-3} \text{ H/km}$, $C_1 = 12,74 \text{e}^{-9} \text{ F/km}$, $C_0 = 7,751 \text{e}^{-9} \text{ F/km}$

Le transformateur T :

$S_n = 2100 \text{ MVA}$, rapport = 13,8/500, 60 Hz, $R_1 = 0,002$, $L_1 = 0$,

D1/Yg connection, $R_m = 500$, $L_m = 500$.

2) Régulation classique de tension

La régulation de tension peut améliorer la stabilité transitoire et empêcher la perte du synchronisme de l'alternateur. Lors d'un défaut, la tension à la sortie de l'alternateur diminue induisant un écart ΔV entre la valeur réelle de la tension V aux bornes de la machine et une valeur de consigne V_{ref} . La régulation de tension consiste alors à détecter cet écart et construire une chaîne d'action sur la tension d'excitation E_{fd} et ce par augmentation du courant d'excitation. Les éléments principaux sont constitués par un étage amplificateur et une excitatrice.

La figure suivante schématisant un régulateur de tension type IEEE indique en outre la configuration de chaînes tenant compte des systèmes de stabilisation et de saturation, la fonction de saturation est de la forme :

$$S_e = A_{ex} e^{B_{ex} E_{fd}}$$

A_{ex} et B_{ex} sont des coefficients constants.

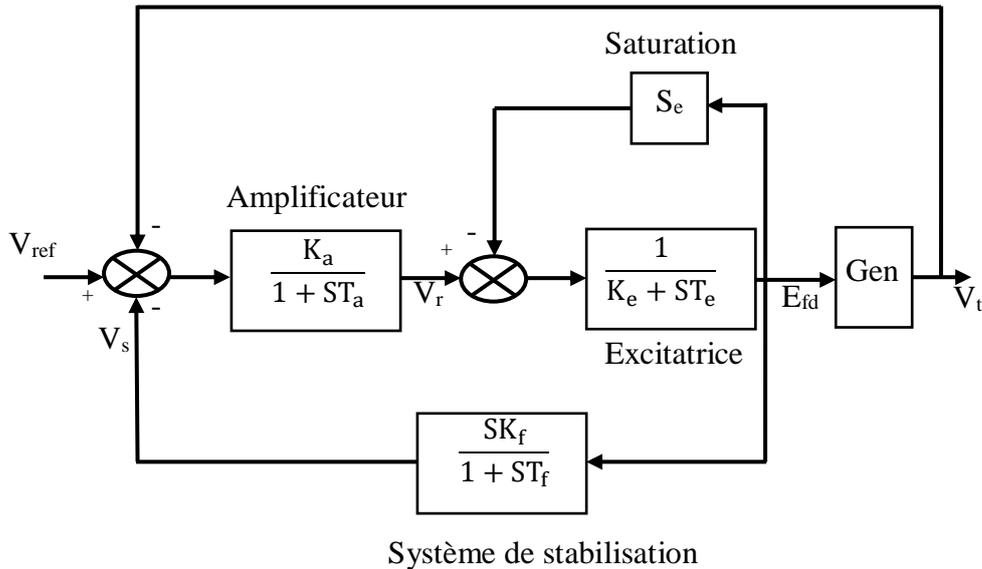


Schéma de la régulation de tension type IEEE.

Les équations différentielles liées à ce type de régulation s'écrivent:

$$\dot{V}_r = -\frac{1}{T_a} V_r - \frac{K_a}{T_a} V_s - \frac{K_a}{T_a} V_t + \frac{K_a}{T_a} V_{ref}$$

$$\dot{E}'_{fd} = -\frac{1}{T_e} V_r - \frac{S_e + K_e}{T_e} E_{fd}$$

$$\dot{V}'_s = \frac{K_f}{T_f T_e} V_r - \frac{K_f (S_e + K_e)}{T_f T_e} E_{fd} - \frac{1}{T_f} V_s$$

3) Régulation classique de vitesse

A la suite d'une perturbation, le régulateur de vitesse des machines agit sur les organes d'admission du fluide afin de rétablir l'équilibre du réseau. La réserve de puissance permet d'assurer la correction de l'écart entre la fréquence de référence et la fréquence réelle. La puissance mécanique développée par la turbine est essentiellement fonction de la position des soupapes d'admission du fluide, elles-mêmes sous le contrôle du régulateur de vitesse dont le schéma fonctionnel est celui de la figure suivante qui suppose le régulateur de vitesse sans zone d'insensibilité.

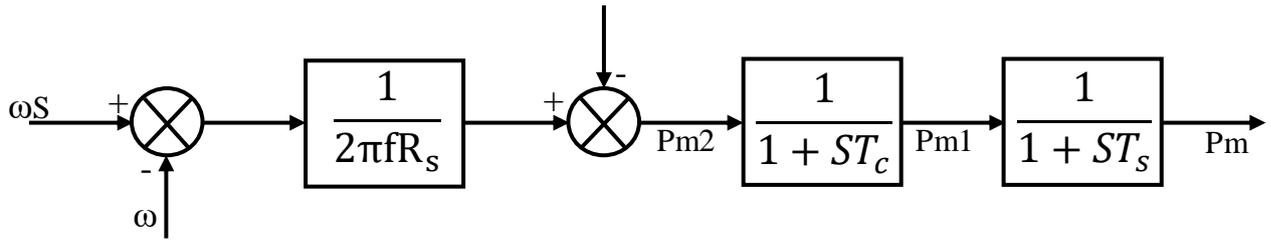


Schéma de régulation de vitesse.

Où

R_s : Désigne le statisme.

P_{m0} : Désigne la puissance mécanique d'entraînement à l'équilibre.

T_c : Est le temps de réponse du circuit de commande.

T_s : Est le temps de réponse du circuit vapeur.

Les équations régissant la puissance mécanique liée à la régulation de vitesse de la structure donnée par la figure III.11 sont données ci-dessous:

$$\dot{P}_m = \frac{1}{T_s} P_{m1} - \frac{1}{T_s} P_m$$

$$\dot{P}_{m1} = \frac{1}{T_s} P_{m2} - \frac{1}{T_s} P_{m1}$$

P_{m2} donné par la relation ci-après :

$$P_{m2} = P_{m0} - \frac{\omega_s - \omega}{2\pi f R_s}$$

4) Paramètres de simulation du BtB-STATCOM

Les paramètres du système back-to-back STATCOM comme suite :

Côté alternatif :

Tension ligne à ligne : 230 kV

Puissance de base : 2000 MVA

Résistance de la source : 0.062 Ω

Inductance de la source : 0.031 H

Fréquence du système : 50Hz

Côté continu :

Tension continue : 100kV

Capacité de filtrage : 0.07 F

5) Paramètres de simulation du réseau électrique de test à 3 nœuds

Le tableau ci-dessous indique les paramètres du réseau électrique à 3 nœuds :

Valeurs de base	$S_b = 200\text{MVA}$, $U_b = 230\text{kV}$
Générateur	$S_{ng} = 1000\text{MVA}$, $H = 3.7\text{s}$, $V_{ng} = 13.8\text{kV}$, $f = 50\text{Hz}$, $X_d = 1.305\text{pu}$, $X_d' = 0.296\text{pu}$, $X_d'' = 0.252\text{pu}$, $X_q = 0.474\text{pu}$, $X_q' = 0.243\text{pu}$, $X_q'' = 0.18\text{pu}$, $T_d = 1.01\text{s}$, $T_d' = 0.053\text{s}$, $T_{qo}'' = 0.1\text{s}$, $R_g = 0.00285\text{pu}$.
Lignes	$R_l = 0.02546\Omega/\text{km}$, $R_0 = 0.3864\Omega/\text{km}$, $L_l = 0.9337 \times 10^{-3}\text{H}/\text{km}$, $L_0 = 4.1264 \times 10^{-3}\text{H}/\text{km}$, $C_l = 12.74 \times 10^{-9}\text{F}/\text{km}$, $C_0 = 7.751 \times 10^{-9}\text{F}/\text{km}$. Ligne 2-3 = 200km Ligne 3-4 = 150km, Ligne 2-4 = 200km.
Transformateurs	$S_{nt} = 1000\text{MVA}$, $V_{nt} = 13.8/500\text{kV}$, 50Hz, $R_t = 0.002$, $L_t = 0$, D/Yg connexion, $R_m = 500$, $L_m = 500$.
Charges	Charge C1: $P = 1000\text{MW}$, $Q = 0\text{MVAR}$. Charge C2: $P = 300\text{MW}$, $Q = 0\text{MVAR}$.
BtB STATCOM	Circuit de puissance : $r_{sh} = 1\Omega$, $L_{sh} = 0.001\text{H}$, $C = 0.002\text{F}$. Régulation de courant : $K_p = 50$, $K_i = 300$. Régulation de tension continue DC: $K_p = 5$, $K_i = 10$. Régulation de la puissance active : $K_p = 10$, $K_i = 100$. Régulation de la tension côté AC : $K_p = 1$, $K_i = 10$.
Paramètres de régulation Classique	Régulation de tension : $K_a = 100$, $T_a = 0.01\text{Sec}$, $K_e = 1$, $T_e = 0.01\text{Sec}$, $K_f = 0$, $T_f = 0$. Régulation de vitesse : $R_s = 0.001$, $P_{mo} = 1.3\text{pu}$, $T_c = 0.01\text{Sec}$, $T_s = 0.5\text{sec}$

Bibliographie

REFERENCES

- [1] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles-Camacho, "FACTS Modelling and Simulation in Power Networks", BOOK Wiley Editorial Offices : Copyright # 2004 John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
- [2] Ruslan Ufa, AlexandrGusev, Ahmed A. ZakiDiab, Aleksey Suvorov, NikolayRuban, Mikhail Andreev, AlisherAskarov, Vladimir Rudnik, Omer Abdalla, Ziad M. Ali, Ahmed Ibrahim, RaefAboelsaud, "Analysis of application of back-to-back HVDC system in Tomsk electric power system", Energy Reports, 6 (2020), 438-444.
- [3] Ahmet M. Vural, Kamil C. Bayindir., "Transient stability improvement using quasi-multi pulse BTB-STATCOM", Advances in Energy Research, 2 (2014), No. 1, 47-59.
- [4] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz- Pérez, César Angeles-Camacho, "FACTS Modelling and Simulation in Power Networks", BOOK Wiley Editorial Offices : Copyright # 2004 John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
- [5] K.K.Sen and M.L.Sen
"Introduction to facts controllers"
A John Wiley & Sons, Inc., publication, Hoboken, New Jersey, 2009.
- [6] Wan Kyun Ham,
Active and Reactive Power Control Model of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) for the Improvement of Power System Stability
Thesis of PhD, The University of Texas at Austin May, 2003
- [7] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, "César Angeles Camacho FACTS Modelling and Simulation in Power Networks",
John Wiley & Sons Ltd, England 2004
- [8] J. Arrillaga,;Y.H. Liu, N.R. Watson, "Flexible Power Transmission",
John Wiley & Sons Ltd, England, 2007.
- [9] N. G. Hingorani, "FACTS: Flexible AC Transmission Systems",
EPRI Conference on Flexible AC Transmission System, Cincinnati, OH, November 1990.
- [10] N. G. Hingorani, "FACTS - Flexible AC Transmission System",
Proceedings of the Fifth International Conference on AC and DC Power Transmission, London, IEE Publication No. 345, pp. 1-7, September 1991.
- [11] R.Benarid, "Optimisation multi objectif de la synthèse des FACTS pour les particules en essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques",
Thèse de magister, UAT, Laghouat 2007

[12] M. Boudiaf, "Contribution de l'UPFC à la stabilisation d'un réseau électrique mono machine 400kV perturbé",
Thèse de Magister, Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2007

[13] https://library.e.abb.com/public/850534829fa6d50c83257cca002c524c/Apl.%20Note_Extremoz%20SVC_1JNS016249.pdf
Application Note : 1JNS016249, 2013-10
www.abb.com/FACTS

[14] Gyugyi, L., "Unified Power Flow Controller : Concept for Flexible AC Transmission System",
IEEEproceeding ,vol .139 ,No .4 ,July1992,

[15] Théodore Wildi, "Electrotechnique",
Institut de recherche d'Hydro-Québec, De Boeck Université, 2000.

[16] Mohd. Hasan Ali, Senior Member, IEEE, Bin Wu, Fellow, IEEE, and Roger A. Dougal, Senior Member, IEEE, "An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems",
IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 1, NO. 1, APRIL 2010.

[17] D. Krischel
"2MJ Supraconducting Magnetic Energy Storage System - SMES",
ACCEL Instruments GMBH, Allemagne,2005

[18] <https://library.e.abb.com/public/dfd0b019e1fe08a48325771f002dbfc5/A02-0158.pdf>
Document : TCSC Thyristor Controlled Series Compensation Keeping grids together-Power and productivity for a better world- ABB,
Application Note : A02-0158 E, 2010-03, Elanders Sverige AB
www.abb.com/FACTS

[19] <https://studylib.net/doc/18523175/47-8mvar-static-synchronous-series-compensator>
Engineering & Technology document - 2019
www.ingeteam.com

[20] E.S. Gholipour, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques",
Thèse de doctorat, faculté des sciences et techniques, université Henri Poincaré, Nancy, France, 2003

[21] B. Brahim, "Contribution du SMES, Dispositif FACTS à la Stabilisation d'un Réseau Electrique Haute Tension",
Thèse de Magister, Laboratoire de Haute Tension de l'ENP, Alger, 20/09/2006

[22] Iman Mohammad Hoseiny Naveh, Behzad Asadi Zadeh, "Application of FACTS Controllers to Damp Detrimental Resonance in Power System: a Case Study of Supplemental Implement of SVC in a Long AC Interconnection",
International Review of Automatic Control (I.RE.A.CO), Vol. 2. n. 6, pp. 693-699, November 2009.

- [23] Claudio, A. Canizares, "Power flow and transient stability models of FACTS controllers for voltage and angle stability studies",
IEEE/PES WM Panel on Modelling, Simulation and Applications of FACTS Controllers in Angle and Voltage Stability Studies, Singapore, Jan. 2000.
- [24] H. F. Wang, "Static synchronous series compensator to damp power system oscillations,"
Electric Power Systems Research, vol. 54, pp. 113-119, 2000.
- [25] F. A. R. Al Jowder and B. T. Ooi, "Series Compensation of Radial Power System by a Combination of SSSC and Dielectric Capacitors",
IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp., pp458-465, January 2005.
- [26] M.S. Castro, H.M. Ayres, V.F. da Costa and L.C.P. da Silva, "Impacts of the SSSC control modes on small-signal transient stability of a power system",
Electric Power Systems Research, vol. 77, pp. 1-9, 2007.
- [27] Nitus Voraphonpiput, Teratam Bunyagul, and Somchai Chatratana Eskandar Gholipour Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques",
Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences & Techniques, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2003.
- [28] T. Allaoui, "Réglage Robuste de l'UPFC pour Améliorer les Performances d'un Réseau Mono et Multi machines",
Thèse de doctorat, USTO Mohamed Boudiaf, Décembre 2007.
- [29] Michel, "Crappe, Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques",
Edition Lavoisier, Paris, 2003.
- [30] P. Kundur, "Power System Stability and Control",
New York: McGraw-Hill Book Company, 1994.
- [31] Nesmat ABU-TABAK, "Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation",
Thèse de doctorat, l'école centrale de LYON, 19 Novembre 2008
- [32] P. Petitclair, "Modélisation et commande de structures FACTS : Application au STATCOM",
Thèse de doctorat de l'INGP, 16 Juillet 1997.
- [33] NOROUZI Amir., "Flexible AC Transmission Systems: Theory, Control and Simulation of the STATCOM and SSSC",
Mémoire de magister université de New Brunswick, 2003.
- [34] Yinbiao Shu, Senior, Guangfu Tang, Hui Pang, "A Back-to-back VSC-HVDC System of Yu-E Power Transmission Lines to Improve Cross-region Capacity",
CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS, 6 (2020), No. 1, 64-71.

- [35] Young Ok Lee, Hyun Jae Kang, Youngseong Han, and Chung Choo Chung, “A Nonlinear Control for a BTB STATCOM System with Asymmetrically Structured Converters”,
2011 IEEE TRONDHEIM POWERTECH CONFERENCE, JUNE 19–23, TRONDHEIM, NORWAY.
- [36] Yeshitela Shiferaw Maru, K. Padma, “The Optimal Power Flow Solution by Optimal Location of STATCOM Device using AHP Method”,
International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 9 (2020), Issue. 4, 2561- 2569.
- [37] Alcalá, J.; Cárdenas, V.; Espinoza, J.; Durán, M., “Investigation on the limitation of the BTB-VSC converter to control the active and reactive power flow”,
Electric Power Systems Research,143 (2017), 149–162.
- [38] Zeng, L.; Yao,W.; Zeng, Q.; Li, D.; Fang, J.; Ai, X.;Wen, J.; He, H., “Design and real-time implementation of data-driven adaptive wide-area damping controller for back-to-back VSCHVDC”,
Int. J. Electr. Power Energy Syst. 109 (2019), 558–574.
- [39] Laurent Teppo. “Commande d’un système de conversion de type VSC-HVDC.Stabilité - Contrôle des perturbations”,
Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [40] Vijay K. Sood, “HVDC and FACTS Controllers Applications of Static Converters in Power Systems”,
Kluwer Acadimica Publishers, Les Etats Unis d'Amérique, 2004.
- [41] Roozbeh ASAD and Ahad KAZEMI, “A New Approach for Control of IPFC for Power Flow Management”,
Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies 16, January-June 2010.
- [42] K. Sebaa, "Commande intelligente pour l'amélioration de la stabilité dynamique des réseaux d'énergie électrique",
Thèse de Magister USTHB, Alger, 15 Septembre 2008.
- [43] Laurent TEPPON, “Commande d’un système de conversion de type VSC-HVDC, Stabilité - Contrôle des perturbations”,
Thèse de doctorat d’institut National Polytechnique de Grenoble, 23 Septembre 2005.
- [44] LIU Qing, WANG Zengping, WU Liying, “Optimization of HVDC Converter Transformer Back-up Protection”,
2006 International Conference on Power System Technology, 2006 IEEE.
- [45] Qian. Chen , Yao. Zhang , Qi. Guo , Chao. Hong, “Investigation on Applying HVDC Light to China Southern Power Grid”,
IEEE, DRPT2008 6-9 April 2008 Nanjing China.

- [46] J. Arrillaga, Y.H.Liu, et N. R. Watson, "Flexible Power Transmission : the HVDC Options",
John Wiley and Sons Inc, 2007.
- [47] IMDADULLAH, SYED MUHAMMAD AMRR, M. S. JAMIL ASGHAR, IMTIAZ ASHRAF 1, MOHAMMAD MERAJ, "A Comprehensive Review of Power Flow Controllers in Interconnected Power System Networks",
IEEE Access, 8 (2020), 18036- 18063.
- [48] MOHAMADREZA BARADAR, "Modeling of Multi Terminal HVDC Systems in Power Flow and Optimal Power Flow Formulations",
PHD Thesis, KTH School of Electrical Engineering, SE-100 44 Stockholm, SWEDEN 2013.
- [49] Yinbiao Shu, Senior, Guangfu Tang, Hui Pang, "A Back-to-back VSC-HVDC System of Yu-E Power Transmission Lines to Improve Cross-region Capacity",
CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS, 6 (2020), No. 1, 64-71.
- [50] Radouan Gouaamar, Seddik Bri, and Zineb Mekrini, "Comparative Analysis between Proportional-Integral and Artificial Neural Network Control of a Grid-Connected PV System",
E3S Web of Conferences 469, 00003 (2023), ICEGC'2023
- [51] Thuan Pham; Xingpeng Li, "Neural Network-based Power Flow Model",
2022 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)
30 March 2022 - 01 April, Houston, TX, USA
- [52] Sam Stanley R, Pavalarajan S, "Evaluation of Fuzzy-Based Artificial Neural Network for Power Quality Enhancement",
Journal : Electric Power Components and Systems Volume 52, 2024 - Issue 2
- [53] Omar N. Mohammed Salim, Salah A. Adnan , Ammar H. Mutlag, "Artificial Neural Network-Based Transmission Power Control for Underwater Wireless Optical Communication System",
Engineering and Technology Journal 41 (02) (2023) 456-466
- [54] Xunyou Zhang , Chuanyang Liu and Zuo Sun, "Line Fault Detection of DC Distribution Networks Using the Artificial Neural Network",
Energy Engineering, EE, 2023, vol.120, no.7
- [55] Ali Hadi Abdulwahid, "Artificial Intelligence-based Control Techniques for HVDC Systems",
Emerging Science Journal, Vol. 7, No. 2, April, 2023

- [56] IWEGBUNA O. N, OKOLO C. C, OKOYE C. S, EZEUGBOR I. C, OKWUELU N, “Introduction of Artificial Neural Network Controlled VSC-HVDC for Transient Stability Improvement of Ajaokuta Bus/Ajaokuta-Benin Transmission Line Using Eigen value Analysis”,
International Journal of Research Publication and Reviews, Vol 2, no 12, pp 721-728, December 2021
- [57] S. A. Ahmed, A. T. Hussain, F. Malek, T. A. Taha, Syed F. Ahmed, N. Noorpi, Gomesh Nair, Irwan Yusoff, Muhammad, Irwanto Misrun, “Intelligent Controller of High Voltage Power Station Based Artificial Neural Network”,
Journal: Applied Mechanics and Materials, Vol. 793, September 2015.
- [58] Vidhyavati Suryawanshi, Surbhi Gupta, “Controlling Techniques for STATCOM using Artificial Intelligence”,
SMART MOVES JOURNALIJOSTHE, VOLUME. 9, ISSUE 1, FEBRUARY 2022,
- [59] F. Sorin, L. Broussard, P. Roblin, “Régulation d’un processus industriel par réseaux de Neurones”,
Techniques de l’Ingénieur, traité Informatique industrielle Doc : S 7 582.
Constantine 2005.
- [60] Melle TRAHY Fatiha, “Prédiction de l’irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels. Application pour le dimensionnement d’une installation photovoltaïque pour l’alimentation du laboratoire de recherche Lampa”,
Mémoire de magister en électronique Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2011.
- [61] Haykin, S., "Neural Networks: A Comprehensive Foundation",
1998: Prentice Hall PTR.
- [62] Grossberg, S., "Nonlinear neural networks",
Principles, mechanisms, and architectures. Neural Networks, 1988. 1(1): p. 17-61.
- [63] Basheer, I.A. and M. Hajmeer, "Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application",
Journal of Microbiological Methods, 2000. 43(1): p. 3-31.
- [64] Popescu, M.-C., et al., "Multilayer perceptron and neural networks",
WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2009. 8.
- [65] Ghosh, J. and A. Nag, "An Overview of Radial Basis Function Networks, in Radial Basis Function Networks 2: New Advances in Design",
R.J. Howlett and L.C. Jain, Editors. 2001, Physica-Verlag HD: Heidelberg. p. 1-36.

- [66] Shanthamallu, U.S. and A. Spanias, "Neural Networks and Deep Learning, in Machine and Deep Learning Algorithms and Applications",
U.S. Shanthamallu and A. Spanias, Editors. 2022, Springer International Publishing: Cham. p. 43-57.
- [67] Teuwen, J. and N. Moriakov, "Chapter 20 -Convolutional neural networks, in Handbook of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention",
S.K. Zhou, D. Rueckert, and G. Fichtinger, Editors. 2020, Academic Press. p. 481-501.
- [68] Wilamowski, B.M. and H. Yu, "Improved Computation for Levenberg–Marquardt Training",
IEEE Transactions on Neural Networks, 2010. 21: p. 930-937.
- [69] Hao Yu, Bogdan M. Wilamowski,
Levenberg–Marquardt Training,
it's a chapter in a book Intelligent Systems, Edition 1st Edition, First Published 2011, Imprint
CRC Press, eBook ISBN 9781315218427.
- [70] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles-Camacho, "FACTS Modelling and Simulation in Power Networks",
John Wiley & Sons Ltd, edition 2004
- [71] E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-lara, T.J.E. Miller, "Power Electronic Control in Electrical Systems",
Chap.3 "Transmission system compensation", Edition 2002.
- [72] S. Gerbex, "Métaheuristique appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique",
Doctorat, Faculté des sciences et Techniques de l'ingénieur, EPFL- Lausanne 2003, Suisse.
- [73] Abdelaàli ALIBI, "Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems",
Magister en Electrotechnique, option : Electricité industrielle, soutenu publiquement le 13 /06/2009.
- [74] DELENDI LOUARDI, "Contrôle de l'écoulement de puissance active par système FACTS",
Thèse de Magister, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, 2009.
- [75] O. Abdelhamid, "Évaluation de la stabilité transitoire des réseaux électriques par les réseaux de neurones artificiels et les plans d'expériences",
Thèse de Magister USTHB, Alger, 2008.
- [76] P. M. Anderson and A. Fouad, "Power System Control and Stability",
Second Edition, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.2003.
- [77] Miguel Angel FONTELA GARCIA, "INTERACTION DES RESEAUX DE TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION EN PRESENCE DE PRODUCTION DECENTRALISEE",
Thèse de doctorat de L'Institut Polytechnique de Grenoble, 10 juillet 2008.

ملخص :

يمكن تحسين تشغيل شبكات نقل الطاقة الكهربائية من خلال تقوية أو إنشاء خطوط جديدة. لأسباب مختلفة، هذا ليس ممكناً دائماً. يمكن تحسين جودة الطاقة وزيادة سعة النقل والتحكم في الشبكات الحالية من خلال تطبيق التقنيات الجديدة. توفر FACTS المستندة إلى إلكترونيات الطاقة حلاً ديناميكياً وفعالاً ومثبتة لإدارة الشبكات. وهذا ما حاولنا إظهاره من خلال هذا العمل من خلال التركيز على اثنين من FACTS : SSSC و BtB STATCOM. قمنا بتقييم أداء هذه الأدوات على شبكة كهربائية اختبارية في الحالات الثابتة والمضطربة. في الظروف المضطربة، قمنا بتجهيز الشبكة بالتحكم التقليدي لمعرفة الموقف الذي تثبت فيه عدم فعاليته لتبرير استدعاء FACTS. تم تبرير الاختيار الأفضل لنظام BtB STATCOM من خلال دراسة محاكاة بالمقارنة مع SSSC. لقد أظهرنا أن نظام BtB STATCOM يعمل على تحسين موازنة دوران الطاقة في الحالة المستقرة والأداء الكهربائي عن طريق تقليل انخفاض الجهد وفقدان الطاقة في خطوط النقل. يتيح الذكاء الاصطناعي إضافة قيمة كبيرة في الإدارة الديناميكية لشبكة الكهرباء.

الكلمات المفتاحية : استقرار الشبكات الكهربائية، FACTS، BtB STATCOM، SSSC، الذكاء الاصطناعي، نقل الطاقة.

Abstract:

The management of electrical energy transmission networks can be improved by strengthening or creating new lines. For various reasons this is not always possible. Improving energy quality, increasing transit capacity and controlling existing networks can be achieved through the implementation of new technologies. FACTS based on power electronics provide dynamic, efficient and proven solutions to network management. This is what we tried to show through this work by focusing on two FACTS, the SSSC and the BtB STATCOM.

We evaluated the performance of these tools on a test electrical network in static and disturbed conditions. In disrupted conditions, we equipped the network with conventional regulation in order to see in which situation it proves ineffective to justify the call to FACTS.

The best choice of the BtB STATCOM system was justified by a simulation study in comparison with the SSSC. We have shown that the BtB STATCOM system improves steady state power circulation balancing and electrical performance by reducing voltage drops and power losses in the transmission lines. The integration of artificial intelligence makes it possible to add significant value in the dynamic management of the electricity network.

Keywords: Stability of electrical networks, FACTS, BtB STATCOM, SSSC, artificial intelligence, Load flow.

Résumé :

L'exploitation des réseaux de transport d'énergie électrique peut être améliorée par renforcement ou création de nouvelles lignes. Pour diverses raisons cela n'est pas toujours possible. L'amélioration de la qualité de l'énergie, l'augmentation de la capacité transitée et le contrôle des réseaux existants peuvent être obtenus grâce à la mise en place de nouvelles technologies. Les FACTS à base d'électronique de puissance apportent des solutions dynamiques, efficaces et éprouvées à la conduite des réseaux. C'est ce que nous avons essayé de montrer par ce travail en nous intéressant à deux FACTS, le SSSC et le BtB STATCOM.

Nous avons évalué les performances de ces outils sur un réseau électrique de test en régime statique et perturbée. En régime perturbé, nous avons équipé le réseau de la régulation conventionnelle afin de voir dans quelle situation elle s'avère inefficace pour justifier l'appel aux FACTS. Le meilleur choix du système BtB STATCOM a été justifié par une étude de simulation en comparaison avec le SSSC. Nous avons montré que le système BtB STATCOM améliore en régime établi l'équilibrage de circulation de puissance, les performances électriques en réduisant des chutes de tension et des pertes de puissance dans les lignes de transmission. L'intégration de l'intelligence artificielle permet d'ajouter d'une valeur importante dans la conduite dynamique du réseau électrique.

Mots clés: Stabilité des réseaux électriques, FACTS, BtB STATCOM, SSSC, intelligence artificiel, circulation de puissances.