

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Jijel



*Faculté des sciences et de la technologie
Département d'électrotechnique*

Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

En électrotechnique

Option : Réseaux électriques

Thème

***Contrôle du transit de puissance dans le réseau de transport
d'énergie à l'aide d'un compensateur statique (STATCOM)***

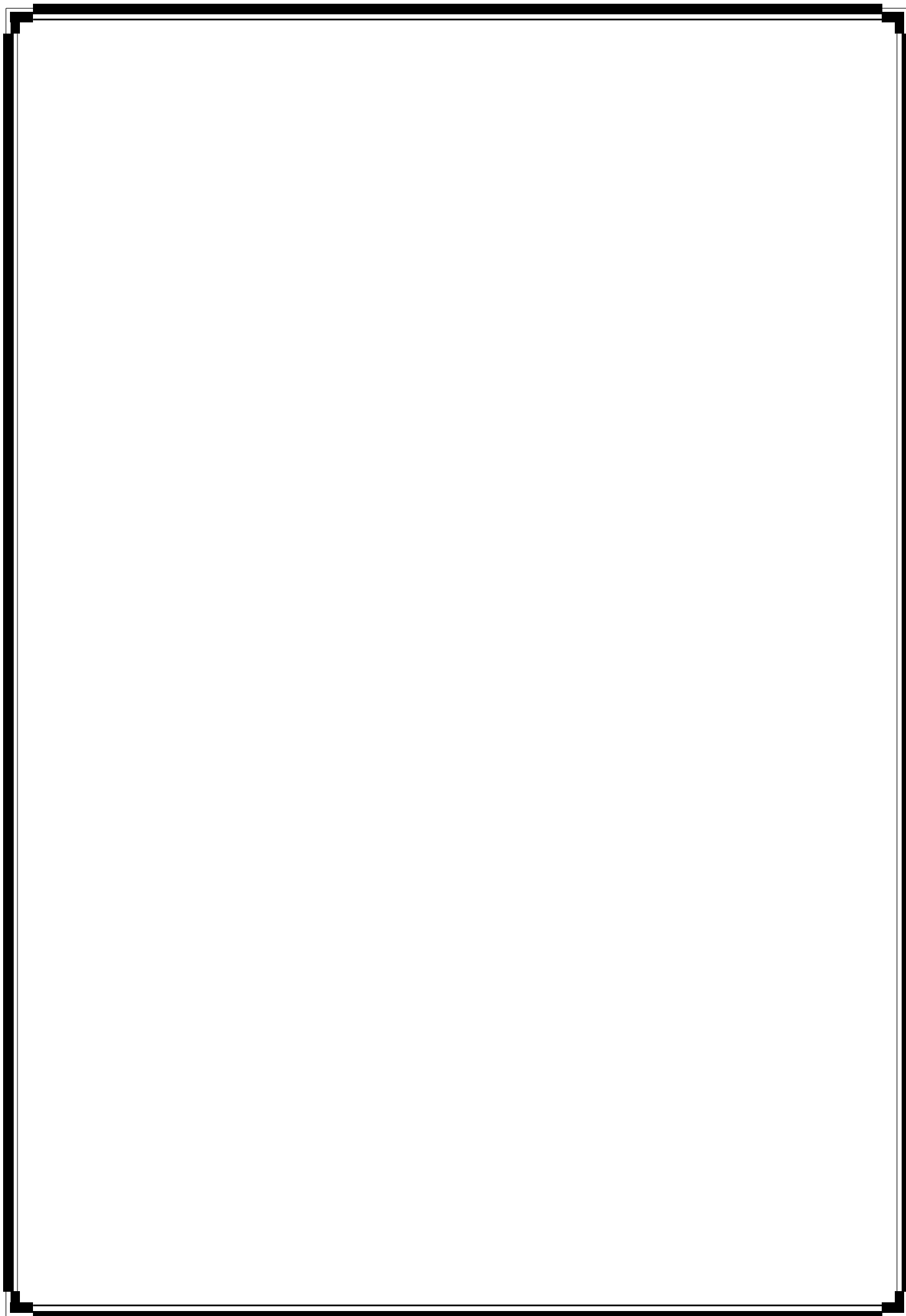
Présenté par :

Hamioud Essaid

Proposé et dirigé par :

Nasserdine Boudjerda et Hassen Bellila

Année universitaire : 2017/2018



Remerciements

Avant tout, mes remerciements vont à Allah le tout puissant, pour le courage et la force qu'il m'a donnés pour mener ce travail jusqu'à la fin.

*Je souhaite tout d'abord adresser un très grand remerciement et le plein respect de la vertu aux personnes qui m'ont encadré **Mr Nasserdine Boudjerda** enseignant à l'université de Jijel et **Mr Bellila Hassen** enseignant à l'université de Oum el bouaghi*

Je veux exprimer par ces quelques lignes de remerciements notre gratitude envers tous ceux qui par leur présence, leur soutien leur disponibilité et leurs conseils, nous avons donné le courage d'accomplir ce projet.

En fin, je ne peux achever ce mémoire sans exprimer ma gratitude à tous les enseignantes et les enseignants du département d'électrotechnique de l'université de Jijel pour leur dévouement et leur assistance tout au long de mes études universitaires

Dédicace

J'exprime ma gratitude et mes remerciements les plus sincères et les plus Profonds à Dieu tout puissant qui m'a donné la force et la patience pour pouvoir accomplir ce travail à terme.

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à mes parents les deux chères du monde qui m'ont appris les grandes valeurs et le sens de l'humanité que dieu les protège.

A ma chère sœur pour les encouragements, la confiance et le soutien moral dont elle a fait le long de ce travail.

A toute ma famille

Mes amis

A toute la promotion électrotechnique 2018

A tous ceux qui me sont chers

Said .H

TABLE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 :	
<u>GENERALITES SUR LA PUISSANCE REACTIVE ET LA TENSION DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES</u>	
 Introduction.....	3
I.1 Les réseaux électriques.....	4
I.2 La tension.....	4
2.1 Qualité de la tension.....	4
2.2 Dégradation de qualité de la tension.....	4
I.2.2. Dégradation de la qualité de la tension.....	5
I.2.2.1. Variation ou fluctuation de la	5
I.2.2.2. Fluctuation de tension (Flicker).....	6
I.2.2.3. Creux de tension.....	6
I.2.2.4. Interruption courte ou coupure brève.....	7
I.2.2.5. Bosses de tension	7
I.2.2.6. Chutes de tension.....	7
I.2.2.7. Tension et/ou courant transitoire.....	8
I.2.2.8. Déséquilibre de tension.....	8
I.2.2.9. Perturbations harmonique.....	9
I.3 La puissance réactive.....	10
I.3.1 L'importance de la puissance réactive.....	10
I.3.2 Facteur de puissance.....	10
I.3.3 Transport de la puissance active est réactive.....	11
I.3.4 Les contrôle dans le problème tension/Puissance réactive.....	11
I.3.4.1 Chute de tension sur une ligne.....	12
I.3.4.2 Contrôle de la tension.....	14
I.3.5 Compensation de la puissance réactive.....	14
I.3.5.1 Les groupes de production (générateurs).....	15
I.3.5.2 Les condensateurs.....	15
I.3.5.3 Les inductances.....	16
I.3.5.4 Les compensateurs synchrones.....	16
I.3.5.5 Les compensateurs statiques.....	16
I.4 Puissance transmissible sur une ligne.....	16
 Conclusion.....	18

CHAPITRE II**PRESENTATION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES FACTS**

Introduction	19
II.1. Les FACTS	20
II.2. Classification des dispositifs FACTS	20
II.3. Différentes Catégories des FACTS	21
II.4. Structure des principaux dispositifs FACTS	22
II.4.1. Compensateurs shunt	22
II.4.1.1. Compensateur shunt à base de thyristors	22
II.4.1.2 Compensateurs shunt STATCOM (STATicCOMpensator)	23
II.4.1.2.1. Principe de Fonctionnement	24
II.4.1.2.2 Effet de la compensation shunt (STATCOM) sur le réseau électrique ...	27
II.4.2 Compensateur séries	29
II.4.2.1 Compensateur séries à base de thyristors	29
II.4.2.2 Compensateur séries à base de GTO thyristors	29
II.4.2.2.1 Principe de fonctionnement	30
II.4.3 Compensateurs hybrides série – parallèle	31
II.4.3.1 SPS (Static Phase Shifter)	31
II.4.3.2 UPFC	32
II.5 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS	33
Conclusion	34

CHAPITRE III**MODELISATION ET COMMANDE DU STATCOM**

Introduction	35
III.1 Modélisation du STATCOM	35
III.1.1 Modèle mathématique simplifié	36
III.1.2 Contrôle du STATCOM	38
III.1.3 Détermination des références	38
III.1.4 La Méthode Watt Var découplée	40
III.1.5 Régulateur PI avec compensation de pôles	42
III.1.6 Régulation de la tension continue U_{dc}	43

<i>III.1.7 Commande de l'Onduleur</i>	44
<i>a. Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)</i>	44
<i>b. Commande par hystérésis</i>	45
<i>Conclusion</i>	46

CHAPITRE IV**SIMULATIONS ET RESULTATS**

<i>Introduction</i>	47
<i>IV.1. Simulation du STATCOM</i>	48
<i>IV.1.1. Description du réseau étudié</i>	48
<i>IV.1.2. Le Contrôle-Commande</i>	49
<i>IV.2. Essais de simulation</i>	50
<i>Conclusion</i>	56
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	57
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	58

Figure I.1: Exemple de Variation ou fluctuation de la fréquence.....	5
Figure I.2: Exemple de variation rapide de la tension.....	6
Figure I.3: Creux de tension.....	7
Figure I.4: Surtension transitoire.....	8
Figure I.5: Déséquilibre de tension.....	9
Figure I.6: Distorsion provoquée par un seul harmonique "h" (h = 5).....	9
Figure. I.7 : Circuit équivalent en π d'une ligne électrique.....	11
Figure I.8: Circuit équivalent du réseau électrique.....	12
Figure I.9: Diagramme vectoriel associé au circuit de la (figure I.8).....	12
Figure I.10: Diagramme des tensions pour une ligne compensée (tension constante)	14
Figure I.11: Ligne électrique alimentant une charge.....	16
Figure I.12: Ligne de charge du système.....	17
Figure II.1: Principaux dispositifs FACTS.....	21
Figure II.2. Structure et schéma équivalent d'un SVC.....	23
Figure II.3: structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.....	24
Figure II.4: STATCOM (Static Synchronous Compensator).....	25
Figure II.5: Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique.....	25
Figure II.6 : Exemple du courant et de la tension.....	27
Figure II.7: P_s Q_s P_{sh} et Q_{sh} en fonction de V_{sh}	28
Figure II.8: Le circuit et le schéma équivalent d'un TCSC.....	29
Figure II.9: Structure et schéma équivalent d'un SSSC.....	30
Figure II.10: Caractéristique statique du SSSC.....	30
Figure II.11: SSSC (static synchronous serie compensator).....	31
Figure II.12: Structure du SPS et son schéma équivalent.....	31
Figure.II.13. Compensateur Unifié UPFC (Unified power flow controller).....	32
Figure II.14: Schéma équivalent de Compensateur Unifier UPFC.....	33
Figure III.1: Schéma équivalent simplifié du STATCOM.....	36
Figure III.2: Passage du repère (abc) vers le repère (d, q).....	37
Figure III.3: Identification des courants de référence.....	39
Figure III.4: Transfert I_{shd} en fonction de X_1	40
Figure III.5: Transfert I_{shq} en fonction de X_2	41
Figure III.6: Régulation et découplage de I_{shd}	41
Figure III.7: Schéma de Régulation du STATCOM (Watt-Var découplés).....	42
Figure III.8: Schéma bloc de la Régulation PI des courants du STATCOM.....	42
Figure III.9: Régulation de la tension continue.....	44

Figure III.10: Principe de la MLI Sinus-Triangle.....	45
Figure III.11: Principe de la commande par hystérésis.....	45
Figure IV.1: Schéma unifilaire du réseau étudié.....	48
Figure IV.2: Schéma équivalente du réseau étudié en pu.....	48
Figure IV.3: Tension I_r dans ligne chargée sans STATCOM.....	50
Figure IV.4: Courant dans ligne chargée sans STATCOM.....	51
Figure IV.5: Courant du STATCOM I_{shd} et I_{shd_ref}	51
Figure IV.6: Courant du STATCOM I_{shq} et I_{shq_ref}	52
Figure IV.7: Puissance Q_{sh} du STATCOM.....	53
Figure IV.9: Régulation de la tension continue U_{dc}	54
Figure IV.10: Puissance active transportée par la ligne.....	54
Figure IV.11: Puissance réactive transportée par la ligne.....	54
Figure IV.12: Tension V_{rd} avant et après compensation	55
Figure IV.13: Tension V_r avec compensation.....	55

Introduction Générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement [1]. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel [2].

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissance indésirables entre zones interconnectées, subissent des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes. Les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateur à prises régleur en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes [3].

Le développement des dispositifs FACTS (**F**lexible **A**lternative **C**urrent **T**ransmission **S**ystem) ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

La nouvelle génération des systèmes FACTS est constituée principalement par des convertisseurs de tension (ou courant), à base des interrupteurs statiques modernes (GTO ou IGBT) commandées en ouverture et en fermeture, liés à des condensateurs comme source de tension continue. Ces convertisseurs selon leur connexion au réseau sont distingués en compensateurs shunt, série et hybride tels que : STATCOM, SSSC, UPFC respectivement.

L'objectif de ce modeste travail est d'étudier les fonctions de contrôle offert par le STATCOM dans la compensation de la puissance réactive aussi que le maintien de la tension. Cette étude qui est organisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre a donné une brève revue sur l'opération de transport de l'énergie électrique ainsi que le besoin du maintien de la tension et les bénéfices de la compensation shunt. Les techniques traditionnelles de compensation shunt et série sont exposées.

Le deuxième chapitre est consacré à une exploration rapide dans l'historique des systèmes FACTS et la description de la structure de ce dispositifs STATCOM), une explication en détail

des principes de leurs fonctionnements et puis la contribution de ces derniers et leurs effets dans le contrôle des réseaux électriques est montrée.

La modélisation de dispositif STATCOM a fait l'objectif du troisième chapitre. La stratégie de commande Watt-Var découplé adoptée pour le contrôle des courants actifs et réactifs de ce dispositif est expliqué ainsi que le calcul de tous les régulateurs proportionnels intégraux.

Afin de valider la théorie et les modèles exposés dans les chapitres précédents une simulation structurée est exécutée dans l'environnement Matlab-Simulink de ce contrôleur intégré dans un réseau simple de transport de l'énergie électrique. Les courbes de la majorité des paramètres du réseau dans plusieurs cas de simulation sont présentées et interprétées dans ce quatrième chapitre.

Enfin, on présentera une conclusion générale et proposera des perspectives d'études futures permettant de compléter ce travail.

Introduction

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits soient inférieurs aux capacités de transport de chaque ouvrage du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont la puissance réactive et le niveau de tension. La tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation, dans ce cas, les transits à travers les lignes du réseau sont importants, ce qui provoque une chute de tension dans ces lignes.

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Il est évident que la qualité et la continuité de la tension est devenue un sujet stratégique pour plusieurs raisons concernent l'exploitation des réseaux électriques. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce premier chapitre, dans lequel nous nous intéressons à quelques généralités sur les réseaux électriques comme la qualité d'énergie, les chutes de tension et les techniques de compensation de la puissance réactive [1].

I.1. Les réseaux électriques

L'énergie électrique est produite en même temps qu'elle est consommée, donc, en permanence, la production doit s'adapter à la consommation. De ce fait, l'ensemble production, acheminement, utilisation constitue un système complexe appelé réseau électrique. Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble. Dans tous les cas, ses caractéristiques s'expriment en termes de :

- grandeurs électriques.
- disposition spatiale.
- données temporelles.

Les grandeurs électriques sont :

- La tension
- La fréquence

Ces grandeurs de base sont influencées par l'intensité du courant dans les lignes et les câbles ; laquelle est liée aux puissances actives et réactives générées, transportées et consommées.

I.2. La tension

I.2.1. La qualité de la tension

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement. Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales :

- Fréquence.
- Amplitude.
- Forme d'onde.
- Symétrie.

Pour le réseau synchrone algérien, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale, mesurée, doit se trouver dans l'intervalle de 50 Hz \pm 1 %. Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires de réseaux concernés (zones de réglage), qui doivent participer aux réglages primaire et secondaire de la fréquence.

Le gestionnaire du réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre de 10 % autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite, plusieurs types de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension :

- Les creux de tension et coupures brèves.
- Les variations rapides de tension (Flicker).
- Les surtensions temporaires ou transitoires.

Les deux premières catégories posent les problèmes les plus fréquents (plus grande difficulté de s'en protéger) [4].

I.2.2. Dégradation de la qualité de la tension

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de [4] :

Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients :

- Court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc.
- Causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).
- Matérielles (vieillessement d'isolants...).
- Humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...).

Installations perturbatrices :

- Fours à arc.
- Soudeuses.
- Variateurs de vitesse.
- Toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent,
- Démarrage ou commutation d'appareils, etc....

Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de la tension - lorsque celle-ci est présente - sont brièvement décrits ci-après.

I.2.2.1. Variation ou fluctuation de la fréquence

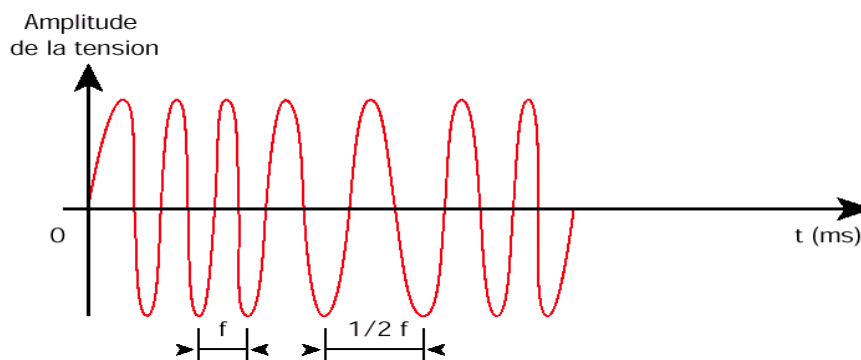


Figure I.1: Exemple de Variation ou fluctuation de la fréquence

Les fluctuations de la fréquence sont observées le plus souvent sur les réseaux non interconnectés ou les réseaux sur groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$. La (figure I.1) présente un exemple qui illustre cette fluctuation de la fréquence.

I.2.2.2. Fluctuation de tension (Flicker)

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (figure I.2), sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc. [5] [6].

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (Flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à 10 %.

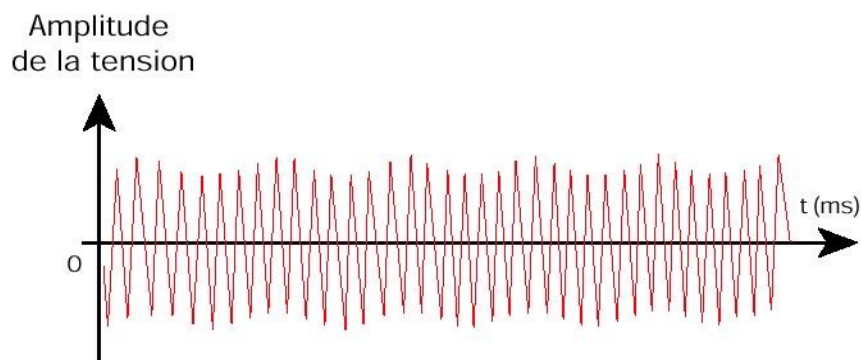


Figure I.2: Exemple de variation rapide de la tension

I.2.2.3. Creux de tension

Les creux de tension sont produits par des court-circuit survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle (figure I.3). Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des "fluctuations de tension"). Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1 - 0.2 s en HT, 0.2 s à quelques secondes en MT). [4]

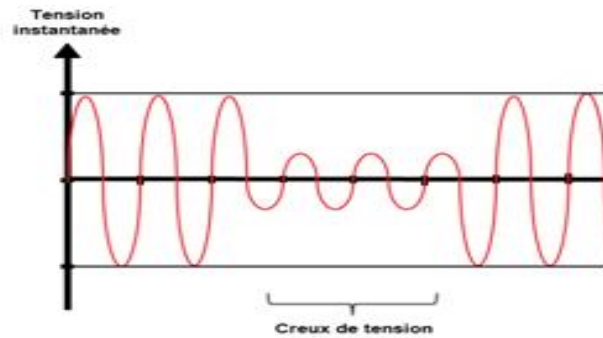


Figure I.3: Creux de tension

Ils sont caractérisés par leurs : amplitude et durée et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concerné.

Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...).

I.2.2.4. Interruption courte ou coupure brève

L'interruption courte est la perte complète ou la disparition de la tension d'alimentation pendant une période de temps de 1/2 cycle jusqu'à 3 s. Elle se produit quand la tension d'alimentation ou le courant de charge diminue à moins de 0.1 pu, [2].

Le dégagement du défaut de tension et les coupures brèves sont principalement produits par les courts-circuits imputables aux incidents naturels du réseau et aux manœuvres d'organes de protection éliminant ces défauts. Ils sont également la conséquence d'appel de puissances importantes lors de la mise en service de certaines charges du réseau.

I.2.2.5. Bosses de tension

La bosse de tension est une augmentation de la tension au-dessus de la tension nominale pour une durée de 0.5 cycle à 60 s. Elle est caractérisée par son amplitude et sa durée. Elle peut causer l'échauffement et la destruction des composants [7].

I.2.2.6. Chutes de tension

Une chute de tension est une brève diminution ou bien une disparition complète de la tension.

Elle se caractérise par sa durée et par la tension résiduelle, généralement exprimée en pourcentage de la valeur RMS de la tension, au point le plus bas pendant la chute de tension. C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. À la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales [7].

I.2.2.7. Tension et/ou courant transitoire

Les surtensions transitoires illustrées sur la (figure I.4) sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz ou 60Hz pendant une durée inférieure à une seconde. Quelques équipements tels que les dispositifs électroniques sont sensibles aux courants/tensions transitoires [1].

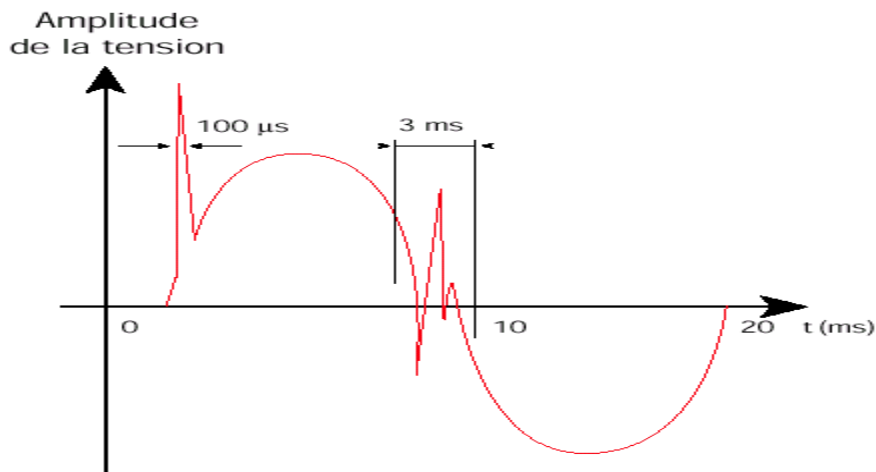


Figure I.4: Surtension transitoire

I.2.2.8. Déséquilibre de tension

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau (figure I.5). Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire.

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° [7].

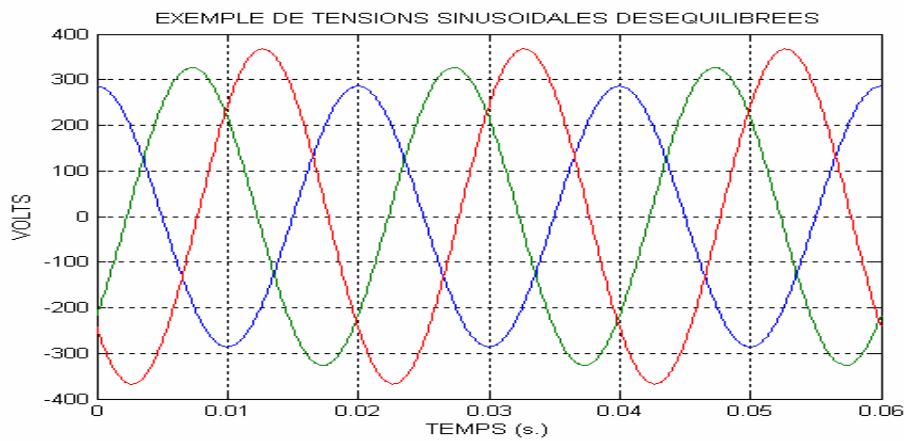


Figure I.5: Déséquilibre de tension

I.2.2.9. Perturbations harmoniques

On entend par harmonique, toute perturbation non transitoire affectant la forme d'onde de tension du réseau électrique [1].

Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale et l'amplitude est divisée par le rang d'harmonique (h) (l'amplitude de l'harmonique est inférieure de h fois de l'amplitude fondamentale) (figure I.6), qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale. Ils sont principalement dus à des installations non linéaires telles que les convertisseurs ou les gradateurs électroniques, etc.

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer un échauffement excessif de certains équipements [4].

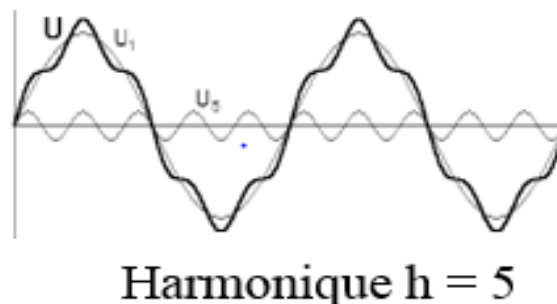


Figure I.6: Distorsion provoquée par un seul harmonique "h" ($h = 5$)

I.3. La Puissance Réactive

Les réseaux électriques à courant alternatif fournissent l'énergie apparente qui correspond à la puissance (ou puissance appelée). Cette énergie se décompose en deux formes d'énergie [7] :

- L'énergie active : transformée en énergie mécanique (travail) et en chaleur (pertes).
- L'énergie réactive : utilisée pour créer des champs magnétiques.

Les consommateurs de puissance réactive sont les moteurs asynchrones, les transformateurs, les inductances et les convertisseurs statiques (redresseurs).

I.3.1 Importance de la puissance réactive

L'énergie réactive est un facteur très important qui influe sur la stabilité et l'équilibre du réseau électrique, ainsi que son fonctionnement. Les effets secondaires de ce facteur ce résume dans les points suivants :

- a) La chute de tension dans les lignes et les postes de transformation.
- b) Les pertes supplémentaires actives dans les lignes, les transformateurs et les générateurs.
- c) Les variations de tension du réseau sont étroitement liées à la fluctuation de la puissance réactive dans le système de production [7].

I.3.2 Le facteur de puissance

C'est le quotient de la puissance active consommée et de la puissance apparente fournie.

$$F = \frac{P}{S} = \cos(\varphi) \quad (\text{I.1})$$

Le $\cos\varphi$ est le facteur de puissance qui est fondamental et ne prend pas en compte la puissance véhiculée par les harmoniques.

- Un facteur de puissance proche de 1 indique une faible consommation d'énergie réactive et optimise le fonctionnement d'une installation. Il permet d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateur de puissance réactive.
- Un facteur de puissance égal à 1 ne conduira à aucune consommation de la puissance réactive (résistive pure).
- Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à consommation (ou à une production) de la puissance réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de 0 (inductive pure).

Dans une installation électrique, le facteur de puissance pourra être différent d'un atelier à un autre, selon les appareils installés et la manière dont ils sont utilisés (fonctionnement à vide, pleine charge...).

I.3.3. Transport de la puissance active et réactive

Quand un régime permanent de circulation d'énergie est établi dans un réseau électrique.

En schématisant chaque liaison (du sommet i au sommet k) par un π symétrique tel que ($i=1$, $k=2$), (figure I.7).

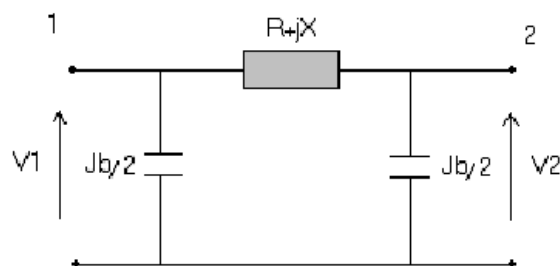


Figure. I.7. Circuit équivalent en π d'une ligne électrique.

Les lignes sont normalement spécifiées par :

- Une impédance série : $Z = R + jX$
- Une admittance shunt : $Y = G + jB$

En pratique G est extrêmement petit ($G = 0$) et par conséquent $jB = j\omega C$ où B représente la susceptance shunt.

I.3.4. Les contrôles dans le problème tension / puissance réactive

Un système est dit bien conçu s'il peut délivrer une énergie d'alimentation fiable et de bonne qualité, par bonne qualité on entend un niveau de tension dans des limites acceptables.

Chaque fois que le niveau de tension en un point du système est soumis à des variations cela est dû à un déséquilibre entre la puissance fournie et consommée.

En effet quand une charge est alimentée à travers une ligne de transmission dont la tension de départ est constante, la tension de la charge dépend de l'amplitude du courant de la charge et du facteur de puissance de la charge. La variation de tension en un nœud est un indicateur de déséquilibre entre la puissance réactive délivrée et celle consommée cependant une importation de la puissance réactive donne une augmentation des pertes de puissances et de la chute de tension à travers l'impédance d'alimentation.

I.3.4.1. Chute de tension sur une ligne

Afin d'illustrer les relations entre la puissance réactive et la chute de tension, considérons le circuit équivalent ci-dessous (figure I.8).

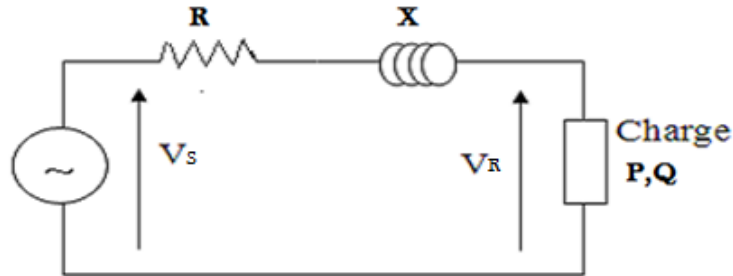


Figure I.8: Circuit équivalent du réseau électrique

La chute de tension due au courant I dans l'impédance.

$$Z = R + jX \text{ et } \Delta V = ZI = V_s - V_r \quad (\text{I.2})$$

Le tracé du diagramme vectoriel de ce circuit est donné en figure I.9.

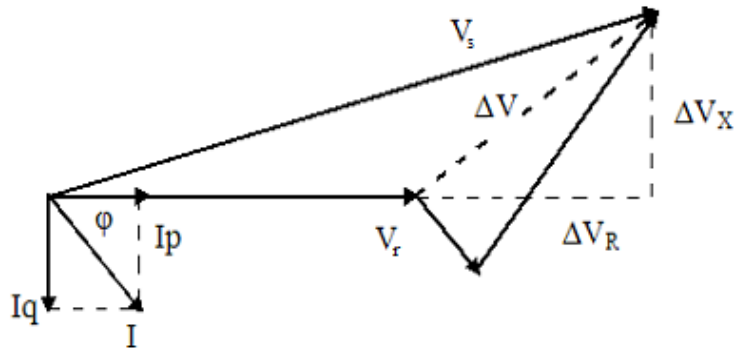


Figure I.9: Diagramme vectoriel associé au circuit de la figure I.8

$$S = V_r \times I^* = P + jQ \quad (\text{I.3})$$

$$I = (P - jQ) / V_r \quad (\text{I.4})$$

$$\Delta V = ZI = (R + jX)(P - jQ) / V_r \quad (\text{I.5})$$

$$\Delta V = \frac{(RP + XQ)}{V_r} + j \frac{(XP - RQ)}{V_r} \quad (\text{I.6})$$

$$\Delta V = \Delta V_R + j\Delta V_X \quad (\text{I.7})$$

C'est-à-dire que la chute de tension a une composante ΔVR en phase avec V_r et une composante ΔVX en quadrature avec V_r .

Il est clair que la chute de tension dépend simultanément de la puissance active et réactive de la charge.

Comme $\Delta V = V_s - V_r$ donc $V_s = V_r + \Delta V$ et en considérant V_s égale 1 :

$$|V_s|^2 = |V_r + \Delta VR|^2 + |\Delta VX|^2 \quad (\text{I.8})$$

$$|V_s|^2 = \left| V_r + \frac{(RP + XQ)}{V_r} \right|^2 + \left| \frac{(XP - RQ)}{V_r} \right|^2 \quad (\text{I.9})$$

Comme $\Delta VX \ll (V_r + \Delta VR)$ on peut approximer:

$$|V_s|^2 = \left| V_r + \frac{(PR + XQ)}{V_r} \right|^2 \quad (\text{I.10})$$

$$V_s - V_r = \frac{PR + XQ}{V_r} = \Delta V \quad (\text{II.11})$$

Puisque la réactance X est le paramètre prédominant dans l'impédance du réseau c'est-à-dire $R \ll X$, on peut écrire :

$$\Delta V = V_s - V_r \approx \frac{XQ}{V_r} \quad (\text{I.12})$$

Donc la cause de la chute de tension à travers une impédance est due principalement au courant réactif passant dans cette impédance, ou en d'autres termes elle est due à la variation de la puissance réactive. [10]

Pour maintenir V_r constante si le courant I change, il faut varier la puissance réactive au point de raccordement de la charge.

I.3.4.2 Contrôle de la tension

La chute de tension sur un élément de réseau s'exprime par l'équation (I.12) donnée précédemment. L'examen de cette équation montre que pour maintenir V_r constante au niveau du consommateur, on dispose de plusieurs solutions à savoir :

- Augmentation de la tension de départ V_s .
- Diminution de la réactance de la ligne par insertion de réactance capacitive.
- Fourniture de la puissance réactive au niveau des usagers (compensation de la puissance réactive). Cette compensation peut être obtenue soit par :
 - La connexion de capacité shunts ;
 - La connexion de compensateur synchrone ;
 - La connexion de réactance shunt (pour les faibles charges, ou charges capacitatives) [7].

En connectant un compensateur de puissance réactive en parallèle avec la charge, il sera possible de maintenir la tension V_r égale en module à la tension V_s . La puissance réactive totale connectée au jeu de barre de charge sera remplacée par $Q_s = Q_\delta + Q$, où Q_δ est la puissance réactive injectée par le compensateur et qui sera ajustée pour faire tourner le vecteur ΔV jusqu'à ce que la tension V_r sera égale à la tension V_s (figure I.10).

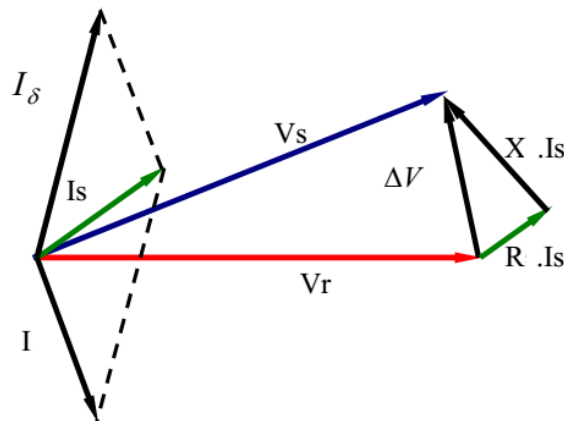


Figure I.10: Diagramme des tensions pour une ligne compensée (tension constante)

I.3.5. Compensation de la puissance réactive

Le bilan global de la puissance réactive produite et consommée dans l'ensemble du système électrique doit être équilibré. Toutefois, l'équilibre local n'est pas naturel. Il en résulte des transits de la puissance réactive. Or, ces transits provoquent des chutes de tension et des pertes. Il faut, donc, éviter ces transits par la production de la puissance réactive, autant que possible, à l'endroit où elle est consommée.

Les variations de tension du réseau sont étroitement liées aux fluctuations de la puissance réactive dans le système de production et de transport. Ceci tient au fait que la puissance réactive intervient de manière importante dans l'expression de la chute de tension.

L'analyse des variations de la demande de la puissance réactive montre que le problème de l'adaptation offre-demande présente deux aspects qui nécessitent l'emploi de dispositifs aux caractéristiques très différentes [5] :

- Le premier consiste à suivre les fluctuations périodiques. Celles-ci sont connues, tout au moins pour les charges dans une large mesure prévisible. Une grande part de l'ajustement peut donc être réalisée à l'aide de moyen dont l'action est discontinue et le temps de réponse relativement long. Cette catégorie comprend les batteries de condensateurs et les inductances installées sur les réseaux.
- Le second consiste à faire face aux variations brusques et aléatoires. Ceci nécessite la mise en œuvre de moyens dont le temps de réponse est très court. Cette catégorie comprend les groupes de production ainsi que les compensateurs synchrones et les compensateurs statiques.

I.3.5.1. Les groupes de production (générateurs)

Les groupes de production sont bien situés pour satisfaire les besoins en énergie réactive. D'autant plus, leurs performances dynamiques leur permettent de faire face aux fluctuations brusques de la demande. En revanche, ils ne peuvent compenser que partiellement les charges réactives, en raison des chutes de tension importantes que créent les transits d'énergie réactive sur les réseaux.

I.3.5.2 Les condensateurs

Ils ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges dans le réseau. On distingue deux types :

- Des batteries de condensateurs HT, raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.
- Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport. Elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension.

I.3.5.3. Les inductances

Elles sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie en heures creuses par les lignes à très haute tension ou par les câbles. Elles sont soit directement raccordées au réseau, soit branchées sur les tertiaires des transformateurs. Par conséquent, elles permettent une limitation des surtensions dans le réseau.

I.3.5.4. Les compensateurs synchrones

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes qui ne fournissent aucune puissance active, mais qui peuvent suivant qu'elles soient sous ou surexcitées, fournir ou absorber de la puissance réactive.

I.3.5.5 Les compensateurs statiques

Ils sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors, montés en tête-bêche dans chaque phase, [9].

I.4. Puissance transmissible sur une ligne

L'énergie électrique est transportée par des lignes électriques de capacités limitées à cause des limites thermiques des câbles, des tensions appliquées aux bornes et de l'angle de charge δ . Les puissances transmises par une électrique radiale sont données par les formules qui suivent :

Considérant la (figure I.11) qui représente une ligne électrique alimentant une charge ($P + jQ$). En admettant que la résistance de la ligne est très faible, vis-à-vis sa la réactance l'impédance, nous aurons : $Z_s = jX_s$. [10].

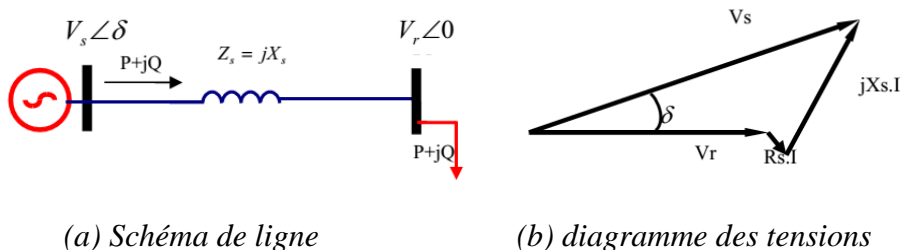


Figure I.11: Ligne électrique alimentant une charge

En prenant la tension aux bornes de la charge comme référence des phase (figure I.11), en négligeant la résistance R_s , le courant sera en phase avec V_r , La puissance demandé par la charge sera donnée par les équations qui suivent :

$$S_r = P + jQ = V_r \cdot I_r^* \text{ Avec } I_r = \frac{V_s - V_r}{Z_s}$$

$$P = \frac{V_s \cdot V_r}{X_s} \sin \delta \tag{I.13}$$

$$Q = \frac{V_s \cdot V_r}{X_s} \cos \delta - \frac{V_r^2}{V_s} \tag{I.14}$$

La relation entre la tension au jeu de barre de charge et le courant de charge I est décrite par la droite de la (figure I.12) appelée ligne de charge du système qui est définie par l'équation d'une droite qui passe par V_s et de pente $-Z_s$:

$$V_s - V_r = Z_s \times I \Rightarrow V_r = -Z_s \times I + V_s$$

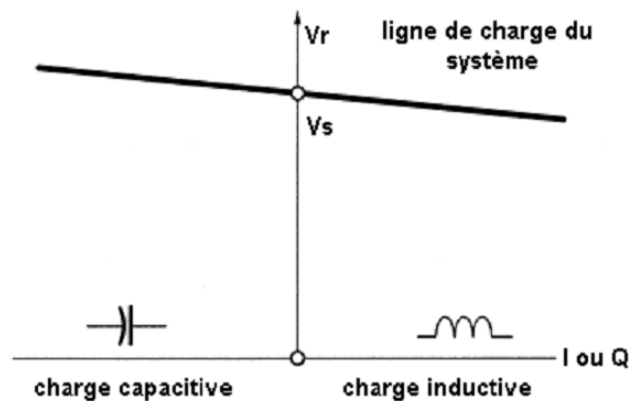


Figure I.12: Ligne de charge du système.

Conclusion

Ce chapitre a traité les différents phénomènes perturbateurs qui influents sur la qualité de tension, ainsi que les différents moyens de compensation conventionnelle de la puissance réactive.

Cela nous persuade que le contrôle de tension et l'optimisation de la puissance réactive est un objectif important pour maintenir un profil adéquat dans les réseaux électriques.

Actuellement il existe une méthode moderne et sophistiquée pour le contrôle de tension et pour optimiser la puissance réactive dans les réseaux électriques. Cette méthode utilise les dispositifs FACTS (basées sur l'électronique de puissance). Ces dispositifs seront traités en détail dans le prochain chapitre.

Introduction

Avec le développement technologique et industriel que vit le monde entier, la demande en énergie électrique est en augmentation continue et sans cesse. Pour satisfaire ces besoins et acheminer cette énergie aux points de consommation dispersés sur un large espace géographique ; les réseaux électriques ayant des capacités de transit limitées à cause des limites thermique des lignes, doivent s'élargir et de nouvelles lignes d'extension seront ajoutées. Face à ce problème et devant les contraintes environnementale, écologique et économique de reconstructions de nouvelles lignes, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS "Flexible Alternating Current Transmission System" afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques et d'augmenter leurs capacités de transfert.

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

Dans ce chapitre, nous présentons un certain nombre de FACTS et nous donnons leurs principes de fonctionnements et leurs applications. Nous nous intéressons particulièrement à la catégorie appelée "STATCOM : STATic COMPensator" qui sera développée, car elle fera l'objet de nos applications dans les chapitres qui suivent.

II.1. Les FACTS

D'après IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), FACTS «Flexible Alternative Current Transmission Systems » est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT...). Ces équipements permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique, c'est-à-dire les différents paramètres du réseau électrique : tension, impédance, déphasage, etc.

La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, ils 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, [10].

II.2. Classification des dispositifs FACTS

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés [11].

1. La première génération est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.
2. La deuxième génération, dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO et les transistors de puissance. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.
3. Une troisième génération de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.

Une autre classification des contrôleurs FACTS peut être effectuée, elle est basée sur les cinq caractéristiques indépendantes suivantes [12] :

- Selon le type de Raccordement sur le réseau (Connexion) ;
- Selon le mode de Commutation ;
- Selon la Fréquences de Commutation ;

- Selon le mode de Stockage d'énergie ;
- Selon le mode de Connexion au Port DC.

Selon ces critères, trois familles de dispositifs FACTS peuvent être mises en évidence :

- Les dispositifs shunt connectés en parallèle dans les postes du réseau.
- Les dispositifs séries insérées en série avec les lignes de transport.
- Les dispositifs combinés série-parallèle qui recourent simultanément aux deux couplages

II.3. Différentes Catégories des FACTS

la figure II.1 représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques [9] ; la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composants de base (R L C) et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variables commandées par des interrupteurs mécaniques. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commandés avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance.

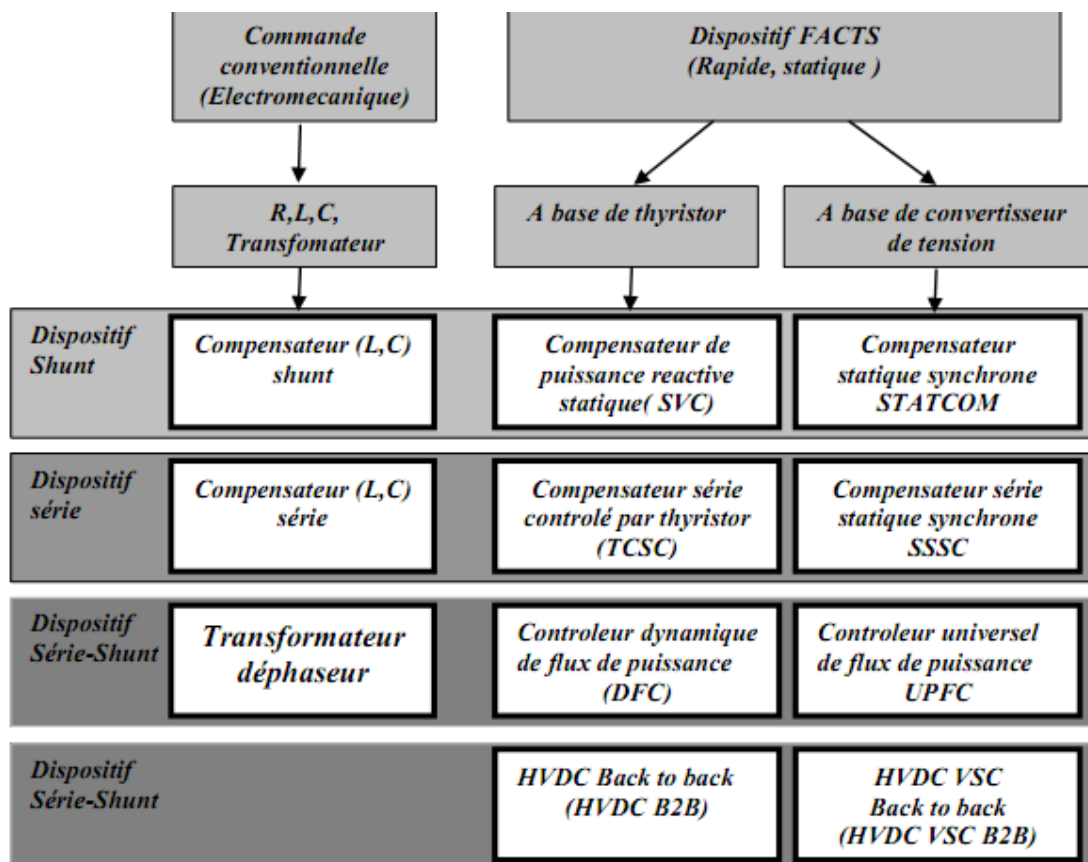


Figure II.1: Principaux dispositifs FACTS.

Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau, en général les FACTS sont divisé en trois grandes catégories principales [13] :

- **Les compensateurs parallèles** appelés aussi compensateurs de puissance réactive. Ils contrôlent le 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 agissent 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 hybrides** associent compensateurs séries et parallèles, qui sont commandés d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie.

Ces compensateurs modifient les flux de puissances active et réactive en agissant sur tous les paramètres : tension, angle, impédance.

II.4. Structure des principaux dispositifs FACTS

II.4.1. Compensateurs shunt

II.4.1.1. Compensateur shunt à base de thyristors

- **TCR** (Thyristor Controlled Reactor) ; Le TCR ou RCT : (Réactances Commandées par Thyristors), est une inductance branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelles. La valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors, [14].
- **TSC** (Thyristor Switched Capacitor) ; Le TSC ou CCT : (Condensateurs Commandés par Thyristor), un TSC comprend un condensateur branché en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle et une inductance d'atténuation.
- **SVC** (Static Var Compensator) ; L'association des dispositifs TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtre d'harmoniques constitue le compensateur statique d'énergie réactive. La figure (II.2) montre le schéma de base d'un SVC et sa caractéristique statique [3] [14].

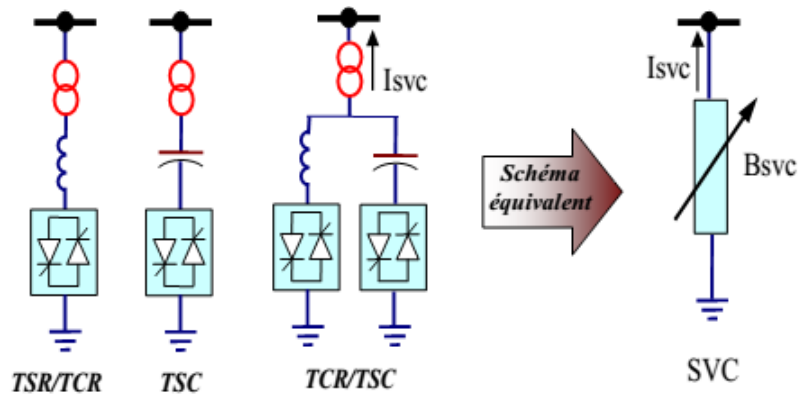


Figure II.2. Structure et schéma équivalent d'un SVC.

Un SVC supposé idéal ne contient pas de composant résistif $G_{SVC} = 0$, (G_{svc} : conductance) donc il ne consomme pas d'énergie active du réseau. Sa puissance réactive est fonction de la tension au jeu de barre de connexion et de la susceptance B_{svc} , [10].

$$P_t = 0 ; Q_t = -|V_t|^2 \cdot B_{svc} .$$

II.4.1.2 Compensateurs shunt STATCOM (STATICCOMPensator)

Le concept de base du STATCOM a été proposé par Gyugyien 1976 [10]. Il correspond à une version des SVC composée d'un convertisseur de tension à base de semi-conducteur de haute technologie (IGBT, IGCT) associé à un condensateur comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle au réseau par le biais d'un transformateur de couplage comme représenté dans la (figure II.3) [1] [3].

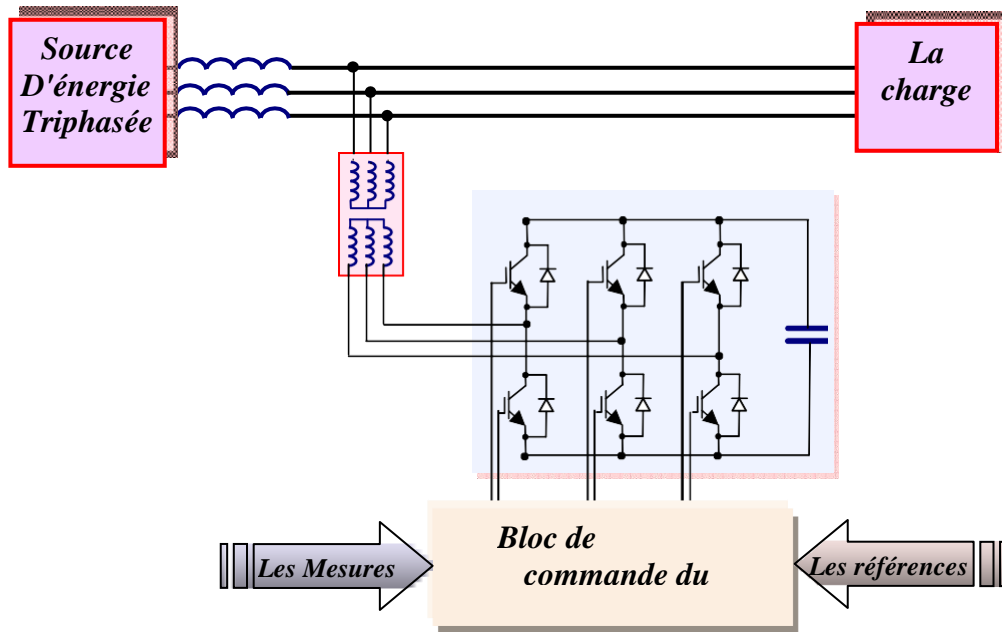


Figure II.3: Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.

II.4.1.2.1. Principe de Fonctionnement

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent la régulation de la tension au jeu de barre où ils sont connectés. Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasé synchrone avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau. En général la tension du STATCOM V_{sh} est injectée en phase avec la tension V_t de la ligne et dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le STATCOM comme le résume la (figure II.4) [10] [15].

N.B. *Ce dispositif est bien détaillé dans ce paragraphe car il fera l'objet d'une étude plus approfondie dans la suite de ce mémoire.*

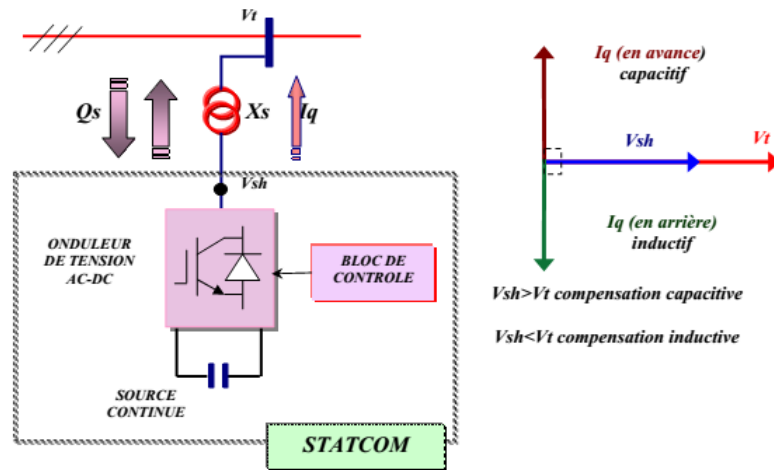


Figure II.4: STATCOM (Static Synchronous Compensator)

Soit le schéma équivalent de ce dispositif avec le système énergétique (source, ligne et charge) est donné par la figure (II.5).

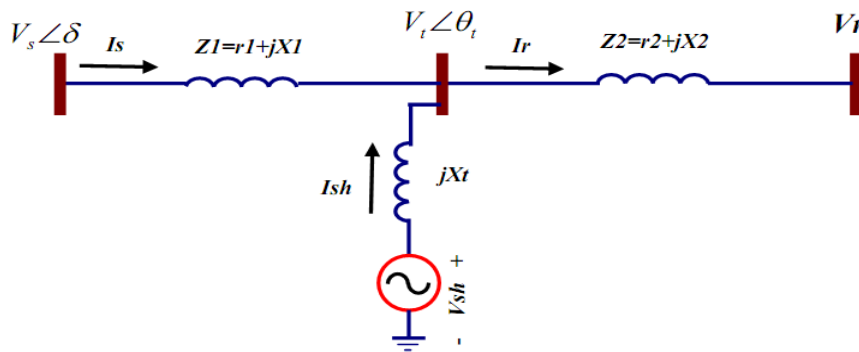


Figure II.5: Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique

Le courant injecté par le STATCOM est donné par :

$$\bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_{sh} - V_t}{jX_t} \quad (II.1)$$

La puissance injectée au jeu de barre "t" est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{S} = \bar{V}_t \cdot \bar{I}_{sh}^* = \frac{\bar{V}_t \cdot (\bar{V}_{sh}^* - \bar{V}_t^*)}{-jX_t} = \frac{\bar{V}_t \cdot \bar{V}_{sh}^* - V_t^2}{-jX_t} \quad (II.2)$$

D'où on aboutit aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre "t" exprimées comme suit :

$$P_{sh} = -V_t \cdot V_{sh} \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t \quad (II.3)$$

$$Q_{sh} = V_t (V_{sh} \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t) / X_t \quad (II.4)$$

Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau.

$$\text{Donc: } P_{sh} = -V_t V_{sh} \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t = 0$$

$$\text{D'où la condition } (\theta_t - \theta_{sh}) = 0 \quad \text{donc } \theta_t = \theta_{sh}$$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM \bar{V}_{sh} doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement [16] [17].

Cependant il y a toujours, dans la pratique, une petite quantité de la puissance active absorbée à partir du réseau pour couvrir les pertes des interrupteurs du convertisseur du STATCOM et les pertes au niveau du transformateur de couplage et pour maintenir la tension DC aux bornes du condensateur constante.

Comme les tensions V_{sh} et V_t (Fig. II.4) sont en phase le courant I_{sh} du STATCOM, en quadrature avec la tension V_t , est donc un courant réactif son amplitude et sa puissance réactive correspondante échangée avec le réseau sont données par les équations suivantes:

En admettant que la tension V_{sh} est sur l'axe d (comme référence des phases):

$$V_{shd} = V_{sh} \text{ et } V_{shq} = 0$$

$$|I_{sh}| = I_{shq} = \frac{V_{sh} - V_t}{jX_t} \quad \text{(II.5)}$$

$$Q_{sh} = V_{sh} \cdot I_{shq} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}\right) \quad \text{(II.6)}$$

A partir de l'équation (II.6) il apparait clairement que si le module de la tension du STATCOM (V_{sh}) égale le module de la tension (V_t) du réseau aucun transfert de l'énergie n'est effectué.

Si $V_{sh} > V_t$, donc $Q_{sh} > 0$, le STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau. (Fig. II.6.a).

Si $V_{sh} < V_t$ alors $Q_{sh} < 0$, le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductive (Fig. II.6 .b).

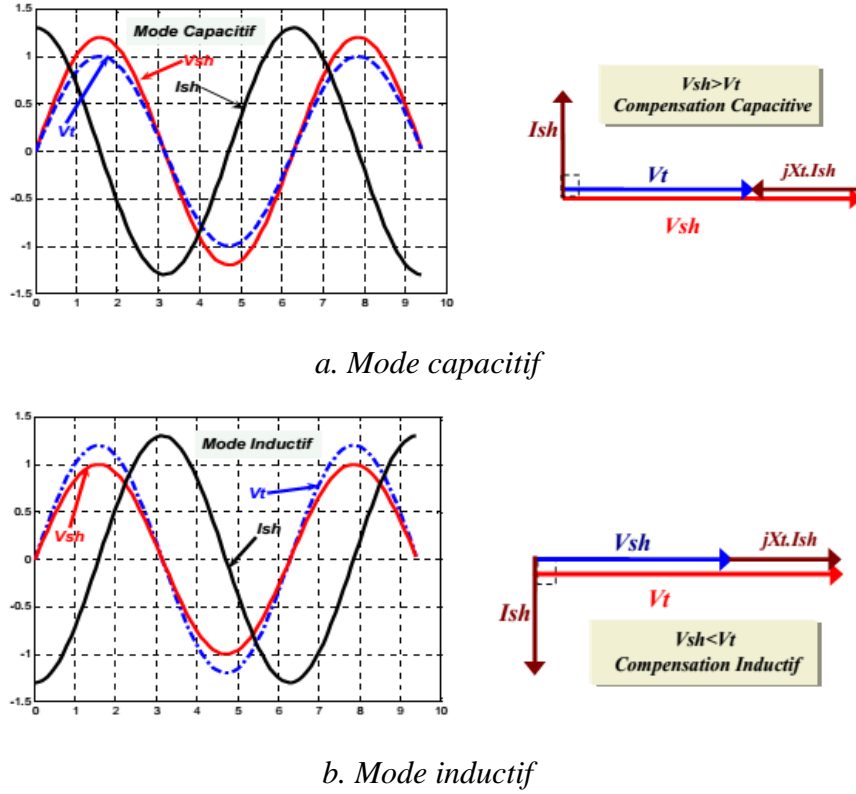


Figure II.6. Exemple du courant et de la tension

II.4.1.2.2. Effet de la compensation shunt (STATCOM) sur le réseau électrique

Pour étudier les relations entre le réseau électrique et le STATCOM, nous allons adopter pour le modèle mathématique de la (figure II.5) qui représente le schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un STATCOM installé dans une ligne de transport. Les équations des courants I_s , I_{sh} et I_r sont les suivantes :

$$\bar{I}_s = \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (\text{II.7})$$

$$\bar{I}_{sh} = \frac{-\bar{Z}_2 \bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \cdot \bar{V}_{sh} - Z_1 \cdot V_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (\text{II.8})$$

$$\bar{I}_r = \frac{jX_t \bar{V}_s - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_{sh} - (Z_1 + Z_2) \cdot V_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (\text{II.9})$$

Les puissances injectées par la source V_s peuvent être calculée à partir des équations :

$$P_s = \text{Re}(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = \text{Re} \left[\bar{V}_s \cdot \left(\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (\text{II.10})$$

$$Q_s = \text{Im}(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = \text{Im} \left[\bar{V}_s \cdot \left(\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right) \right] \quad (\text{II.11})$$

Les puissances délivrées par le STATCOM données par les équations (II.12) et (II.13) sont représentées sur la (figure II.7) [10].

$$P_{sh} = \text{Re}(\bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^*) = \text{Re} \left[\bar{V}_s \cdot \left(\frac{-\bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (\text{II.12})$$

$$Q_{sh} = \text{Im}(\bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^*) = \text{Im} \left[\bar{V}_s \cdot \left(\frac{-\bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (\text{II.13})$$

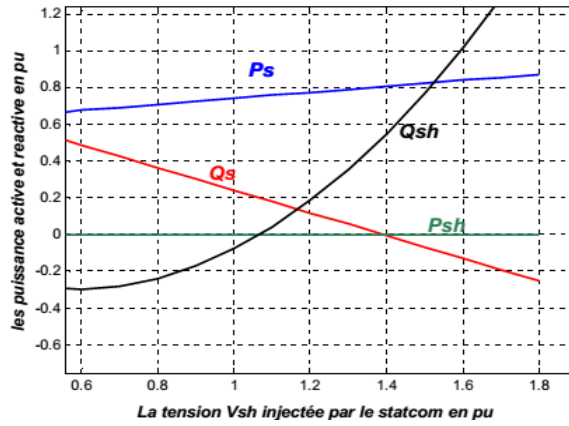


Figure II.7: \$P_s\$ \$Q_s\$ \$P_{sh}\$ et \$Q_{sh}\$ en fonction de \$V_{sh}\$ [9]

Sur la caractéristique de la figure II.7 qui représente la variation des puissances active et réactive \$P_s\$ et \$Q_s\$ transportées par la ligne ainsi que les puissances active et réactive injectées par le STATCOM \$P_{sh}\$ et \$Q_{sh}\$, en fonction des variations de l'amplitude de la tension \$V_{sh}\$ il paraît clair que l'influence de la tension \$V_{sh}\$ sur la puissance réactive \$Q_s\$ est plus grand que sur la puissance \$P_s\$. Et on voit qu'en augmentant la tension \$V_{sh}\$ la puissance réactive injectée par le STATCOM augmente et par conséquent la puissance réactive injectée au réseau par le générateur diminue. Nous pouvons constater aussi que la capacité de transit de la puissance active est améliorée. Celle-ci était occupée par la puissance réactive. [17] [18]

II.4.2. Compensateur série

II.4.2.1 Compensateur série à base de thyristors

TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) : Le Compensateur Série Contrôlé par Thyristors (TCSC) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur. La représentation schématique et son circuit équivalent de ce compensateur sont donnés par la figure (II.8) [16].

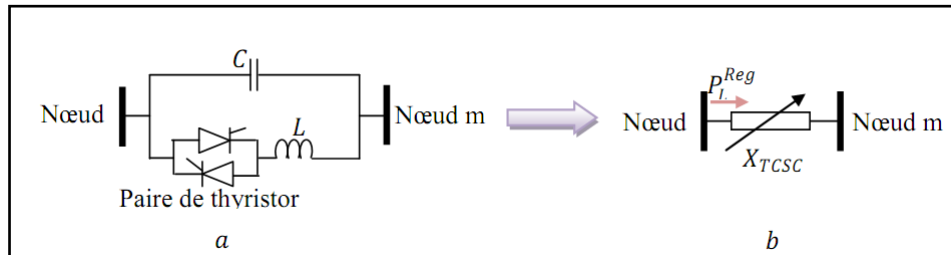


Figure II.8: Le circuit et le schéma équivalent d'un TCSC

Du point de vue fonctionnement, le TCSC se comporte comme une réactance variable connectée en série avec la ligne de transmission (figure II.8.b). Si les thyristors sont bloqués, le TCSC a une impédance fixe qui est celle du condensateur. Si Les thyristors sont commandés en interrupteur électronique et en pleine conduction, l'impédance du TCSC est encore fixe et vaut l'impédance équivalente du condensateur en parallèle avec l'inductance. A partir du fonctionnement de ce type de compensateur, on peut conclure que, le TCSC permet de faire varier la longueur électrique de la ligne de transmission en variant son impédance électrique, il peut être utilisé pour fournir une régulation du flux de puissance active, il permet aussi d'augmenter la marge de stabilité du système [16].

II.4.2.2. Compensateur séries à base de GTO thyristors

SSSC (Static Synchronous Series Compensator) : c'est l'un des plus important dispositifs FACTS ; similaire à un STATCOM mais avec une tension de sortie injectée en série dans la ligne, son schéma de principe est donné par la figure II.9. Ce dispositif appelé aussi DVR (Dynamic Voltage Restorer) est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants [10].

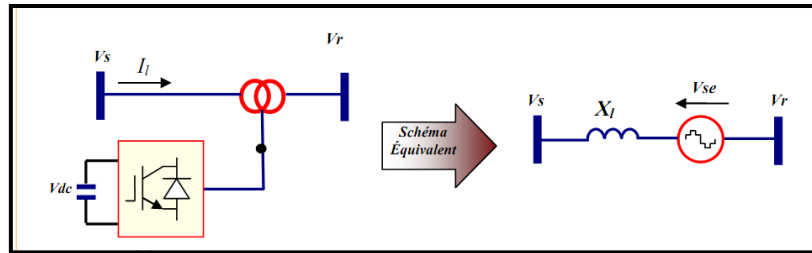


Figure II.9: Structure et schéma équivalent d'un SSSC.

Dans le but d'un fonctionnement stable, ce dispositif performe les mêmes fonctions d'un SPS (static phase shifter) que l'on verra au prochain paragraphe ou d'une impédance série variable de compensation : il injecte une tension en quadrature avec une tension des extrémités de la ligne pour contrôler le flux de puissance active. Et comme ce système ne consomme pas de réactive à partir du réseau et possède son propre énergie réactive stockées dans les batteries de condensateur il a l'aptitude de contrôler à la fois la puissance active et réactive. Sa caractéristique statique est donnée sur la figure II.10 suivante :

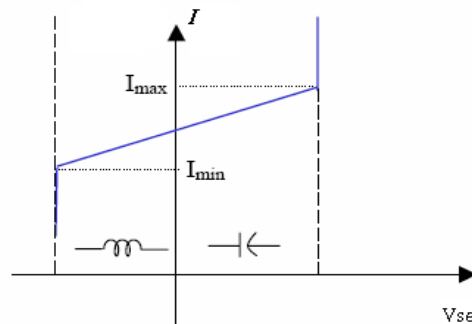


Figure II.10: Caractéristique statique du SSSC.

Dans le model adopté pour ce dispositif la valeur de la source de tension connectée en série et donnée par la formule (II.14) :

$$V_{se} = |V_{se}| \left(\cos \delta_{se} + j \sin \delta_{se} \right) \quad (\text{II.14})$$

L'amplitude et la phase de ce modèle V_{se} et δ_{se} sont ajustées en utilisant l'algorithme de Newton pour satisfaire les puissances active et réactive spécifique, qui transitent ce dispositif [10].

II.4.2.2.1 Principe de fonctionnement

Le SSSC est un générateur statique synchrone de la famille des compensateurs série fonctionnant sans source d'énergie extérieure. Son principe de fonctionnement peut être expliqué en se référant au schéma et au phaseur de la (figure II.11).

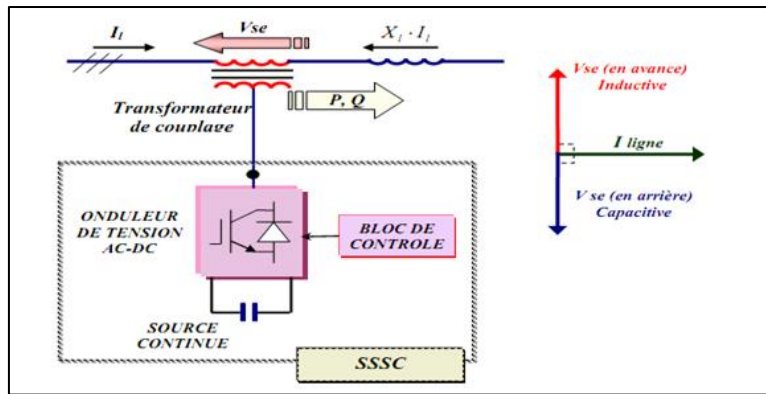


Figure II.11: SSSC (static synchronous serie compensator).

Le SSSC délivre une tension triphasée V_{se} , à la fréquence du réseau, en quadrature ($\pm 90^\circ$) avec le courant de la ligne et contrôlable afin d'augmenter ou diminuer la tension à travers la ligne représentée par sa réactance X_l selon le mode de compensation capacitif ou inductif respectivement (Fig. II.11), mais comme la réactance de la ligne ne varie pas réellement, c'est le courant dans la ligne qui sera affecter par cette variation et par conséquence les puissances correspondantes [16] [18].

Idéalement la tension V_{se} est à $\pm 90^\circ$ du courant de la ligne ce qui fait qu'aucun échange de la puissance active est entre le réseau et le SSSC. Pratiquement il y a toujours une petite composante de cette tension V_{sed} en phase avec le courant I_l qui génère une petite quantité de la puissance active pour couvrir les pertes dans le convertisseur.

II.4.3 Compensateurs hybrides série – parallèle

II.4.3.1 SPS (Static Phase Shifter)

Le déphaseur statique est un transformateur déphaseur à base de thyristors, ce dispositif a été conçu pour remplacer les anciens transformateurs déphaseurs commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs l'un branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle, la figure (II.12) donne un schéma de principe de ce dispositif et son schéma équivalent [10].

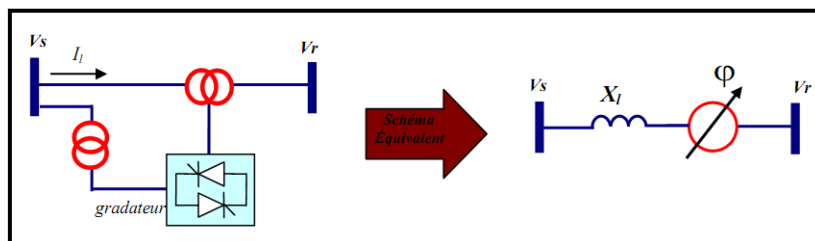


Figure II.12: Structure du SPS et son schéma équivalent.

Ce dispositif varie l'angle de phase de la tension aux extrémités de la ligne ; son principe est basé sur l'injection d'une tension en quadrature avec la tension de l'extrémité de la ligne à déphaser. Il permet aussi un contrôle rapide du flux de la puissance active. La variable de contrôle de ce dispositif est l'angle de phase de la tension injectée " φ " qui est ajusté en utilisant l'algorithme de Newton pour satisfaire un flux de puissance active spécifié [10].

La puissance active qui transite dans cette ligne à travers le SPS est donnée par :

$$P_{sr}^{reg} = \frac{|V_s| \cdot |V_r|}{X_l} \cdot \sin(\theta_s - \theta_r - \varphi)$$

Un ajustement approprié de l'angle de phase φ permet un contrôle précis du flux de puissance active à travers le SPS.

II.4.3.2. UPFC

UPFC (Unified power flow controller ou Contrôleur universel de l'écoulement de puissance) : L'association des dispositifs parallèle (STATCOM) et série (SSSC) par l'intermédiaire d'un bus continu constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom UPFC (variateur de charge universel). Gygyi a présenté le concept de ce compensateur en 1990 [9]. Un schéma simple de L'UPFC est donné en figure II.13 et un schéma électrique équivalent est donné en figure II.14. En principe L'UPFC, possède à la fois la fonctionnalité des autres compensateurs FACTS (parallèle, série et déphaseur), à savoir le réglage de la tension, le flux de puissance, l'atténuation des oscillations de puissance et l'amélioration de la stabilité. L'originalité de ce dispositif est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique à savoir : la tension, l'impédance de la ligne, le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne [10].

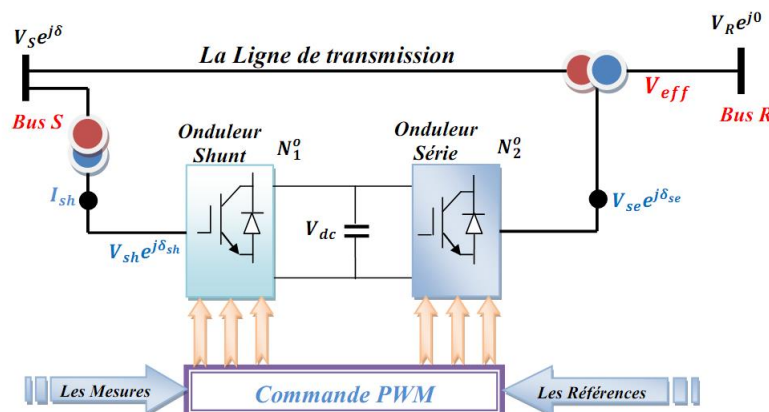


Fig.II.13. Compensateur Unifié UPFC (Unified power flow controller).

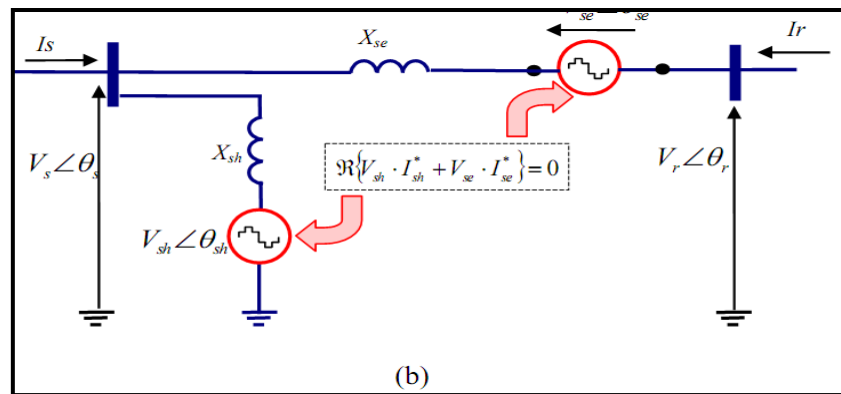


Figure II.14: Schéma équivalent de Compensateur Unifié UPFC.

L'UPFC est constitué de deux onduleurs triphasés de tension, un onduleur connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur de couplage, et l'autre connecté en série avec le réseau via un transformateur de couplage, les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur C. L'onduleur N°1 est utilisé pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur N°2, il réalise aussi la fonction de la compensation d'énergie réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active au réseau [14].

II.5. Avantages de la technologie des dispositifs FACTS

Les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir un ou plusieurs des bénéfices suivants :

- Contrôle du transit de la puissance active.
- Contrôle des tensions dans les nœuds.
- Réduction du transit de l'énergie réactive.
- Optimisation des puissances générées, donc réduction du coût de production d'énergie.
- Amélioration de la stabilité dynamique du système : entre autres des fonctions des FACTS l'amélioration de la stabilité transitoire, l'atténuation des oscillations et le contrôle de la stabilité des tensions.
- Amélioration de l'interconnexion et de l'échange énergétique.
- Amélioration de la qualité de l'énergie.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue globale sur les dispositifs FACTS (définition et rôle, classifications et différentes catégories, structure et principe de fonctionnement) avec des schémas qui structurent chaque dispositif.

Dans les chapitres suivants nous avons choisi d'étudier le STATCOM (STATicCOMpensator) comme dispositif FACTS pour contrôler la tension et optimiser la puissance réactive dans un réseau de transport de l'énergie électrique.

Introduction

Dans le premier chapitre, nous avons effectué un rappel sur la puissance réactive, sur la tension et sur les différents problèmes rencontrés dans les réseaux électriques.

Au deuxième chapitre nous avons vu une présentation générale du concept « FACTS ». Une classification des différents types est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits. Nous avons présenté les différentes structures des FACTS (série, shunt, et hybride), nous avons aussi décrit la structure de ces dispositifs (STATCOM) donné quelques explications de leurs principes de fonctionnements.

Dans ce chapitre nous allons voir la modélisation et la commande du STATCOM, les différents modèles mathématiques de chaque circuit ainsi que certaines lois de commandes des régulateurs sont développés séparément.

III.1. Modélisation du STATCOM

La modélisation mathématique est basée sur la transformation du système triphasé à un système biphasé orthogonal stationnaire ou tournant au synchronisme par la transformation de PARK respectivement afin d'aboutir à un système d'équations différentielles d'état dans le plan (d, q).

Pour cette modélisation nous avons adopté les hypothèses suivantes :

- Tous les interrupteurs sont supposés idéals.
- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligés et on ne considère que le fondamental.
- L'inductance de fuite du transformateur de couplage Parallèle du STATCOM est représentée par l'inductance L_p .
- Pour simplification du modèle mathématique le système d'unités relatives est adopté où les grandeurs I_B et U_B sont des grandeurs de base :

$$\text{Donc : } ; U_{pu} = \frac{U}{U_B} ; Z_{pu} = \frac{U_B}{I_B}$$

$$L_{pu} = \frac{X_{pu}}{\omega} ; R_{pu} = \frac{R}{Z_B} ; C_{pu} = \frac{1}{\omega C Z_B}$$

ω : Vitesse angulaire de la composante fondamentale de la tension du réseau.

III.1.1. Modèle mathématique simplifié

Le STATCOM peut être représenté par un schéma simplifié équivalent donné sur la (figure III.1). Dans cette figure, nous avons tenu compte uniquement du jeu de barre où est connecté et le circuit DC (à l'entrée du convertisseur) ne sera pas inclus dans ce modèle. Le schéma équivalent de ce dispositif donc est une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance L_{sh} du transformateur de couplage ; le circuit contient aussi une résistance R_{sh} en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur, [10]. Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système V (tension au nœud) et la tension ajustable V_{sh} du STATCOM [19].

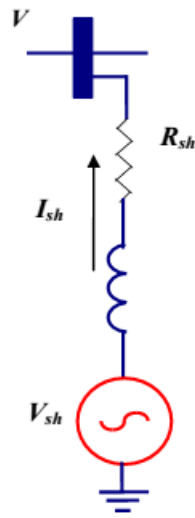


Figure III.1: Schéma équivalent simplifié du STATCOM.

En appliquant la loi d'ohm on a :

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \cdot \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (\text{III.1})$$

Où les grandeurs sont en triphasé :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{sha} \\ V_{shb} \\ V_{shc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{sha} \\ I_{shb} \\ I_{shc} \end{bmatrix}.$$

Pour simplifier ces équations on utilise la transformation de Park dite modifiée suivante [7] :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (\text{III.2})$$

La transformation de Park permet de passer du repère (abc) vers le repère (dq), (figure.III.2) [7].

Donc :

$$[X_{odq}] = [P(\theta)][X_{abc}] \quad (\text{III.3})$$

Inversement :

$$[X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} [X_{odq}] \quad (\text{III.4})$$

$$\text{Avec : } [P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \end{pmatrix}$$

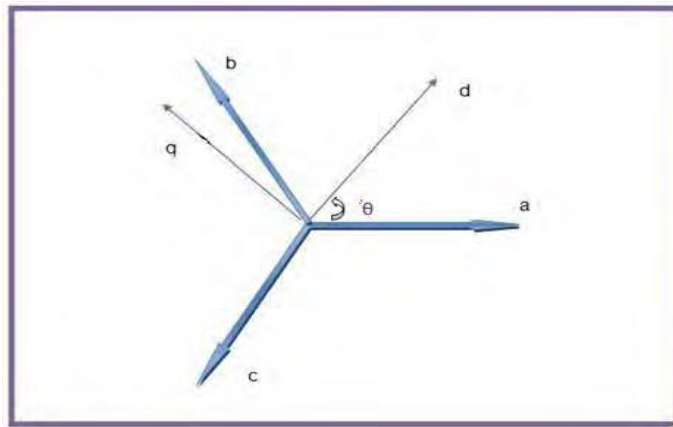


Figure III.2: Passage du repère (abc) vers le repère (d, q).

L'équation (III.1) peut être écrite comme suit :

$$[V_{abc} - V_{sh_abc}] = [R_{sh}][I_{sh_abc}] + L \frac{d[I_{sh_abc}]}{dt} \quad (\text{III.5})$$

Le développement de cette équation aboutit à :

$$\begin{bmatrix} V_{dq} - V_{sh_dq} \end{bmatrix} = R_{sh} \begin{bmatrix} I_{sh_dq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} L \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_dq} \end{bmatrix} + L_{sh} \frac{d \begin{bmatrix} I_{sh_dq} \end{bmatrix}}{dt} \quad (\text{III.6})$$

$$\text{Avec : } \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

Alors :

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shq} \quad (\text{III.7})$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shd} \quad (\text{III.8})$$

Sous forme matricielle on écrit le système d'état du STATCOM comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Où le vecteur $\begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$ représente le vecteur de commande du système.

III.1.2. Contrôle du STATCOM

Le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion et par conséquent maintenir la tension de ce dernier. Pour réaliser cet objectif, ce dispositif injecte ou absorbe un courant I_{sh}^{ref} , qui est l'image de la puissance à compenser. Ces courants ($I_{shd}^{ref}, I_{shq}^{ref}$) sont donc les grandeurs de références du STATCOM qu'on déterminera à partir des puissances à injecter.

III.1.3 Détermination des références

Les puissances à injecter par le STATCOM sont la puissance réactive Q_{sh}^{ref} calculée en fonction de la chute de tension et la puissance active $P_{sh}^{ref} \approx 0$ représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur [19].

$$P_{sh}^{ref} = \frac{3}{2}(V_d I_{shd}^{ref} + V_q I_{shq}^{ref}) \quad (\text{III.10})$$

$$Q_{sh}^{ref} = \frac{3}{2}(V_q I_{shd}^{ref} - V_d I_{shq}^{ref}) \quad (\text{III.11})$$

L'écriture matricielle des équations (III.7) et (III.8) donne :

$$\begin{bmatrix} P_{sh}^{ref} \\ Q_{sh}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd}^{ref} \\ I_{shq}^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

Ces puissances (eq.III.9) sont les images des composantes active et réactive (I_{shd}^{ref} et I_{shq}^{ref}) du courant, qu'on détermine à partir de l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^{ref} \\ I_{shq}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{sh}^{ref} \\ Q_{sh}^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Où les tensions V_d et V_q sont les tensions du jeu de barre.

Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par la (figure III.3) suivante :

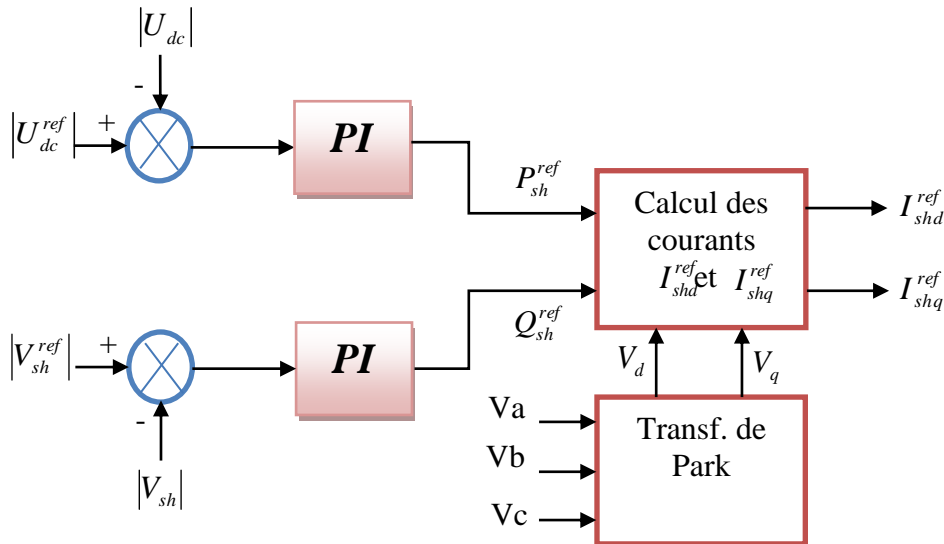


Figure III.3: Identification des courants de référence.

III.1.4. La Méthode Watt Var découplés

Considérons le modèle simplifié représenté par le système d'équation (III.9) précédent [3] [10] [19] :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$$

Sur le vecteur de commande on effectue le changement de variable suivant :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

Où le vecteur $\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$ représente les nouvelles grandeurs de commande.

En combinant les équations III.9 et III.14, nous obtenons dans l'axe d :

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega I_{shq} + X_1 \quad (\text{III.15})$$

En appliquant la transformation de Laplace sur cette équation on obtient :

$$\left(S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right) I_{shd} = \omega I_{shq} + X_1 = \tilde{X}_1 \quad (\text{III.16})$$

D'où on arrive au transfert I_{shd} en fonction de \tilde{X}_1 suivant :

$$\frac{I_{shd}}{\tilde{X}_1} = \frac{1}{\left(S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right)} \quad (\text{III.17})$$

En réalité, notre commande est en X_1 et comme $\tilde{X}_1 = \omega I_{shq} + X_1$, on doit ajouter donc le terme ωI_{shq} pour retrouver \tilde{X}_1 à l'entrée de ce transfert comme l'indique le schéma de la (figure III.4) suivante :

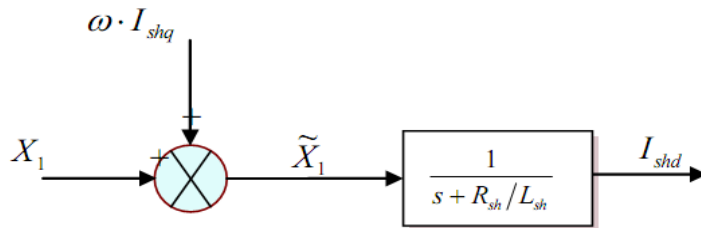


Figure III.4: Transfert I_{shd} en fonction de X_1 .

De la même manière en prenant la deuxième équation (selon l'axe q) du modèle précédent on trouve le transfert I_{shq} en fonction de \tilde{X}_2 qui suit :

$$\frac{I_{shq}}{\tilde{X}_2} = \frac{1}{\left(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right)} \quad (III.18)$$

Avec : $\left(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right) I_{shq} = -\omega \cdot I_{shd} + X_2 = \tilde{X}_2$

Le schéma de la figure III.5 suivante résume ce transfert :

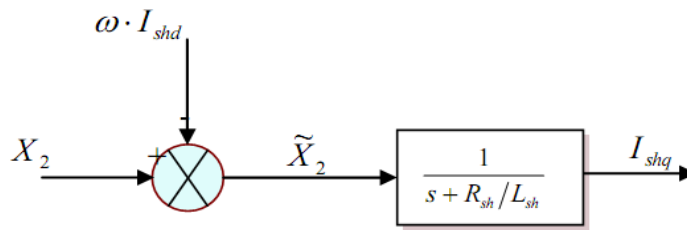


Figure III.5: Transfert Ishq en fonction de X2.

De ce qu'on vient de voir (figures III.4 et III.5), on constate qu'il y a un couplage naturel dans les transferts des courants I_{shd} et I_{shq} . Pour éliminer ce couplage on utilise la méthode de compensation et avec des régulateurs PI on peut contrôler les courants de sortie du STATCOM et les faire suivre leurs consignes I_{shd}^{ref} et I_{shq}^{ref} comme le représente le schéma bloc de la figure (III.6).

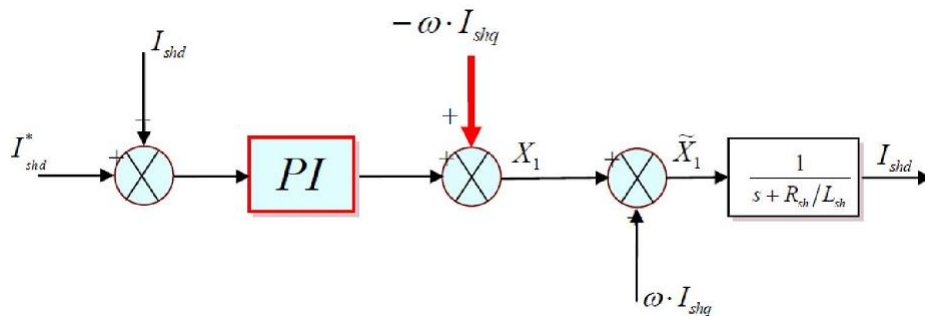


Figure III.6: Régulation et découplage de I_{shd} .

De même pour le courant réactif on doit ajouter la composante $\omega \cdot I_{shd}$ et finalement arriver au schéma de régulation du STATCOM par la méthode Watt-Var découplée de la figure (III.7).

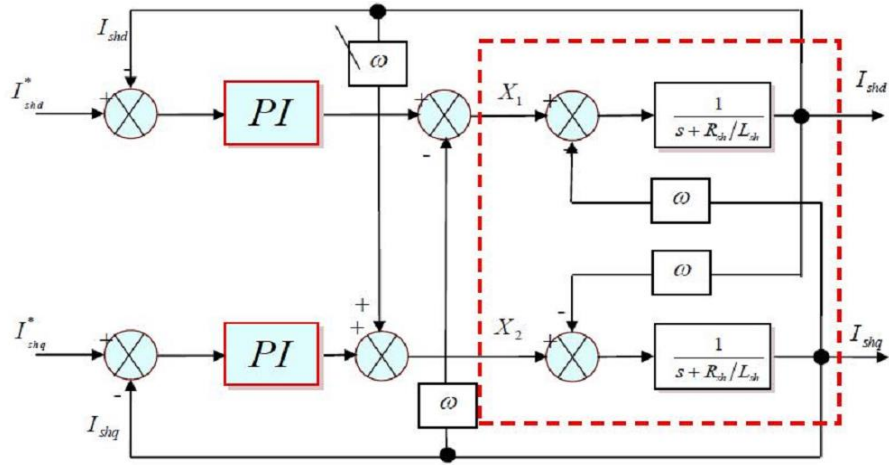


Figure III.7: Schéma de Régulation du STATCOM (Watt-Var découplés).

III.1.5. Régulateur PI avec compensation des pôles

Nous avons utilisé pour la régulation des courants du STATCOM des régulateurs (PI) comme le montre le schéma de la figure (III.7). Ce schéma de réglage peut être simplifié comme indiqué dans la figure (III.8) suivante :

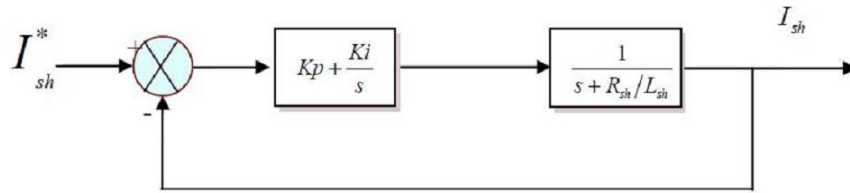


Figure III.8: Schéma bloc de la Régulation PI des courants du STATCOM.

La fonction de transfert de cette régulation en boucle ouverte FTBO est :

$$G(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) = K_p \left(\frac{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) \quad (\text{III.19})$$

Et par compensation du pôle on doit avoir :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \quad (\text{III.20})$$

Et G(s) devient : $G(s) = K_p \left(\frac{1}{s} \right)$

T_{BO} Constante de temps en boucle ouverte.

La fonction de transfert de la régulation précédente après compensation du pôle sera de la forme qui suit :

$$F(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K_p}{S + K_p} = \frac{1}{T_{BF}S + 1} \quad (\text{III.21})$$

$$T_{BF} = \frac{1}{K_p} \quad (\text{III.22})$$

Avec T_{BF} , la constante de temps de la régulation en boucle fermée. En faisant un choix convenable du temps de réponse en boucle fermée (de l'ordre de 1/3 du temps de réponse en boucle ouverte) on déterminera à l'aide des équations (III.19 et III.21) les gains du contrôleur PI (proportionnel intégral).

$$K_p = \frac{1}{3}T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}}$$

$$K_i = K_p \frac{R_{sh}}{L_{sh}}$$

III.1.6. Régulation de la tension continue Udc

La tension continue aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par l'adjonction d'un courant actif au courant de référence du STATCOM qui traduira l'absorption ou la fourniture d'une puissance active sur le réseau. La puissance échangée avec le condensateur peut être exprimée par l'équation suivante [19] [10] [13] :

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \quad (\text{III.23})$$

$$\frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2P_{sh}}{C} \quad (\text{III.24})$$

En passant au domaine fréquentiel (Lapalucien) on aura :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{C * S} \quad (\text{III.25})$$

Pour obtenir le signal P_{sh} nous avons le choix entre un régulateur proportionnel et un régulateur proportionnel intégral. Ce dernier est souvent préférable du fait qu'il permet d'annuler l'erreur statique [11].

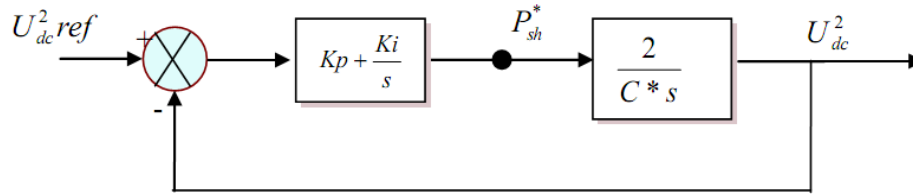


Figure III.9: Régulation de la tension continue

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système est :

$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc_ref}^2} = \frac{\frac{2K_p}{C}S + \frac{2K_i}{C}}{S^2 + \frac{2K_p}{C}S + \frac{2K_i}{C}} \quad (\text{III.26})$$

Avec :

$$\omega_n^2 = \frac{2K_i}{C} \quad (\text{III.27})$$

$$\xi = K_p \sqrt{\frac{1}{2.C.K_i}} \quad (\text{III.28})$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée on choisit généralement : $\xi = 0.7$.

Et afin d'atténuer les fluctuations à 300 Hz, et pour avoir un bon filtrage on va choisir

$$\omega_n = \frac{2\pi * 300}{10} \text{ rad/sec, et finalement on détermine à partir des équations (III.28) les}$$

coefficients k_p et k_i .

III.2. Commande de l'Onduleur

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sortie pour que les tensions triphasées à la sortie de l'onduleur soient les plus proches des tensions de référence. Deux méthodes de commandes peuvent être utilisées :

a. Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

La modulation de largeur d'impulsion est réalisée par la comparaison d'une onde modulée basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre

la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse comme le montre le schéma de principe de la (figure III.10). [3] [19].

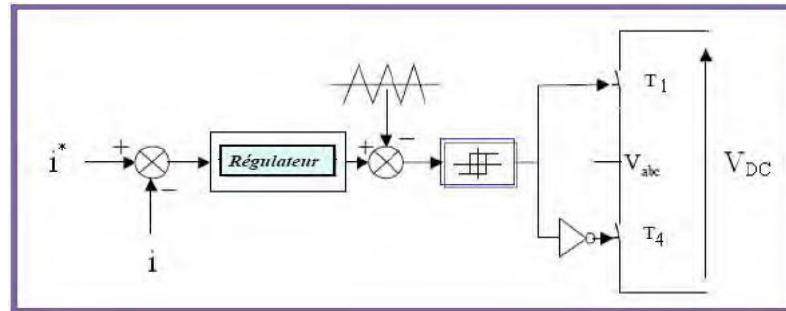


Figure III.10: Principe de la MLI Sinus-Triangle.

b. Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Celui-ci, produit des impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur, de façon à limiter le courant de phase dans une bande d'hystérésis autour du courant de référence (Figure III.11).

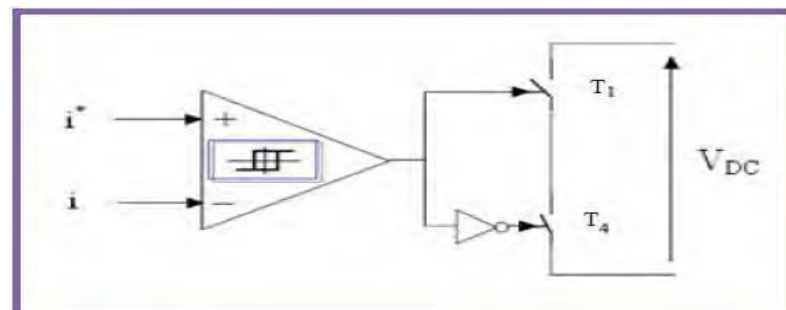


Figure III.11: Principe de la commande par hystérésis.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude et la modélisation d'un "STATCOM " avec les fonctions de contrôle suivantes : la régulation de la tension par compensation de l'énergie réactive et le contrôle du flux de puissance active et réactive.

Nous avons présenté dans ce chapitre des modèles simples pour lesquels nous avons identifié les références de leurs systèmes de commande de dispositif.

La loi de commande utilisée pour ce contrôleur été la méthode dite Watt-Var découplée basée sur le principe de découplage dans le contrôle des courants actif et réactif du système accompli avec des régulateur PI par compensation des pôles.

Introduction

Au chapitre précédent, nous avons établi le modèle mathématique d'un STATCOM avec son système de commande composé de la régulation de la tension par compensation de l'énergie réactive et du contrôle du flux de puissances active et réactive.

Dans ce chapitre, nous allons procéder à une complète simulation d'un dispositif, STATCOM introduit dans un réseau test simple. Cette simulation a été performée dans l'environnement Matlab-Simulink et basée sur les lois de fonctionnement et de commande développées dans les chapitres II et III précédents. Le fonctionnement de ce dispositif dans une ligne de transport d'énergie électrique sera validé dans les deux modes de compensation capacitive et inductive.

IV.1. Simulation du STATCOM

IV.1.1. Description du réseau étudié

Le schéma unifilaire du réseau simple de transport d'énergie électrique utilisé pour valider le fonctionnement du Statcom est représenté par la (figure IV.1)

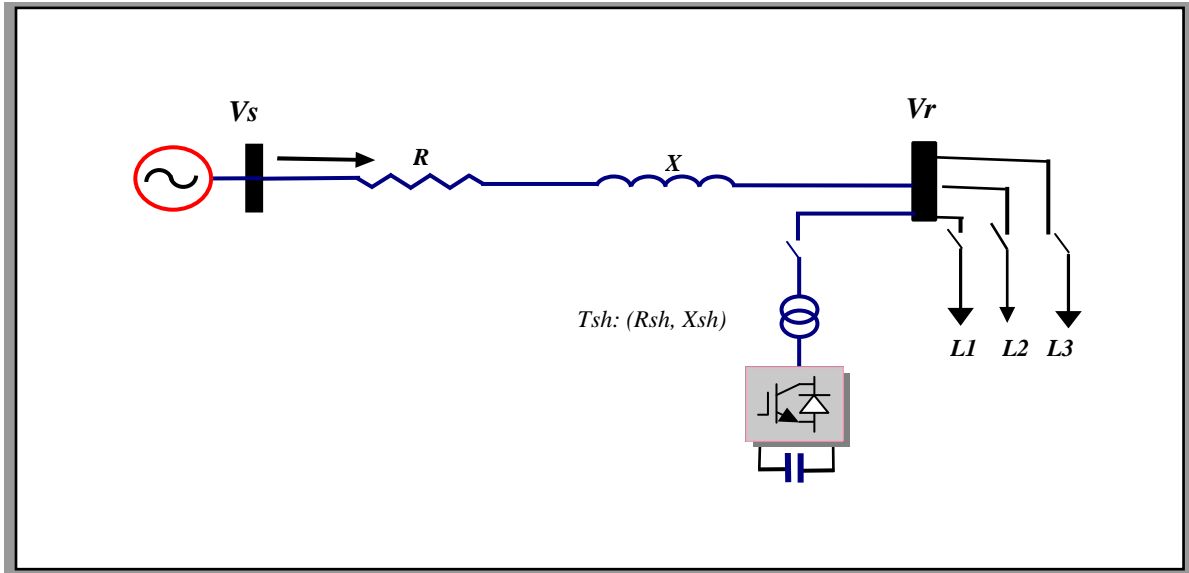


Figure IV.1: Schéma unifilaire du réseau étudié.

Le réseau est composé d'un générateur de 400 KV avec une puissance nominale de 1000 MVA et d'une ligne de transport de 500 Km modélisée en π pour chaque 100 Km, le transformateur Tsh sert à baisser la tension de 400 KV (tension du réseau) à 20 KV (tension d'entrée du convertisseur), la ligne alimente une charge (L1, L2) au jeu de barre 'R'. En grandeurs réduites le réseau précédent est représenté par la (figure IV.2).

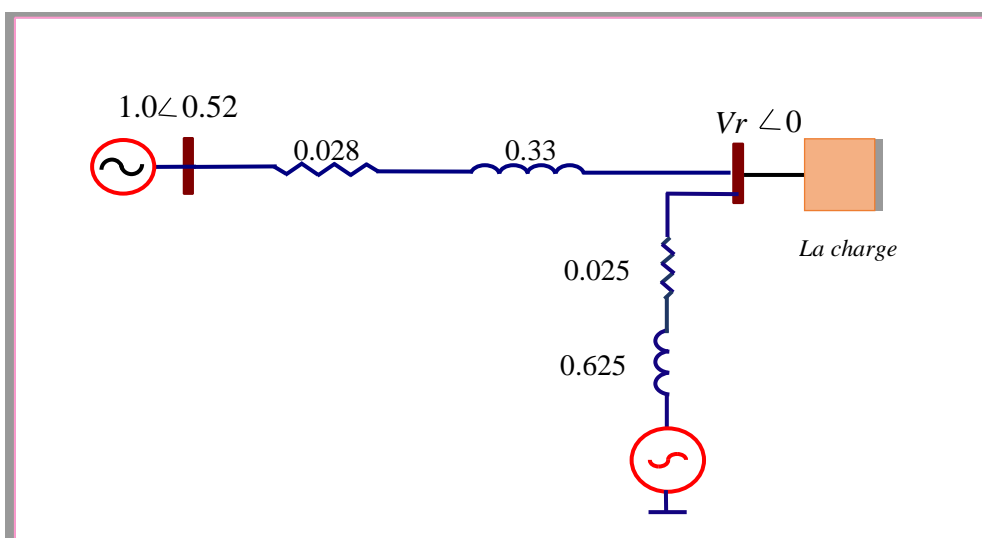


Figure IV.2: Schéma équivalent du réseau étudié en pu.

IV.1.2. Le Contrôle-Commande

Pour simplifier les calculs, nous avons utilisé des grandeurs réduites. Nous considérons d'abord la base du système en grandeur réduite comme suit :

$$S_{base} = 1000 \text{ MVA} \quad U_{base} = 400 \text{ KV}$$

Par conséquent, les autres bases seront données par les équations suivantes :

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}U_{base}} = 1443 \text{ A}$$

$$Z_{base} = \frac{U_{base}}{S_{base}} = 160 \Omega$$

Le système d'équations (III.9) (voir chapitre III), représentant le modèle du STATCOM devient en grandeurs réduites le suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd}^{pu} \\ I_{shq}^{pu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}^{pu}}{L_{sh}^{pu}} & \omega \\ \omega & -\frac{R_{sh}^{pu}}{L_{sh}^{pu}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd}^{pu} \\ I_{shq}^{pu} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}^{pu}} \cdot \begin{bmatrix} V_d^{pu} - V_{shd}^{pu} \\ V_q^{pu} - V_{shq}^{pu} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Tel que : } \frac{1}{L_{sh}^{pu}} = \frac{\omega}{X_{sh}^{pu}}$$

Par conséquent l'équation (III.18) (chapitre III) peut s'écrire :

$$G(s) = \frac{I_d^{pu}}{I_d^{ref}} = \frac{I_q^{pu}}{I_q^{ref}} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}^{pu}}{L_{sh}^{pu}}} \right)$$

Les coefficients des régulateurs se calculent avec compensation des pôles et en prenant le

temps de réponse en boucle fermé $T_{BF} = \frac{1}{3}T_{BO}$, ce qui donne :

$$K_i = K_p * \frac{R_{sh}^{pu}}{L_{sh}^{pu}}$$

$$K_p = \frac{3}{T_{BO}}$$

$$\text{avec } T_{BO} = \frac{L_{sh}^{pu}}{R_{sh}^{pu}}$$

Alors:

$$K_p = \frac{3R_{sh}^{pu}}{L_{sh}^{pu}} = \frac{3R_{sh}^{pu} \omega}{X_{sh}^{pu}} = \frac{3 \times 0.025 \times 2\pi \times 50}{0.625}$$

$$K_i = K_p \times \frac{R_{sh}^{pu}}{X_{sh}^{pu}} = 37.69 \times \frac{3 \times 0.025 \times 2\pi \times 50}{0.625}$$

$$K_p = 37.69, K_i = 473.74$$

IV.2. Essais de simulation

Initialement le condensateur du STATCOM est chargé et la tension à ses bornes est de 1.0 pu. La tension du jeu de barre de génération $V_s = 1.0$ pu, et le system énergétique débite sur une charge inductive L1:($P_1=1.0$ pu ; $Q_1 = 0.32$) dans un état d'équilibre.

Dans nos essais on va ajouter à l'instant ($t = 0.5$ s) une charge inductive L2 : ($P_2 = 0.3$ pu ; $Q_2 = 0.7$ pu) et à l'instant ($t = 1$ s) on va déconnecter toutes les charges et on ajouter à l'instant ($t=1$ s) une charge capacitive L3 :($P_3 = 0.3$ pu ; $Q_c = 0.38$ pu).

La (figure IV.3) montre la chute de tension provoquée par la charge inductive L2 à partir de l'instant $t = 0.5$ s. La déconnexion des charges inductives dans la dernière transition ($t = 1$ s) et débit sur la charge capacitive a entrainé une surtension importante dans la tension du jeu de barre de charge V_r . (Figure IV.3).

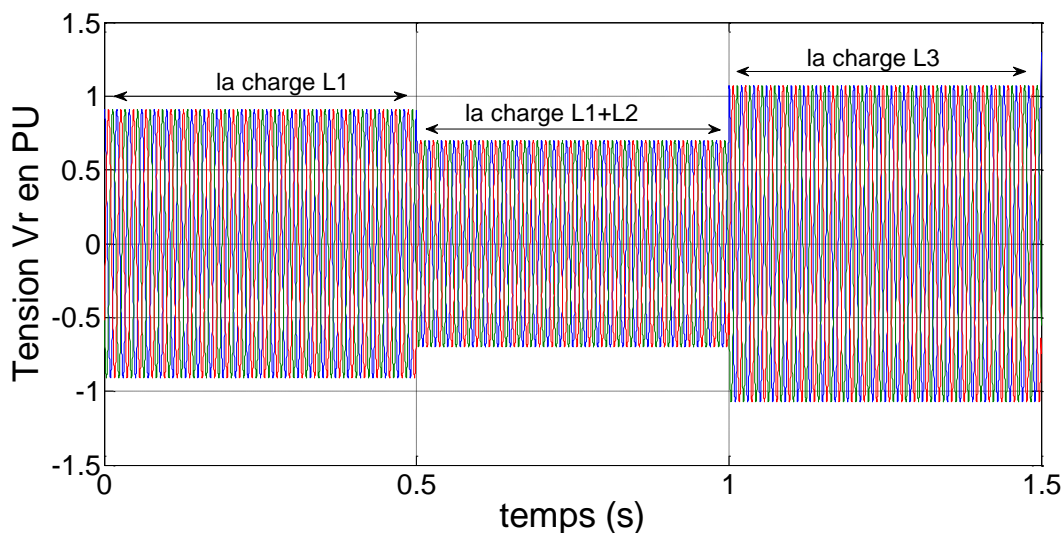


Figure IV.3: Tension V_r de ligne chargée sans STATCOM

La (figure IV.4) montre la forme du courant qui augmente avec le branchement de la charge L2 à $t = 0.5$ s puis diminue avec la déconnexion de L1 et L2 à $t = 1$ s.

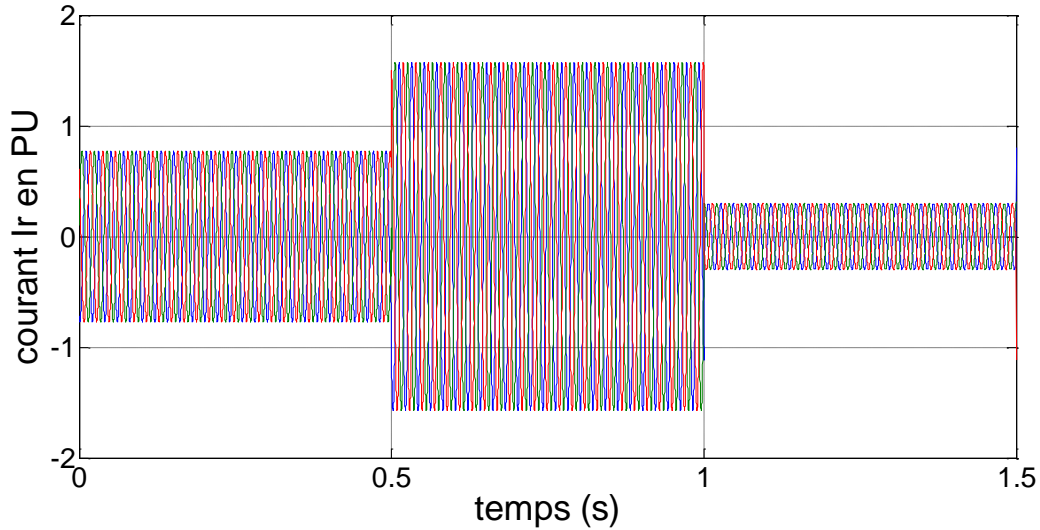


Figure IV.4: Courant Ir dans ligne chargée sans STATCOM

En reprenant ces essais, avec les mêmes charges, sur ce réseau associé à un Contrôleur FACTS (parallèle) "STATCOM" au jeu de barre de réception (de charge) on constate ce qui vient :

Les courants dans ce dispositif, STATCOM, I_{shd} et I_{shq} (figures IV.5 et IV.6) suivent leurs grandeurs de références (qui sont calculées à partir des puissances de références nécessaires pour compenser la puissance réactive dans la ligne et maintenir la tension du jeu de barre V_r), ce qui valide le bon fonctionnement des régulateurs "proportionnel intégral : PI" placés dans le modèle Watt-Var découplé utilisé.

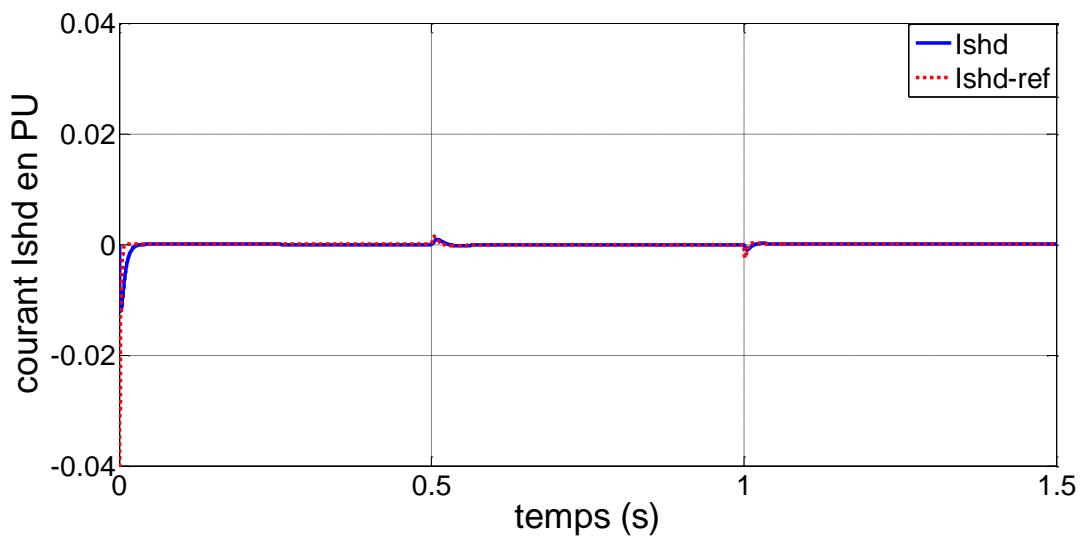


Figure IV.5: Courant du STATCOM I_{shd} et I_{shd_ref}

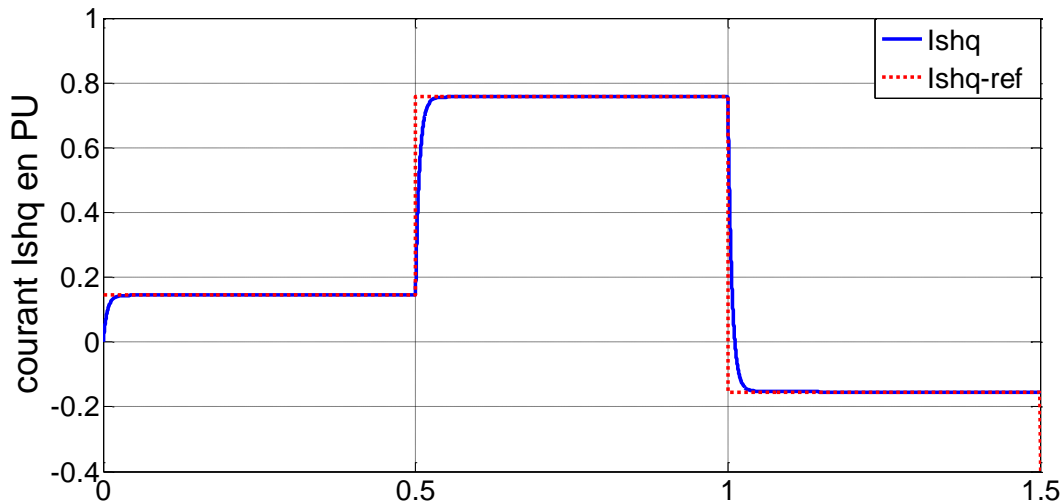


Figure IV.6: Courant du STATCOM Ishq et Ishq_ref.

Avant $t = 0.5$ s le STATCOM injecte une petite quantité de puissance réactive Q_{sh} de l'ordre de $Q_{sh} \approx 0.2$ pu pour soulever la tension V_r à 1.0 pu (figure IV.7). Mais après la mise en service de la charge $L1+L2$ à ($t = 1$ s), plus de puissance réactive est nécessaire pour la compensation et le STATCOM dans un mode capacitif injecte environ $Q_{sh} \approx 0.79$ pu, (figure IV.7). Une petite quantité de la puissance active est absorbée dans cette phase pour maintenir la tension aux bornes du condensateur constant, (figure IV.8). En connectant la charge capacitive à $t = 1$ s l'énergie réactive fournie par le STATCOM décroît et devient négative à cause de l'effet capacitif de cette charge sur la ligne de transport, (figure IV.7).

La charge capacitive connectée à la ligne provoque une surtension au jeu de barre de charge V_r et fait que le STATCOM opère en mode inductif et absorbe l'énergie réactive depuis le réseau pour maintenir le profil de la tension V_r , on constate de ce fait que la tension V_{sh} devient inférieure à la tension V_r ce qui démontre la théorie exposée dans le chapitre II (figure IV.13).

Depuis la courbe de la figure IV.9, il paraît très clair que le bloc de régulation de la tension continue à prouver son efficacité au maintien constante de la tension au borne du condensateur $U_{dc} = 1.0$ pu.

L'effet de la compensation de l'énergie réactive se répercute directement sur le transit de la puissance active dans la ligne, comme illustré par la (figure IV.10); la fourniture de l'énergie réactive au point de consommation permet un transit plus important de la puissance active en minimisant le flux de puissance réactive dans la ligne de transport.

La tension du jeu de barre où ce dispositif est connecté est régulée à la valeur de la tension de

départ $V_{rd} \approx 1.0$ pu (figure IV.13). L'erreur statique entre cette tension V_{rd} réglée et la tension référence ($V_{rdref} = 1.0$ pu) est due aux simplifications effectuées dans l'expression de la puissance réactive de référence

$$Q_{sh}^{ref} = \frac{V_s \times \Delta V}{X} \text{ Demandée à injecter par le contrôleur STATCOM.}$$

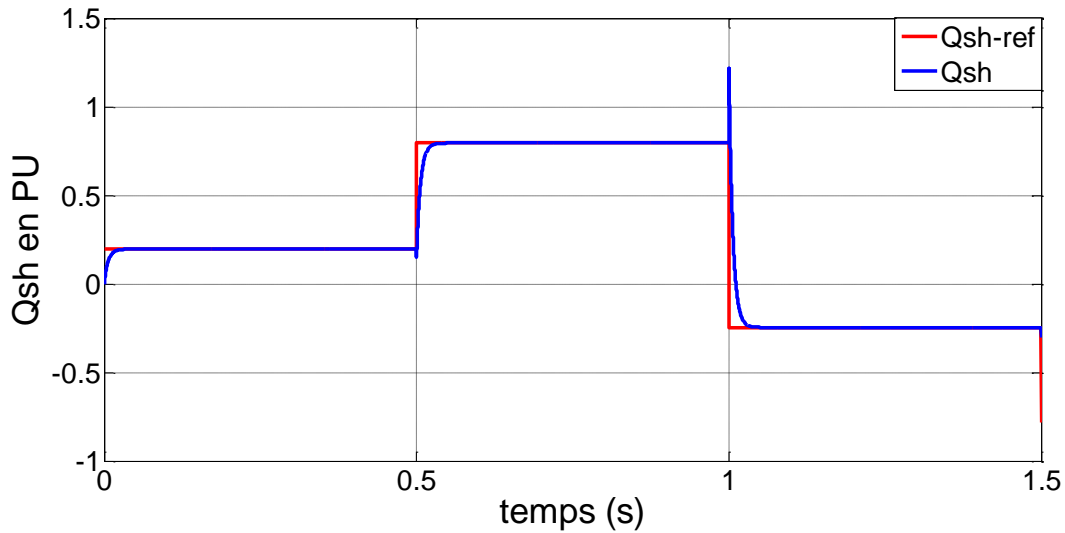


Figure IV.7: Puissance Qsh du STATCOM.

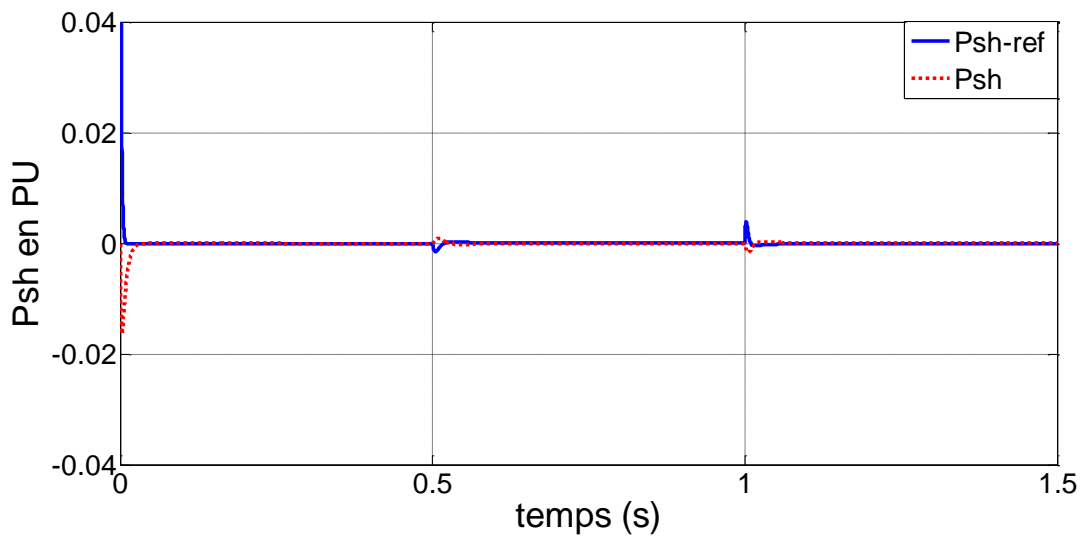


Figure IV.8: Puissance Psh du STATCOM.

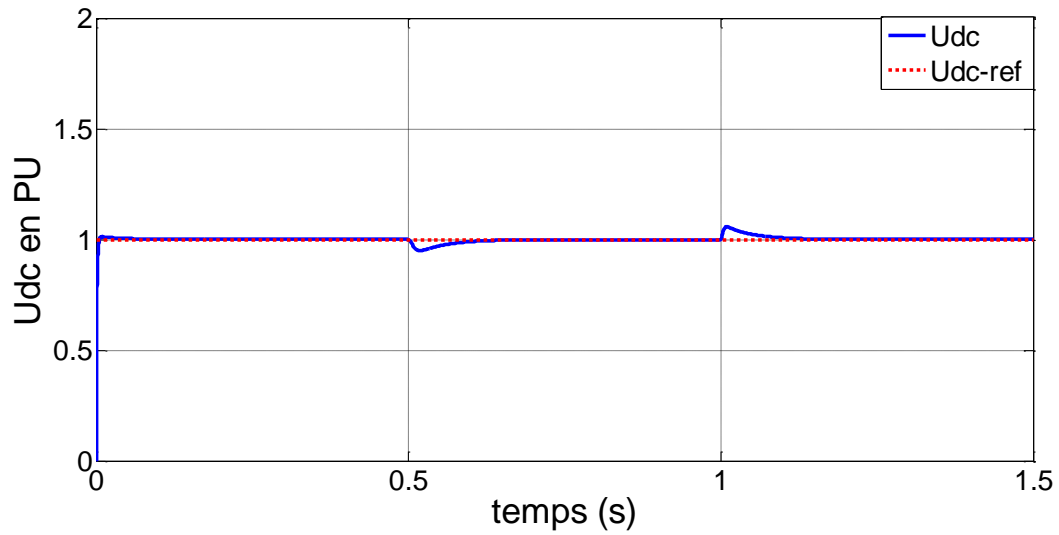


Figure IV.9: Régulation de la tension continue Udc.

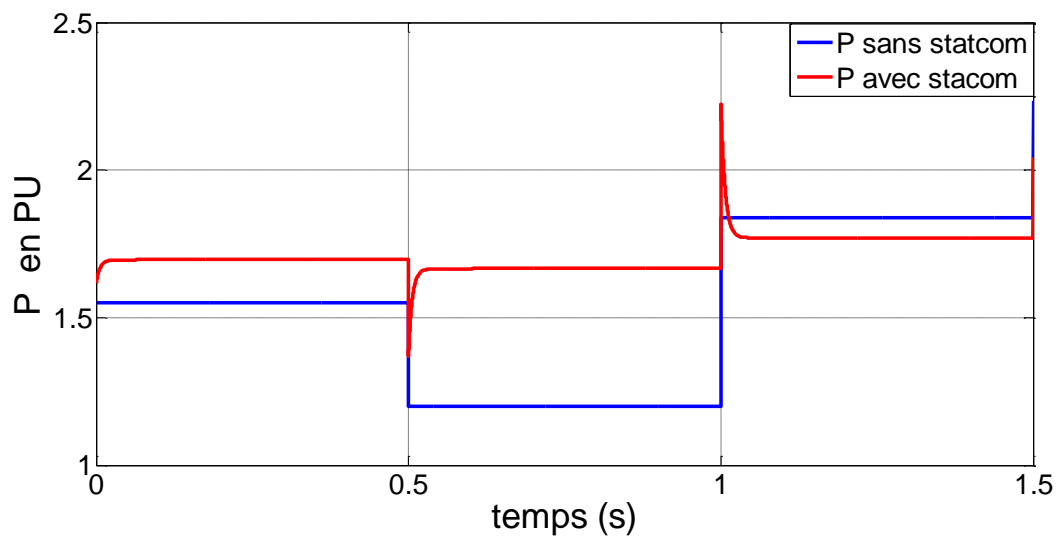


Figure IV.10: Puissance active transportée par la ligne.

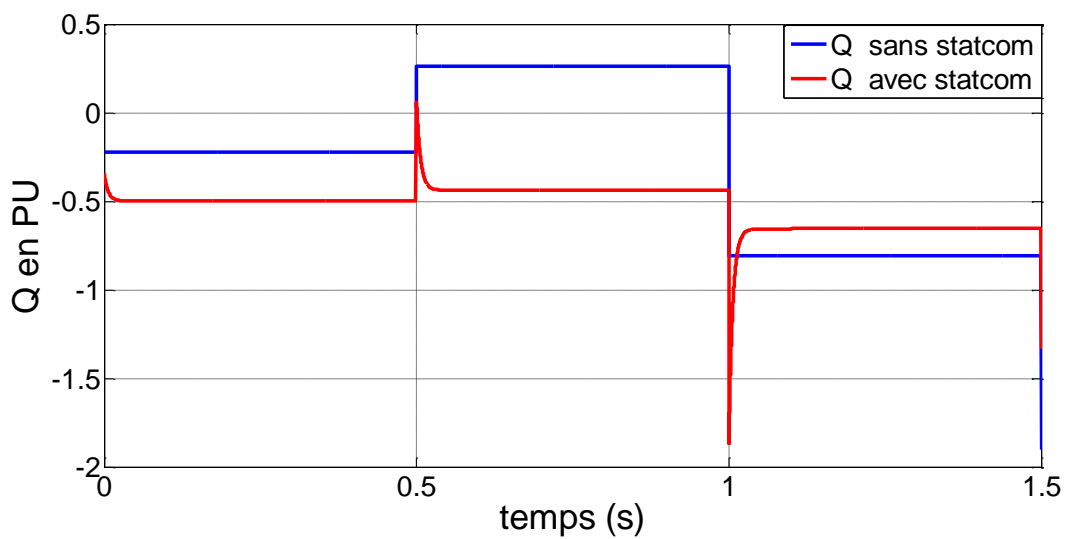


Figure IV.11: Puissance réactive transportée par la ligne.

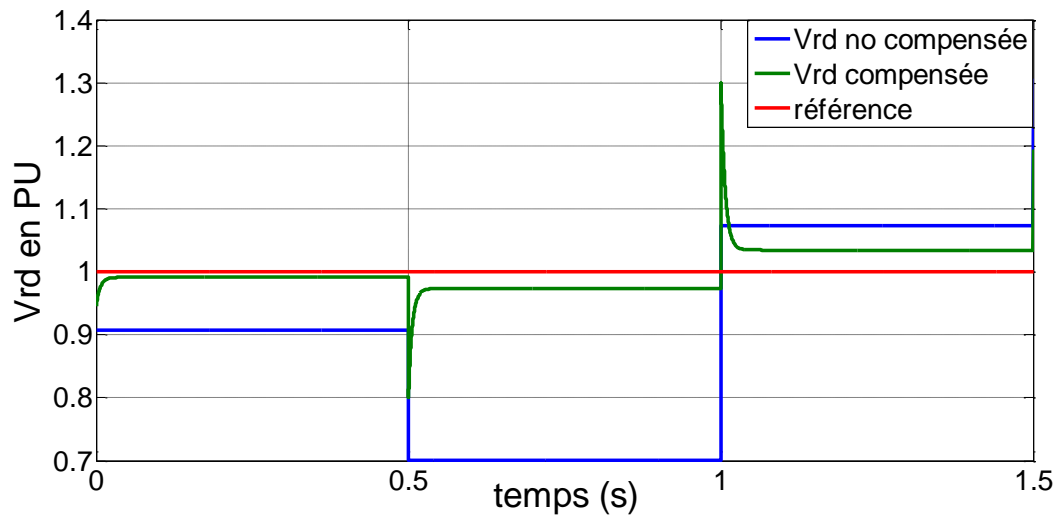


Figure IV.12: Tension V_{rd} avant et après compensation.

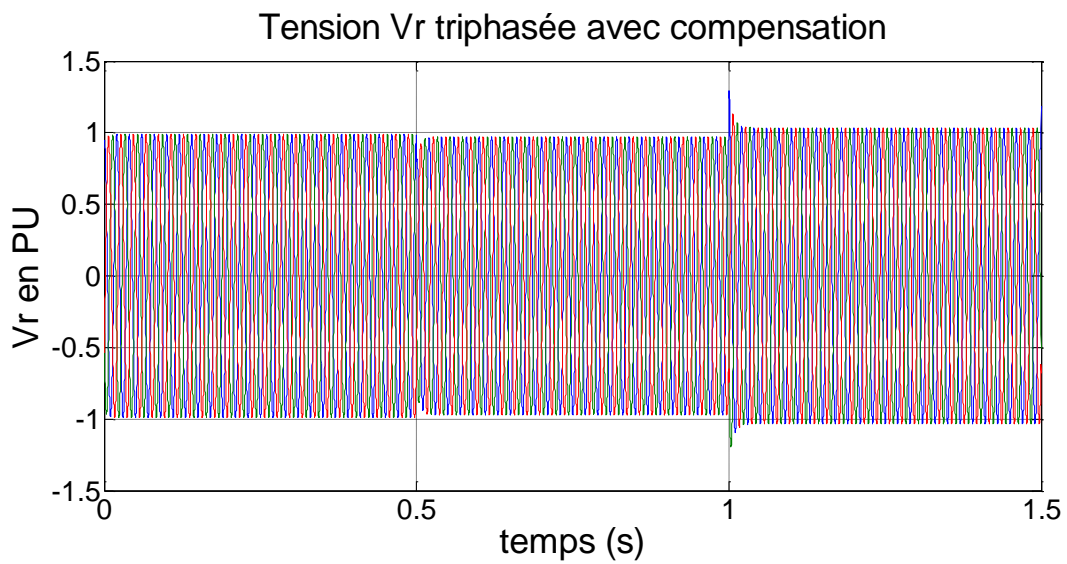


Figure IV.13: Tension V_r avec compensation.

Conclusion

Le STATCOM est un dispositif puissant parmi les systèmes FACTS. Dans ce chapitre nous avons décrit le réseau à simuler dans lequel nous avons introduit le contrôleur FACTS parallèle « STATCOM » afin de compenser la puissance réactive et maintenir la tension du jeu de barre où il est connecté. Pour cela nous avons réécrit les équations du modèle du STATCOM ainsi que ceux du réseau en grandeurs réduites puis effectué les essais de simulation et observé le comportement de ce dispositif dans deux cas de fonctionnement envisagés : inductif et capacitif.

D'après les résultats de simulation nous avons vu le potentiel de la méthode Watt-Var découplée dans la régulation de la puissance active et réactive à travers le contrôle des courants actif et réactif correspondants.

Le contrôle de ces derniers par des régulateurs proportionnels intégral a donné des résultats acceptables.

Conclusion générale

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept comme les systèmes flexibles de transmission à courant alternatif appelée FACTS, avec lesquels le contrôle du flux de puissance active et réactive ainsi que l'augmentation des capacités de charge des lignes, sont atteints et performés par l'injection des tensions (ou courant). Des convertisseurs conçus avec des interrupteurs statiques modernes commandés tels que les GTO, IGBT présentent la nouvelle génération de ces systèmes FACTS.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans ce concept et porte sur le contrôle de la tension par compensation shunt de l'énergie réactive avec un dispositif STATCOM. Afin d'atteindre cet objectif, nous sommes passés par plusieurs étapes :

- en premier étape, nous avons commencé par une brève étude des lois de transport de l'énergie électrique en exposant la problématique de limite de puissance transportable en fonction des paramètres des réseaux ainsi que la chute de tension.
- Le deuxième chapitre les principes de fonctionnements des différents types des dispositifs FACTS.
- Le troisième chapitre nous avons présenté le modèle mathématique d'un STATCOM

Connecté à un réseau électrique, dans le repère synchrone d-q de, objets de cette étude, afin de mieux analyser et observer le comportement de ces derniers. La méthode de Watt-Var découplée a été adoptée comme stratégie de commande également pour le STATCOM.

- Pour valider cette étude théorique, nous avons effectué dans le dernier chapitre plusieurs essais de simulations sur un STATCOM couplé avec un réseau de transmission à l'aide de logiciel MATLAB/Simulink.

Ces résultats ont vérifié l'efficacité de la stratégie de commande adoptée qui a permis un contrôle indépendant et découplé des puissances active et réactive de ce dispositif en minimisant l'effet d'interaction entre ces puissances.

Le dispositif STATCOM a agi en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive sur le réseau. Ceci a pour effet d'augmenter ou de diminuer l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible.

Enfin cette étude nous a permis de juger ces dispositifs très avantageux pour les réseaux électriques en démontrant une flexibilité, dans le contrôle de la majorité des paramètres du réseau, basée sur la commande à MLI des convertisseurs qui représente l'élément constitutif de base de ces dispositifs.

- [1] **Michel Crappe** « Commande et régulation des réseaux électriques » Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [2] **Hanene Kouara** « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006.
- [3] **E.G. Shahraki** « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques » Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy, France, 13 octobre 2003.
- [4] **BOUTABA Samia** « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC » mémoire de magister, Université Hassiba Ben Bouali Chlef 2009.
- [5] **Haimour Rachida** « Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique » mémoire de magister, université d'Oran 2009.
- [6] **Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet** : « Fluctuations de tension et Flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II) » Techniques de l'ingénieur D 4315.
- [7] **Sekhane Hocine** « L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS » mémoire de magister, université de constantine1, 2013.
- [8] **Khiat Mounir** « Répartition optimale des puissances réactives dans un réseau d'énergie électrique sous certaines contraintes de sécurité » Thèse de doctorat d'état Oran 2003.
- [9] **Delendi Louardi** « Contrôle de l'écoulement de puissance active par un système FACTS» mémoire de magister, Université Batna, 2009.
- [10] **Abdelaali. Alibi** « Contrôle des réseaux électrique par les systèmes FACTS : Flexible AC Transmission Systèmes » mémoire de magister, université de Batna 2009.
- [11] **K.R.Padiyar** : « Investigation on strong resonance in multimachine power systems with STATCOM supplementary modulation controller », IEEE, transaction on power systems, vol.21, N°2, May 2006.
- [12] **Nicolas Buyant** : « Etude et commande généralisées des filtres actifs parallèles », thèse de doctorat, Ecole des Sciences pour l'ingénieur de LANPES 1999.
- [13] **Laib Hichem** « Contribution à l'étude du contrôle du flux de puissance par l'UPFC » mémoire de magister, université de Batna 2009.
- [14] **A. Abdelouahab** « Modélisation et Analyse d'Un Compensateur Statique : SVC » mémoire de magister, université de Batna 02 /05/2013.
- [15] **J. C. Passelergue** « Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques » Thèse de doctorat de l'INPG 26 Novembre 1998.

- [16] **Amir H. Norouzi** « Flexible AC Transmission System : Theory, Control and Simulation of the STATCOM and SSSC », Thèse de magister de l'université de New Brunswick, 2003.
- [17] **I. Papiê** « Mathematical analysis of FACTS devices based on a voltage source converter, Part1: mathematical models», electric power systems research, Elsevier science 56 (2000) 139-148.
- [18] **Nitus Voraphonpiput et Somchai Chatratana** « STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation», transmission and distribution conference & exhibition 2005 IEEE/PER.
- [19] **Djermane Ali** « Contrôle optimal de la tension dans un réseau électrique en utilisant les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS) » mémoire de Magister, Université D'oum El Bouaghi 2010