

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

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine: Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité: Réseaux électrique

THÈME

**Apport d'un STATCOM dans un système de conversion
d'énergie photovoltaïque (PV) connecté au réseau électrique.**

Préparé par : M Belgacem Riadh

M Ali Ahmed Lounis

Devant le Jury:

Nom et prénoms

Grade

Qualité

M. OMARI

MCB

Président

B.BEKKI

MAA

Examineur

S.BELFDHAL

MCB

Examineur

B. BELABBAS

MCA

Encadreur

Promotion 2021/2022

Remerciements

La louange à Allah l'unique et le salut sur celui qui n'a point de messager après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivant son chemin jusqu'au jour de la résurrection

*Nous adressons nos plus vifs remerciements à notre encadreur Monsieur **B.BELABBAS** qu'il trouve ici notre respect et notre gratitude pour ses conseils, encouragement qu'il nous a témoigné pour réaliser ce mémoire.*

*Nous remercions très chaleureusement les membres de jury Monsieur **M.OMARI**, **Mr. I.BEKKI** et **Mr. S.BELFDHAL** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteurs de ce mémoire.*

Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire:

A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude de leur dévouement, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études.

A mes chers frères, chères sœurs

A tout La famille

A toutes mes amis

A toute la promo de l'électrotechnique 2021/2022.

Table de Matière

Remerciements.....	
Dédicaces.....	
Liste des Figures.....	
Liste des Tableaux.....	
Symboles et abreviation	
INTRODUCTION GENERALE.....	2
<i>CHAPITRE I Généralité sur les systèmes FACTS</i>	
I.1. Introduction	5
I.2. Compensateurs statiques (FACTS)	5
I.3. Définition des FACTS.....	5
I.4. Différentes Catégories des FACTS :.....	6
I.5. Types des FACTS.....	6
I.5.1. Compensateurs Parallèles (SVC, STATCOM)	7
I.5.2. Compensateurs séries.....	7
I.5.3. Compensateurs hybrides (TCPAR, UPFC, IPFC).....	8
I.6. Apports et avantages des FACTS.....	9
I.7. Coût des dispositifs FACTS	10
I.8. Définition du STATCOM	10
I.8.1 Principe de fonctionnement du STATCOM	11
I.8.2 Configuration	12
I.8.3 Application de STATCOM	13
I.8.4. Avantages du STATCOM	14
I.8.5. Inconvénient du STATCOM	14
I.9. Conclusion	15
<i>CHAPITRE II Modélisation et simulation d'un STATCOM</i>	
II.1. Introduction	17
II.2. Modèle statique du STATCOM.....	17
II.2.1 Zone de régulation ($V_{in} < E < V_{max}$)	18
II.2.2 Zone de surcharge capacitive ($E < V_m$).....	18
II.2.3 Zone de surcharge inductive ($E > V_{max}$).....	18
II.3. Principe de fonctionnement du STATCOM.....	18

II.4. Modélisation de STATCOM	22
II.5. Description de convertisseur statique CC/CA	26
II.6. Commande de l'Onduleur	27
a. Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)	27
b. Commande par hystérésis	28
II.7. Partie de simulation	28
Scénario 1 : Variation de la tension de référence	30
Scénario 2 : Application d'une charge purement réactive	30
II.8. Conclusion	33
CHAPITRE III Système PV/STATCOM	
III.1. Introduction	34
III.2. Description d'une chaîne de conversion d'énergie PV-STATCOM	34
III.3. Principe de fonctionnement d'une chaîne de conversion d'énergie PV	35
III.4. La cellule solaire	35
III.5. Hacheur	36
III.5.1. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)	36
III.6. Onduleur	38
III.7. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire	38
III.7.1. Les avantages de l'énergie solaire	38
III.7.2. Inconvénients	39
III.8. Résultats de simulation sous différents scénarios	39
1. Système PV connecté au réseau électrique sans défaut	40
2. Système PV connecté au réseau électrique avec le défaut de court-circuit	43
3. Système PV / STATCOM connecté au réseau électrique avec le défaut de court-circuit	44
III.9. Conclusion	44
Conclusion générale	46
Références bibliographiques	47
Résumé	50

Liste des Figures

Figure I.1. Différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques.....	6
Figure I.2. Compensateur Shunt.....	7
Figure I.3. (a) schéma représentatif d'un UPFC, (b) schéma équivalent de l'UPFC.....	9
Figure I.4. (a) structure d'un STATCOM ; (b) schéma équivalent.....	11
Figure I.5. Principe de fonctionnement du STATCOM.....	12
Figure I.6. Static synchronous compensator (STATCOM).....	13
Figure II.1. Schéma de fonctionnement d'un compensateur de puissance réactive synchrone (STATCOM)....	17
Figure II.2. Le STATCOM.....	19
Figure II.3. Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique.....	19
Figure II 4. Courant et tensions en mode capacitif.	21
Figure II .5. Courant et tensions en mode inductif.....	22
Figure II.6. Schéma équivalent simplifié du STATCOM.....	22
Figure II.7. Schéma équivalent du circuit DC du STATCOM.....	24
Figure II.8. Principe de la MLI Sinus-Triangle.....	27
Figure II.9. Principe de la commande par hystérésis	28
Figure II.10. le schéma de simulation simplifié d'un réseau électrique associé avec un STATCOM.....	29
Figure II.11. Courbes des tensions $V(t)$ avec et sans STATCOM.....	30
Figure II.12. Courbe de la puissance réactive délivrée par le STATCOM.....	31
Figure II.13. Courbes de la tension mesurée et la tension de référence.....	31
Figure II.14. Courbe de la puissance réactive délivrée par le STATCOM.....	32
Figure III 1. Système PV-STATCOM.....	34
Figure III.2. Principe de la conversion photovoltaïque.....	35
Figure III.3. Constituants d'une cellule photovoltaïque au silicium.....	36
Figure III.4. Connexion d'un GPV-charge à travers un convertisseur DC/DC.....	36
Figure III.5. Caractéristiques de fonctionnement de la <i>méthode de P&O</i>	37

Figure III.6. Organigramme de l'algorithme MPPT de la Perturbation & Observation.....	38
Figure. III.7. Répartition de la puissance active.....	41
Figure. III.8. Forme d'onde du courant : (a) Charge ; (b) Réseau électrique ; (c) PV.....	42
Figure. III.9. RMS de la tension du réseau électrique.....	43
Figure. III.10. RMS de la tension du réseau électrique avec défaut de court-circuit.....	43
Figure. III.11. RMS de la tension du réseau électrique avec défaut de court-circuit en présence du STATCOM....	44

Liste des Tableaux

Tableau II.1. Caractéristiques du réseau et du STATCOM.....	28
Tableau III.1. Cellule d'une PV (Modele KC200GT).....	40

Symboles et abreviation

FACTS Flexible alternatif curant transmission systems.

SVC Static Var Compensator.

DVR : Dynamique Voltage Restorer.

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistors.

GTO Gate Turn-Off Thyristor.

STATCOM Static Synchronous Compensator.

UPFC Unified Power Flow

SSSC Static Synchronous Series Compensator.

TCSR Thyristor Switched Serie Reactor.

TCSC Thyristor-Controlled Series Capacitor.

Pcc point de couplage commun.

PPM point de puissance maximale.

R Résistance de la ligne de transport.

X réactance de la ligne de transport.

Cs convertisseur statique.

MLI Modulation par Largeur d'Impulsion.

Pv photovoltaïque.

Ps Puissance active fournie par la source.

Qs Puissance réactive fournie par la source.

Vs Tension du jeu de barre de génération (sen ding voltage).

Vr Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage).

PI Proportionnel Intégral (régulateur).

MPPT Maximum Power Point Tracking.

α rapport cyclique.

Vsh Tension (shunt) injectée par le STATCOM.

Ish Courant (shunt) injecté par le STATCOM.

Rsh Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.

Xsh Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.

Psh Puissance active délivrée par le STATCOM.

Qsh Puissance réactive délivrée par le STATCOM.

Ise Courant (série) injecté par le STATCOM.

Vse tension (série) injecté par le SSSC.

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

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

INTRODUCTION GENERALE

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].

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.[4]

Le système photovoltaïque (PV) est l'une des sources d'énergie renouvelables la plus importante grâce à sa disponibilité dans la plupart des secteurs autour du monde.

Le système PV raccordé au réseau électrique peut servir à fournir d'importantes quantités d'énergie. Cependant, cela nécessite un énorme investissement qui rend le coût de l'électricité produite très élevé. [5], En outre, il est facile de l'obtenir comme source d'alimentation CC.

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 trois chapitres

Le premier chapitre a donné une brève revue sur les techniques FACTS, et de brèves définitions des célèbres dispositifs FACTS sont données. Plus précisément le compensateur synchrone «STATCOM» ou on trouve son fonctionnement, sa configuration, ainsi son rôle et apport sur le réseau.

Le deuxième chapitre est consacré au fonctionnement et le modèle mathématique de dispositif STATCOM, puis on simule le système (Réseau + STATCOM) sur le SIMULINK MATLAB.

Dans le troisième chapitre un système PV-STATCOM connecté au réseau électrique est étudié dans un état sein (sans défaut) et dans une état de présence de défaut de court-circuit afin d'avoir l'avantage d'utiliser un système de compensation de l'énergie réactive avec une source d'énergie renouvelable.

Une conclusion générale clôture notre travail.

CHAPITRE I

I.1. Introduction

Les dispositifs FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission Systems*) peuvent être introduits pour faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques.

Le concept de FACTS introduit en 1986 par EPRI (*Electric Power Research Institute*), regroupe l'ensemble des dispositifs basés sur l'électronique de puissance, qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique ainsi que le contrôle des puissances à travers ces derniers. Ces éléments jouent le rôle des interrupteurs très rapides (*Fast Valving*); ce qui donne aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes classiques qui ont des temps de réponse relativement lents.

Plusieurs types de FACTS ont été développés. Parmi lesquels on trouve, les plus connus qui sont le STATCOM (*Static Compensator*), le TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), le SVC (*Static Var Compensator*) ET l'UPFC (*Unified Power Flow Controller*). Chacun de ces dispositifs possède ses propres caractéristiques et peut être utilisé pour répondre à des besoins bien précis. [6]

I.2. Compensateurs statiques (FACTS)

Ils sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors, montés en tête-bêche dans chaque phase. La puissance réactive absorbée par l'inductance varie en contrôlant la valeur efficace du courant qui la traverse par action sur l'angle d'amorçage des thyristors [7].

I.3. Définition des FACTS

Les dispositifs FACTS «Flexible Alternative Current Transmission Systems» sont des systèmes flexibles de transmission à courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes [8]. La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de

transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. Ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie.

I.4. Différentes Catégories des FACTS :

Le tableau de la figure I.1 représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques; la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composant de base (R L C). Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commandés avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance. [9] [10]

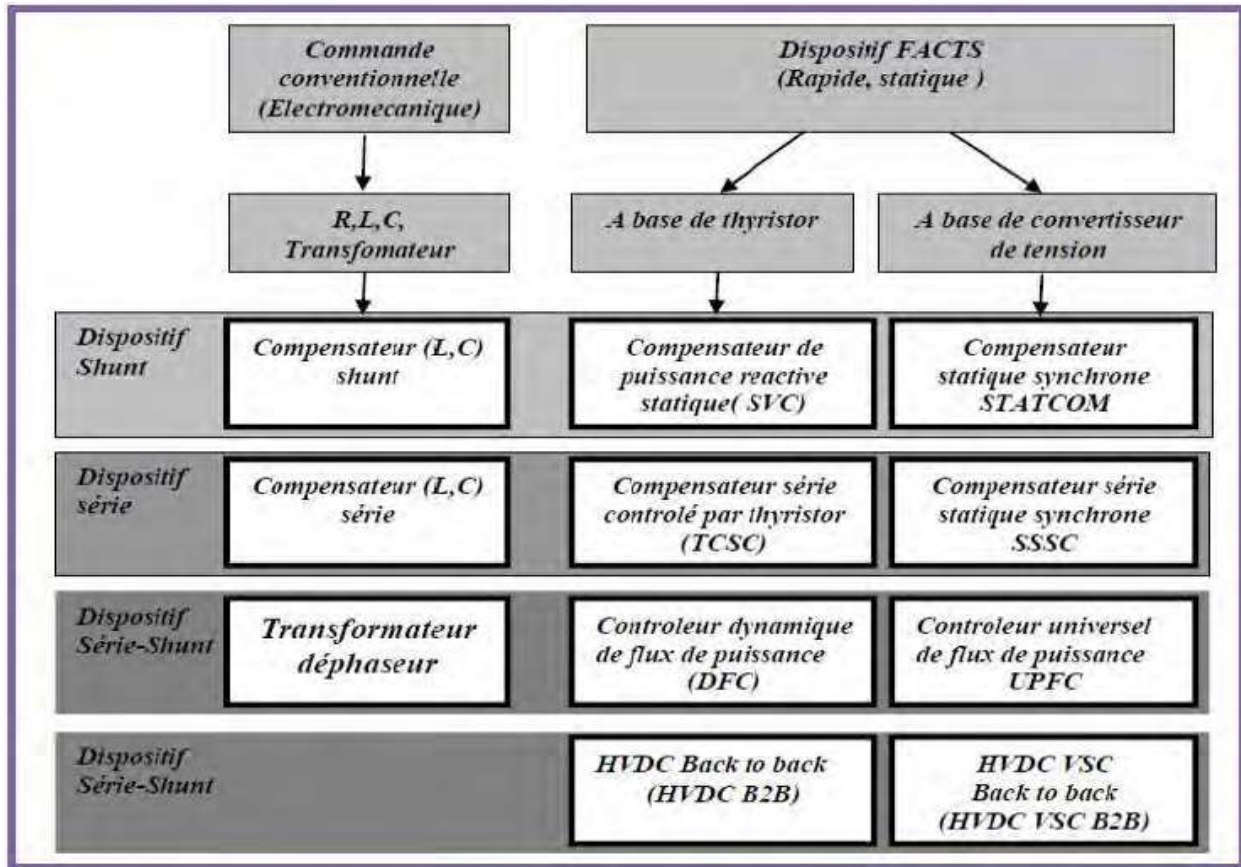


Figure I.1. Différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques

I.5. Types des FACTS

Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories.

- Les compensateurs parallèles.
- Les compensateurs séries.
- Les compensateurs hybrides (séries-parallèles).

I.5.1. Compensateurs Parallèles (SVC, STATCOM)

Ils consistent en une impédance variable Figure I.2, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Les FACTS shunt ont été identifiés comme des solutions les plus efficaces et les plus utilisés pour résoudre les problèmes de la régulation de l'énergie, par conséquent le contrôle de la tension de la génératrice est d'améliorer la qualité d'énergie produite. Il existe des systèmes à base de thyristors des compensateurs de puissance réactive statique (SVC) et des systèmes à base de convertisseurs de tension compensateurs statiques synchrones (STATCOM). [11] [12]

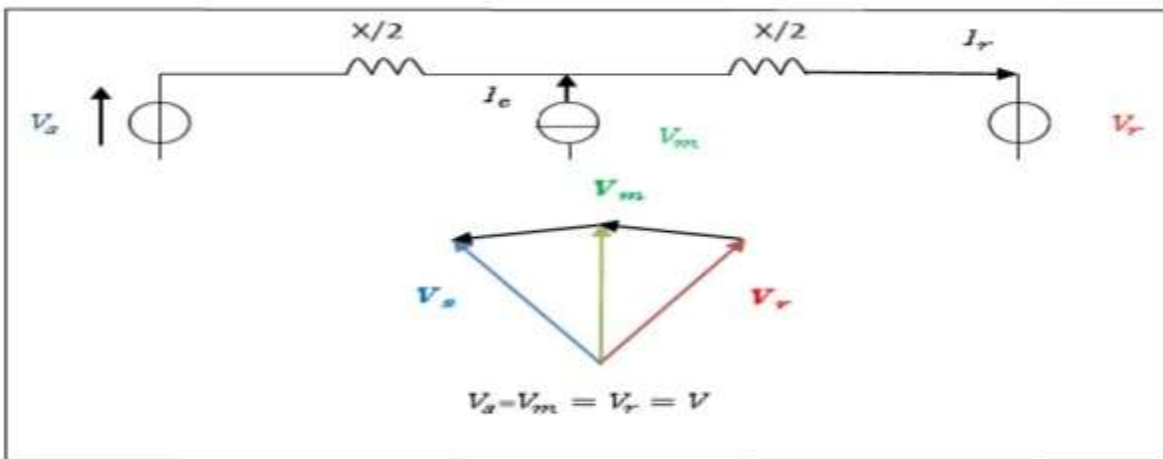


Figure I.2. Compensateur Shunt.

I.5.2. Compensateurs séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable.

Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général, ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission. [8]

Les FACTS dans la compensation série modifient l'impédance de la ligne : la réactance (X) de la ligne est diminué, donc augmenter la puissance active transmissible. Cependant la puissance réactive doit être plus fournie. [9]

I.5.3. Compensateurs hybrides (TCPAR, UPFC, IPFC)

C'est une combinaison des dispositifs série et parallèle commandé d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variable, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie. Dans cette catégorie on peut citer les Contrôleurs Dynamiques du Flux de puissance (CDF), contrôleurs universels du flux de puissance (UPFC), HVDC back to back et HVDC VSC back to back. comme le résume la figure(I.3) [11]

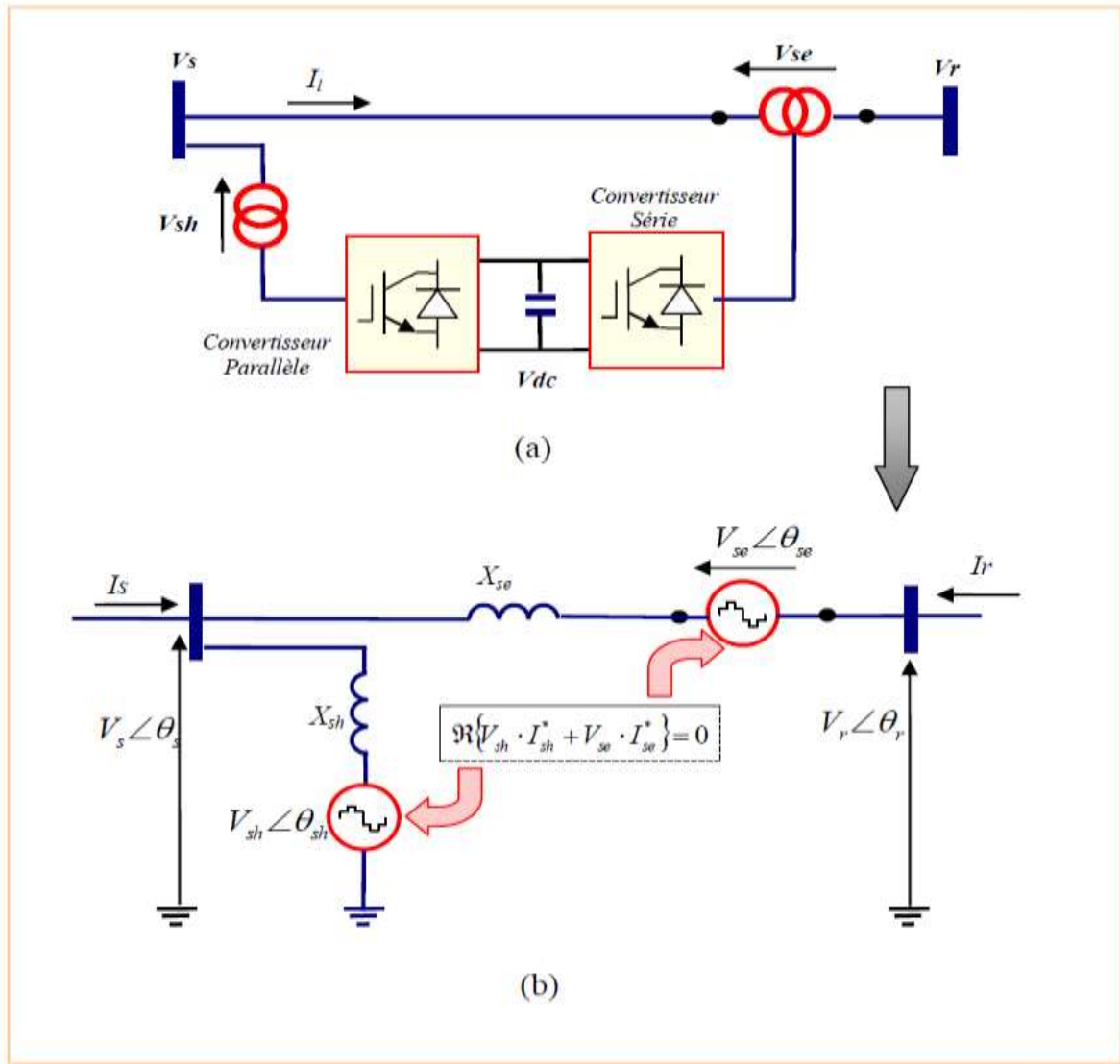


Figure I.3 (a) schéma représentatif d'un UPFC, (b) schéma équivalent de l'UPFC

I.6. Apports et avantages des FACTS

L'intérêt majeur de la technologie FACTS pour les opérateurs de l'énergie électrique est d'ouvrir plus d'opportunités pour le contrôle de la puissance et d'augmenter les capacités des lignes sous les conditions normales. Les contrôleurs

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

- Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS. Ce contrôle doit être réalisé pour satisfaire les besoins des consommateurs ;
- Améliorer la stabilité dynamique du système ;
- Contrôle des tensions dans les noeuds ;
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques ;
- Contrôle de la puissance réactive: Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergie active et par conséquence réduire les pertes de transmission ;
- Amélioration de la qualité de l'énergie ;

Dans notre étude on s'intéressera à l'un des dispositifs de la famille des FACTS, destinées à la compensation et au contrôle des réseaux électriques, à base d'onduleurs de tension connectés au réseau électrique en parallèle, est connu sous l'appellation "STATCOM" pour lequel on étudiera son principe de fonctionnement et son rôles dans le contrôle des réseaux électriques. [8]

I.7. Coût des dispositifs FACTS

Mis à part les avantages techniques apportés par les FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les couts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation.

Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que :

- Les performances requises;
- La puissance de l'installation ;
- Le niveau de tension du système ;
- La technologie du semi-conducteur utilisé. [6]

I.8. Définition du STATCOM

Le STATCOM est un convertisseur de tension à base de GTO (Gate Turn off Thyristor) ou IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) alimenté par des batteries d'accumulateurs,

l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage. Ce dispositif est semblable à un compensateur synchrone Figure I.4. [8]

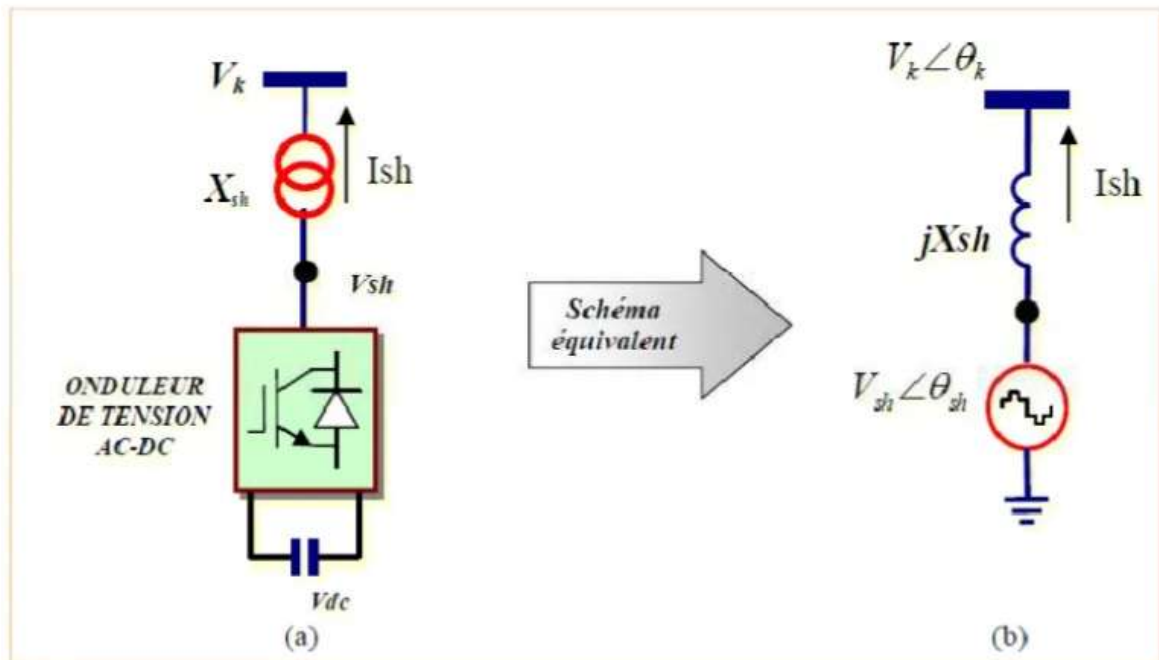


Figure I.4 (a) structure d'un STATCOM ; (b) schéma équivalent.

Le STATCOM est capable de délivrer la puissance même si la tension du jeu de barre de connexion est très faible, il y a eu lieu de signaler que le courant du STATCOM est indépendant de la tension du nœud.

I.8.1 Principe de fonctionnement du STATCOM

Le rôle du STATCOM est de compenser la puissance réactive, ce qui conduit à la régulation de la tension au jeu de barres auquel il est connecté. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de la puissance réactive à échanger avec le réseau [13].

Il n'y a pas d'échange de puissance active avec le réseau mais seulement la puissance réactive comme le montre la Figure I.5, (facteur de puissance quasi nul)

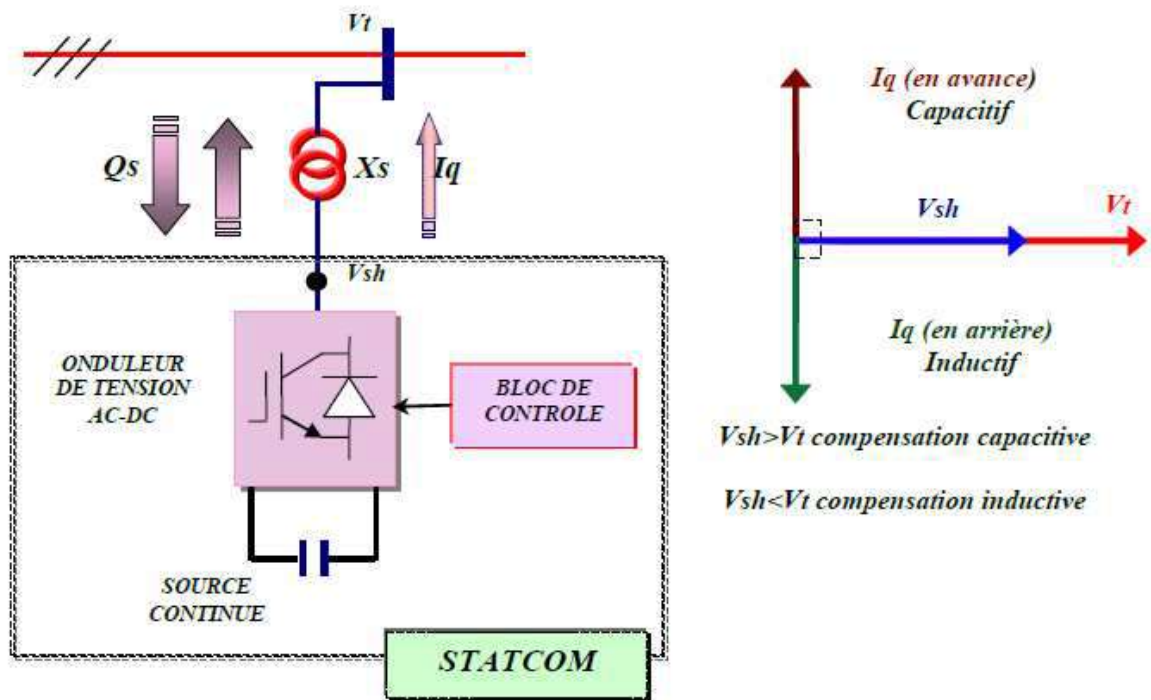


Figure I.5. Principe de fonctionnement du STATCOM.

I.8.2 Configuration

STATCOM utilise IGBT, IGCT ou GTO comme dispositifs de commutation. Dans ces commutateurs, les deux les événements d'activation et de désactivation peuvent être contrôlés. Cela donne donc deux degrés de liberté par rapport à un degré de liberté donné par les thyristors dans les SVC. Cela en fait plus rapide et plus efficacement contrôlable.

La figure 1.6 présente un STATCOM typique connecté à un bus moyenne tension (MT). Un transformateur 'TR' est utilisé pour abaisser tension du bus haute tension (HV) afin que les commutateurs de tension nominale inférieure (S1-S6) puissent être utilisés. Il a un condensateur au niveau de la liaison CC pour fournir le chemin du courant [1]. Le lissage self/transformateur est utilisé pour réduire le contenu harmonique en tension. Le temps de fonctionnement de STATCOM est de 15 à 30 ms, ce qui est très rapide parmi tous les appareils FACTS mentionné ci-dessus. La raison principale de sa réponse rapide est l'absence de toute masse en rotation et l'utilisation d'IGBT, d'IGCT ou de GTO comme dispositif de commutation. Ceci explique le nom, STATic COMPensateur synchrone (STATCOM). [14]

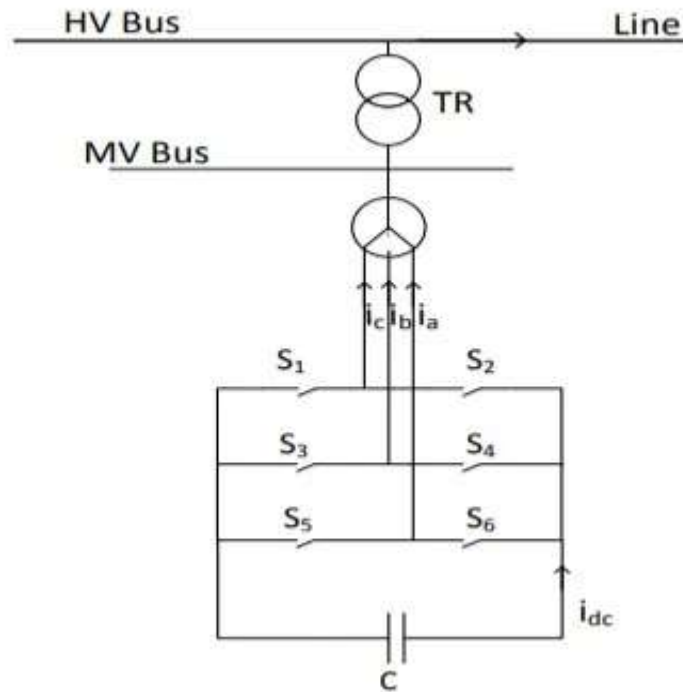


Figure I.6 Static synchronous compensator (STATCOM)

I.8.3 Application de STATCOM

L'application principale de STATCOM est de fournir une compensation de puissance réactive dynamique et de réguler la tension au bus d'interconnexion dans des limites acceptables. Plusieurs juridictions au Canada utilisent STATCOM. Mines et métallurgie les industries ont installé STATCOM pour renforcer leur alimentation électrique. Les industries Petro chimiques utilisent des moteurs de grande puissance, à cause desquels la tension descend sur le chargeur. Pour maintenir la fiabilité de l'alimentation et fournir un support de tension dynamique rapide pendant les conditions de défaut équilibré et déséquilibré, le service public a installé trois unités de 12 MVar STATCOM en Colombie-Britannique.

Les installations de mines d'or en Ontario ont utilisé la solution STATCOM pour aider leur haute puissance demande ou augmentation de la charge due à l'expansion de l'installation minière existante. Une nouvelle mine le développement en Ontario nécessite des machines électriques de grande puissance alimentées par de très longs câbles longueurs. Pour faciliter leur fonctionnement, ils ont utilisé 6 unités de STATCOM, chacune notée 4,5 MVar pour le support

de puissance réactive pour réguler la tension. Le temps de réponse rapide de STATCOM garantit l'exigence de performance de puissance, avec la longévité des moteurs et du processus équipements, assurant ainsi un retour sur investissement rapide.

Les moteurs à induction aux charges de la mine sont la principale cause d'effondrement de tension et de mauvaise qualité de l'alimentation. La Saskatchewan a une forte concentration de moteurs à induction aux charges de la mine. Avec augmentation de la charge, les installations deviennent vulnérables aux inefficacités des équipements et aux déclenchements hors ligne en raison d'une mauvaise tension sur le bus.

Un service public a utilisé deux STATCOM de 5,5 MVar pour compensation VAR dynamique pour atténuer l'impact sur le réseau [15].

I.8.4. Avantages du STATCOM

Le STATCOM possède plusieurs avantages sur les compensateurs conventionnels

- L'étendue de la plage d'opération est plus large qu'avec un SVC classique
- Il réagit plus vite, pouvant répondre en moins d'un cycle à des variations de tension
- Lorsque la tension se baisse, il peut produire plus de puissance réactive, pour empêcher que la tension chute davantage
- Bonne réponse à faible tension: le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle
- Bonne réponse dynamique: Le système répond instantanément
- Il ne présente pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau
- Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système [16]

I.8.5. Inconvénient du STATCOM

- Le STATCOM de base engendre de nombreux harmoniques. Il faut donc utiliser, pour résoudre ce problème, des compensateurs multi-niveaux à commande MLI ou encore installer des filtres [16]

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux dispositifs FACTS ainsi que leurs bases de fonctionnement dans les réseaux électriques.

En particulier, les dispositifs de type STATCOM qui ont pour rôle de maintenir la tension dans des plages admissibles, d'augmenter la puissance transmise dans les grandes lignes de transmission et l'amortissement des oscillations de puissances. Ils présentent certains avantages par rapport à d'autre dispositif de compensation tels leur aptitude à contrôler la tension de manière efficace en fournissant du courant réactif même sous de basses tensions du réseau, leur flexibilité, leur rapidité et leur état statique qui réduit leur maintenance.

Donc la qualité essentielle de ces dispositifs leur revient grâce à leurs performances dynamiques, ce qui les rend plus compétitifs et mieux adaptés aux utilisations modernes d'énergie électrique.

Dans le chapitre qui suit, nous allons montrer, à travers la simulation sur un réseau électrique, le fonctionnement du STATCOM.

CHAPITRE II

II.1. Introduction

Le développement rapide de l'électronique de puissance a eu un effet considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques en performant le contrôle de leurs paramètres par l'introduction de dispositifs de contrôle à base des composants d'électronique de puissance très avancés (GTO, IGBT) connus sous l'acronyme FACTS : Flexible Alternatif Curant Transmission System.

Parmi ces dispositifs le STATCOM, objet de ce mémoire, qui est utilisé souvent pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent, le maintien d'un profil de tension.

La compensation de puissance réactive peut se réaliser de plusieurs manières. La plupart des moyens cités sont certes efficaces mais présentent tout de même tous des défauts : Souplesse, temps de réaction élevé ou génération d'harmoniques. Afin d'éviter ces inconvénients on utilise aujourd'hui des onduleurs à pulsation qui présente de nombreux avantage.

Pour pouvoir observer l'impact des dispositifs FACTS (STATCOM) dans un Réseau électrique, il est nécessaire de les représentés par des modèles mathématiques appropriés.

Les modèles mathématiques des convertisseurs de tension pour les différentes connexions dans un réseau électriques, série ou parallèle, sont très utiles sinon obligatoire pour analyser leurs fonctionnements et déterminer des lois de commande de ces dispositifs (FACTS) à base de ces convertisseurs [17].

II.2. Modèle statique du STATCOM

Ce modèle simple est destiné à l'étude statique des réseaux électriques sur des logiciels de répartition de charge [8].

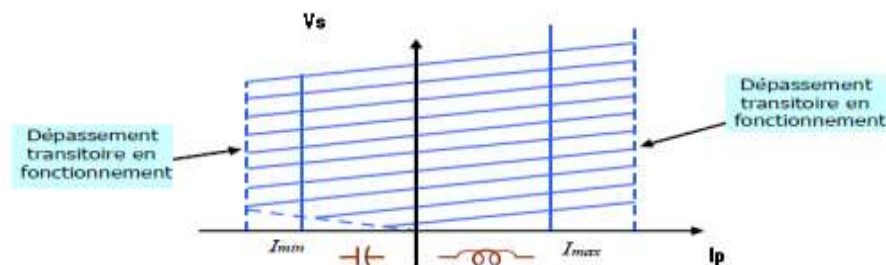


Figure II.1. Schéma de fonctionnement d'un compensateur de puissance réactive synchrone (STATCOM) [8].

II.2.1 Zone de régulation ($V_{in} < E < V_{max}$)

La caractéristique est linéaire et régie par l'équation (II.1). On aura dans la zone de régulation

$$E = V_{réf} + X_{sh} \cdot I_{Statcom} \quad (II.1)$$

E : est la tension au point de connexion du STATCOM

X_{sh} : Est la pente de la caractéristique statique du STATCOM.

$V_{réf}$: Est la tension de référence

$I_{Statcom}$: Est le Courant fournit par le STATCOM.

II.2.2 Zone de surcharge capacitive ($E < V_m$)

Dans cette zone, le courant du STATCOM (II.2) est maintenu à son courant I_{cmax}

$$I_{sh} = E - \frac{V}{X} \quad (II.2)$$

II.2.3 Zone de surcharge inductive ($E > V_{max}$)

Dans cette zone, le courant du STATCOM est maintenu à son courant I_{1max} défini de la même façon qu'en charge capacitive.

Ce modèle restitue la caractéristique statique du STATCOM, il a pour inconvénient une grande erreur sur le courant en s'éloignant trop de la référence [18].

II.3. Principe de fonctionnement du STATCOM

Le rôle du STATCOM est de compenser la puissance réactive, ce qui conduit à la régulation de la tension au jeu de barres auquel il est connecté. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de la puissance réactive à échanger avec le réseau [4].

En général la tension du STATCOM est injectée en phase avec la tension 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.2) (facteur de puissance quasi nul) [6]

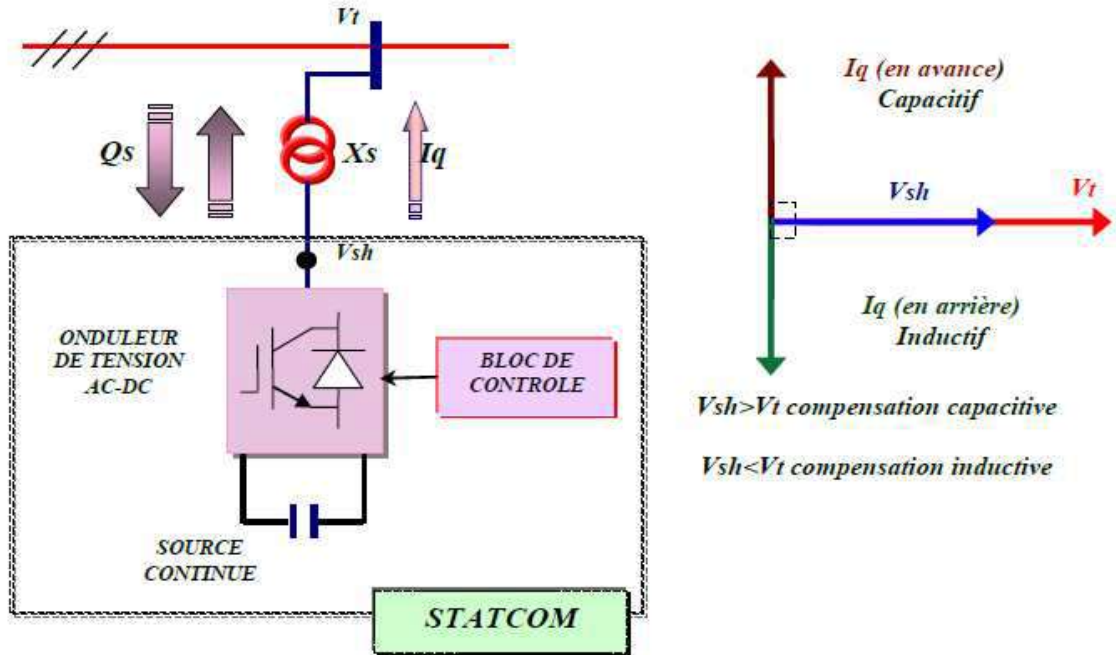
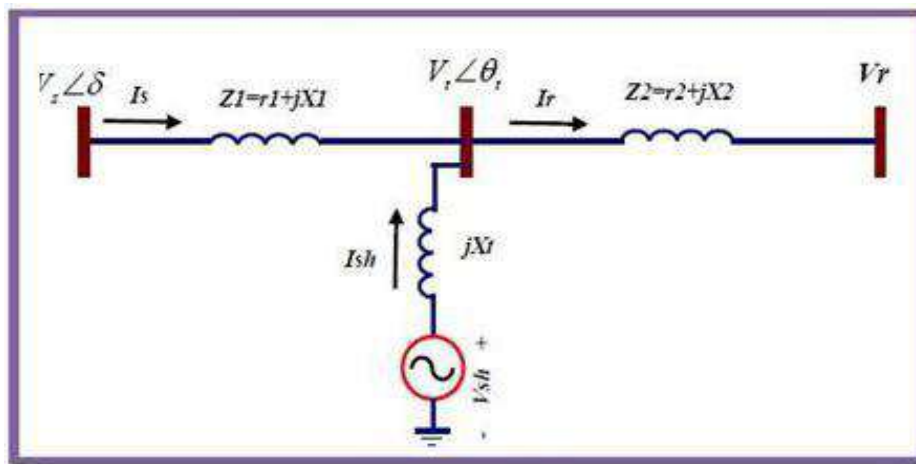


Figure II.2. Le STATCOM.

Considérant le STATCOM de la figure (II.2) connecté à un jeu de barre dans le système énergétique (source de tension, ligne et charge), le schéma équivalent de ce dispositif est donné



par la figure (II.3).

Figure II.3. Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique

Mise en équations du système:

Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$\bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t}{jX_t} \quad (\text{II.3})$$

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

$$S = \bar{V}_t \cdot \bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_t(\bar{V}'_{sh} - \bar{V}'_t)}{-jX_t} = \frac{\bar{V}_t \cdot \bar{V}'_{sh} - \bar{V}_t^2}{-jX_t} \quad (\text{II.4})$$

D'où on aboutit aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre "t" exprimées par les formules qui suivent:

$$P_{sh} = \frac{-V_t \cdot V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh})}{X_t} \quad (\text{II.5})$$

$$Q_{sh} = \frac{V_t(V_{sh} \cdot \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t)}{X_t} \quad (\text{II.6})$$

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 :

$$P_{sh} = \frac{-V_t \cdot V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh})}{X_t} = 0 \quad (\text{II.7})$$

D'où la condition $\theta_t - \theta_{sh} = 0 \Rightarrow \theta_{sh} = \theta_t$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement. [6]

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 Figure(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) :

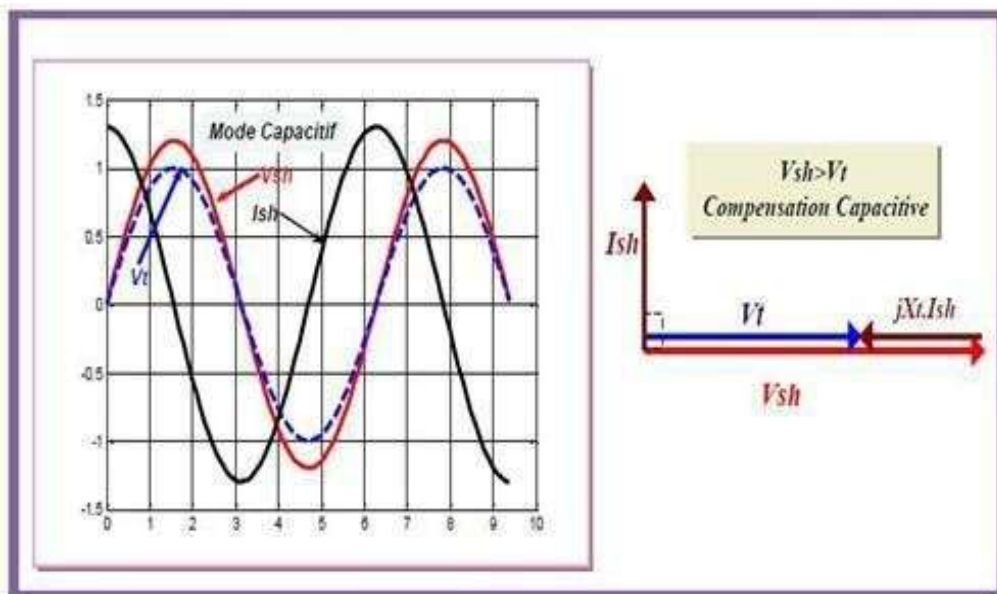
$$V_{shd} = V_{sh}; V_{shq} = 0 \quad (II.8)$$

$$|I_{sh}| = I_{sh} = \frac{(V_{sh} - V_t)}{X_t} \quad (II.9)$$

$$Q_{sh} = V_{sh} \cdot I_{sh} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}\right) \quad (II.10)$$

A partir de l'équation (2.4) il parait claire 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.4).
- 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 inductif Fig. (II.5).

Figure II 4. Courant et tensions en mode capacitif. [10]

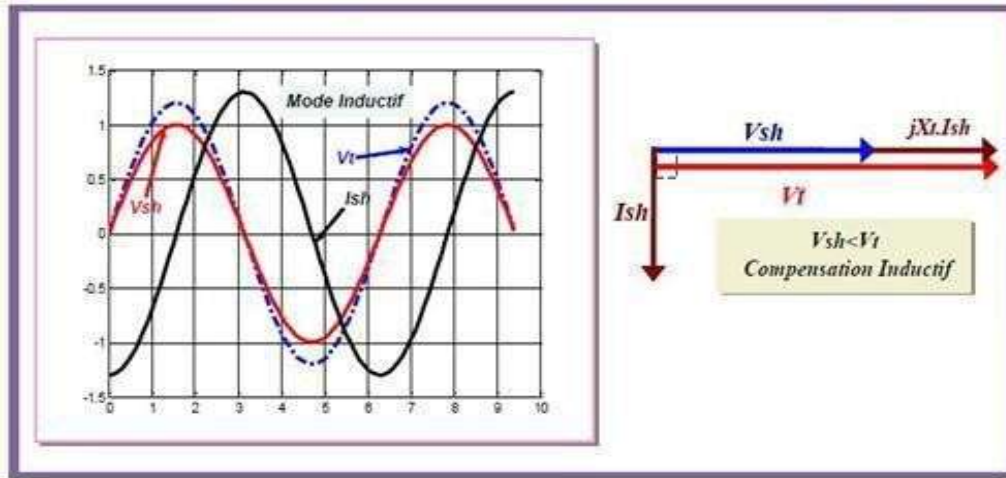


Figure II .5. Courant et tensions en mode inductif. [10]

II.4. Modélisation de STATCOM

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, [8]. 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].

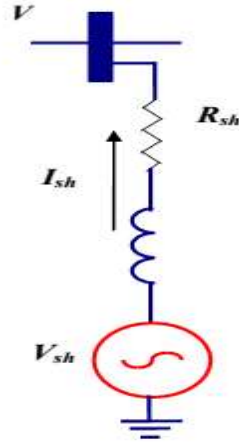


Figure II.6. Schéma équivalent simplifié du STATCOM.

L'équation (II.11) illustre la relation entre les courants et les tensions pour chaque phase, côté alternatif :

$$\bar{V}_r - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \cdot \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (\text{II.11})$$

Tel que

$$\bar{V}_r = \begin{bmatrix} V_r & - & a \\ V_r & - & b \\ V_r & - & c \end{bmatrix}; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{sh} & - & a \\ V_{sh} & - & b \\ V_{sh} & - & c \end{bmatrix}; \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{sh} & - & a \\ I_{sh} & - & b \\ I_{sh} & - & c \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Alors on peut écrire l'équation (II.17) sous la forme matricielle comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_r & - & a \\ V_r & - & b \\ V_r & - & c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{sh} & - & a \\ V_{sh} & - & b \\ V_{sh} & - & c \end{bmatrix} = R_{sh} \begin{bmatrix} I_{sh} & - & a \\ I_{sh} & - & b \\ I_{sh} & - & c \end{bmatrix} + L_{sh} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh} & - & a \\ I_{sh} & - & b \\ I_{sh} & - & c \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Pour simplifier ces équations on utilise la transformation de Park dite « des deux axes » (en 1920). La matrice de Park modifiée est :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - biphasé, elle permet de passer du repère (abc) vers le repère (d q) [20] (voir Figure (9)).

Généralement, on peut écrire :

$$[X_{abc}] = [P(\theta)] [X_{odq}] \quad (\text{II.15})$$

Alors :

$$[X_{odq}] = [P(\theta)]^{-1} [X_{abc}] \quad (\text{II.16})$$

L'équation (II.16) est de la forme :

$$[V_{abc}] = [R][I_{abc}] + L \frac{d[I_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.17})$$

Alors:

$$[V_{r_abc} - V_{sh_abc}] = R_{sh} [I_{sh_abc}] + L_{sh} \frac{d[I_{sh_abc}]}{dt} \quad (\text{II.18})$$

Après le développement de cette équation on a trouvé :

$$[V_{r_dq} - V_{sh_dq}] = R_{sh} [I_{sh_dq}] + \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} L_{sh} \frac{d\theta}{dt} [I_{sh_dq}] + L_{sh} \frac{d[I_{sh_dq}]}{dt} \quad (\text{II.19})$$

Tel que : $\frac{d\theta}{dt} = \omega$, alors :

$$\begin{cases} V_{r_d} - V_{sh_d} = R_{sh} \cdot I_{sh_q} - L_{sh} \cdot \omega I_{sh_q} + L_{sh} \frac{d I_{sh_d}}{dt} \\ V_{r_q} - V_{sh_q} = R_{sh} \cdot I_{sh_d} - L_{sh} \cdot \omega I_{sh_d} + L_{sh} \frac{d I_{sh_q}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

De l'équation (II.20):

$$\begin{bmatrix} V_{rd} - V_{sh_d} \\ V_{rq} - V_{sh_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sh} & 0 \\ 0 & R_{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -L_{sh}\omega \\ L_{sh}\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} + L_{sh} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

On peut trouver :

$$L_{sh} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_{rd} - V_{sh_d} \\ V_{rq} - V_{sh_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ \omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Où le vecteur $\begin{bmatrix} V_{rd} - V_{sh_d} \\ V_{rq} - V_{sh_q} \end{bmatrix}$ présente le vecteur de commande du système. Maintenant on

tient compte le circuit DC dans le modèle mathématique du STATCOM, le circuit continu est

représenté par une source de courant connecté au condensateur C et une résistance shunt pour exprimer les pertes joules dans le circuit (voir Figure (II.7)) [21].

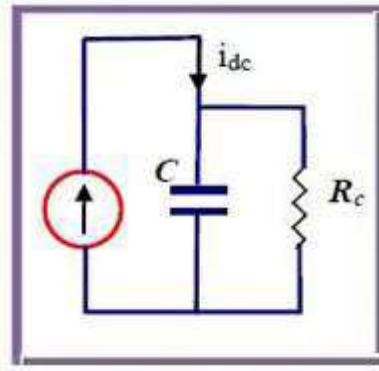


Figure II.7. Schéma équivalent du circuit DC du STATCOM

On peut écrire le $V_{sh_{dq}}$ qui possède deux composantes (d et q) sous forme d'une grandeur comme suit :

$$V_{sh_{dq}} = V_{sh_d} + jV_{sh_q} = V \cos \theta + jV \sin \theta \quad (II.23)$$

V : étant le module de la tension injectée qui dépend directement de la tension continue U_{dc} et exprimé par :

$$V = m \cdot U_{dc} \quad (II.24)$$

m : est l'indice de modulation il ne dépend que de type de l'onduleur.

On remplace (II.23) et (II.24) dans l'équation (II.20) on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} - m \cdot U_{dc} \cos \theta = R_{sh} I_{sh_q} - L_{sh} \omega I_{sh_q} + L_{sh} \frac{dI_{sh_q}}{dt} \\ V_{rq} - m \cdot U_{dc} \sin \theta = R_{sh} I_{sh_d} - L_{sh} \omega I_{sh_d} + L_{sh} \frac{dI_{sh_d}}{dt} \end{cases} \quad (II.25)$$

La puissance circulante entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (II.26) :

$$P_{sh} = U_{dc} \cdot I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{sh_d} \cdot V_{sh_d} + V_{sh_q} \cdot V_{sh_q}) \quad (II.26)$$

Le courant I_{dc} est défini comme étant la somme du courant capacitif " I_c " et le courant résistif " I_{rc} " dans la branche de la résistance R_c :

$$I_{dc} = I_c + I_{rc} \quad (II.27)$$

Avec : $I_c = C \frac{U_{dc}}{dt}$ et $I_{rc} = \frac{U_{dc}}{R_c}$, alors (II. 27) devient :

$$I_c = C \frac{U_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (II.28)$$

De ces équations (II-23-24-26-28) on peut tirer l'équation dynamique du coté continu du STATCOM suivante:

$$C \frac{U_{dc}}{dt} \frac{3}{2} m (I_{sh_d} \cos \theta - I_{sh_q} \sin \theta) - \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (II.29)$$

L'équation (II-25) et (II.29) forment le système d'équation d'état du STATCOM en tenant compte des variations de la tension du circuit continu qu'on écrit sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega & -\frac{m}{L_{sh}} \cos \theta \\ \omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & -\frac{m}{L_{sh}} \sin \theta \\ \frac{3m}{2c} \cos \theta & -\frac{3m}{2c} \sin \theta & -\frac{1}{R_{cc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (II.30)$$

II.5. Description de convertisseur statique CC/CA

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative.

Il existe des onduleurs :

- **Non autonomes** : la fréquence et la forme d'onde sont imposées par la source du coté alternative « le réseau ».
- **Autonomes** : la fréquence et la forme d'onde sont imposées par la commande et la source du coté continue.

L'onduleur est un convertisseur réversible, il permet de transfert la puissance du l'alternative vers le continue, mais le sens normal de transfert est du continue vers l'alternative.

On distingue deux grands types d'onduleurs :

Les onduleurs de tension : alimenté par une source de tension continue.

Les onduleurs de courant : alimenté par une source de courant continu.

II.6. 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 (II.8)). [3] [19].

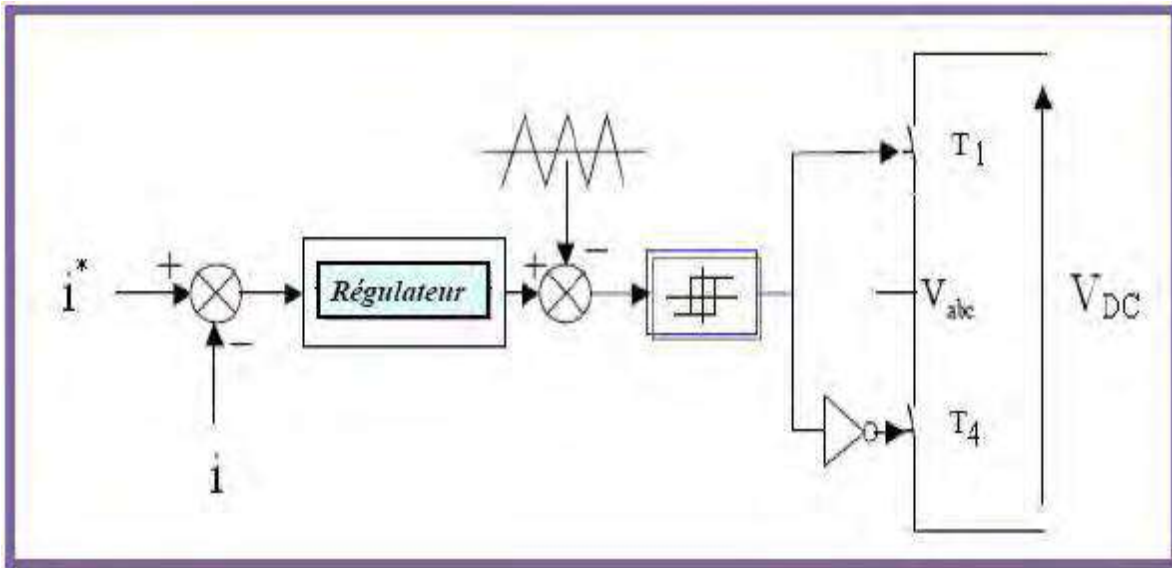


Figure II.8. Principe de la MLI Sinus-Triangle

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 II.9).

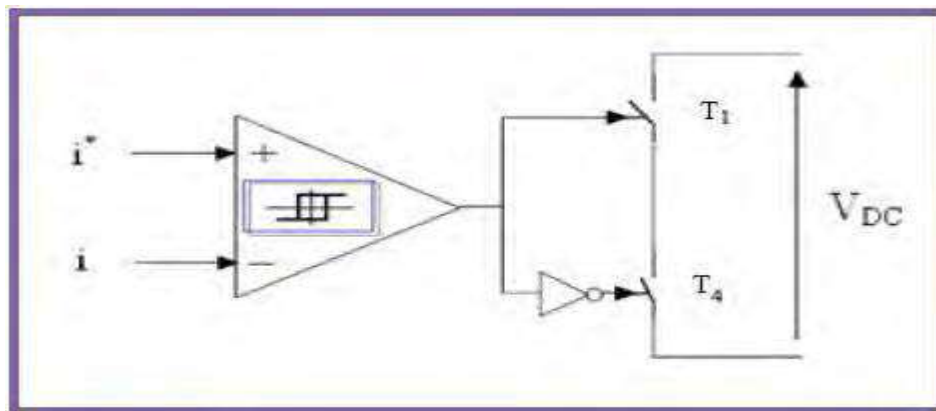


Figure II.9. Principe de la commande par hystérésis

II.7. Partie de simulation

Dans cette partie nous présentons les résultats de simulation d'un STATCOM présenté dans la figure II.1 simulé à travers un logiciel MATLAB / Sim Power System. Les caractéristiques du réseau et du STATCOM sont illustrées dans le tableau II.1. Deux scénarios seront étudiés pour le STATCOM pour le but d'avoir ces avantages de ce connexion avec le réseau électrique.

Tableau II.1. Caractéristiques du réseau et du STATCOM.

Grandeur	Valeur
Tension du réseau	380 V
Fréquence	50 Hz
Tension nominale du STATCOM	380 V
Capacité du STATCOM	375 μF

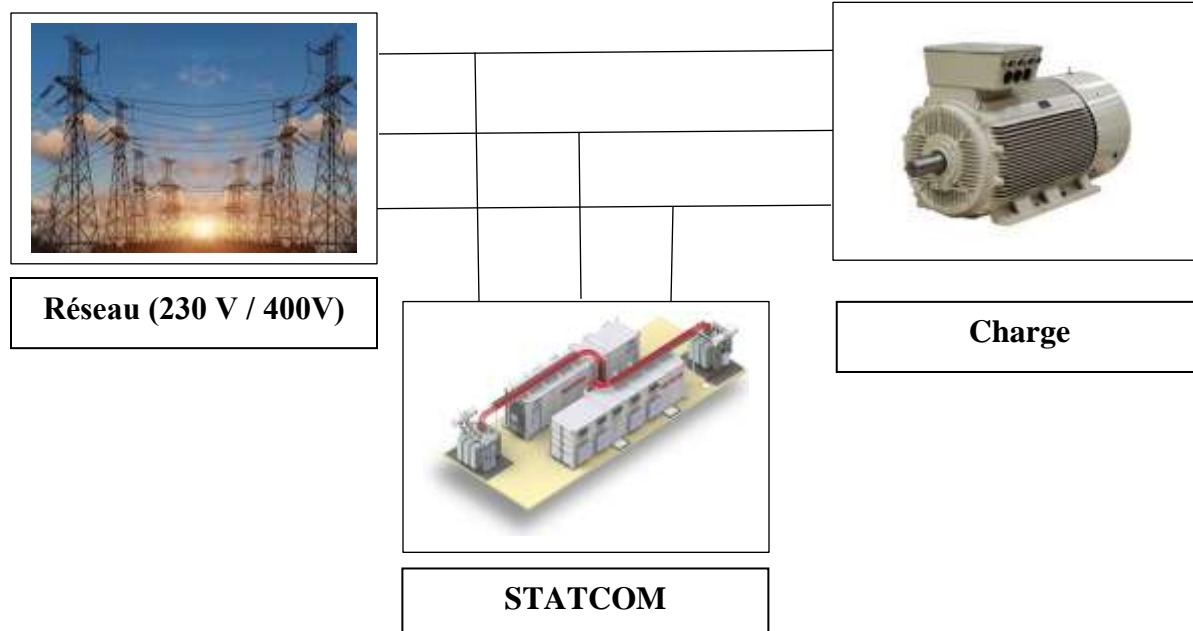


Figure II.10. le schéma de simulation simplifié d'un réseau électrique associé avec un STATCOM

Scénario 1 : Variation de la tension de référence

Pour montrer le rôle du STATCOM dans le réseau électrique proposé dans notre projet de fin d'étude, nous avons changé la consigne de la tension du réseau présenté dans la figure II.11 de $[220\ 213]V$ et de $[213\ 227]V$ à $t = [0.2\ 0.4]s$ et à $t = [0.4\ 0.6]s$ respectivement.

D'après cette figure, on constate clairement que le STATCOM réagit rapidement afin d'améliorer le niveau de la tension d'une valeur de $213V$ à $217V$ et de $227V$ à $224V$

La figure II.12 présente les allures de la puissance réactive de référence et celle délivrée par le STATCOM.

Dans l'intervalle $[0.2\ 0.4] s$ il y a une diminution de la tension dans ce cas le STATCOM fourni une puissance réactive pour minimiser de la chute de tension

Dans l'intervalle $[0.4\ 0.6] s$ il y a une augmentation de la tension dans ce cas le STATCOM absorbe une puissance réactive pour minimiser de la surtension.

Scénario 2 : Application d'une charge purement réactive

Ce scénario a pour le but d'étudier le comportement du STATCOM lors de l'application des charges purement inductive dans l'intervalle $t = [0.4\ 0.6] s$.

Les figure II.13 et II.14 présente les allures de la tension (référence, mesurée) et les allures de la puissance réactive délivrée par le STATCOM respectivement.

On constate que le STATCOM délivre la puissance réactive demandée par la charge et que la tension reste proche de sa valeur nominale.

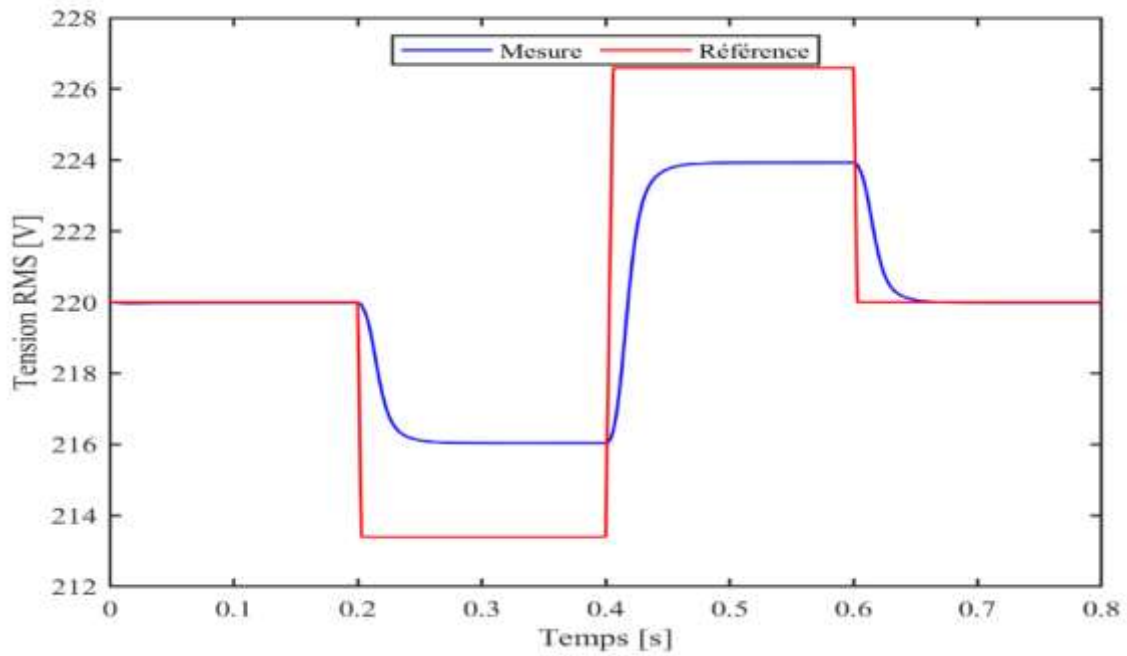


Figure II.11. Courbes des tensions $V(t)$ avec et sans STATCOM

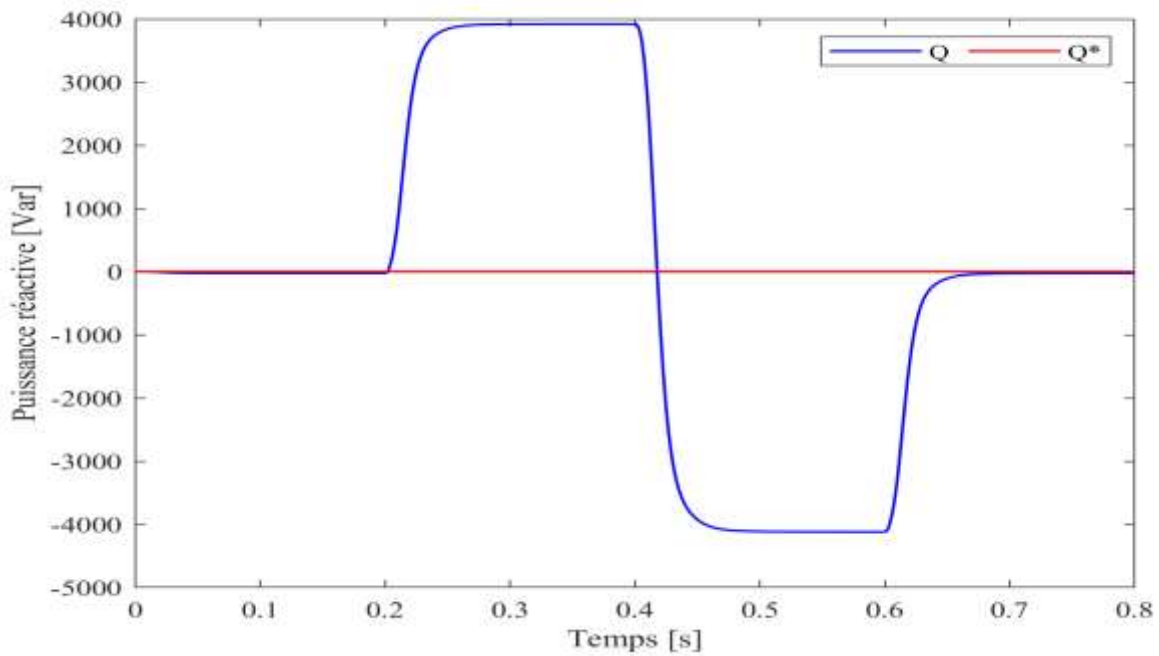


Figure II.12. Courbe de la puissance réactive délivrée par le STATCOM

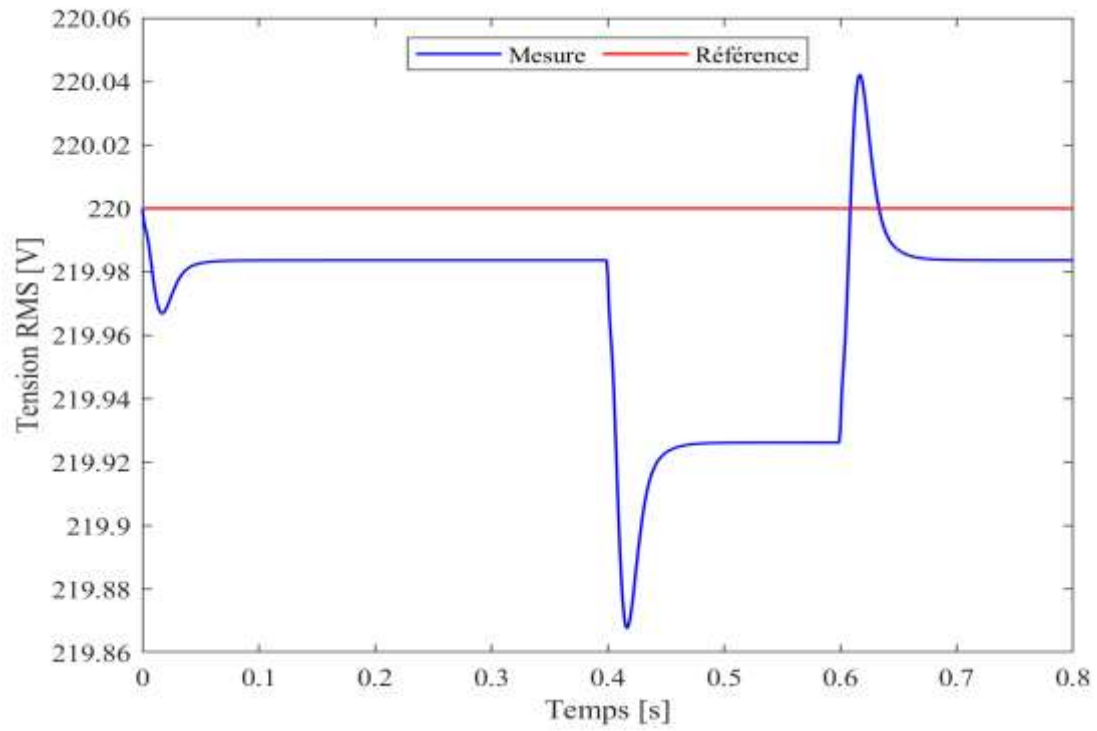


Figure II.13. Courbes de la tension mesurée et la tension de référence

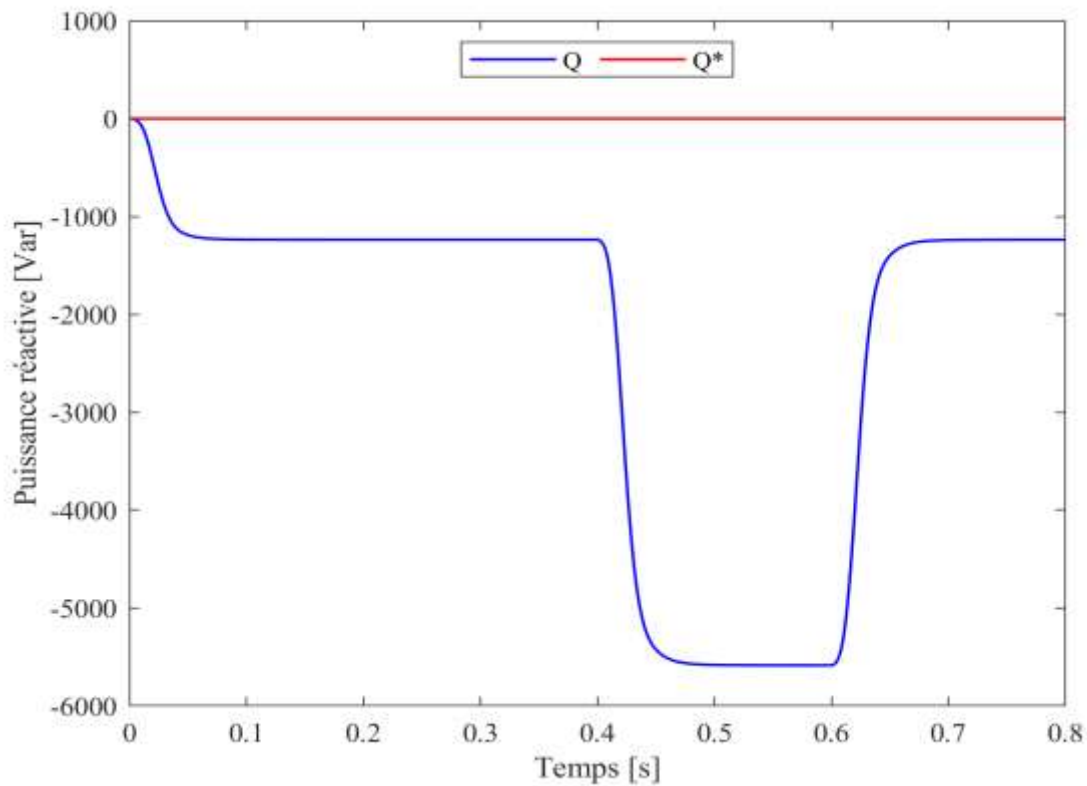


Figure II.14. Courbe de la puissance réactive délivrée par le STATCOM

II.8. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude et la modélisation d'un STATCOM. Les résultats de simulations sous l'environnement MATLAB/Simulink du dispositif STATCOM nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de ce dispositif FACTS dans les différents modes de fonctionnement.

Le dernier chapitre est basé sur l'étude de la connexion d'un système du STATCOM avec une source d'énergie renouvelable de type PV.

CHAPITRE III

III.1. Introduction

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. [22]

Dans un système de conversion des énergies photovoltaïques, les convertisseurs sont utilisés pour bien adapter la source à la charge. Ces convertisseurs peuvent être en courant continu, comme dans le cas d'utilisation des MPPT pour une exploitation maximale de la puissance fournie par le générateur PV, ou en courant alternatif comme dans le cas d'utilisation des charges en courant alternatif.[23]

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu sur le système de conversion d'énergie PV ainsi sa simulation sans et avec le STATCOM avec la présence d'un défaut de court-circuit.

III.2. Description d'une chaîne de conversion d'énergie PV-STATCOM

Le système de la figure III.1 est composé de GPV, d'un convertisseur CC / CC (hacheur survolteur), d'un bus continu de l'onduleur CC / CA commandé par la technique de MLI, de filtre et le réseau électrique et un compensateur statique synchrone (STATCOM).

Le hacheur survolteur sera commandé dans le but d'extraire et d'injecter le maximum de puissance du GPV. L'onduleur est chargé de transférer l'énergie produite par le GPV dans le réseau électrique. et Le STATCOM Pour améliorer l'énergie dans le réseau électrique.

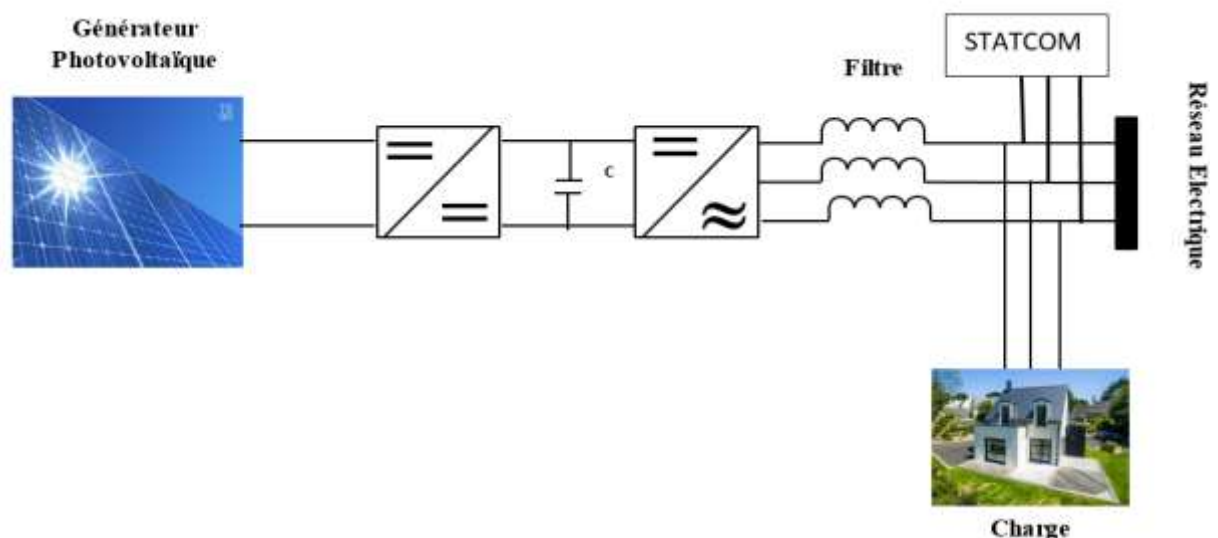
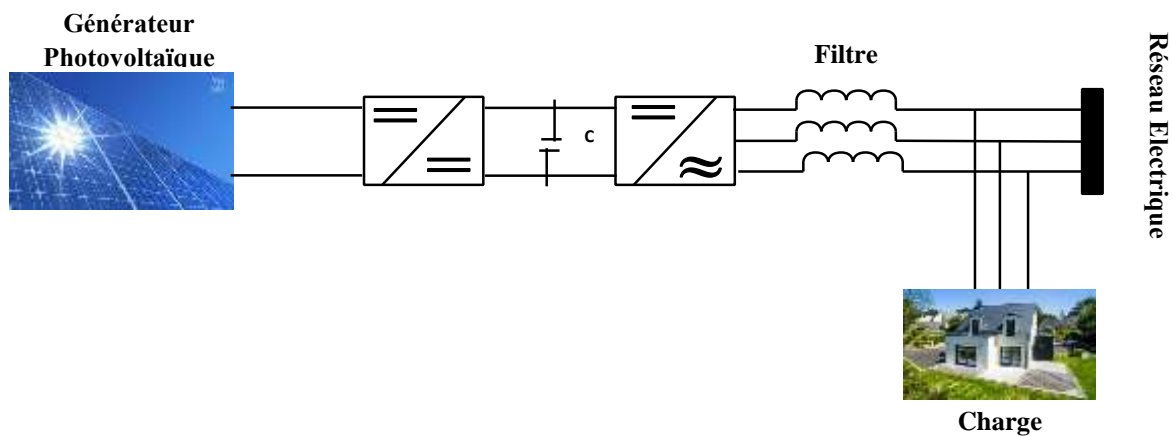


Figure III 1. Système PV-STATCOM

III.3. Principe de fonctionnement d'une chaîne de conversion d'énergie PV

Un panneau solaire est composé de plusieurs cellules. Ces cellules sont composées de silicium, un matériau semi-conducteur contenu dans le sable. Les rayons du soleil viennent heurter la surface des cellules et mettre en mouvement les électrons. Ces électrons vont se déplacer vers d'autres noyaux en créant du courant électrique.

La figure III.2 montre la chaîne de conversion d'énergie PV. La production du courant continu est relayée vers un onduleur (convertisseur) pour convertir en courant alternatif pour être compatible avec le réseau de distribution d'électricité. [24]

**Figure III.2** Principe de la conversion photovoltaïque.

III.4. La cellule solaire

Appelées aussi photopiles, elles permettent de transformer l'énergie du rayonnement solaires en électricité. Les cellules solaires sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs produits à partir d'une matière première très pure, comme le silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière, en développant une force électromotrice (Figure III.3). Le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente. La cellule solaire délivre une tension continue. [25]

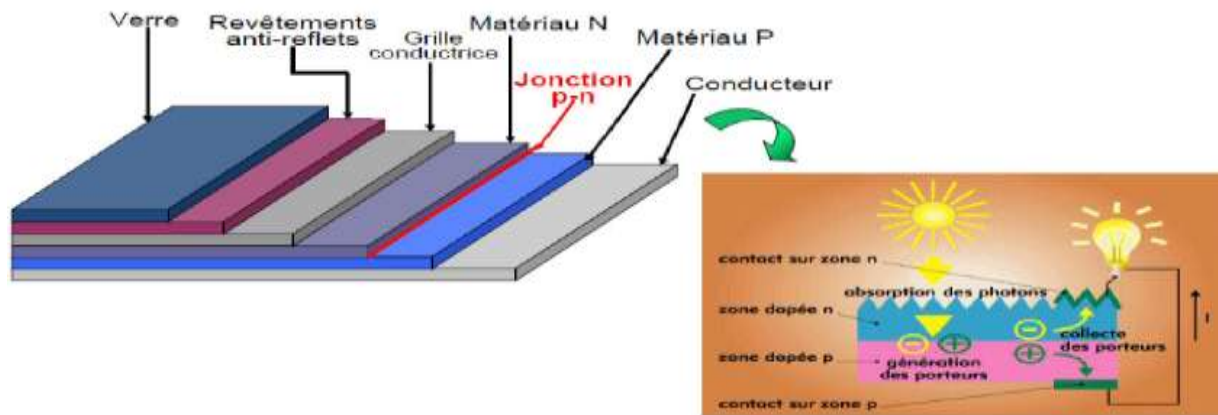


Figure III.3. Constituents d'une cellule photovoltaïque au silicium.[25]

III.5. Hacheur

Le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une valeur de la tension et du courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement, de la température ainsi de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite (MPPT) « Maximum Power Point Tracking ».[26]

III.5.1. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

La chaîne de puissance d'un GPV où une charge DC est alimentée par un générateur à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT peut être représentée comme indiquée sur la Figure III.4. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du CS (Convertisseur Statique) de telle sorte que la puissance fournie par le GPV disponible à ses bornes.

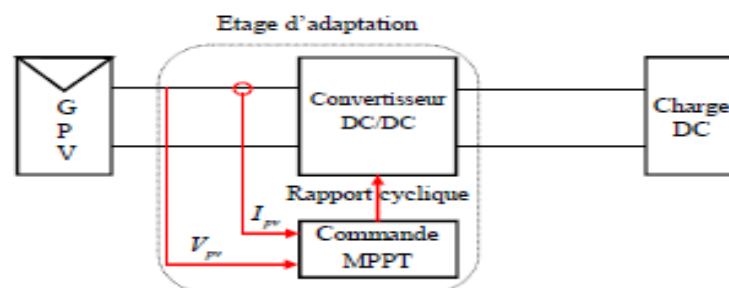


Figure III.4 Connexion d'un GPV-charge à travers un convertisseur DC/DC. [26]

Plusieurs algorithmes MPPT sont proposés comme la méthode :

- Perturbation et observation. (P&O).
- La méthode incrémentation de la conductance.
- Méthode de capacité parasite.
- Méthode de mode glissant

Dans ce chapitre, nous utilisons ce qu'on appelle la méthode perturber et observer,

Cet algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique, il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC) utilisé, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (α).

Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du générateur est supérieur à la valeur précédente $P(k - 1)$, alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation de cycle précédent Figure III.5. L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O) est donné par la Figure III.6:

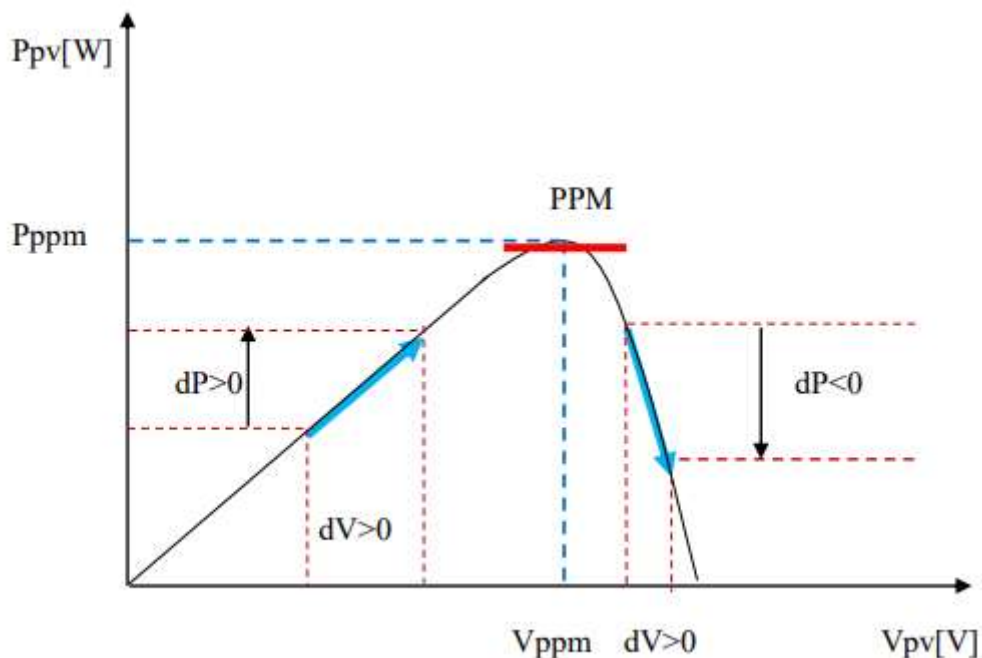


Figure III.5 : Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O

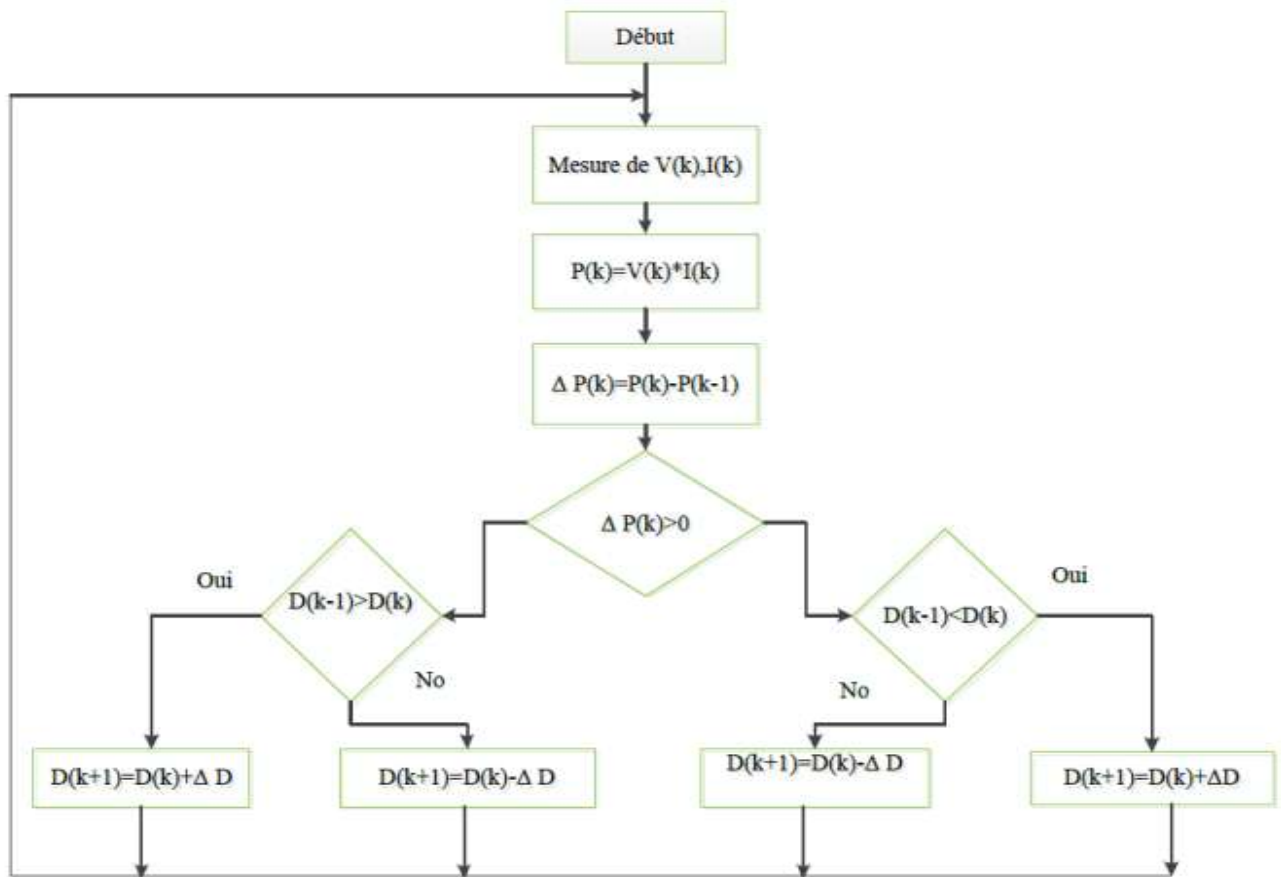


Figure III.6 Organigramme de l'algorithme MPPT de la Perturbation & Observation

III.6. Onduleur

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion CA/CC est le même. La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système. [27]

III.7. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

III.7.1. Les avantages de l'énergie solaire

Dépendent de différents facteurs. Selon les caractéristiques de l'installation solaire, certains avantages peuvent être observés par rapport à d'autres sources d'énergie

L'énergie solaire est une énergie renouvelable et, par conséquent, elle est inépuisable. Bien que le soleil ait une durée de vie limitée, à l'échelle humaine, il est considéré comme une source d'énergie inépuisable [28].

- Faible pollution et respect de l'environnement. la production d'électricité dans le cas de l'énergie photovoltaïque ou de l'eau chaud dans l'énergie solaire thermique est propre et la serre de causes.

- Installations avec un cout d'installation et de maintenance réduit. Le cout d'une installation solaire par rapport à d'autres types d'installations telles qu'une centrale nucléaire est très faible. de même, la maintenance d'une installation solaire n'est pas très coûteuse.

- C'est favorable pour les sites isolés. Dans les cas où l'accès au réseau électrique est difficile, l'énergie solaire est une très bonne option. [28]

III.7.2. Inconvénients

- Selon les caractéristiques de l'installation solaire, les inconvénients de l'énergie solaire seront plus ou moins importants. Malgré tous les avantages, il convient d'analyser soigneusement les inconvénients. Certains inconvénients de l'énergie solaire peuvent impliquer qu'une installation solaire soit inefficace. Les aspects à considérer sont les suivants :

- L'efficacité énergétique est faible par rapport à d'autres sources d'énergie. Le rapport de la quantité d'énergie reçue dans un panneau solaire à la quantité d'énergie électrique est faible par rapport à d'autres sources d'énergie telles que l'énergie nucléaire.

La performance est fonction de la météo. La dépendance à la climatologie fait de cette source d'énergie une option irréalisable dans les zones où le ciel est habituellement nuageux.

- Des limitations sur le temps solaire. Gardez à l'esprit que dans certaines régions, le nombre d'heures de soleil est plus limité. Les pays nordiques, par exemple, pendant les jours d'hiver les heures solaires sont très peu. De plus, l'inclinaison du soleil par rapport à la surface varie au cours des différents jours de l'année. la variation de l'inclinaison de la radiation influence la performance des panneaux solaires.

- Des limitations pour stocker l'énergie générée. Parce que les heures où l'énergie électrique peut être obtenue ne coïncident pas toujours avec les heures où il est nécessaire de stocker l'énergie. Pour cela, il y a des batteries solaires et des réservoirs d'eau chaude pour stocker l'énergie thermique, mais l'efficacité est encore très faible. [28].

III.8. Résultats de simulation sous différents scénarios

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation de l'intégration du système PV au réseau électrique associé avec un STATCOM évalué à l'aide du logiciel MATLAB / Sim Power System pour un éclairement solaire $G = 1000 [W/m^2]$ et une température $T = 293 [K]$. Plusieurs scénarios de simulations dans différentes conditions de fonctionnement seront étudiés dans ce qui suit.

Les paramètres de système proposés sont répertoriés dans le tableau (III.1).

Tableau III.1. Cellule d'une PV (Modele KC200GT).

P	W	200.143
$V_{oc,n}$	V	32.9
$I_{sc,n}$	A	8.21
$I_{0,n}$	A	$9.825 \cdot 10^{-8}$
R_p	Ω	415.405
R_s	Ω	0.221
K_V	V/K	-0.123
K_I	A/K	0.0032
a	-	1.3
N_s	-	54
K	J/K	$1.281 \cdot 10^{-23}$
q	C	$1.602 \cdot 10^{-19}$

1. Système PV connecté au réseau électrique sans défaut

La première partie des résultats de simulation est consacrée à montrer les performances du système PV connecté au réseau électrique dans un état sain (sans défauts) pour une charge constante de valeur de 50 KW pour un éclairement solaire $G = 1000 [W/m^2]$ et une température $T = 293 [K]$.

La figure III.7 montre la puissance active générée par le réseau électrique, celle produite par le système PV et celle demandée par la charge.

On constate clairement qu'après cette figure que la puissance générée par le système PV reste constante tout au long de la simulation car il produit une puissance maximale pour une température et éclairement nominales. Le réseau électrique doit réagir rapidement pour compenser la différence entre la puissance générée par le système PV et celle demandée par la charge pour le but d'assurer la stabilité entre la puissance demandée et la puissance générée. Ces résultats démontrent l'efficacité du système PV connecté au réseau électrique.

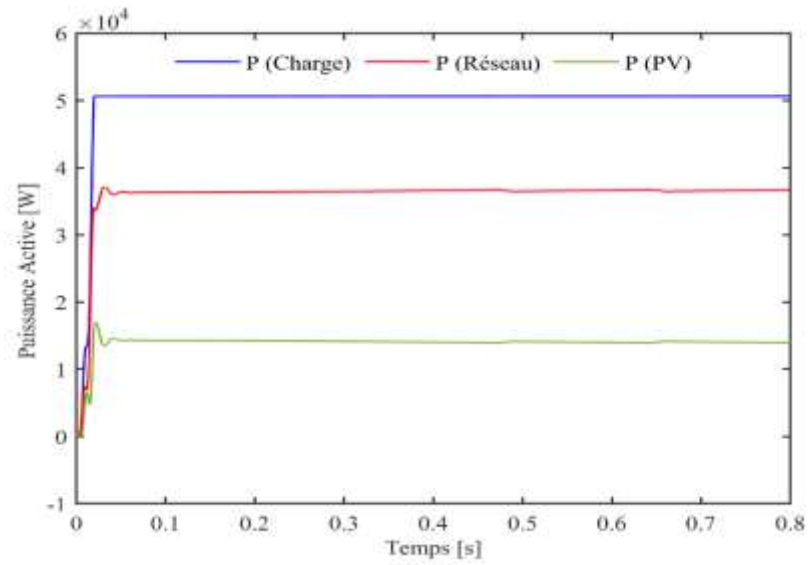
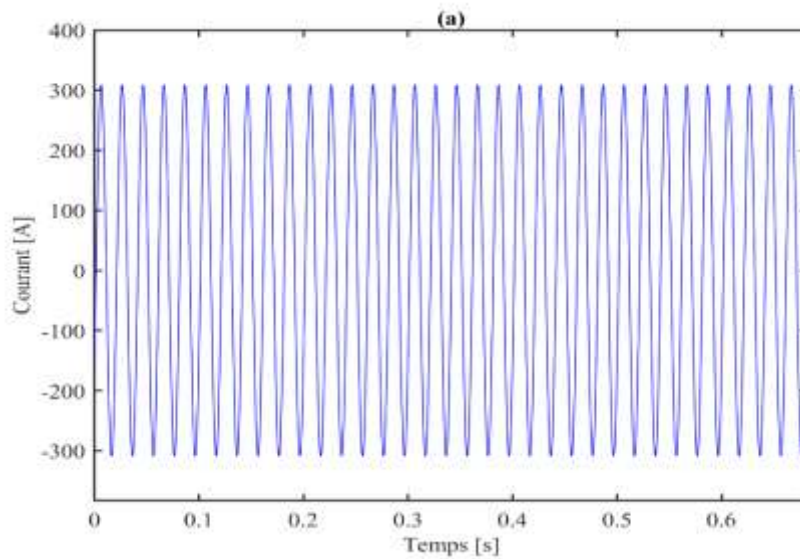


Figure. III.7. Répartition de la puissance active.

Les figures III.8. (a), III.8. (b) et III.8. (c) montrent les formes d'ondes des courants de la charge, de réseau électrique et du système PV respectivement. Sur ces figures, on remarque que les formes d'onde des courants sont sinusoïdales et que la fréquence est maintenue à 50 Hz.



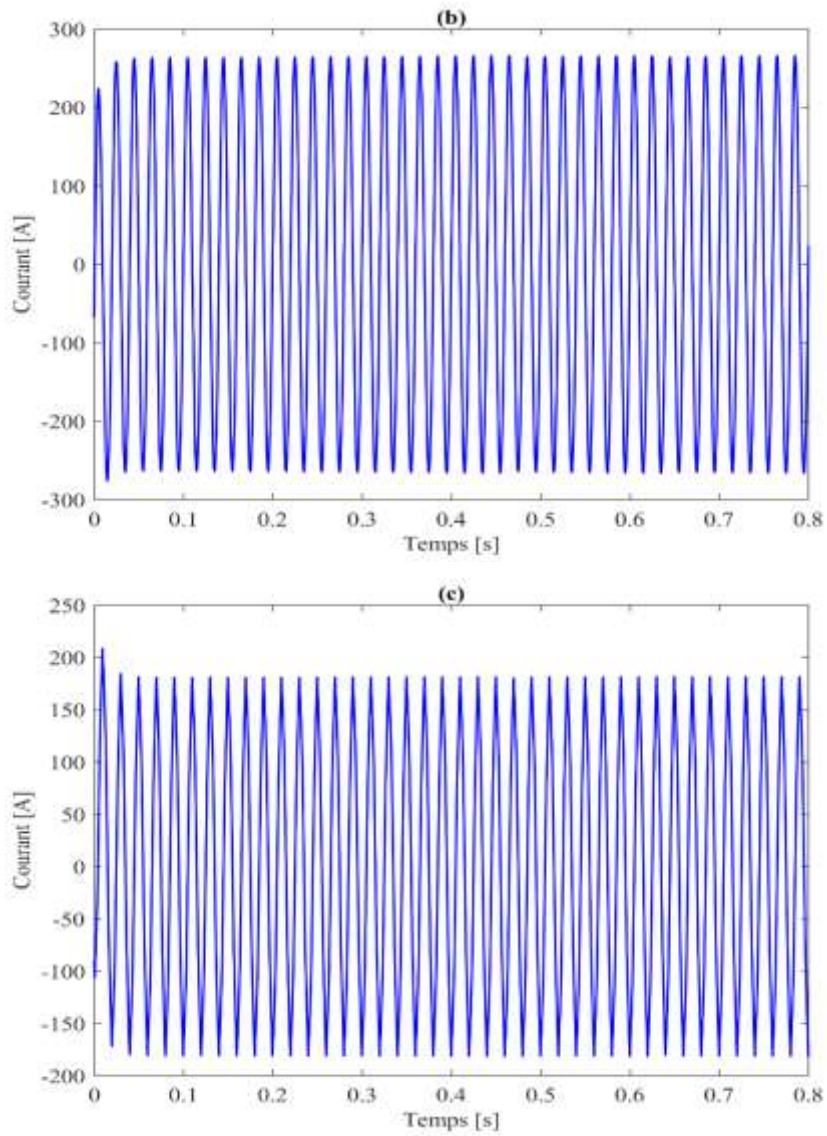


Figure. III.8. Forme d'onde du courant : (a) Charge ; (b) Réseau électrique ; (c) PV.

La figure III.9 montre RMS de la tension du réseau électrique. On constate clairement que la tension reste stable et constante tout au long de cette simulation.

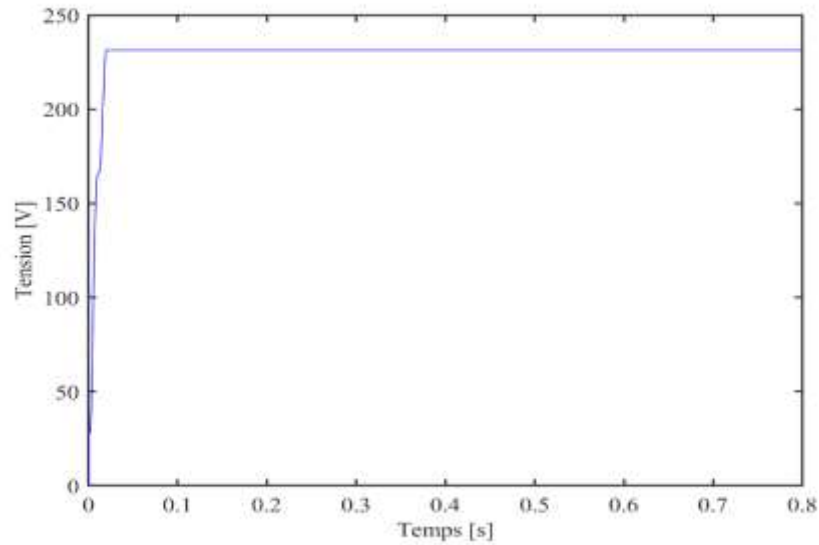


Figure. III.9. RMS de la tension du réseau électrique.

2. Système PV connecté au réseau électrique avec le défaut de court-circuit

Le but de ce scénario est d'illustrer le comportement dynamique d'un système PV connecté au réseau électrique, et son impact sur la stabilité électrique lors d'un défaut de court-circuit triphasé (grand mouvement). Le défaut de court-circuit triphasé est appliqué au point de couplage commun (PCC), entre les deux instants $t = 0.39s$ et $t = 0.41s$.

La figure III.10 montre RMS de la tension du réseau électrique. On constate clairement à l'instant d'application d'un défaut de court-circuit, la tension présente un déséquilibre et le système PV entre dans la zone de l'instabilité. Une fois le court-circuit triphasé disparaît, la tension revient à son état initial.

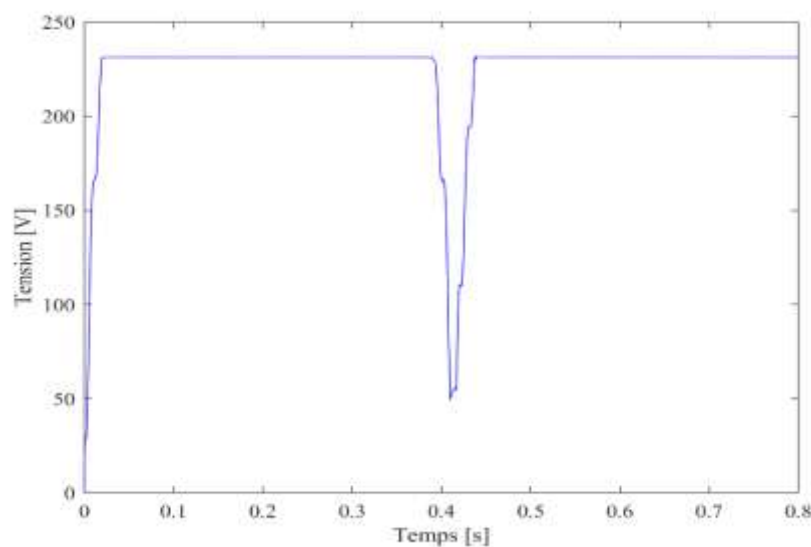


Figure. III.10 RMS de la tension du réseau électrique avec défaut de court-circuit.

3. Système PV / STATCOM connecté au réseau électrique avec le défaut de court-circuit

Pour réduire l'effet de défaut de court-circuit, le système PV est connecté avec le système de compensation de l'énergie réactive de type STATCOM.

La figure III.11 montre RMS de la tension du réseau électrique. On constate clairement à l'instant d'application d'un défaut de court-circuit, le STATCOM intervient rapidement afin d'améliorer le niveau de la tension du réseau électrique et permet aussi d'assurer la continuité de fonctionnement d'un système PV.

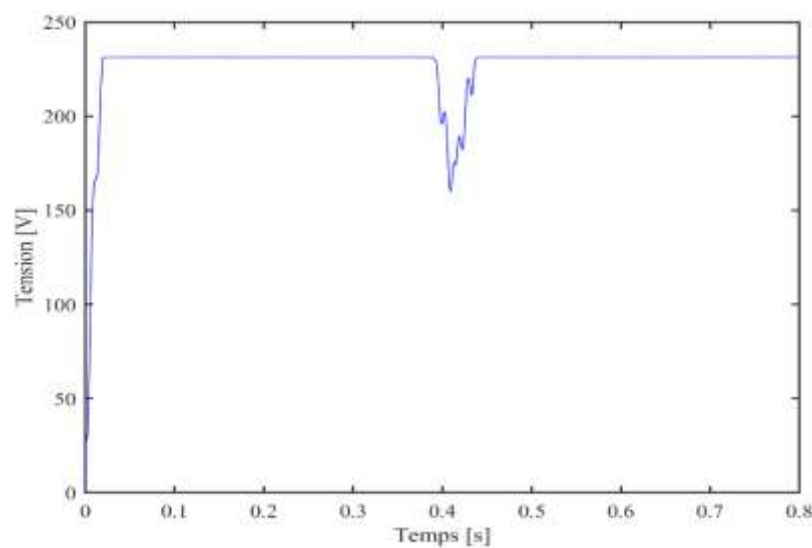


Figure. III.11. RMS de la tension du réseau électrique avec défaut de court-circuit en présence du STATCOM.

III.9. Conclusion

Le système PV produit principalement une puissance active maximale pour une température et éclairage nominale.

En cas le système est exposé a une perturbation l'installation d'un STATCOM avec le système PV qui appelé PV-STATCOM réagit rapidement pour ajuster la puissance réactive qui permet de stabiliser la tension aussi l'augmentation les performances de fonctionnement du système.

Les résultats de simulations sous l'environnement MATLAB / Sim Power System du système PV-STATCOM nous ont permis de mieux comprendre leur fonctionnement et confirme leur efficacité d'amélioration d'énergie au réseau électrique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept par les systèmes de transmission de l'énergie appelé 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.

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

D'abord nous avons commencé dans le premier chapitre par une aperçue sur quelque principaux dispositifs, puis on a vus plus notre compensateur STATCOM, son fonctionnement, ces composantes, son rôle et avantages dans le réseau de transport d'énergie.

La deuxième étape de notre travail a été consacrée à la présentation en détaille de la structure de base et le principe de fonctionnement de dispositif du STATCOM, ainsi essais de simulations sur un STATCOM insérés dans une ligne de transmissions dans l'environnement Matlab Simulink.

Le dispositif de STATCOM est un moyen très efficace pour maintenir la tension stable lors d'une perturbation, chute de tension ou bien une surtension. Il réagit d'une manière instantanée soit par la génération de la puissance réactive, c'est son mode capacitif. Soit par l'absorption de la puissance réactive, c'est son mode inductif.

Dans le d'dernier chapitre nous avons présentons aperçu de l'énergie photovoltaïques ainsi que la simulation de PV-STATCOM. Les résultats atteints par la simulation ont confirmé l'efficacité du STATCOM pour assurer la stabilité du système lors de l'application d'un défaut de court-circuit dans le point de couplage commun.

Ce modeste travail, nous pousse à adopter un projet au moins de réaliser ce dispositif de STATCOM au niveau Laboratoire de Génie Energétique et Génie Informatique.

Références bibliographiques

- [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] 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.
- [5] Stéphane Vighetti. Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010. Français.
- [6] Rabah Benabid « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des réseaux électriques » université de Jijel ,2007.
- [7] HAIMOUR Rachida, « contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique », thèse de magister de l'école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, 2009.
- [8] ALIBI Abdelaali, "Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)" mémoire de magistère université de Batna ,2009.
- [9] Mezaache Mohamed, «analyse et traitement de la qualité d'énergie électrique en utilisant des dispositifs de contrôle des réseaux électriques à UPFC dans le cas de stabilité de la tension », mémoire de magister, option réseaux électriques, université de Batna, soutenu le 24/11/2011.
- [10] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, "Flexible AC Transmission systems: Modelling and Control", Springer 2005.
- [11] F. Abaidia, « Contribution du STATCOM dans l'amélioration du comportement du réseau électrique », mémoire master, université Badji Mokhtar Annaba, juin 2018.
- [12] K. Berabez, « Effet des dispositifs FACTS sur l'amélioration de la qualité d'énergie produite par un générateur asynchrone auto-excite », mémoire magister, université A.Mira, Béjaia, Algérie, 2015

- [13] Amar HAMACHE et Hachemi CHEKIREB, Commande linéarisante décentralisée d'une ligne THT équipée d'un UPFC, Journal of Technology, ENP Alger, Algérie.2015
- [14] R. M. Mathur and R.K. Varma, "Thyristor based FACTS controllers for Electrical transmission systems" IEEE press 2002
- [15] <http://www.abb.ca/>
- [16] FOUGHALI LYES.HAMADI FATIHA mémoire de master «Apport des systèmes FACTS sur la stabilité de la tension Cas d'un SVC» 2015
- [17] Cong Duc PHAM : « Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée » ; Thèse de doctorat INP Grenoble, année 2005
- [18] VORAPHONPIPUT Nitus et CHATRATANA Somchai, "STATCOM analysis and contrôler design for power system voltage regulation", transmission and distribution conference & exhibition 2005 IEEE/PER.
- [19] Djermame 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
- [20] narimen LAHAÇANI AOUZELLAG" Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques Liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens" thèse de doctorat de l'université Bejaia ; juin 2011.
- [21] UEM « Liste des études à mener pour le raccordement d'un utilisateur HTA » Référentiel technique HTA et BT 2005
- [22] Alain Bilbao learreta « réalisation de commande MPPT Numérique Rapport de stage projet fin d'études Université Rovira Virgili 2006.
- [23] Nedjma Aouchiche. Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque.. Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, 2020. Français.
- [24] <https://www.mtaterre.fr/dossiers/sur-la-route-de-lelectricite/la-transformation-de-lenergie-en-electricite>
- [25] N.CHOUGAR S.YACHIR «Simulation et optimisation des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau. » Mémoire de Fin d'Etude MASTER ACADEMIQUE FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE, Tizi-Ouzou 2015

- [26] Benoussad Melkhir Mémoire de Fin d'Etude MASTER «Etude et simulation d'un émulateur photovoltaïque. »2017
- [27] Violaine Didier Rapport ‘‘ Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques’’ HESPUL Août 2007
- [28] N.Debili. Mémoire de Fin d'Etude MASTER « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque ». Année 2014/2015

ملخص

تقدم هذه الأطروحة دراسة محاكاة لسلوك التكامل لنظام الطاقة المتجددة من النوع الكهروضوئي (PV) المتصل بالشبكة الكهربائية مع وجود خطأ ماس كهربائي في نقطة الاتصال المشتركة (PCC). يمثل النظام الكهروضوئي حالياً حلاً فعالاً واقتصادياً لتزويد الطاقة لشبكة الكهرباء. يقترح هذا العمل استخدام نظام تعويض الطاقة التفاعلية مع النظام الكهروضوئي لغرض ضمان استمرارية الخدمة لنظام الكهروضوئية والحفاظ على استقرار الجهد في PCC. يتمثل الجزء الأول من هذه الأطروحة في دراسة نظام تعويض الطاقة التفاعلية من نوع STATCOM والذي يتميز بالعديد من المزايا مثل الاستجابة الديناميكية الجيدة ، ويتفاعل بسرعة في حالة تغيرات الجهد ويمكن أن ينتج طاقة تفاعلية وفقاً للطلب.

يحتوي الجزء الثاني على نظام PV / STATCOM متصل بالشبكة الكهربائية لضمان استمرارية الخدمة وكفاءة الإنتاج الكهروضوئي. يستخدم نظام MATLAB / SimPower لتنفيذ النموذج العام لنظام PV / STATCOM المتصل بشبكة الطاقة واختبار أداء STATCOM الذي يتم تقييمه من خلال سلسلة من سيناريوهات المحاكاة. أظهرت النتائج أداءً جيداً للنظام المقترح لضمان ثبات الجهد في حالة حدوث عطل ماس كهربائي

الكلمات المفتاحية: نظام الطاقة المتجددة ؛ الطاقة الكهروضوئية (PV) ؛ STATCOM ؛ نقطة الاتصال المشتركة (PCC) ؛ خطأ ماس كهربائي.

Résumé

Ce mémoire présente une étude de simulation sur le comportement d'intégration d'un système d'énergie renouvelable de type Photovoltaïque (PV) connecté au réseau électrique avec la présence d'un défaut de court-circuit dans le Point de Connexion Commun (PCC). Actuellement, le système PV représente une solution d'approvisionnement énergétique efficace et économique pour le réseau électrique. Ce travail suggère d'utiliser un système de compensation d'énergie réactive avec le système PV pour le but d'assurer la continuité de service d'un système PV et de garder la stabilité de la tension dans le PCC. La première partie de ce mémoire est d'étudier un système de compensation d'énergie réactive de type STATCOM qui présente plusieurs avantages comme bonne réponse dynamique, réagit rapidement en cas des variations de tension et il peut produire la puissance réactive suivant la demande.

La deuxième partie dispose un système PV / STATCOM connecté au réseau électrique pour assurer la continuité de service et l'efficacité de la production PV. MATLAB /SimPower System est utilisé pour mettre en œuvre le modèle global du système PV / STATCOM connecté au réseau électrique et pour tester la performance du STATCOM qui est évalué par une série de scénarios de simulation. Les résultats ont montré une bonne performance du système proposé pour assurer la stabilité de la tension en cas d'un défaut de court-circuit.

Mots clés : Système d'énergie renouvelable ; Energie Photovoltaïque (PV); STATCOM ; Point de Connexion Commun (PCC) ; Défaut de court-circuit.

Abstract

This thesis presents a simulation study on the integration behavior of a Photovoltaic (PV) type renewable energy system connected to the electrical network with the presence of a short-circuit fault in the Common Connection Point (PCC).). Currently, the PV system represents an efficient and economical energy supply solution for the electricity grid. This work suggests to use a

reactive power compensation system with the PV system for the purpose of ensuring the service continuity of a PV system and keeping the voltage stability in the PCC. The first part of this thesis is to study a reactive energy compensation system of the STATCOM type which has several advantages such as good dynamic response, reacts quickly in the event of voltage variations and it can produce reactive power according to demand.

The second part has a PV / STATCOM system connected to the electrical network to ensure continuity of service and efficiency of PV production. MATLAB /SimPower System is used to implement the overall model of the PV / STATCOM system connected to the power grid and to test the performance of the STATCOM which is evaluated by a series of simulation scenarios. The results showed a good performance of the proposed system to ensure voltage stability in the event of a short-circuit fault.

Keywords: Renewable energy system; Photovoltaic Energy (PV); STATCOM; Common Connection Point (PCC); Short circuit fault.