

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

UNIVERSITE IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de master

Domaine : Sciences et Technologie.

Filière : Electrotechnique.

Spécialité : Réseaux électrique.

THEME

Amélioration de la qualité d'énergie photovoltaïque

Préparé par : BENABDELMOUMEN Zoulikha

BENABDELOUAHAB Sara

Devant le jury :

Nom et prénom	Grade	Qualité
R.CHEHDA	Pr	Président
M.KOURA	Pr	Examineur
S.MARIH	MCA	Examineur
B.BELABBAS	MCA	Encadrant
S.HEROUAL	Doctorante	Invitée

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Louange à Allah, le Tout-Puissant, pour Ses bénédictions infinies. Nous Le remercions du fond du cœur pour la force, la sagesse et la persévérance qu'Il nous a accordées, nous permettant ainsi d'achever ce mémoire. Que Ses faveurs continuent de nous inspirer et de nous éclairer dans toutes nos futures entreprises.

*On tient à remercier tout particulièrement notre encadrant **Monsieur B. BELABBAS** pour nous avoir suivis et conseillés tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur R.CHEHDA, pour le grand honneur d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

C'est un plaisir pour nous d'exprimer nos remerciements à M.KOURA et S.MARIH Pour avoir accepté d'examiner notre travail et d'être membre du jury de soutenance.

A travers ce mémoire, nous exprimons notre profonde gratitude à tous nos enseignants qui ont accompagné notre formation depuis notre première année de primaire jusqu'à aujourd'hui.

Un grand Merci aux enseignants ainsi que l'administration de génie électrique.

Un grand Merci à Mme HEROUAL Samira, Mme Mimouna et Monsieur TOUMI

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos parents pour leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours. Leur amour, leurs encouragements constants et leurs sacrifices ont été des sources essentielles de motivation et de force pour nous deux. Sans leur aide précieuse et leur confiance en nos capacités, la réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible. Nous leur dédions ce travail en témoignage de notre reconnaissance et de notre affection infinie.

Dédicaces

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux,

Je dédie ce mémoire à Allah, le Tout-Puissant, le Sage, sans qui rien de tout cela n'aurait été possible. C'est par Sa miséricorde et Sa guidance que j'ai pu surmonter les défis et achever ce travail. Puisse-t-Il accepter mes efforts et faire de ce travail une source de bien et de bénédictions. Alhamdoulillah.

A ma chère mère, Tu es la force tranquille qui m'a toujours guidée, l'amour indéfectible qui m'a toujours soutenu, ta patience et ta force sont les piliers de ma vie.

A mon père Nacer, pour leur affection et leur soutien moral qui m'ont beaucoup aidé tout au long de ma vie

A mes chères sœurs Asmaa, Ranya et Assia . Et mon frère Mohammed

A ma grande mère Saadia, et mon oncle Dr. Tayeb

A ma nièce Wissem

A mes neveux Aissam, Ghiles

A mes meilleures amies Amina, Souhila , Lina ,Nour et Chaimaa

A mon cher binôme Zoulikha

A mon promo de Réseaux électriques 2023/2024

A tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant

A tous ceux qui sont dans mon cœur et à mes côtés

Sara

Dédicaces

Tout d'abord, je remercie le Dieu, notre créateur de m'avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

Je dédie ce travail

À ma mère, la source de tendresse et la lumière

Qui guide mes routes et qui m'emmène aux chemins de la réussite, pour tous ses sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

À mon père que je le remercie énormément pour ses efforts, ses conseils et sa surveillance.

À mes chers frère et sœurs :

{Fatima, Meamer, Bsafi, Soumia, Benyamina, Abdessamed, Hadjer}

À ceux qui ont toujours été les premiers à me soutenir et à m'encourager, je te dédie cette recherche mon cher mari Mustapha.

À mes meilleures amies :

{Khouloud, Chaimaa, Sara, Ikram, Hind, Imane}

À tout ce que je connais sans exceptions.

À tous mes enseignants sans exceptions

Enfin, j'offre mes bénédictions à tous ceux qui m'ont soutenu dans l'accomplissement de ce travail.

ZOULIKHA

SOMMAIRE

Contents

INTRODUCTION GENERALE.....	3
CHAPITRE I GENERALITES SUR L'AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE	1
I.Introduction.....	4
I.1. Définitions et concepts de base	4
I.1.1. Réseau électrique	4
I.1.2. Qualité d'énergie électrique	5
I.2.Importance de la qualité de l'énergie électrique	6
I.3.Normes et réglementations pertinents	7
I.3.1.La série des normes de comptabilité électromagnétiques :	7
I.3.2.La série des normes de surveillance de la qualité de l'énergie :.....	7
I.4.Principaux problèmes de qualité de l'énergie électrique	9
I.4.1.Perturbations harmoniques	9
I.4.2. Fluctuations de tension (flicker)	10
I.4.3.Déséquilibre de la tension	11
I.4.4.Creuxdetension	11
I.4.5.Variation de la fréquence	12
I.4.6.Surtension	12
I.5. Conclusion	13
CHAPITRE II MODELISATION DE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	4
II. Introduction	15
II.1. Principe de fonctionnement des systèmes PV :	15
II.2.Générateur PV	15
II.3.Convertisseur DC/DC «Hacheur».....	16
II.4. Convertisseur élévateur "BOOST"	16
II.5.Les convertisseurs DC/AC pour les systèmes photovoltaïques.....	17
II.6.L'onduleur triphasé à trois niveaux type N.P.C	17
II.7.Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC	18
II.7.1.Perturbation et observation. (P&O).....	19
II.8.Stratégie de Commande de l'onduleur :.....	21
II.8.1.Commande Modulation de largeur d'impulsion :.....	21
II.9.Control de la puissance instantanée :	21
II.10.Simulation du système PV avec un onduleur à 3 trois niveaux.....	23
II.11. Conclusion	27
CHAPITRE III SYSTEME PV/STATCOM.....	16
III. Introduction	32
III.2.Définition du STATCOM	32
III.3.Principe de fonctionnement.....	32
III.4.Modélisation du STATCOM.....	35
III.4.1.Modèle Mathématique Simplifié:	35
III.4.2.Modèle mathématique en considérant le circuit DC:	38
III.5.Contrôle du STATCOM.....	40
III.5.1.Détermination des Références:	40

III.5.2.Méthode Watt-Vardécouplée :	41
III.5.3.Régulateur PI avec compensation de pôles:	43
III.5.4.Régulation de la tension continue Udc:	44
III.6.Avantages du STATCOM :	45
III.7.Inconvénient du STATCOM :	46
III.8.Intégration du STATCOM dans un système PV :	46
III.9.Système PV /STATCOM :	47
III.10.Simulation du système PV/STATCOM :	47
III.11. Conclusion	50
CONCLUSION GENERALE	52

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

FIGURE I. 1 : STRUCTURE GENERALE D'UN RESEAU ELECTRIQUE	5
FIGURE I. 2 : IMAGE D'UNE ONDE DEFORMEE	10
FIGURE I. 3 : FLUCTUATIONS DE TENSION	10
FIGURE I. 4 : DESEQUILIBRE DU SYSTEME TRIPHASE DE TENSION	11
FIGURE I. 5 : CREUX DE TENSION	12
FIGURE I. 6 : VARIATION DE FREQUENCE.	12
FIGURE I. 7 : EXEMPLE DE SURTENSION	13
FIGURE II. 1 : PRINCIPE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE.	15
FIGURE II. 2 : CONVERTISSEUR CONTINU-CONTINU.	16
FIGURE II. 3 : SCHEMA THEORIQUE D'UN CONVERTISSEUR BOOST	16
FIGURE II. 4 : ONDULEUR NPC 3 NIVEAUX	18
FIGURE II. 5 : SCHEMA DU SYSTEME PV PAR UNE COMMANDE MPPT	19
FIGURE II. 6 : CARACTERISTIQUE $P(V_{PV})$ D'UN PANNEAU SOLAIRE.	20
FIGURE II. 7 : ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME MPPT DE LA PERTURBATION & OBSERVATION.	20
FIGURE II. 8 : REALISATION DU SIGNAL MLI.	21
FIGURE II. 9 : SCHEMA DE METHODE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE	22
FIGURE II. 10 : SCHEMA GLOBALE DU SYSTEME PV CONNECTE AU RESEAU	23
FIGURE II. 11 : PUISSANCE ACTIVE	24
FIGURE II. 12 : PUISSANCE REACTIVE	24
FIGURE II. 13 : FORME D'ONDE DU COURANT : (A) CHARGE, (B) RESEAU ELECTRIQUE, (C) PV	26
FIGURE II. 14 : FACTEUR DE PUISSANCE.	26
FIGURE II. 15 : TAUX DE DISTORSION HARMONIQUE.	27
FIGURE III. 1 : SCHEMA DE BASE DU STATCOM.	32
FIGURE III. 2 : LE STATCOM	33
FIGURE III. 3 : SCHEMA EQUIVALENT DU STATCOM CONNECTE A UN RESEAU ELECTRIQUE	33
FIGURE III. 4 : COURBES SIMULEES COURANT ET TENSION EN MODE CAPACITIF.	35
FIGURE III. 5 : COURBES SIMULEES COURANT ET TENSION EN MODE INDUCTIF.	35
FIGURE III. 6 : SCHEMA EQUIVALENT D'UN STATCOM CONNECTE AU RESEAU.	36
FIGURE III. 7 : PASSAGE DU REPERE (A, B) VERS LE REPERE (D, Q)	37
FIGURE III. 8 : SCHEMA EQUIVALENT DU CIRCUIT DC DU STATCOM	39
FIGURE III. 9 : IDENTIFICATION DES COURANTS DE REFERENCE.	41
FIGURE III. 10 : TRANSFERT DE L'ISHD EN FONCTION DE X.	42
FIGURE III. 11 : REGULATION ET DECOUPLAGE DE ISHD	42
FIGURE III. 12 : SCHEMA DE REGULATION DU STATCOM (WATT-VAR DECOUPLEE).	43
FIGURE III. 13 : SCHEMA BLOC DE LA REGULATION PI DES COURANTS DU STATCOM.	43
FIGURE III. 14 : REGULATION DE LA TENSION CONTINUE UDC	44
FIGURE III. 15 : SCHEMA SYNOPTIQUE D'UN SYSTEME PV/STATCOM.	47
FIGURE III. 16 : REPARTITION DE PUISSANCE REACTIVE	50
FIGURE III. 17 : FACTEUR DE PUISSANCE.	50

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I. 1 : LIMITES DES DISTORSIONS DES TENSIONS AU PCC (IEEE 519-1996)	8
TABLEAU I. 2 : LIMITES DES EMISSIONS HARMONIQUES DU COURANT (IEEE 519/1159)	8

LISTE DES SYMBOLES

FACTS	Flexible alternative curant transmission Systems.
STATCOM	Static Synchronous Compensator.
PPM	point de puissance maximale.
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.
PI	Proportionnel Intégral (régulateur).
MPPT	Maximum Power Point Tracking .
α	Rapport cyclique.
P&O	Méthode de Perturbation et observation
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.
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'amélioration de la qualité de l'énergie électrique est devenue un enjeu majeur dans le contexte de l'évolution rapide des systèmes énergétiques et de l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelable. La qualité de l'énergie électrique, qui englobe la stabilité et la pureté des signaux de tension et de courant fournis aux consommateurs, est essentielle pour assurer le bon fonctionnement des équipements électriques et électroniques, ainsi que la fiabilité globale du réseau électrique.

Dans ce contexte, l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique devient une priorité pour garantir une alimentation stable et fiable. La qualité de l'énergie électrique se réfère à la stabilité et la pureté de la tension et du courant fournis aux consommateurs. Les perturbations telles que les variations de tension, les harmoniques et les fluctuations de fréquence peuvent avoir des impacts négatifs sur les équipements électriques et électroniques, ainsi que sur la performance globale du réseau.

L'objectif de ce modeste travail est d'examiner les fonctions de contrôle offertes par le STATCOM pour la compensation de la puissance réactive et le maintien de la tension. Cette étude est organisée en trois chapitres.

Le premier chapitre de ce mémoire se concentre sur les généralités liées à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. Nous y explorerons les différentes problématiques rencontrées, ainsi que les solutions et technologies actuelles visant à atténuer ces perturbations.

Le deuxième chapitre est consacré aux la modélisation des systèmes photovoltaïques. Nous aborderons les principes de fonctionnement des panneaux solaires, les différentes configurations de systèmes PV, ainsi que les méthodes de modélisation et de simulation utilisées pour analyser leur performance et leur intégration dans le réseau électrique.

Enfin, le troisième chapitre traitera de l'utilisation des systèmes photovoltaïques en conjonction avec des compensateurs statiques d'énergie réactive, communément appelés STATCOM. Nous examinerons comment l'association d'un système PV avec un STATCOM peut améliorer la qualité de l'énergie électrique en fournissant une compensation réactive, en réduisant les fluctuations de tension et en augmentant la stabilité du réseau.

.

CHAPITRE I

Généralités sur l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique

• I. Introduction

En général, le fournisseur d'énergie livre l'électricité sous forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Les paramètres caractéristiques de ce système incluent la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde (qui doit être sinusoïdale), et la symétrie du système triphasé. Cependant, ces dernières années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance, les fournisseurs d'énergie sont confrontés à divers problèmes dus à l'augmentation du nombre de convertisseurs statiques connectés aux réseaux de distribution. [1]

En effet, ces convertisseurs sont des sources de pollution qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment souvent de la puissance réactive. Les harmoniques qu'ils génèrent sont des perturbations constantes qui affectent la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale, modifiant ainsi l'onde de tension ou de courant, ce qui entraîne une dégradation du facteur de puissance et/ou la génération de courants et de tensions alternatives à une fréquence différente de celle du fondamental.

Ces perturbations peuvent causer des nuisances, des pannes ou des dommages en affectant un ou plusieurs des paramètres de la tension du réseau électrique, tels que la fréquence, l'amplitude, la symétrie des tensions triphasées et la forme de l'onde.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes généralités sur le réseau, la qualité de l'énergie électrique, et les principales perturbations affectant la qualité de l'onde électrique, notamment les harmoniques.[2]

• I.1. Définitions et concepts de base

I.1.1. Réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures conçu pour acheminer l'énergie électrique des centres de production jusqu'aux consommateurs. Il se compose de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, interconnectées via des postes électriques. Ces postes jouent un rôle crucial en répartissant l'électricité et en permettant le passage d'une tension à une autre grâce aux transformateurs.

En outre, un réseau électrique doit garantir la gestion dynamique de l'ensemble production-transport-consommation, en mettant en œuvre des réglages destinés à assurer la stabilité du système.[1]

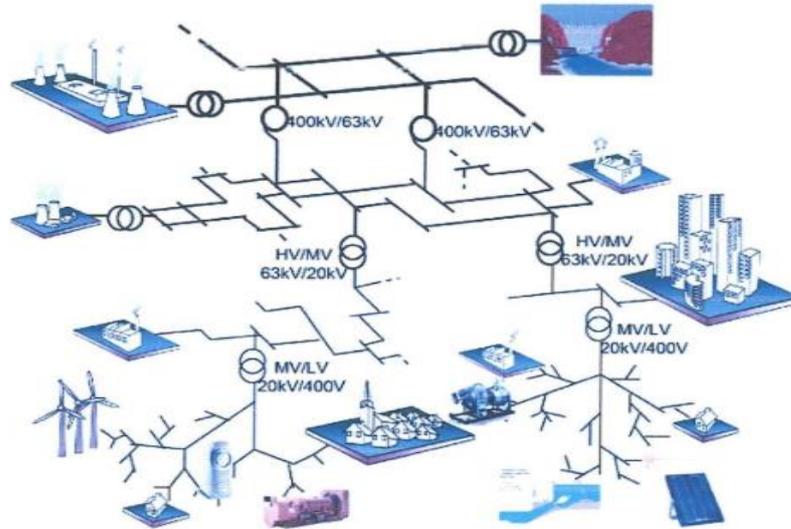


Figure I. 1 :Structure générale d'un réseau électrique [1]

• I.1.2. Qualité d'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique dépend fondamentalement de la tension et de la fréquence. Cette tension est souvent soumise à des perturbations et des altérations pendant le processus de circulation de l'énergie électrique, ce qui justifie l'introduction du courant comme indicateur complémentaire pour l'évaluation de la qualité de l'énergie électrique (QEE). Ainsi, la qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. [3]

➤ Qualité de la tension

La qualité de l'énergie ou de la tension est un concept d'efficacité qui permet de classer les équipements sensibles de manière appropriée pour leur bon fonctionnement.[4]

Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales:

▪ Fréquence :

Dans des conditions idéales, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales, avec une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Les variations de fréquence peuvent être causées par des pertes de production significatives, l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou encore par un défaut entraînant une chute de tension qui réduit la charge.[4]

▪ Amplitude :

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité, et elle représente généralement le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. En règle générale, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale.

▪ Forme d'onde :

La forme d'onde des trois tensions constituant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations, la tension peut perdre son caractère sinusoïdal et être considérée comme une onde fondamentale à 50 Hz, associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz, appelées harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non périodiques, appelés bruits.

▪ Symétrie :

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et par celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelée déséquilibre. [4]

➤ Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une déviation des courants de leur forme idéale, et elle se caractérise de la même manière que pour les tensions par les paramètres suivants : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de $2\pi/3$ radians entre eux, et leur forme est strictement sinusoïdale. [3]

• I.2. Importance de la qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique revêt une importance capitale pour plusieurs raisons, notamment en ce qui concerne la fiabilité des équipements, la continuité du service, et l'efficacité énergétique. C'est un élément clé qui influe sur la performance, la fiabilité et l'efficacité des systèmes électriques. Les gestionnaires de réseau, les entreprises industrielles et les fournisseurs d'énergie doivent surveiller et améliorer en permanence la qualité de l'énergie pour garantir la pérennité des équipements, la continuité des services et l'efficacité énergétique. Investir dans des solutions de qualité énergétique permet non seulement de

réaliser des économies à long terme, mais également de contribuer à la durabilité environnementale et à la satisfaction des consommateurs.

• I.3. Normes et réglementations pertinents

Pour garantir un niveau satisfaisant de qualité de l'énergie tout en limitant les effets des perturbations harmoniques sur les réseaux électriques, les distributeurs d'énergie ainsi que les consommateurs doivent se conformer à des normes et des recommandations qui définissent les réglementations standards pour les problèmes de perturbation harmonique liés à la comptabilité électromagnétique (CEM). Bien qu'il n'existe pas encore de réglementation universelle à cet égard, deux principaux organismes, à savoir la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) et l'IEEE, élaborent des normes efficaces qui peuvent être regroupées en deux séries principales de normes[5]:

I.3.1. La série des normes de comptabilité électromagnétiques :

(CEI 61000) et (IEEE 519-1995) qui définissent certaines limites concernant les harmoniques, notamment :

- CEI 61000-3-2 qui définit les limites d'émissions de courant harmonique par les appareils consommant moins de 16 A par phase.

- CEI 61000-2-2 qui définit les niveaux de comptabilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension

- CEI 61000-2-4 qui définit les niveaux de comptabilité dans les réseaux d'installations industrielles

- IEEE 519-1996 qui définit les limites des perturbations des tensions et courant en amont du point commun de raccordement PCC[5]

I.3.2. La série des normes de surveillance de la qualité de l'énergie :

(EN 50160, IEEE 1159-2009)

- **Norme IEEE 519-1996**

La norme IEEE 519 établit les limites à respecter pour les émissions harmoniques en courant et en tension au point de raccordement commun (PCC) afin d'assurer un

fonctionnement adéquat. Le tableau ci-dessous présente ces limites de distorsion des tensions [5].

Tableau I. 1 : Limites des distorsions des tensions au PCC (IEEE 519-1996)

Niveau des tensions au PCC	Taux individuel d'harmoniques (%)	Taux d'harmoniques global THD (%)
$V_n \leq 69$ KV	3.0	5.0
$69KV \leq V_n \leq 161$ KV	1.5	2.5
$V_n > 161$ KV	1.0	1.5

Dans cette norme, les limites pour les courants ne sont pas calculées en fonction du courant fondamental, mais en fonction du courant maximal appelé par la charge, noté I_L (courant effectif). La distorsion globale est alors quantifiée par le TDD (Total Demand Distorsion) au lieu du THD. De plus, les limites des émissions sont liées au courant de court-circuit de l'installation issu de la puissance de court-circuit pour chaque niveau de tension. Les limites pour les émissions sont présentées dans le tableau suivant uniquement pour $V_n \leq 69$ KV. [5]

Tableau I. 2 : Limites des émissions harmoniques du courant (IEEE 519/1159)

$V_n \leq 69$ KV						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
>20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
<1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Avec[27]:

$$TDD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * 100 \quad (I.1)$$

I_h : Amplitude du courant harmonique.

I_L : Courant efficace maximale demandé par la charge .

I_{sc} : Courant de court circuit

• I.4.Principaux problèmes de qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie est un concept très large qui peut être défini en fonction de la continuité de la fourniture électrique et de la forme de la tension disponible. L'évaluation de cette qualité implique généralement la caractérisation des perturbations électromagnétiques, parmi lesquelles on peut citer :

- Perturbations harmoniques.
- Déséquilibres de tension.
- Creux de tension et coupures.
- Variations de la fréquence d'alimentation, etc.

Ces perturbations peuvent être regroupées en quatre catégories en fonction de leur impact sur l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie. Elles peuvent également être classées en fonction de leur nature permanente, semi-permanente ou aléatoire (causée par la foudre, un court-circuit, une manœuvre, etc.).

I.4.1.Perturbations harmoniques

Un harmonique est défini comme une composante sinusoïdale d'un signal périodique ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences correspondant à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs $h=2$ et $h=40$).

L'amplitude de l'harmonique de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique, dans notre cas c'est le 50 Hz. L'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre. Les premiers rangs harmoniques, tels que 3, 5, 7, ont des amplitudes élevées, ce qui souligne l'importance des courants injectés. C'est pourquoi il est nécessaire de limiter ces harmoniques selon les normes en vigueur. La figure suivante illustre la forme d'onde fondamentale, la forme d'onde harmonique et la forme d'onde déformée.[2]

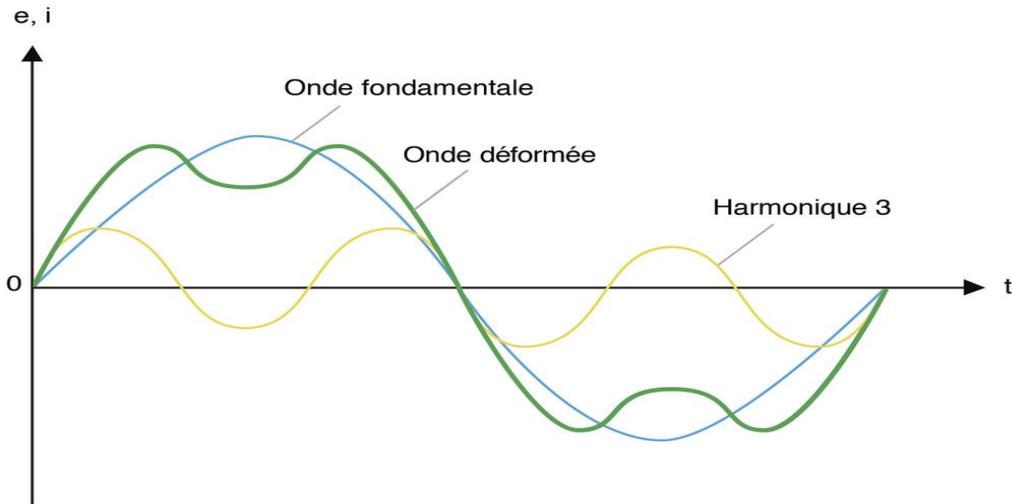


Figure I. 2 :Image d'une onde déformée [6]

I.4.2.Fluctuations de tension (flicker)

Les fluctuations de tension se réfèrent à des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Elles se caractérisent par des changements brusques de l'amplitude de la tension, généralement situés dans une plage de $\pm 10\%$, et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes[2]. Ces fluctuations entraînent des variations d'intensité, notamment visibles au niveau de l'éclairage, ce qui peut provoquer une gêne visuelle perceptible même pour une variation de tension de seulement 1 %. Ce phénomène de variation rapide est communément appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est illustré dans la figure suivante.

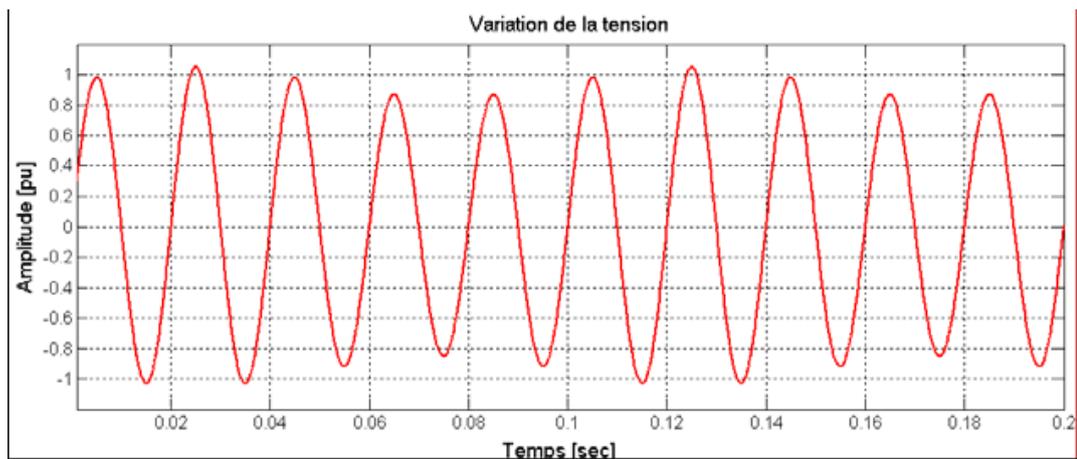


Figure I. 3 : Fluctuations de tension [14]

I.4.3. Déséquilibre de la tension

Un système triphasé est considéré comme déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres. [2][3]

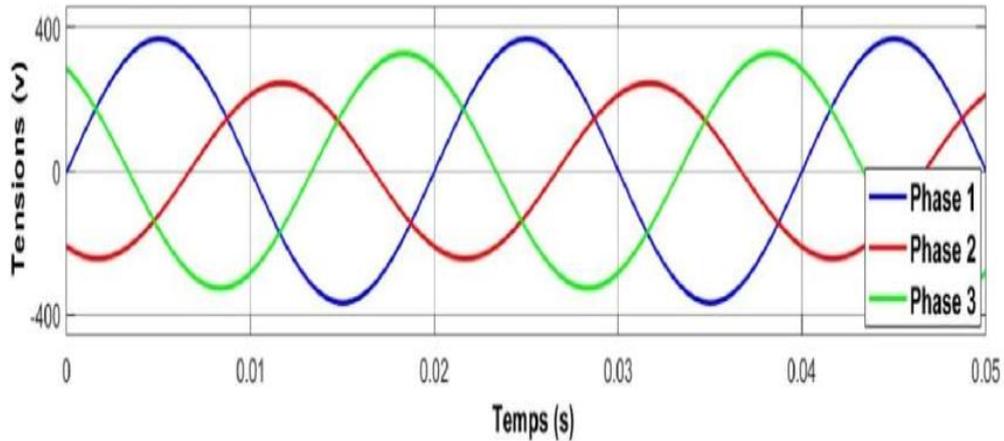


Figure I. 4 : Déséquilibre du système triphasé de tension [7]

I.4.4. Creux de tension

▪ Définition et Origine des creux de tension

Un creux de tension se produit lorsqu'il y a une diminution soudaine de la tension de fourniture. Cette baisse, généralement comprise entre 90 % et 10 % de la tension nominale U_n , est suivie d'un rétablissement rapide de la tension après un bref laps de temps. Un creux de tension peut durer environ 10 millisecondes. La plupart des appareils électriques peuvent tolérer une interruption totale de l'alimentation d'une durée inférieure à 10 millisecondes. Deux types de phénomènes sont à l'origine des creux de tension [2][7] :

- Les creux causés par le fonctionnement d'appareils à charge variable ou par la mise en service d'appareils nécessitant un courant élevé au démarrage, tels que les moteurs et les transformateurs.

- Les creux liés à des événements aléatoires, tels que la foudre ou les courts-circuits.

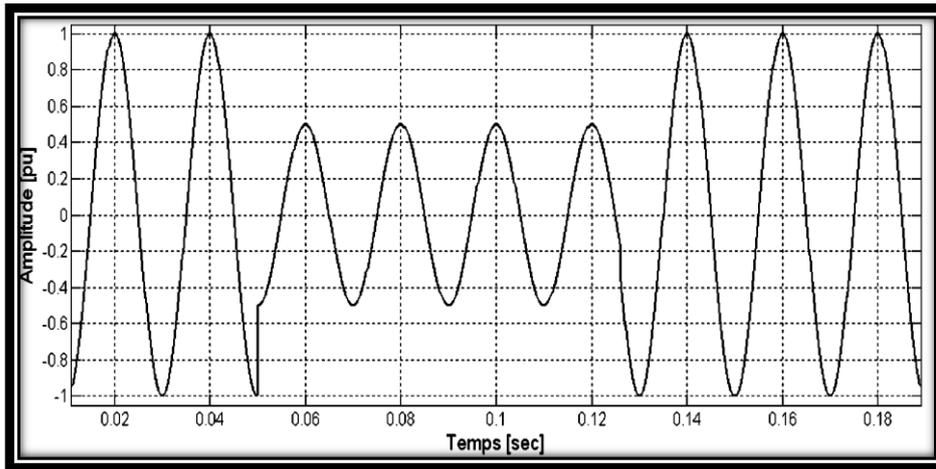


Figure I. 5 :Creux de tension [8].

I.4.5.Variation de la fréquence

Les réseaux de distribution ou de transport maintiennent généralement une fréquence constante, avec des variations très rares, sauf dans des circonstances exceptionnelles, telles que certains défauts graves sur le réseau. En conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit se situer dans l'intervalle de 50 Hz \pm 1 %. [2] [9]

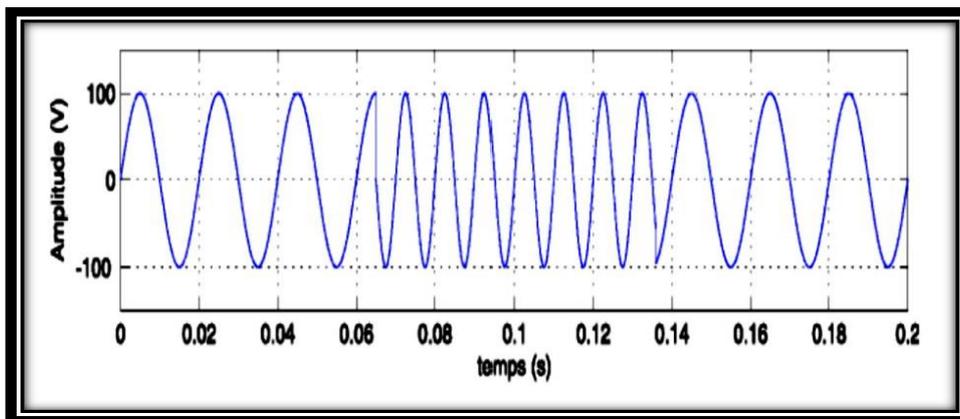


Figure I. 6 : Variation de fréquence[2].

I.4.6.Surtension

Toute tension appliquée à un équipement, dont la valeur de crête dépasse les limites définies par une norme ou une spécification, est considérée comme une surtension.. Les surtensions peuvent être de trois types :

- Temporaires (à fréquence industrielle).
- De manœuvre.
- D'origine atmosphérique (comme la foudre).

Ces surtensions peuvent apparaître :

- En mode différentiel (entre conducteurs actifs phase/phase ou phase/neutre).
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).[10][11]

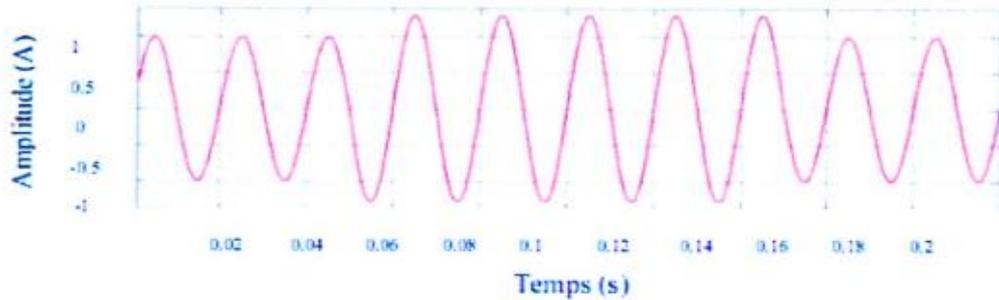


Figure I. 7 : exemple de surtension [12]

• I.5. Conclusion

L'amélioration de la qualité de l'énergie électrique est une priorité fondamentale pour garantir l'efficacité, la fiabilité et la durabilité des systèmes électriques. Les perturbations de la qualité de l'énergie, telles que les harmoniques, les creux de tension et les surtensions, peuvent causer des dommages significatifs aux équipements, entraînant des arrêts de production coûteux et des risques pour la sécurité.

En conclusion, l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique est une tâche complexe qui nécessite une approche multidimensionnelle, intégrant des technologies avancées, une gestion proactive et une régulation adéquate. À mesure que les technologies évoluent, les solutions pour améliorer la qualité de l'énergie deviendront de plus en plus sophistiquées et efficaces, assurant ainsi la robustesse et la fiabilité des systèmes électriques modernes.

CHAPITRE II

Modélisation d'un système photovoltaïque

• II. Introduction

L'énergie photovoltaïque est produite par la conversion directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion se fait grâce à une cellule photovoltaïque (PV), utilisant un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. [13]

Dans un système de conversion d'énergie photovoltaïque, des convertisseurs sont utilisés pour adapter efficacement la source à la charge. Ces convertisseurs peuvent être en courant continu, comme dans le cas de l'utilisation des MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour maximiser la puissance fournie par le générateur PV, ou en courant alternatif pour alimenter des charges en courant alternatif.

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu du système de conversion d'énergie photovoltaïque ainsi que sa simulation, avec un onduleur à 3 trois niveaux.

• II.1. Principe de fonctionnement des systèmes PV :

Un panneau solaire est constitué de plusieurs cellules composées de silicium, un matériau semi-conducteur présent dans le sable. Lorsque les rayons du soleil frappent la surface des cellules, ils mettent en mouvement les électrons présents dans le matériau. Ces électrons se déplacent vers d'autres noyaux, créant ainsi un courant électrique.

La figure suivante illustre la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque. La production de courant continu est ensuite transmise à un onduleur (convertisseur) pour être convertie en courant alternatif afin de rendre la production d'électricité compatible avec le réseau de distribution. [3][13]

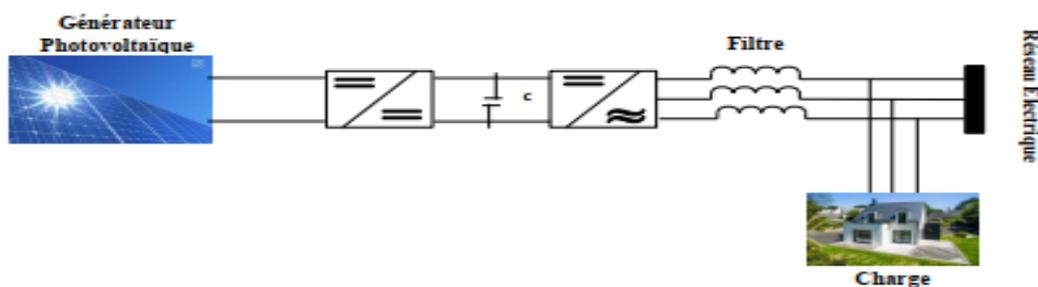


Figure II. 1 :Principe de la conversion photovoltaïque[14].

-
-

• II.2.Générateur PV

Le terme "générateur photovoltaïque" désigne le sous-système énergétique situé en amont de l'ensemble convertisseur-batterie, produisant de l'énergie électrique par conversion photovoltaïque du rayonnement solaire. Cette énergie produite est sous forme continue.

À sa base, le générateur photovoltaïque est composé de cellules. Ces cellules sont assemblées entre elles pour former des modules, qui sont ensuite regroupés en série et/ou en parallèle pour former le générateur. La tension du générateur dépend de l'agencement des modules[15].

• II.3. Convertisseur DC/DC «Hacheur»

Un convertisseur de tension continue DC/DC est un dispositif qui génère une tension de sortie régulée, isolée de la tension d'entrée. Cette conversion d'énergie est réalisée grâce à un processus de "découpage" haute fréquence, ce qui permet d'atteindre un rendement élevé pouvant aller jusqu'à 94%.[16]

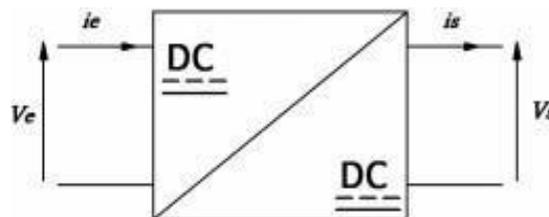


Figure II. 2 : Convertisseur continu-continu [10].

• II.4. Convertisseur élévateur "BOOST"

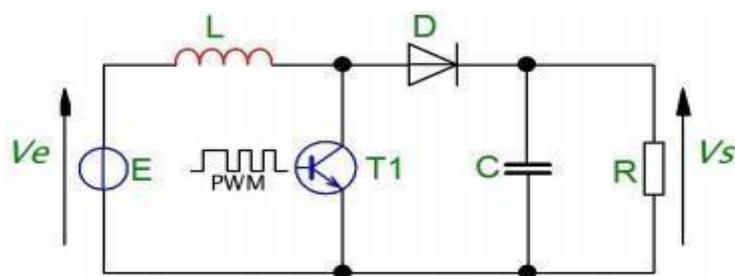


Figure II. 3 : Schéma théorique d'un convertisseur BOOST [10].

Il s'agit d'un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est un courant continu (inductance en série avec une source de tension), et la charge de sortie est une tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur $T1$ peut être remplacé par un transistor car le courant est toujours positif et les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). L'interrupteur $T1$ est fermé pendant une fraction αT de la période de découpage T . La source d'entrée fournit l'énergie à la charge R à travers

l'inductance L. Lorsque le transistor est bloqué, la diode D assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie stockée dans cette inductance est ensuite déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui impose la relation suivante :

$$V_e = (u_e) = (V_t) = (1 - \alpha) V_s \quad (\text{II.1})$$

Soit :

$$V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha}$$

Par définition, $0 < \alpha < 1$, ce qui induit que le montage est élévateur de tension (survolteur)[10].

• **II.5. Les convertisseurs DC/AC pour les systèmes photovoltaïques**

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance qui permet de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue, telle qu'une source photovoltaïque. Il réalise la fonction inverse d'un redresseur, ce qui en fait un convertisseur statique de type continu/alternatif.

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques présentent quelques différences par rapport aux onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais leur objectif de conversion AC/DC reste le même. Ils utilisent des transistors de puissance ou des thyristors. Dans les cas les plus simples, l'onde de sortie présente une forme carrée qui peut convenir à certains types de charges, mais cela peut entraîner des pertes à vide considérables, surtout pour des faibles puissances.[17]

• **II.6. L'onduleur triphasé à trois niveaux type N.P.C**

Une des structures de référence dans la conversion multi-niveaux est le convertisseur NPC à trois niveaux (Neutral Point Clamped) (voir Figure II.1). Ce convertisseur utilise la mise en série d'interrupteurs, et la répartition de la tension aux bornes des interrupteurs à l'état bloqué est réalisée à l'aide de diodes connectées au point milieu (N). Ces diodes de clamp assurent une tension de blocage à $E/2$ aux points A et B.

Le bus continu d'entrée est constitué de deux capacités en série (C_1 et C_2), formant un point milieu noté O, qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à un onduleur classique à deux niveaux. La tension totale du bus continu est E , et dans des conditions de fonctionnement normales, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités, qui possèdent alors une tension $E/2$ à leurs bornes. Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (K_1, K_2, K_3 et K_4 pour le bras a) et de deux diodes de roue libre connectées au point milieu du bus continu.[1k8]

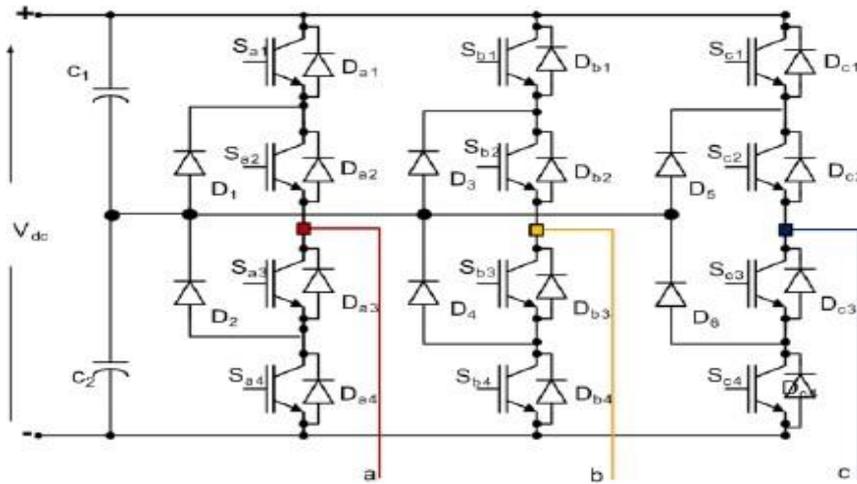


Figure II. 4 : Onduleur NPC 3 Niveaux[18].

• II.7. Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC

Les panneaux solaires de première génération sont généralement dimensionnés de manière à ce que leur point de puissance maximale (MPP) corresponde à la tension nominale (12 ou 24 Volts). Cette configuration permet un transfert d'énergie du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge via une simple connexion directe, souvent réalisée à l'aide d'une diode anti-retour. Cependant, en raison des caractéristiques non linéaires du module photovoltaïque et de sa sensibilité aux conditions extérieures telles que l'éclairement et la température, des pertes énergétiques peuvent survenir. Afin d'optimiser la production d'énergie en tout temps, l'utilisation d'un étage d'adaptation est de plus en plus recommandée. Le principe de régulation repose sur la variation automatique du rapport cyclique D à une valeur adéquate afin de maximiser la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque. [13][19][20]

$D = \alpha$: Rapport cyclique.

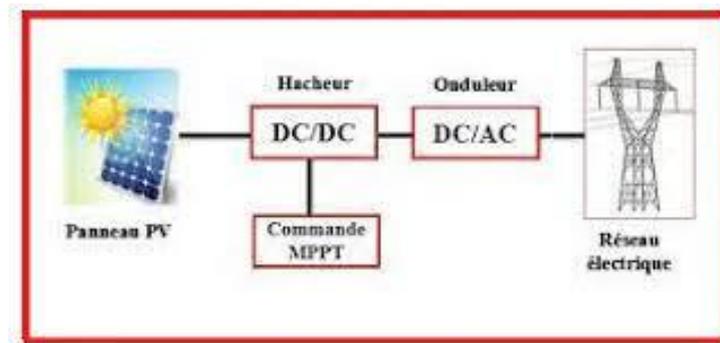


Figure II. 5 : Schéma du système PV par une commande MPPT[20].

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,

II.7.1. Perturbation et observation. (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type Perturbe and Observe (P&O) consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et à analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ces méthodes, largement utilisées aujourd'hui en raison de leur facilité d'implémentation, présentent cependant quelques problèmes liés aux oscillations autour du Point de Puissance Maximale (PPM) qu'elles engendrent en régime établi. En effet, la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement.

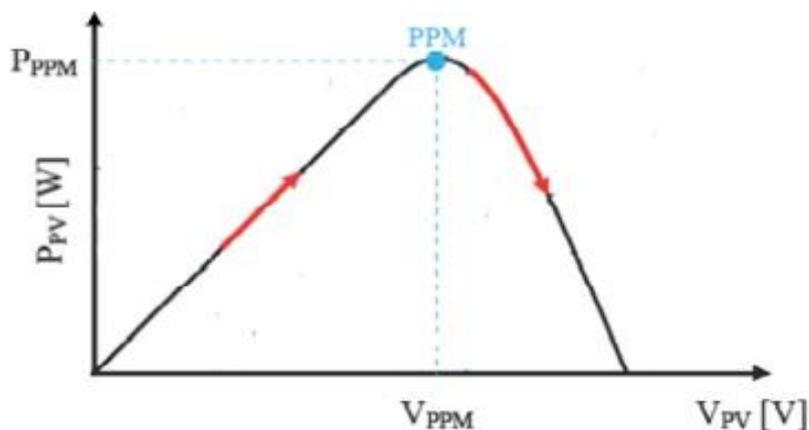


Figure II. 6 : Caractéristique $P(V_{PV})$ d'un panneau solaire.

La Figure II.7 montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O'. D'après la figure, la tension et le courant V et I , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante $P(k)$ de la range. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur $P(k-1)$ de la dernière mesure.

Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposé eux dernier cycle.

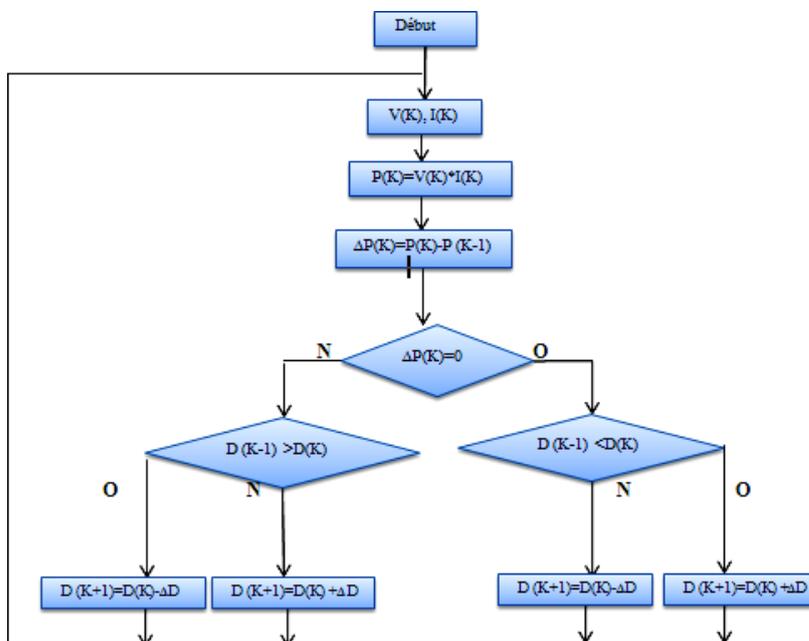


Figure II. 7 : Organigramme de l'algorithme MPPT de la Perturbation & Observation.

-
-

- - **II.8.Stratégie de Commande de l'onduleur :**

Le but de la commande de l'onduleur est d'assurer la meilleure reproduction possible des courants perturbés de référence en appliquant des ordres de commande aux interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

- La commande par hystérésis.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

- **II.8.1.Commande Modulation de largeur d'impulsion :**

La commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) consiste à diviser la tension ou le courant de sortie en plusieurs créneaux de largeurs différents en agissant sur les commutateurs de l'onduleur. Ces commutations sont déterminées par l'intersection entre deux signaux : le premier est l'onde de référence ou modulante, représentant la tension de sortie désirée à une fréquence f , et le deuxième est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence, appelé onde de modulation (porteuse), qui définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. Plusieurs techniques de commande MLI ont été développées. [21]

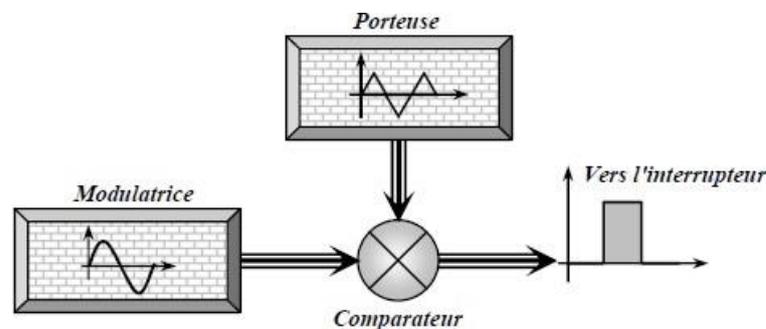


Figure II. 8 :Réalisation du signal MLI [10]

- **II.9.Control de la puissance instantanée :**

L'objectif de ce type de commande est de contrôler les valeurs de puissance active et réactive injectées dans le réseau. Le circuit de contrôle agit sur la commande par hystérésis des courants afin d'imposer la valeur instantanée du courant délivré par l'onduleur de manière à ce que le courant fourni au réseau soit sinusoïdal et en phase ou non (selon la valeur de Q_{ref} avec la tension simple correspondante. Dans notre cas, Q_{ref} est choisi égal à zéro, ce qui signifie que l'onduleur fonctionne avec un facteur de puissance unitaire.

Ce contrôle est représenté sur le schéma synoptique suivant, et son principe est présenté sur la figure suivante :

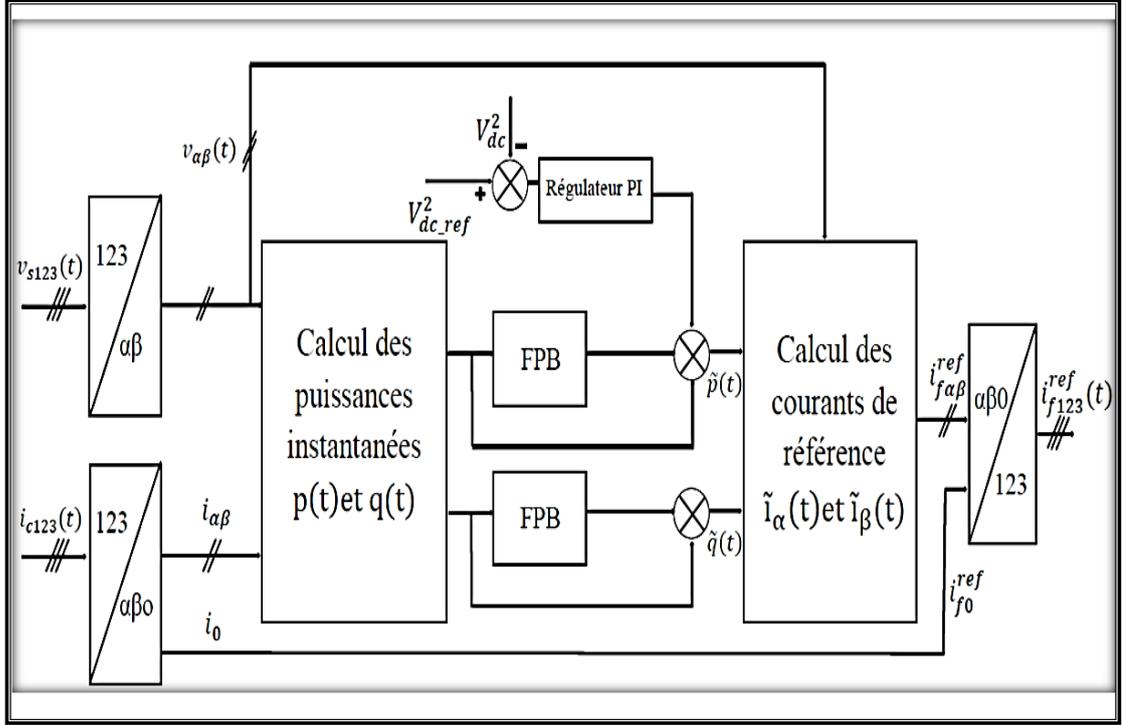


Figure II. 9 : Schéma de méthode des puissances active et réactive [22]

$$\text{On a } P_{ref} = P_{pv} - P_{dc} \quad (II.2)$$

Et les courants I_{d_ref} et I_{q_ref} sont donnés par :

$$I_{d_ref} = \frac{P_{ref} V_d + Q_{ref} V_q}{V_d^2 + V_q^2} \quad (II.3)$$

$$I_{q_ref} = \frac{P_{ref} V_q - Q_{ref} V_d}{V_d^2 + V_q^2} \quad (II.4)$$

P_{ref} et Q_{ref} : sont les puissances de référence de la production PV.

V_d et V_q : sont les composantes directes et quadratiques des tensions mesurées, au point de connexion de la production PV, dans le référentiel de Park.

I_{d_ref} et I_{q_ref} : sont les composantes directes et quadratiques des courants produits de référence par la production PV sur le réseau auquel elle est connectée. Ces courants dépendent donc des puissances de références ainsi que de la tension mesurée au point de connexion de la production.

La tension mesurée est transformée dans le référentiel de Park avant le calcul des courants. Une boucle à verrouillage de phase, ou PLL (Phase Locked Loop), est utilisée pour

synchroniser la transformation de Park sur la pulsation de la tension mesurée sur le réseau.[15] .

• II.10.Simulation du système PV avec un onduleur à 3 trois niveaux

Pour modéliser un système photovoltaïque avec un onduleur à trois niveaux, k commencez par modéliser le panneau photovoltaïque, qui convertit la lumière du soleil en électricité. Ensuite, créez un onduleur à trois niveaux pour convertir cette électricité en courant alternatif. Utilisez un logiciel de simulation comme MATLAB/Simulink pour assembler le modèle du panneau et de l'onduleur. Ajoutez un contrôleur pour optimiser la production d'énergie. Enfin, lancez la simulation pour analyser et vérifier les performances du système.

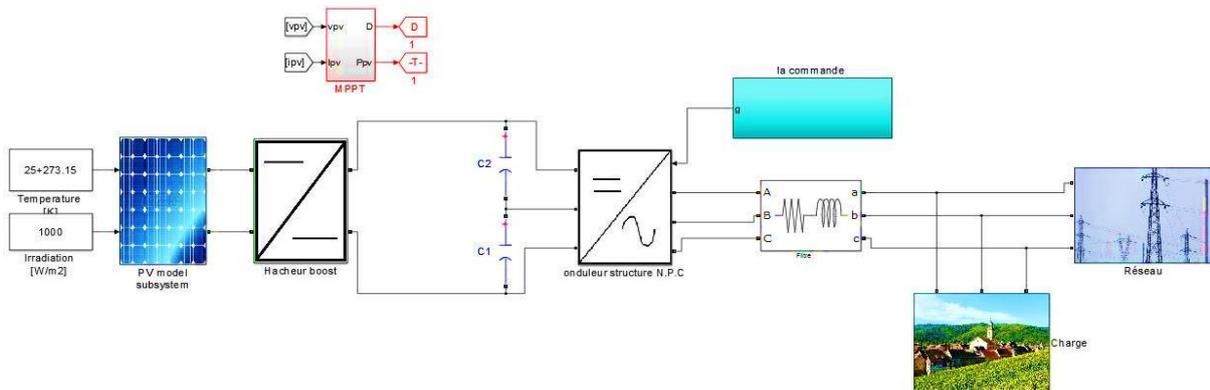


Figure II. 10 : schéma globale du système PV connecté au réseau [9]

La figure III.1 représente la puissance active générée par le réseau électrique, celle fournie par le système photovoltaïque (PV) et celle requise par la charge. Il est clair d'après cette figure que la puissance produite par le système PV reste constante tout au long de la simulation, car il opère à sa capacité maximale pour des conditions nominales de température et d'éclairement. Ainsi, le réseau électrique doit réagir promptement afin de compenser tout écart entre la puissance générée par le système PV et celle nécessaire à la charge, afin de maintenir l'équilibre entre la demande et la production d'énergie. Ces résultats illustrent l'efficacité remarquable du système PV lorsqu'il est intégré au réseau électrique.

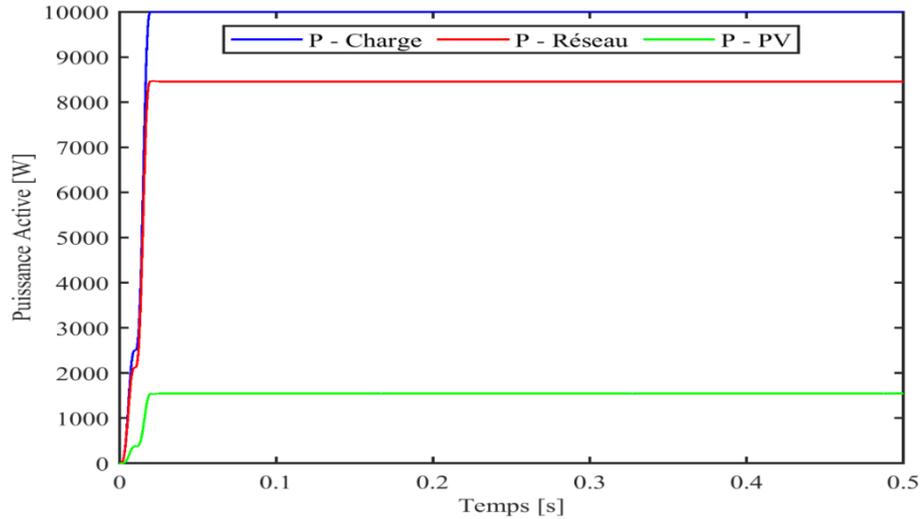


Figure II. 11 : répartition de puissance active

La figure II.12 Représente la puissance réactive

- Dans L'intervalle $[0s : 10^{-8}s]$ la puissance réactive de la charge peut augmenter est consomme la puissance jusque la valeur $Q=7000\text{var}$ est en même temps la puissance réactive de réseau est injecte au absorbe de la puissance réactive pour compenser les variations et ainsi améliorer la stabilité et l'efficacité du système électrique

- $[10^{-8}s : 0.5s]$ la puissance réactive de la charge et le réseau stable

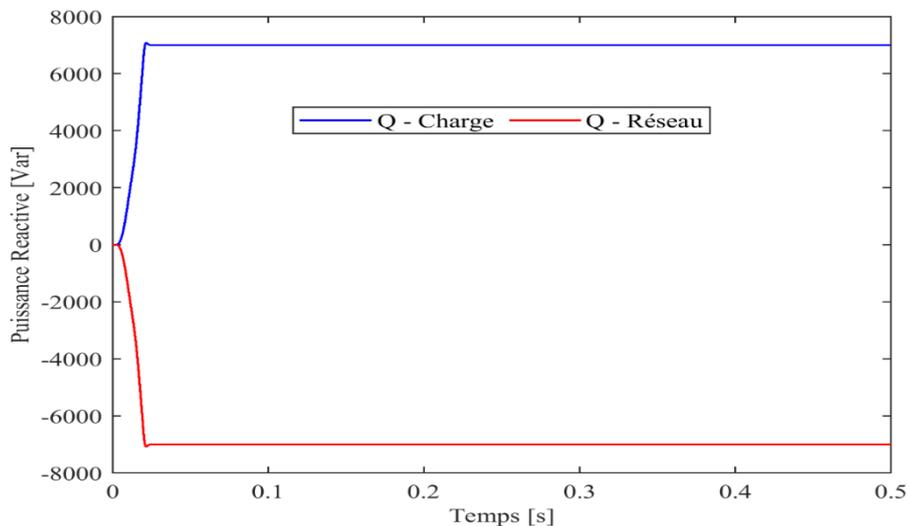
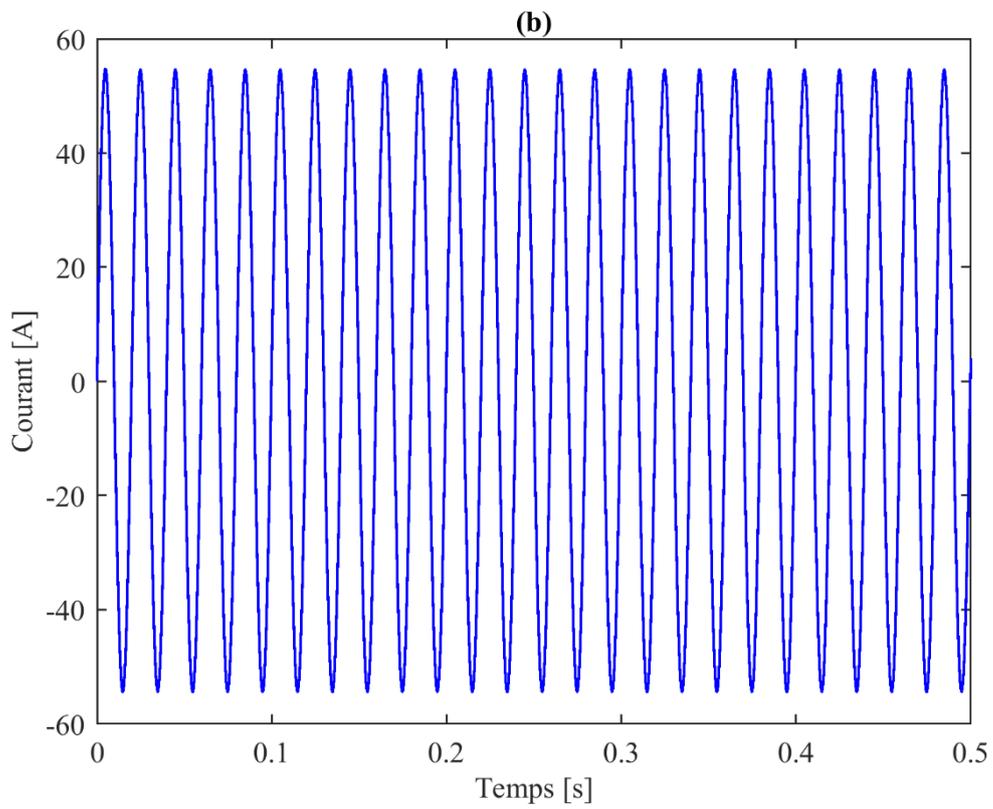
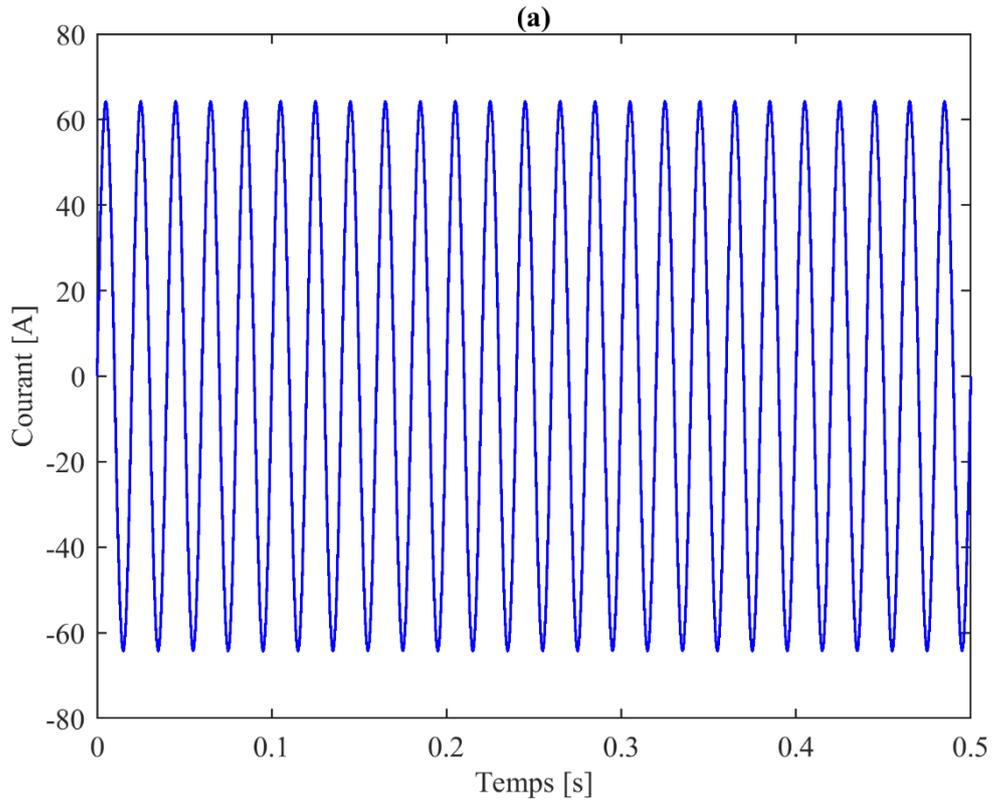


Figure II. 12 : puissance réactive

Les figures II.13(a), II.13(b) et II.13(c) : illustrent les formes d'ondes des courants de la charge, du réseau électrique et du système photovoltaïque (PV) respectivement. On observe que les formes d'onde des courants sont sinusoïdales et que la fréquence est maintenue à 50 Hz



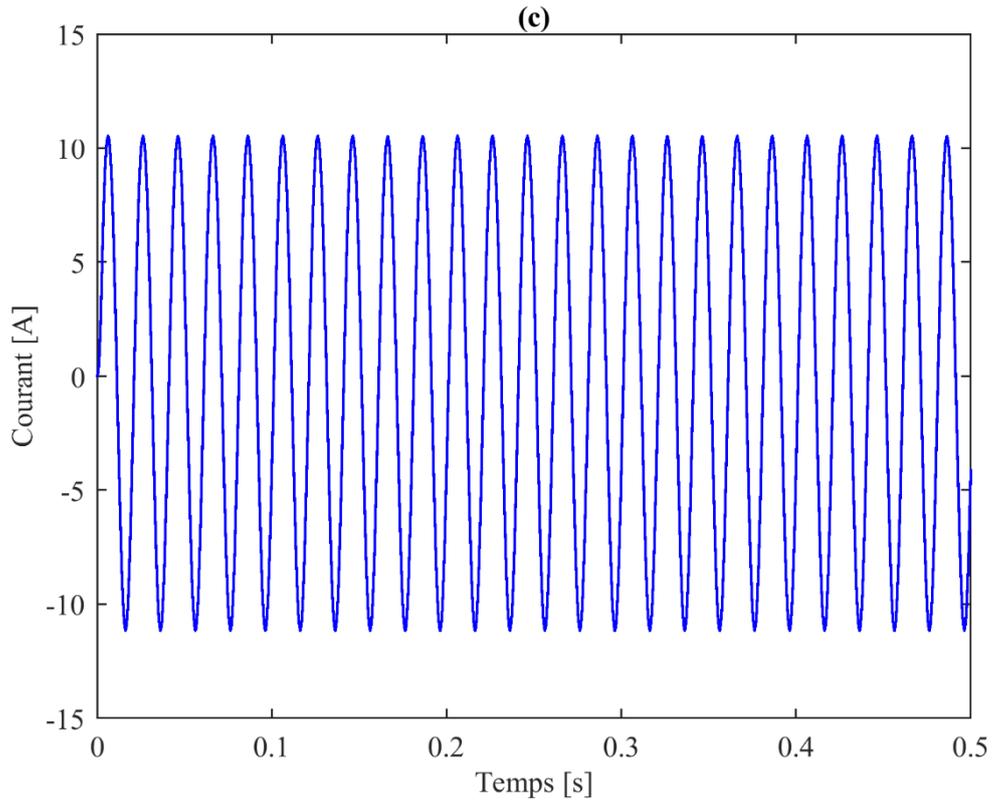


Figure II. 13 :Forme d'onde du courant : (a) charge, (b) réseau électrique, (c)PV

La figure II.14 montre l'évolution de facteur de puissance, on remarque que la valeur de \cos atteint une valeur de 0.8 durant toute la simulation cette valeur indique que il y a une consommation de l'énergie réactive indiquée

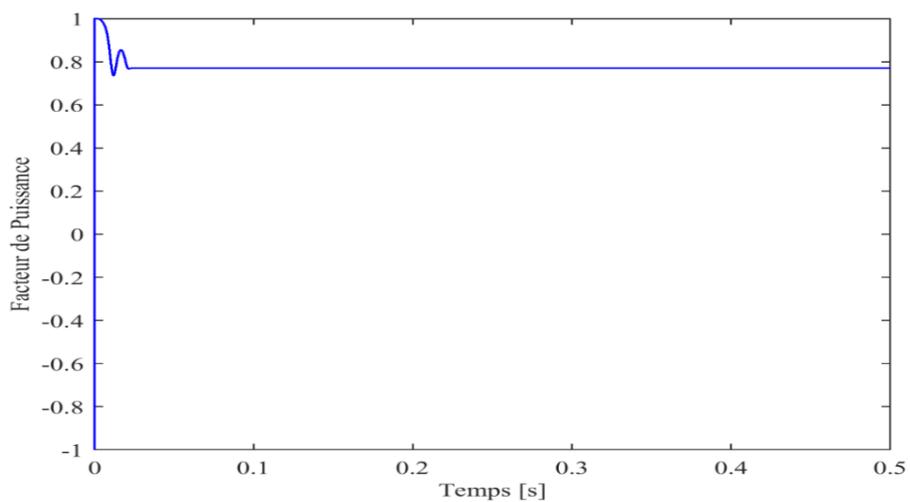


Figure II. 14 : Facteur de puissance

La figure II.15

Au début de simulation on remarque que le THD a une grande valeur(100%) indique une déformation signal

et après on remarque un lissage de courant le THD diminue jusqu'à la valeur de (2.48%); qui revient à l'efficacité d'onduleur à trois niveaux

Nous concluons que les harmoniques des courants injectés par le GPV n'influe pas sur la qualité d'énergie produite par le réseau électrique.

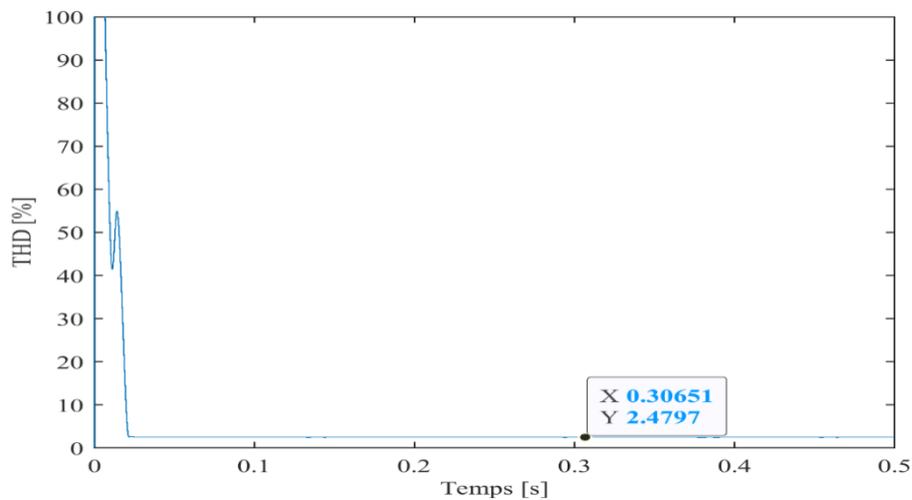


Figure II. 15 : Taux de distorsion harmonique

• II.11. Conclusion

La modélisation des systèmes photovoltaïques (PV) utilisant des onduleurs à trois niveaux constitue une avancée significative en matière de performance et de qualité de l'énergie. Ces onduleurs améliorent la qualité de l'énergie en réduisant les perturbations harmoniques et en augmentant l'efficacité de conversion. Leur intégration permet une gestion plus efficace des variations de production d'énergie solaire et renforce la stabilité du réseau grâce à une réponse plus rapide aux fluctuations de charge.

En résumé, la modélisation précise des systèmes PV avec des onduleurs à trois niveaux est essentielle pour optimiser leurs performances et tirer pleinement parti de ces technologies avancées. Les recherches futures doivent se concentrer sur l'amélioration des algorithmes de

modélisation afin de permettre une intégration encore plus efficace de ces onduleurs dans les réseaux électriques, soutenant ainsi une transition énergétique durable.

CHAPITRE III

Systeme PV/Statcom

• **III. Introduction**

Un STATCOM, plus récent et plus élaboré, est une source de tension variable contrôlée en amplitude et en phase. Ce dispositif diffère considérablement en termes de construction, de commande et de fonctionnement, mais sa fonction et sa contribution au réseau électrique sont sensiblement les mêmes que celles du dispositif SVC.

Dans ce travail, nous adopterons la convention suivante : l'injection de puissance réactive au nœud correspond à l'injection de puissance réactive capacitive, tandis que l'absorption concerne l'injection de puissance réactive inductive. De plus, nous parlerons de courant capacitif positif et de courant inductif négatif[19][23]

• **III.2.Définition du STATCOM**

Le STATCOM est un générateur synchrone statique fonctionnant de manière similaire à un SVC (Static Var Compensator) connecté en parallèle, mais avec la particularité que son courant de sortie (capacitif ou inductif) peut être contrôlé de manière indépendante de la tension alternative du réseau.[24]

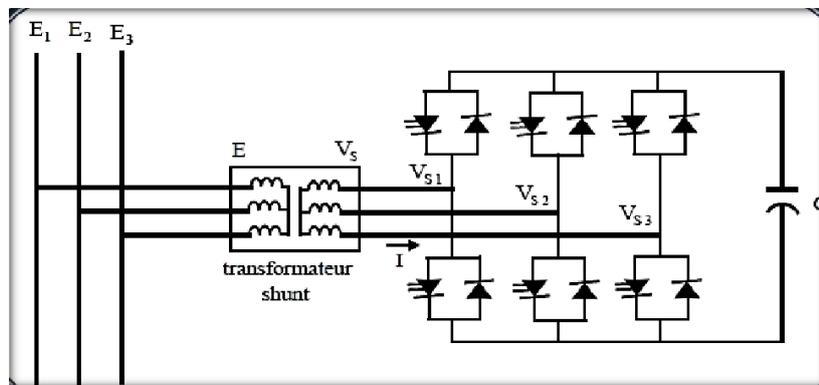


Figure III. 1 :Schéma de base du STATCOM

• **III.3.Principe de fonctionnement**

Le rôle du STATCOM est de compenser la puissance réactive, ce qui entraîne 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 puissance réactive à échanger avec le réseau[25].

Il n'y a pas d'échange de puissance active avec le réseau, mais seulement de la puissance réactive, comme le montre la Figure III-2 (facteur de puissance quasi nul).

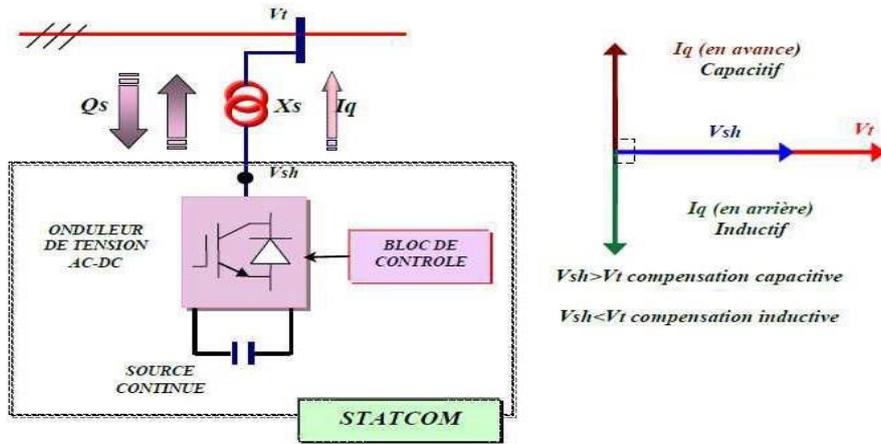


Figure III. 2 : Le STATCOM

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 d'énergie active avec le réseau, mais seulement de la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le STATCOM, comme le résume la Figure (III-3).[26]

Considérant le STATCOM de la figure (III.2) connecté à un jeu de barres dans le système énergétique (source de tension, ligne et charge), le schéma équivalent de ce dispositif est donné par la Figure (III-3):

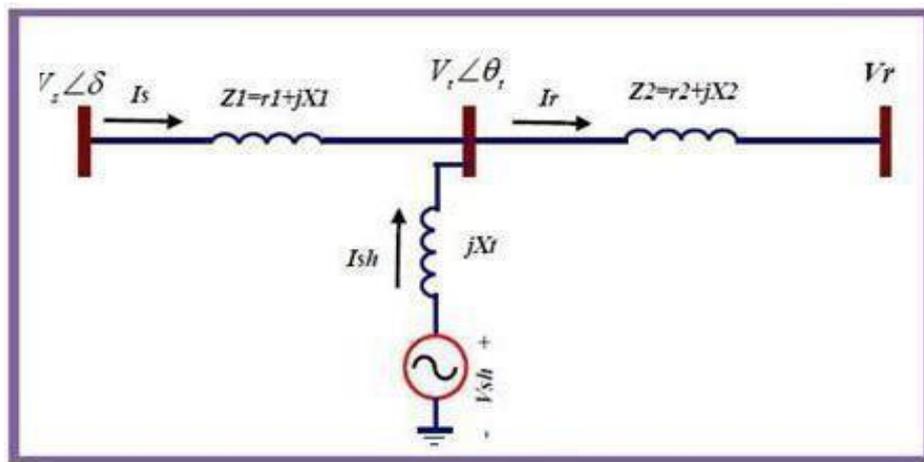


Figure III. 3 : Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique

Le courant injecté par le STATCOM est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{jX_t} \quad (III.1)$$

La puissance injectée au jeu de barre " t " est donnée par l'équation (III.2).

$$S = V_t - I_{sh} = \frac{V_t(V_{sh}-V_t)}{-jX_t} = \frac{V_t V_{sh} - V_t^2}{-jX_t} \quad (III.2)$$

D'où on aboutit aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre "t" exprimées par les formules (III.3.a) (III.3.b).

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

$$Q_{sh} = (V_{sh} \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t) / X_t \quad (III.3.b)$$

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.

Donc

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t = 0 \quad (III.4)$$

D'où la condition :

$$\theta_t - \theta_{sh} = 0 \Rightarrow \theta_t = \theta_{sh} \quad (III.5)$$

Selon cette condition, la tension injectée par le STATCOM V_{sh} doit être en phase avec la tension du jeu de barres de raccordement. [26][27]

Cependant, dans la pratique, une petite quantité de puissance active est toujours absorbée du réseau pour couvrir les pertes des interrupteurs du convertisseur du STATCOM, 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 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 (III.6) et (III.7).

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

$$V_{shd} = V_{sh}, V_{shq} = 0$$

$$|I_{sh}| = I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{X_t} \quad (III.6)$$

$$Q_{sh} = V_{sh} I_{sh} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}\right) \quad (III.7)$$

A partir de l'équation (III.1), il paraît clair 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 comme montre la figure (III.4), et 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, voir figure(III.5). [15], [25]

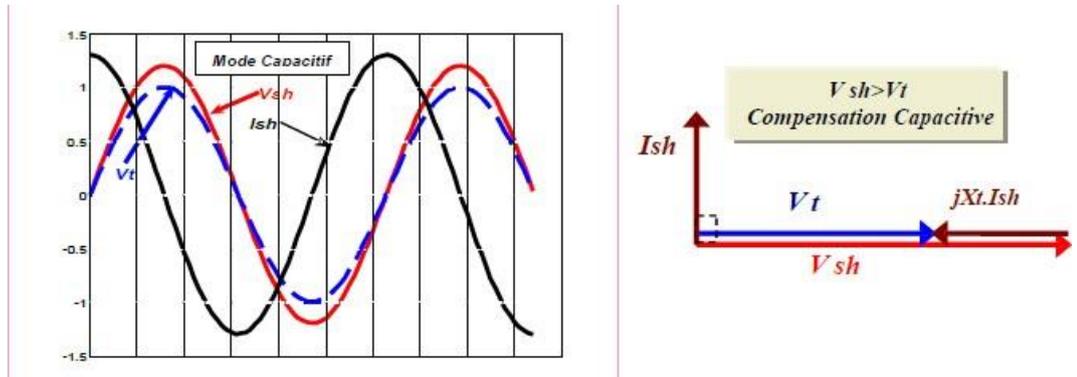


Figure III. 4 : Courbes simulées courant et tension en mode capacitif.

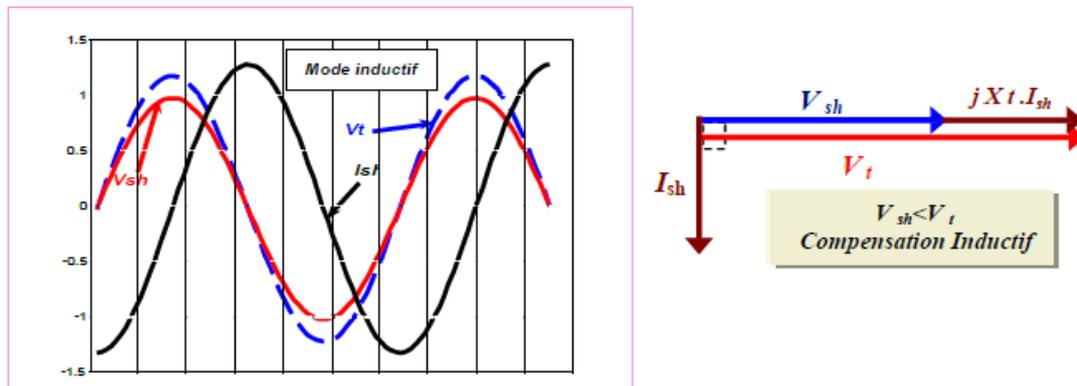


Figure III. 5 : Courbes simulées courant et tension en mode inductif.

NB: La puissance nominale du STATCOM dépend de la puissance réactive demandée pour la compensation au point de connexion. Le calcul de la répartition de charge (écoulement de puissance) détermine la tension du jeu de barre à réguler et la quantité de la puissance réactive nécessaire pour atteindre cet objectif.

• **III.4.Modélisation du STATCOM**

III.4.1.Modèle Mathématique Simplifié:

Le STATCOM, tel que décrit précédemment, peut être représenté par un schéma équivalent, comme illustré dans la Figure (III.6), en ne considérant que le jeu de barres auquel ce dispositif est connecté.

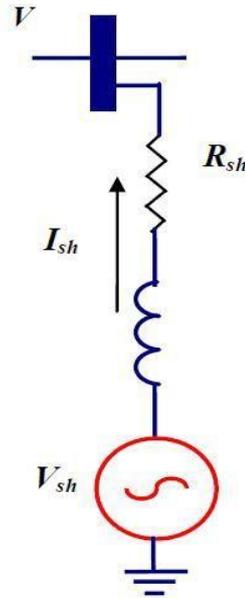


Figure III. 6 : Schéma équivalent d'un STATCOM connecté au réseau

Pour le modèle simplifié du STATCOM, on suppose que le circuit continu consiste en une source de tension constante, et le circuit continu ne sera pas inclus dans ce modèle. Le schéma équivalent de ce dispositif est donc une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'intermédiaire de l'inductance L_{sh} (voir Figure III.8) à travers un transformateur de couplage. Le circuit contient également une résistance en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur.[27]

Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système V (tension au nœud) et la tension ajustable du STATCOM. On appliquant la loi d'ohm on a :

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (\text{III.8})$$

Où les grandeurs en triphasé sont :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \quad \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bsh} \\ V_{csh} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{ash} \\ I_{bsh} \\ I_{csh} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe (α, β) en multipliant

l'équation (III.8) par la matrice de la transformation de CLARK suivante:

$$T_{\alpha,\beta} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

On passe au repère tournant (d,q), le référentiel du synchronisme, en multipliant tous les grandeurs par le phaseur $e^{-j\gamma}$ avec $d\gamma/dt = \omega$, la pulsation des grandeurs en question voire la figure (III.7).

Donc:

$$(d, q) = (\alpha, \beta) \cdot e^{-j\gamma} \quad (III.11)$$

Et inversement

$$(\alpha, \beta) = (d, q) \cdot e^{j\gamma} \quad (III.12)$$

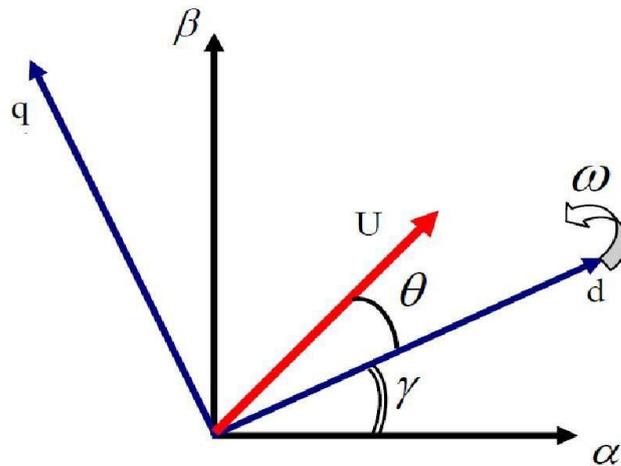


Figure III. 7 : Passage du repère (α, β) vers le repère (d, q)

En appliquant cette écriture sur l'équation (III.8) on aura:

$$\overline{V}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} - \overline{V}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} = R_{sh} \overline{I}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} + L_{sh} \frac{d}{dt} (\overline{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma}) \quad (III.13)$$

Après simplification de calcul en aboutissant aux équations dynamiques du STATCOM dans le repère (d, q) suivante:

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \omega I_{shq} \quad (III.14)$$

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

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

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{pmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

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

III.4.2. Modèle mathématique en considérant le circuit DC :

Le modèle simplifié est dérivé sous l'hypothèse d'aucune variation de la tension continue U_{dc} durant les petits échanges d'énergie active entre le réseau et la source DC.

Lorsque la capacité de la source DC est relativement petite, le modèle mathématique doit être amélioré en incluant l'équation du circuit continu.[27][28]

Le circuit continu est représenté par une source de courant connectée au condensateur C et une résistance en shunt pour exprimer les pertes joules dans le circuit continu, comme illustré dans la Figure (III.8).

On suppose que :

$$V_{sh}^{(d,q)} + V_{shd} + jV_{shq} = v \cos\theta + jv \sin\theta \quad (III.17)$$

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

$$v = m \times U_{dc} \quad (III.18)$$

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

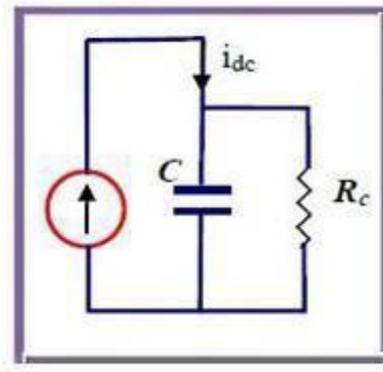


Figure III. 8 : Schéma équivalent du circuit DC du STATCOM

En substituant les équations (III.17) et (III.18) dans les équations (III.14) et (III.15) on abouti aux équations:

$$V_d - mU_{dc} \cos\theta = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \quad (III.19)$$

$$V_q - mU_{dc} \cos\theta = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \quad (III.20)$$

La puissance circulant entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation(III.20) et en même temps vérifie l'égalité qui suit (III.21):

$$P_{sh} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (III.21)$$

$$U_{dc} I_c = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (III.22)$$

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_{dc} .

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (III.23)$$

De ces équations (III.24),(III.25),(III.29)et(III.30) on peut tirer l'équation dynamique du côté continue du STATCOM suivante:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} m (I_{shd} \cos\theta - I_{shq} \sin\theta) - \frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (III.24)$$

Les équations (III.19) (III.20) (III.24) forment le système d'équation d'état du STATCOM en tétant compte des variations de la tension du circuit continu qu'on écrit sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ I_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta \\ \frac{3m}{2C} \cos \theta & -\frac{3m}{2C} \cos \theta & -\frac{1}{R_{dc}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (III.25)$$

On peut observer qu'il y a deux paramètres de commande dans ce système, avec trois paramètres d'état à contrôler, et seulement deux grandeurs peuvent être commandées indépendamment. Lorsque l'on linéarise ce système autour d'un point de fonctionnement, il prend la forme suivante : [27], [29]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ I_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta \\ \frac{3m}{2C} \cos \theta & -\frac{3m}{2C} \cos \theta & -\frac{1}{R_{dc}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin \theta_0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \cos \theta_0 \\ 0 & 0 & \frac{2m}{3C} (I_{shd} \sin \theta + I_{shq} \cos \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \theta \end{bmatrix} \quad (III.26)$$

Le courant réactif est commandé indépendamment pour contrôler le flux de puissance réactive et les autres paramètres sont utilisés pour maintenir la tension continue U_{dc} constante. [27]

• III.5. Contrôle du STATCOM

III.5.1. Détermination des Références:

Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive Q_{shq}^* calculée en fonction de la chute de tension, et la puissance active $P_{shq}^* \approx 0$, représentant les pertes joules dans le circuit continu et les interrupteurs de l'onduleur. [2][30]

Ces puissances, qui sont les images des courants I_{shd}^* et I_{shq}^* actif et réactif, sont déterminées à partir du système d'équations suivant, écrit dans le référentiel tournant au synchronisme (d,q)

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{shd}^* \\ Q_{shq}^* \end{bmatrix} \quad (III.27)$$

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 l'algorithme de la figure (III.9).

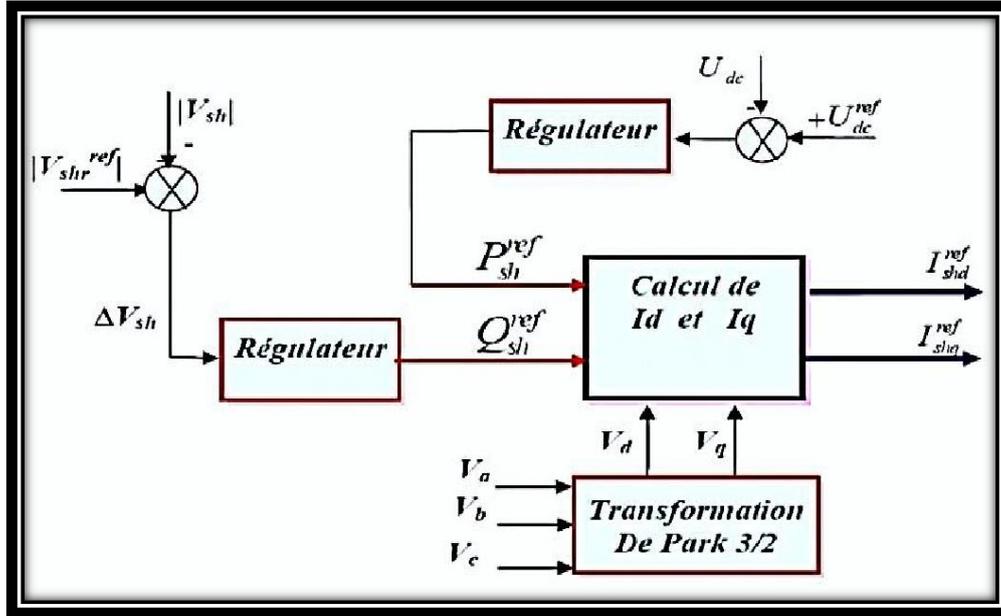


Figure III. 9 : Identification des Courants de Référence. [32]

III.5.2.Méthode Watt-Var découplée :

Considérant le modelé simplifié représenté par le système d'équation(III.23) Précédent:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{pmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} \quad (III.28)$$

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

$$\frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} \text{ Avec } X_1 = \frac{1}{L_{sh}} (V_d - V_{shd}) \text{ et } X_2 = \frac{1}{L_{sh}} (V_q - V_{shq}) \quad (III.29)$$

Sont les nouvelles grandeurs de commande.

A partir de la première équation du système(III.23) on aura:

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega I_{shq} + X_1 \quad (III.30)$$

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

$$\left(S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right) I_{shd} = \omega I_{shq} + X_1 = \tilde{X}_1 \quad (III.31)$$

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

$$\frac{I_{shd}}{\tilde{X}_1} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (III.32)$$

Notre commande en réalité est en X_1 et comme $\tilde{X}_1 = \omega \cdot I_{shq} + X_1$, on doit ajouter donc le Terme $\omega \cdot I_{shq}$ pour retrouver \tilde{X}_1 à l'entrée de ce transfert comme L'indique le schéma de la figure(III.10) suivante :

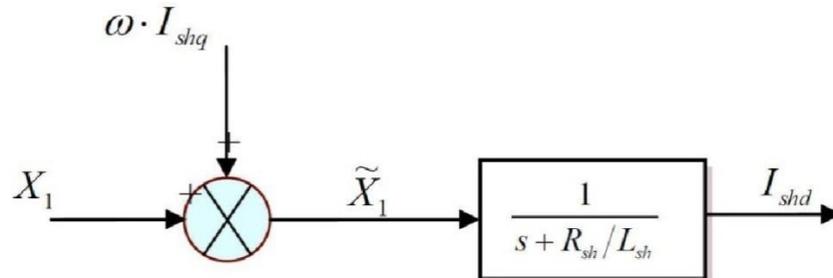


Figure III. 10 : Transfert de l'Isd en fonction de X.

De ce que nous venons de voir, 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}^* et I_{shq}^* Comme le représente le schéma bloc de Figure (III-11)

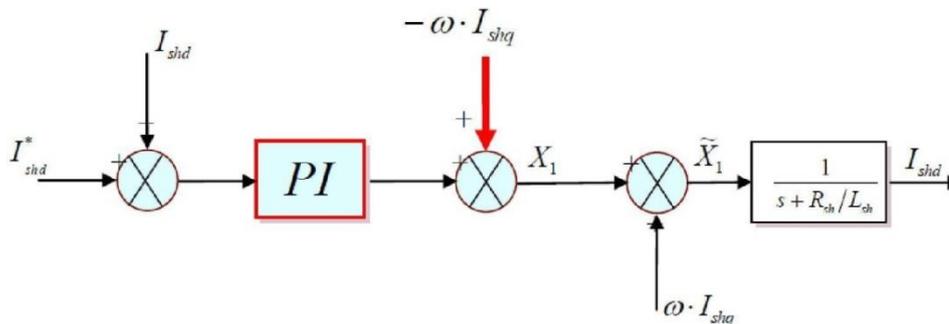


Figure III. 11 : Régulation et découplage de Isd

De la même manière, pour le courant réactif, nous devons ajouter la composante $\omega \cdot I_{shd}$. Ainsi, nous arrivons finalement au schéma de régulation du STATCOM par la méthode Watt-Var découplée, comme illustré dans la figure (III.12).

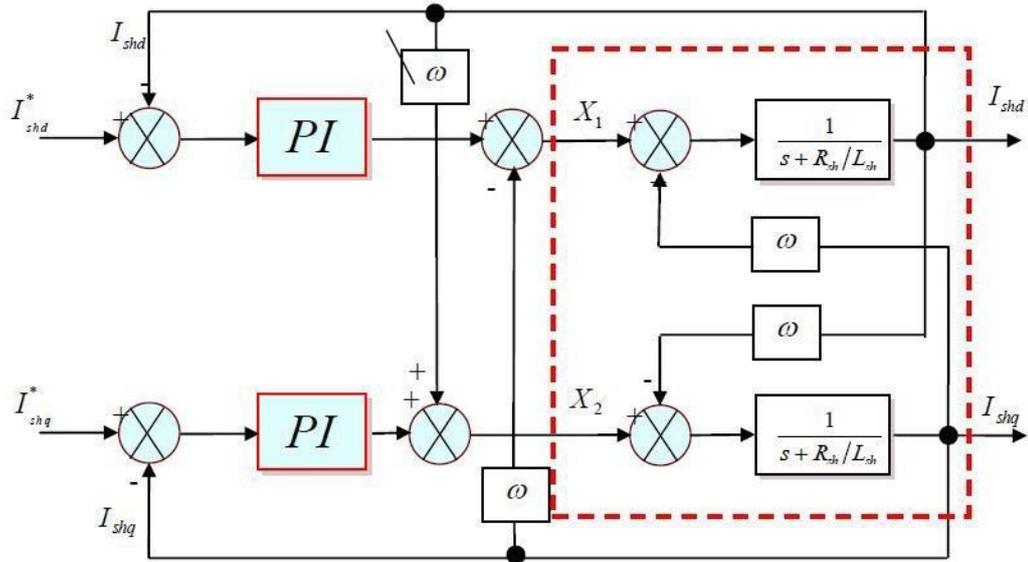


Figure III. 12 : Schéma de Régulation du STATCOM (Watt-Var découplé).

III.5.3. Régulateur PI avec compensation de pôles:

Nous avons utilisé pour la régulation des courants du STATCOM des régulateurs proportionnels intégraux (PI) comme le montre le schéma de la figure (III.13) :

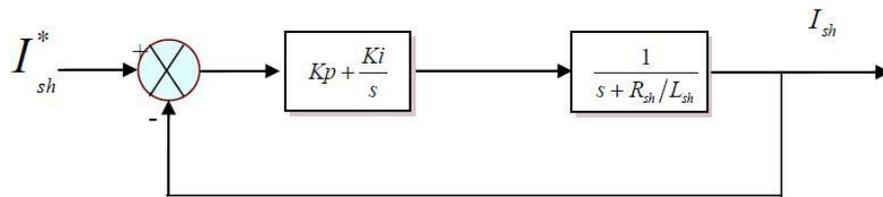


Figure III. 13 : Schéma bloc de la Régulation PI des courants du STATCOM

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

$$G(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) = K_p \left(\frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) \quad (III.33)$$

Et par compensation du pôle on doit avoir :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \quad (III.34)$$

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 des pôles errèrent de la forme qui suit:

$$F(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K_p}{s+K_p} = \frac{1}{T_{BF}(s)+1} \quad (III.35)$$

$$T_{BF} = \frac{1}{K_p}$$

En choisissant un temps de réponse en boucle fermée convenable (de l'ordre de 1/3 du temps de réponse en boucle ouverte), les gains du contrôleur PI peuvent être déterminés à l'aide des équations (III.34) et (III.35).

$$K_p = \frac{1}{3} T_{BF} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \quad \text{Et} \quad K_i = K_p \times \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \quad (III.36)$$

III.5.4. Régulation de la tension continue Udc:

Pour maintenir la tension continue aux bornes du condensateur à une valeur constante, il est nécessaire d'ajouter un courant actif au courant de référence du STATCOM. Cela permettra d'absorber ou de fournir la puissance active nécessaire sur le réseau. La puissance échangée avec le condensateur peut être exprimée par l'équation (III.37).[30][30]

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \Rightarrow \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2P_{sh}}{C} \quad (III.37)$$

En passant au domaine fréquentiel (La placier) on aura:

$$\frac{U_{dc}^2}{P_h} = \frac{2}{C \cdot s} \quad (III.38)$$

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.[31]

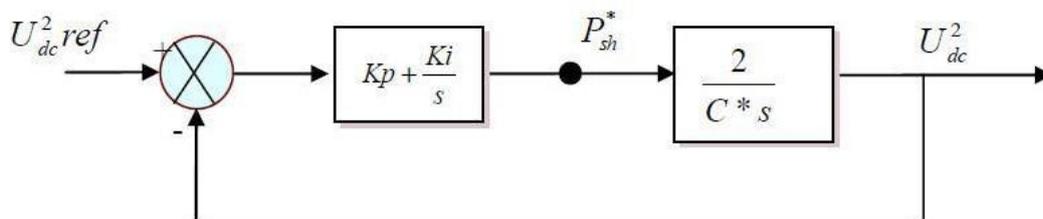


Figure III. 14 : Régulation de la tension continue Udc

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système sous forme de Bode est:

$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc\text{ref}}^2} = \frac{\frac{2 \cdot K_p}{C} s + \frac{2 \cdot K_i}{C}}{s^2 + \frac{2 \cdot K_p}{C} s + \frac{2 \cdot K_p}{C}} \quad (\text{III.39})$$

Avec

$$\omega_n^2 = \frac{2K_i}{C}$$

$$\xi = K_p \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot C \cdot K_i}} \quad (\text{III.40})$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée nous avons choisi $\xi=0.7$. Et à fin d'atténuer les fluctuations à 300Hz, et pour avoir un bon filtrage on va choisir

$$\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot 300}{10} \text{red/sec et finalement on détermine à partir des équations (III.40) les valeurs}$$

Des gains K_p et K_i .

• III.6. Avantages du STATCOM :

Le STATCOM possède plusieurs avantages par rapport aux compensateurs conventionnels :

- ❖ Plage d'opération plus large : Il offre une plus grande flexibilité d'opération que les SVC classiques.
- ❖ Réactivité accrue : Il peut répondre à des variations de tension en moins d'un cycle.
- ❖ Production accrue de puissance réactive : Lors de baisses de tension, il peut produire plus de puissance réactive pour empêcher une chute supplémentaire de la tension.
- ❖ Bonne réponse à faible tension : Le STATCOM peut fournir son courant nominal même lorsque la tension est presque nulle.
- ❖ Excellente réponse dynamique : Le système répond instantanément aux variations de tension.
- ❖ Absence d'éléments capacitifs susceptibles de résonance : Il ne comporte pas d'éléments capacitifs pouvant provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau.
- ❖ Contrôle optimal de la tension : Chaque phase est contrôlée séparément, même pendant les perturbations du système.[32]

- **III.7.Inconvénient du STATCOM :**

Pour contrer le phénomène des harmoniques générés par le STATCOM de base, il est essentiel d'adopter des stratégies telles que l'utilisation de compensateurs multi-niveaux avec commande MLI ou l'installation de filtres appropriés[32], [33]

- **III.8.Intégration du STATCOM dans un système PV :**

Dans cette section, nous exposons les résultats de simulation de l'intégration du système photovoltaïque (PV) au réseau électrique, en conjonction avec un STATCOM, évalués à l'aide du logiciel MATLAB / Sim Power System. Ces simulations ont été effectuées pour un éclairement solaire de $G = 1000 [W/m^2]$ et une température de $T = 298 K$.

• **III.9.Système PV /STATCOM :**

La figure (4.1) représente le schéma synoptique d'un système PV-STATCOM relié au réseau électrique qui contient les parties suivantes :

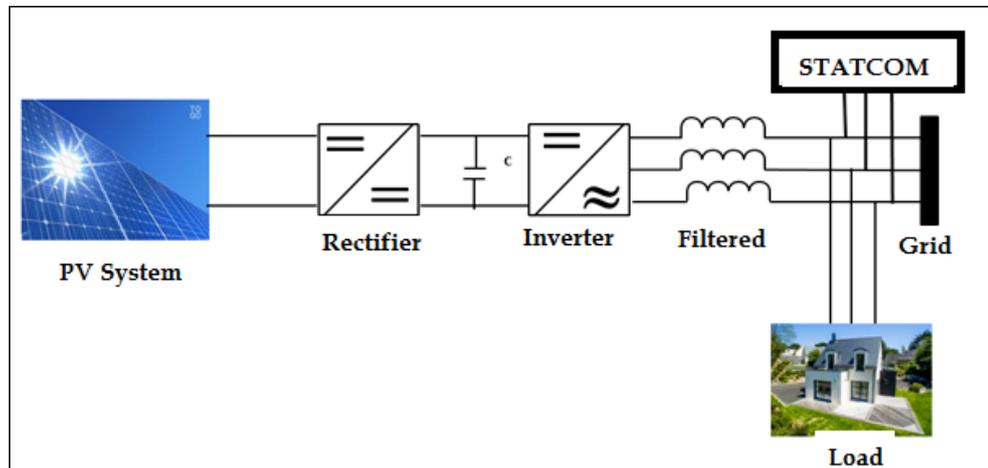


Figure III. 15 : Schéma synoptique d'un système PV/STATCOM

1. Le système PV connecté au réseau électrique contient un générateur PV constitué de plusieurs modules en séries ; chaque module peut délivrer dans les conditions standards une puissance de 200.143W, un courant de 8.21A sous une tension optimale de 32.9V.
2. Le quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie de type survolteur commandé par la commande MPPT de type «perturbation et observation».
3. Onduleur de tension triphasé commandé par la commande Hystérésis de courant.
4. Filtre de raccordement RL
5. Charge inductive RL.
6. Réseau électrique triphasé.

• **III.10.Simulation du système PV/STATCOM :**

La simulation d'un système photovoltaïque (PV) avec un compensateur statique de puissance réactive (STATCOM) est un sujet complexe mais fascinant, surtout dans le cadre de la gestion de l'énergie et de la stabilité du réseau électrique. Voici un aperçu des concepts clés et des étapes pour réaliser une telle simulation.

• **Concepts clés**

1. Système Photovoltaïque (PV) :

- Panneaux solaires: Convertissent l'énergie solaire en électricité.
- Onduleur : Convertit le courant continu (DC) produit par les panneaux en courant alternatif (AC) utilisable par le réseau.
- Contrôleurs MPPT (Maximum Power Point Tracking) : Optimisent l'efficacité de conversion des panneaux solaires.

2. STATCOM (Static Synchronous Compensator) :

Dispositif utilisé pour réguler la tension et améliorer la stabilité du réseau électrique en injectant ou absorbant de la puissance réactive.

Utilise des convertisseurs de puissance basés sur des technologies comme les onduleurs à base de transistors bipolaires à grille isolée (IGBT).

- **Étapes de la Simulation**

1. Modélisation du Système PV :

- .Modélisation des Panneaux Solaires: Utilisation des équations caractéristiques pour représenter les panneaux solaires.
- Onduleur et MPPT : Implémentation des algorithmes de contrôle pour le suivi du point de puissance maximale.

2. Modélisation du STATCOM:

- Convertisseur de Puissance: Modélisation du convertisseur AC/DC et de ses contrôleurs de courant et de tension.
- Contrôleurs: Conception des régulateurs pour la régulation de la tension du bus CC et de la puissance réactive.

- **Intégration du Système :**

- Connexion au Réseau: Intégration des modèles PV et STATCOM au réseau électrique simulé.
- Simulation de Scénarios Dynamiques : Analyse de la réponse du système à des variations de charge, de génération PV et des perturbations du réseau.

- **Outils de Simulation**

MATLAB/Simulink: Très utilisé pour les simulations de systèmes d'énergie, avec des bibliothèques spécifiques pour les systèmes PV et les dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems) comme le STATCOM.

PSCAD/EMTDC: Autre outil puissant pour la simulation des systèmes de puissance.

-

Cette Figure III. 16 illustre la répartition de la puissance réactive (Q) en fonction du temps, mesurée en secondes. On y voit trois courbes distinctes représentant la charge (Q - Charge), le STATCOM (Q - STATCOM) et le réseau (Q - Réseau).

Q - Charge (ligne bleue) : La puissance réactive de la charge reste constante à environ 6000 Var pendant toute la durée de la simulation (0 à 0,5 seconde).

Q - STATCOM (ligne rouge) : La puissance réactive du STATCOM commence à -6000 Var et reste constante, indiquant que le STATCOM compense complètement la puissance réactive de la charge.

Q - Réseau (ligne verte): La puissance réactive fournie par le réseau reste à zéro, ce qui signifie que le réseau ne contribue pas à la puissance réactive pendant cette période.

ce graphique démontre l'efficacité du STATCOM à compenser la puissance réactive de la charge, assurant ainsi que le réseau n'a pas besoin de fournir de puissance réactive, ce qui optimise la performance globale du système.

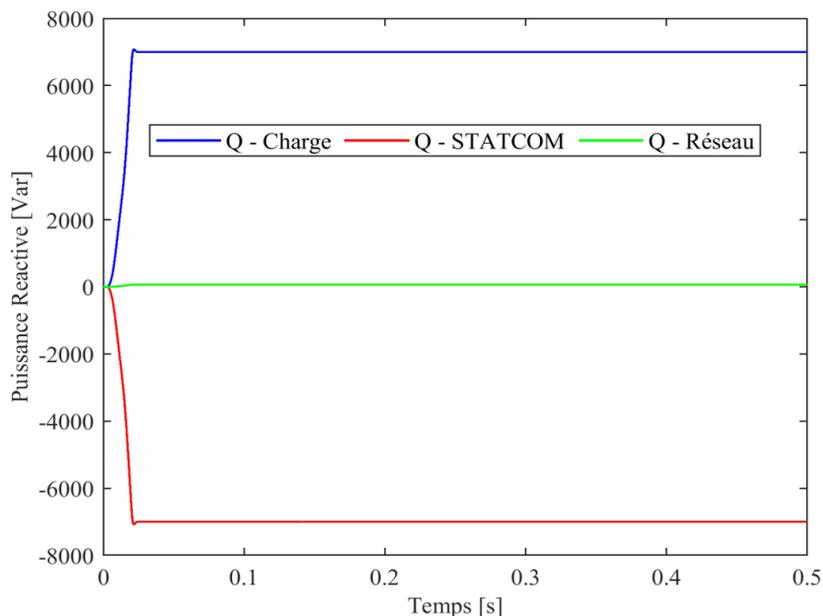


Figure III. 17 : Répartition de puissance réactive

La figure(III.17) représentée montre l'évolution du facteur de puissance en fonction du temps, mesuré en secondes. On peut observer que le facteur de puissance reste constamment à 1 tout au long de la période analysée, de 0 à 0,5 seconde. Cela indique une efficacité maximale du système, sans déphasage entre la tension et le courant. Un facteur de puissance de 1 signifie que toute la puissance apparente est convertie en puissance réelle, ce qui est idéal pour le fonctionnement d'un système électrique. Ce résultat suggère une stabilité et une performance optimales du système pendant la période de mesure.

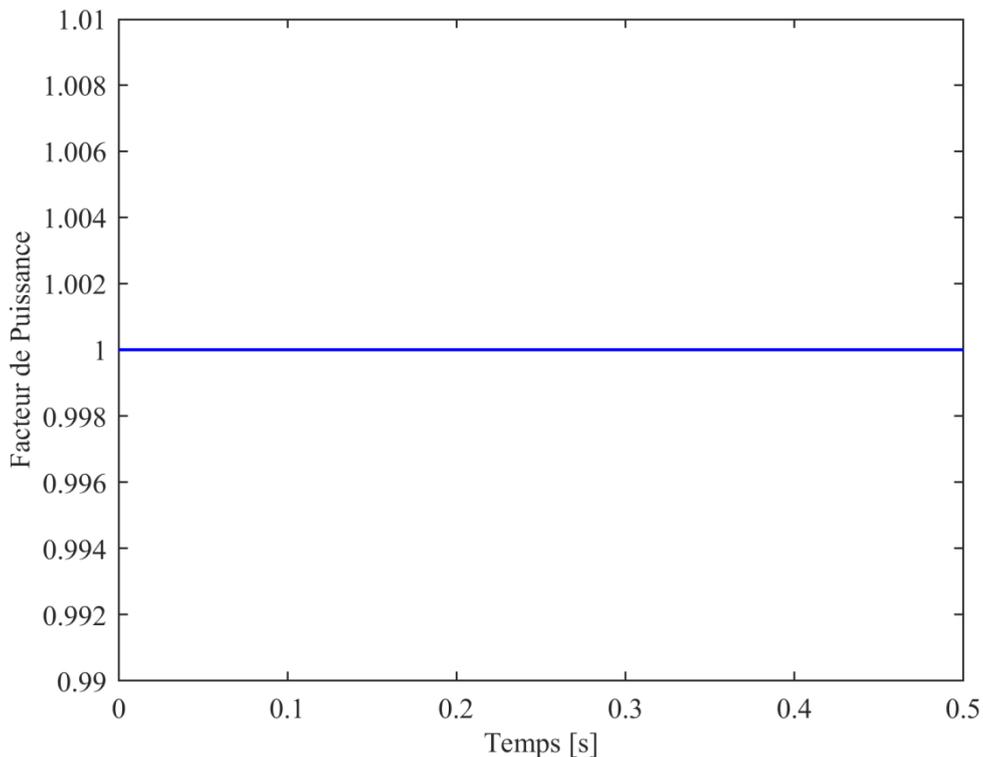


Figure III. 18 : Facteur de puissance

• III.12. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation du STATCOM dans diverses fonctions pour contrôler et réguler la tension via la compensation de l'énergie réactive. Le système PV-STATCOM a été simulé sous différents scénarios de test. L'avantage principal du système PV-STATCOM réside dans sa capacité à compenser non seulement la puissance réactive, mais aussi la puissance active.

Les résultats de la simulation ont démontré que le PV-STATCOM peut assurer une compensation complète de la puissance réactive et de la puissance active, tout en maintenant un facteur de puissance unitaire côté réseau.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a exploré trois aspects essentiels pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans le contexte de l'intégration des énergies renouvelables : les généralités sur l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, la modélisation des systèmes photovoltaïques, et l'intégration des systèmes PV avec un STATCOM.

Le premier chapitre a mis en évidence l'importance de la qualité de l'énergie électrique, soulignant les défis posés par les perturbations telles que les variations de tension, les harmoniques et les fluctuations de fréquence. Ces perturbations peuvent avoir des impacts négatifs sur les équipements et la stabilité du réseau.

Le deuxième chapitre a fourni un aperçu des systèmes photovoltaïques, décrivant leurs principes de fonctionnement, les différentes configurations et les méthodes de modélisation. La modélisation des systèmes PV est cruciale pour optimiser leur performance et prévoir leur comportement sous différentes conditions. Les modèles et les simulations aident à dimensionner les installations et à améliorer leur intégration dans le réseau électrique, maximisant ainsi leur efficacité et leur fiabilité.

Le troisième chapitre a examiné l'utilisation des systèmes PV en combinaison avec des STATCOM. Cette association permet une compensation dynamique de la puissance réactive, améliorant la qualité de l'énergie et la stabilité du réseau. Les STATCOM offrent des réponses rapides aux variations de charge, réduisant les fluctuations de tension et augmentant la résilience du réseau face à l'intermittence des sources d'énergie renouvelable.

En conclusion, l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique est un enjeu crucial pour les réseaux modernes, surtout avec l'intégration croissante des énergies renouvelables. Les systèmes photovoltaïques, lorsqu'ils sont associés à des technologies de compensation avancées comme les STATCOM, peuvent significativement contribuer à cette amélioration. Les avancées dans la modélisation et l'optimisation de ces systèmes sont essentielles pour garantir une transition énergétique réussie vers des sources plus durables et fiables. Les futures recherches et développements devraient se concentrer sur l'amélioration continue des technologies PV et des dispositifs de compensation pour surmonter les défis liés à l'intégration des énergies renouvelables et assurer la stabilité et la qualité du réseau électrique.

Références bibliographiques

- [1] « □ Thèses-Algérie: Doctorat, Magister, Master... » Disponible sur: <https://www.theses-algerie.com>
- [2] N. Zoukh et A. Ras Ghanem, « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par l'utilisation d'un filtre actif parallèle dans un réseau électrique », Thesis, Université Ibn Khaldoun, 2023.
- [3] D. Sabra et H. Radja, « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique », Université 8Mai 1945 – Guelma, Working Paper, juill. 2021.
- [4] V. Ignatova, « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique. », oct. 2006.
- [5] « Stratégies de commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique dans le but d'optimiser la qualité de l'énergie - Cognito ».
- [6] « Composition d'une onde déformée (onde fondamentale et harmonique 3) | Le monde en images ». Consulté le: 14 juin 2024.
- [7] « 6 Déséquilibre du système triphasé de tension I.2.2.2. Impacte d ... », www.google.com.
- [8] « Memoire Online - controle des puissances et des tensions dans un ... », www.google.com.
- [9] « Figure 8 from PV-STATCOM: A New Smart Inverter for Voltage Control ... », www.google.com.
- [10] H. Ahmed, H. Ibrahim, et O. Attalah, « Amélioration de la Qualité d'Énergie d'un Système Photovoltaïque Raccordé au Réseau Électrique », UNIVERSITE Amar Telidji de Laghouat.FACULTE DE TECHNOLOGIE.DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE, 2021.
- [11] N. Voraphonpipit et S. Chatratana, « STATCOM Analysis and Controller Design for Power System Voltage Regulation », févr. 2005, p. 1-6. doi: 10.1109/TDC.2005.1546873.
- [12] « 11 Exemple de variation de tension | Download Scientific Diagram », www.google.com.
- [13] M. AC, « Novel Control of PV Solar and Wind Farm Inverters as STATCOM for Increasing Connectivity of Distributed Generators », *Electron. Thesis Diss. Repos.*, avr. 2013,
- [14] « Modified STATCOM control strategy for fault ride-through ... », www.google.com. Consulté le: 13 juin 2024.
- [15] « E-STATCOM (energy storage + STATCOM): a solution to integrate ... », www.google.com.
- [16] H. Ahmed, H. Ibrahim, et O. Attalah, « Amélioration de la Qualité d'Énergie d'un Système Photovoltaïque Raccordé au Réseau Électrique », UNIVERSITE Amar Telidji de Laghouat.FACULTE DE TECHNOLOGIE.DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE, 2021.
- [17] M. Lattoui et B. Zellouta, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution », Thesis, Université Ibn Khaldoun -Tiaret-, 2018. Consulté le: 14 juin 2024.
- [18] M. Kidoud et A. Zergaoui, « Intégration de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique à basse tension via l'onduleur à trois niveaux », Thesis, Université Ibn Khaldoun -Tiaret-, 2016.
- [19] « Chapitre III », www.google.com. Consulté le: 14 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.google.com/imgres?imgurl=x-raw->

Références bibliographiques

- [20] « MPPT d'un système photovoltaïque à l'aide d'un contrôleur à ... », www.google.com. Consulté le: 14 juin 2024.
- [21] E. Ajjouri, « Méthode avancée de contrôle commande d'un onduleur monophasé pour une réduction de la banque de condensateurs, en vue d'accroître la durée de vie du convertisseur ».
- [22] « Figure 2 from Coordinated control of PV solar system as STATCOM ... », www.google.com.
- [23] object Object, « State Space Modeling of Smart PV Inverter as STATCOM (PV-STATCOM) for Voltage Control in a Distribution System ».
- [24] « 3 Schéma de base du STATCOM | Download Scientific Diagram », www.google.com. STATCOM
- [25] R. Belgacem et A. A. Lounis, « Apport d'un STATCOM dans un système de conversion d'énergie photovoltaïque (PV) connecté au réseau électrique. », Thesis, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2022.
- [26] B. Fateh, « Filière : Génie Electrique ».
- [27] S. Fares, B. Houari, et B. Boubekour, « Utilisation d'un dispositif STATCOM pour l'amélioration du transit de puissance d'un réseau de transport d'énergie alternatif ».
- [28] G. Nesrine, « Utilisation d'un D-STATCOM pour la compensation des énergies réactives et des tensions dans le réseau de distribution d'énergie », Thesis, Abdelhafidboussoufuniversity Centre mila, 2020.
- [29] S. Kumari, « Performance Investigation of Solar PV Integrated STATCOM based Multilevel Inverter », *University*, 2018,
- [30] E. G. Shahraki, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », phdthesis, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2003. Consulté le: 14 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01746535>
- [31] N. Voraphonpipit et S. Chatratana, « STATCOM Analysis and Controller Design for Power System Voltage Regulation », févr. 2005, p. 1-6. doi: 10.1109/TDC.2005.1546873.
- [32] F. Hamadi, F. Hamoudi, Promoteur, et L. Foughali, « Apport des systèmes FACTS sur la stabilité de la tension », Thesis, Université de bejaia, 2015. Consulté le: 14 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://172.17.1.105:8080/xmlui/handle/123456789/8863>
- [33] « behadj.pdf ».

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'assurer l'injection d'énergie électrique produite par un centrale PV au réseau. La configuration de ce système comporte un générateur photovoltaïque, connecté à un hacheur survolteur, un onduleur de tension multiniveaux, on doit assurer un fonctionnement à puissance maximale du générateur photovoltaïque (MPPT). Ensuite, PV/ STATCOM connecté au réseau électrique assurer la continuité de service et l'efficacité de la production PV. Le modèle global du système PV/STATCOM connecté au réseau électrique et pour tester la performance du STATCOM Les résultats ont montré une bonne performance du système proposé pour assurer la stabilité de la tension.

Les résultats de simulation, ont été présentés à l'aide de l'outil Matlab Simulink.

Mots clés : Energie Photovoltaïque (PV); STATCOM ; Maximum Power Point Tracking (MPPT)

ملخص

في الشبكة. ويشمل تكوين هذا النظام PV الهدف من هذا العمل هو ضمان حقن الطاقة الكهربائية التي تنتجها محطة مولد كهروضوئي، متصل بمروحية فائقة الشحن، محول جهد متعدد المستويات، يجب على المرء أن يضمن التشغيل المتصل بالشبكة واختبار PV/STATCOM النموذج العام لنظام (MPPT) الأقصى للطاقة للمولد الكهروضوئي أظهرت النتائج أداءً جيدًا للنظام المقترح لضمان استقرار الجهد تم تقديم نتائج المحاكاة باستخدام STATCOM أداء أداة Matlab Simulink..

الكلمات الرئيسية:

؛ الحد الأقصى لنقاط الطاقة STATCOM (MPPT)؛ الطاقة الكهروضوئية ؛

Abstract

The objective of this work is to ensure the injection of electrical energy produced by a PV plant to the grid. The configuration of this system includes a photovoltaic generator, connected to a supercharger chopper, a multilevel voltage inverter, one must ensure maximum power operation of the photovoltaic generator (MPPT) Then, PV/ STATCOM connected to the power grid ensure continuity of service and efficiency of PV production. The overall model of the PV/STATCOM system connected to the grid and to test the performance of the STATCOM The results showed a good performance of the proposed system to ensure the stability of the voltage.

The simulation results were presented using the Matlab Simulink tool.

Keywords: Photovoltaic Energy (PV); STATCOM; Maximum Power Point Tracking (MPPT)

ANNEXE

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	$1.602 \cdot 10^{-19}$

Cellule d'une PV