

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique**

**Université de Boumerdes M'Hamed Bougara**  
**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**  
**Département Automatisation des Procèdes et Electrification**



# *Thèse*



Présentée pour l'obtention du diplôme de :

## **Doctorat en Sciences en Electrotechnique**

*Option* : Electrotechnique

Sous le Thème :

### **Contrôle des Systèmes FACTS dans un Réseau Electrique Connecté à une Source d'Energie Renouvelable**

Présentée par

**BOUKARANA Leila**

#### **Devant le jury composé de :**

KIDOUCHE	Madjid	Professeur	UMBB	Président
FELLAG	Sid Ali	Professeur	UMBB	Encadreur
HABI	Idir	Professeur	UMBB	Co-Encadreur
BENDAAS	Mohamed Lokman	Professeur	Univ-Batna 2	Examineur
HABBAB	Mohamed	MCA	Univ-Bechar	Examineur
IDIR	Abdelhakim	Professeur	Univ-Msila	Examineur

# Dédicace

*Un très grand honneur.*

*Un très grand respect.*

*Et surtout beaucoup d'amour.*

*Je dédie ce travail*

*A ma fille **Nina Maram.***

***B.Lilia***

# REMERCIEMENT

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour la force, la patience, la santé et le courage qu'Il m'a accordés. Sans Sa volonté, ce chemin n'aurait jamais pu être parcouru.

Je saisis cette occasion pour adresser mes plus sincères remerciements à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail. Chaque geste, chaque parole, chaque encouragement a compté.

Mes remerciements les plus profonds vont à mes directeurs de thèse, le **Professeur FELLAG Sid Ali** et le **Professeur HABI Idir**. Leur confiance, leurs conseils précieux, leur rigueur scientifique, et leur disponibilité constante ont été pour moi des repères tout au long de cette aventure. Leur accompagnement a donné à ce travail toute sa portée.

Je tiens également à remercier chaleureusement les membres du Laboratoire de **Recherche sur l'Électrification des Entreprises Industrielles (LREEI)**, à la Faculté de **Chimie et des Hydrocarbures de l'Université de Boumerdes**. Une pensée particulière au **Professeur HABI Idir** et au **Professeur NADJI Bouchera** pour leur soutien humain et scientifique.

Ma gratitude va également à Monsieur le Président du jury, le **Professeur KIDOUCH Mdjid**, ainsi qu'aux membres du jury :

- Le **Professeur BENDAAS Mohamed Lokmen** (École Nationale des Énergies Renouvelables – Batna).
- Le **Professeur IDIR Abdelhakim** (Université de M'Sila).
- Le **Docteur HABBAB Mohamed** (Université de Béchar).

Pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail, et pour leurs observations enrichissantes.

Enfin, je n'oublie pas tous les enseignants qui m'ont accompagné et formé tout au long de mon parcours. Merci pour le savoir transmis avec passion.

À toutes et à tous, merci du fond du cœur.

Je vous souhaite une excellente lecture.

## *Mon Dieu*

- ✚ Accorde-moi un esprit souple afin que j'accepte de paraître faible et sans défense, plutôt que de peiner ou de briser.
- ✚ Accorde-moi un esprit droit afin que je n'interprète jamais en mal la peine que l'on me fait.
- ✚ Accorde-moi un esprit simple afin que je ne sois pas un poids pour ceux qui m'entourent.
- ✚ Accorde-moi un cœur ardent afin que je reste ouvert à ceux qui pourraient me haïr, m'envier ou me jalouser.
- ✚ Accorde-moi un cœur humble afin que je ne raidisse pas devant les critiques, les procédés déloyaux, les jugements durs ou hâtifs.
- ✚ Accorde-moi un cœur large afin que je supporte les étroitures d'esprit et les égoïsmes révoltants.
- ✚ Accorde-moi une volonté ferme afin que je persévère malgré la fatigue et malgré l'ingratitude.
- ✚ Accorde-moi une volonté patiente afin que j'aime mes frères malgré leurs défauts, malgré leurs faiblesses.
- ✚ Accorde-moi une volonté rayonnante afin qu'autour de moi personne ne se décourage, personne ne désespère.
- ✚ Accorde-moi de ne jamais croire au mal que l'on me dit des autres et surtout, de ne jamais le répéter.
- ✚ Accorde-moi surtout de savoir écouter, de savoir deviner, de savoir pardonner afin que mes frères soient plus heureux.

*Amine*

---

## **1. Les Publications Scientifiques**

[1] : **B.Leila**, F.Sid Ali, H.Idir, "Fuzzy Logic Control of a 400 kV Transmission Line by a STATCOM based on NPC Multilevel Voltage Inverters", vol.6.No.1,(January, 2024),pp.1522-1547, revue International Journal of Applied Engineering & Technology.

[2]: **B.Leila**, F.Sid Ali, H.Idir, " Impacts Static Inverters on the Performance of UPFC Systems" IJANSER, vol.8, pp1-10,5,2024, revue International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches.

[3]: **B.Leila**, F.Sid Ali, H.Idir, "Fault Analysis and Diagnosis in a Three-Level NPC Voltage Inverter " IJANSER, vol.8, pp.629-640,2,2024, revue International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches.

## **2. Les Communications**

[1]: **B.Leila**, F.Sid Ali, H.Idir, " Modeling and Control of a 100 kW Mini Photovoltaic Power Plant Connected to the Network" 6<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering and Control Applications (ICEECA2024), November 19-21, 2024 University of Khenchela.

[2]: **B.Leila**, F.Sid Ali, H.Idir, " Impacts Static Inverters on the Performance of UPFC Systems" , ICSIS-2024, 2<sup>nd</sup> International Conference on Scientific and Innovative Studies, April 18-19, 2024 in Konya, Turkey.

[3]: **B.Leila**, F.Sid Ali, H.Idir, "Fault Analysis and Diagnosis in a Three-Level NPC Voltage Inverter ", ICIAS-2024, 4<sup>th</sup> International Conference on Innovative Academic Studies, March 12-13, 2024 – Konya, Turkey.

[4]: **B.Leila**, F.Sid Ali, H.Idir, " Analysis, Simulation and Control of a Photovoltaic System Connected to the Power Grid", NMM2021, National Conferene on Mechanics and Maintenance, 15-16 November 2021 University de Boumerdes.

[5]: **B.Leila**, F.Sid Ali, H.Idir, "Impact of Multilevel Inverter on the Performance of the STATCOM" ICCESN (12-16 October 2018), The 5<sup>th</sup> International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, Kemer-Antalya/Turkey.

[6]: **B.Leila**, B.M.Lokman, " Study and Modeling of an Inverter with two and three Levels of Tension Structure NPC Applied to the Asynchron Machine", LAADI 2015, The 2<sup>nd</sup> International Conference on Power Electronics and their Applications, University of Djelfa, Algeria.

[7]: **B.Leila**,F.Ouahiba, B.M.Lokman, " Commande Non Linéaire de la Machine Synchrone à Aiment permanent avec un Onduleur de Tension à Deux Niveaux, SNEM 2014", Séminaire

National d'Electrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingéniorat, Université Badji Mokhetar Annaba.

[8]: **B.Leila**, F.Cherif, " Contrôle Du Flux De Puissance D'un Réseau Electrique 400KV Par L'UPFC ", CIGE'2013, International Conference on Electrical Engineering, Bechar University, Algeria, 17-19 November 2013.

[9]: **B.Leila**, F.Cherif, " PI Controllers of DC Motor Supplied by a Four Quadrant Chopper", IC2013PEA, The first International Conference on Power Electronics and their Applications, Faculty of Science and Technology University of Djelfa, Algeria, 6-7 November 2013.

---

Dédicace.....	i
Remerciement.....	ii
Publications scientifiques.....	iii
Table des matière.....	v
Liste des symboles et abréviations.....	1
Liste des figures.....	5
Liste des tableaux.....	11
Introduction générale.....	12

## **Chapitre I : Etats de l’art sur les systèmes FACTS**

I.1. Introduction.....	17
I.2. Puissance transmise par une ligne électrique.....	18
I.3. Chute de Tension et Compensation Réactive.....	20
I.4. Ligne Electrique Non Compensée.....	22
I.4.1. Equation des tensions et courants d'une ligne électrique.....	22
I.4.2. Ligne électrique non compensée ave charge.....	23
I.5. Compensation réactive dans une ligne électrique.....	24
I.5.1. Compensateur shunt au point milieu.....	25
I.5.2. Compensation série.....	27
I.6. Application des systèmes FACTS.....	29
I.7. Différentes catégories des dispositifs FACTS.....	30
I.7.1. Dispositifs séries.....	31
I.7.2. Dispositifs shunts.....	31
I.7.3. Dispositifs hybrides série-shunt.....	32
I.8. Apports et Avantages des FACTS.....	32
I.9. Applications Pratiques des Dispositifs FACTS.....	33
I.10. Structure des principaux dispositifs FACTS.....	33
I.10.1. Dispositifs shunts.....	33
I.10.2. Dispositifs séries.....	39
I.11. Conclusion.....	49

## **Chapitre II : Modélisation de l’UPFC et synthèse des régulateurs**

I.1. Introduction.....	51
II.2. Structure et conception de base de l’UPFC.....	52

---

II.3. Modélisation de la partie shunt de l'UPFC (STATCOM).....	53
II.2.1. Contrôle du STATCOM.....	55
II.2.2. Méthode watt var découplée.....	56
II.4. Synthèse du régulateur du bus continu.....	58
II.4.1. Commande par un PI classique.....	58
II.4.1.1. Régulateurs des courants.....	58
II.4.1.2. Régulation de la tension continue Udc.....	60
II.4.2. Commande par un PI flou.....	61
II.4.2.1. Variables linguistiques et ensembles flous.....	62
II.4.3. Différentes formes des fonctions d'appartenance.....	64
II.4.4. Opérateurs.....	66
II.4.4.1. Intersection et union des sous-ensembles flous.....	66
II.4.4.2. Complément d'un sous-ensemble flou.....	66
II.4.5. Inférences flous.....	67
II.5. Présentation d'un régulateur par logique floue.....	68
II.5.1. Eléments de base d'un contrôleur flou.....	68
II.5.1.1. Interface de fuzzification.....	69
II.5.1.2. Base de connaissance.....	69
II.5.1.3. Interface de défuzzification.....	69
II.5.1.3.1. Méthode du centre de gravité.....	70
II.5.1.3.2. Méthode de maximum et de moyenne des maximums.....	70
II.5.2. Contrôleur de Mamdani.....	71
II.5.2.1. Structure du contrôleur flou.....	71
II.5.2.2. Caractéristiques principales du contrôleur flou utilisé.....	72
II.5.3. Application du contrôleur flou au STATCOM.....	74
II.5. Modélisation de la partie série de l'UPFC.....	75
II.5.1. Contrôle de l'SSSC.....	77
II.5.2. Identification des références.....	77
II.6. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux NPC.....	80
II.6.1. Modèle de l'interrupteur bidirectionnel en courant.....	81
II.6.2. Modèle de fonctionnement d'un bras de l'onduleur.....	82
II.6.3. Commandabilité d'un bras d'onduleur.....	82
II.6.4. Les différentes configurations électriques d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	83

---

---

II.6.5. Fonction de commutation.....	86
II.6.6. Commande complémentaire des interrupteurs.....	86
II.6.7. Tension de sortie.....	86
II.7. Commande de l'onduleur à trois niveaux.....	88
II.7.1. MLI classique sans injection de l'harmonique trois à deux porteuses unipolaires...	88
II.8. Conclusion.....	89

### **Chapitre III : Résultat de simulation de L'UPFC**

III.1. Introduction.....	90
III.2. Simulation de l'onduleur trois niveaux.....	90
III.2.1.MLI classique à deux porteuses unipolaires triangulaires.....	90
III.2.2. Tension simple Van.....	91
III.2.3. Tension composé Vab.....	91
III.2.4. Influence de la fréquence du découpage sur le courant de phase.....	92
III.2.5. Taux de distorsion harmonique.....	93
III.3. Simulation du réseau électrique sans compensation.....	94
III.4. Pourquoi la compensation de l'énergie réactive.....	96
III.4.1. Effet de puissance réactive sur les lignes.....	96
III.4.2. Effet de puissance réactive sur le facteur de puissance.....	97
III.5. Impact du STATCOM sur la qualité de l'énergie transité .....	97
III.5.1. Description du réseau étudié.....	97
III.5.2. Présentation des courants et tensions de la source .....	98
III.5.3. Présentation des courants et tensions de la ligne .....	100
III.5.4. Simulation de comportement de STATCOM .....	101
III.5.4.1. Etage de puissance.....	101
III.5.5. Régime transitoire lors de la connexion du STATCOM au réseau .....	104
III.6. Présence de compensateur série SSSC et son Impact sur le réseau électrique.....	105
III.6.1. Les tensions .....	106
III.6.2. Les courants.....	107
III.6.3. Le flux de puissance.....	108
III.7. Conclusion.....	108

### **Chapitre IV : Modélisation et commande du système photovoltaïque connecte au réseau électrique**

---

IV-1-Introduction.....	110
IV.2. Energie solaire.....	111
IV.2.1. Energie solaire thermique.....	112
IV.2.2. Energie photovoltaïque.....	112
IV.3. Modes d'utilisation d'un système solaire photovoltaïque.....	113
IV.3.1. Système autonome.....	113
IV.3.2. Système hybride.....	114
IV.3.3. Système PV raccordée au réseau.....	115
IV.4. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque.....	115
IV.4.1. Avantages.....	115
IV.4.2. Inconvénients.....	116
IV.5. Système photovoltaïque étudié.....	116
IV.5.1. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	117
IV.5.1.1. L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du panneau PV.....	120
IV.5.1.2. L'influence de la température sur le fonctionnement du panneau PV....	121
IV.5.2. Convertisseur continu-continu (DC-DC).....	121
IV.5.2.1. Principe de fonctionnement.....	109
IV.5.2.2. Formes d'ondes des principaux signaux.....	122
IV.5.2.3. Dimensionnement des composants de l'hacheur boost.....	123
IV.5.2.3.1. L'inductance d'entrée.....	124
IV.5.2.3.2. Condensateur de sortie.....	125
IV.5.2.3.3. Condensateur d'entrée.....	126
IV.5.2.4. Commande MLI de l'hacheur.....	126
IV.5.2.5. Concept de la MPPT.....	127
IV.5.2.5.1. Les méthodes indirectes.....	128
IV.5.2.5.2. Les méthodes directes.....	128
IV.5.2.5.2.1 Méthode Perturb & Observe (P&O).....	129
IV.5.3. Régulation de la tension du bus continu.....	131
IV.5.4. Onduleur de tension multiniveaux.....	133
IV.5.5. Modélisation de l'interface réseau.....	133
IV.5.5.1. Association de l'onduleur au réseau.....	133
IV.5.5.2. Découplage du modèle de l'onduleur.....	134
IV.5.5.3. Synthèse des régulateurs des courants.....	136

---

---

IV.5.5.4. Synthèse du régulateur de la tension continue.....	138
IV.6 Résultat de simulation.....	139
IV.6.1 Présentation de la structure de système photovoltaïque.....	139
IV.6.2. Charge constante.....	140
IV.6.2.1. Générateur GPV.....	140
IV.6.2.2. Hacheur Boost.....	142
IV.6.2.3. Convertisseur Continu-Alternatif.....	142
IV.6.2.4. Le réseau électrique.....	145
IV.6.2.5. La charge.....	146
IV.6.3. Charge variable inductif.....	147
IV.7 Conclusion.....	149

## **Chapitre V : Système PV-STATCOM Connecté au Réseau Electrique**

V.1. Introduction.....	150
V.2. Les différents modes de fonctionnement du système PV-STATCOM.....	151
V.3. Analyse du mode 1 : $I_r = 1000 \text{ w/m}^2$ .....	152
V.3.1. Profil de la charge variable.....	152
V.3.2. Les puissances injectées par le système PV-STATCOM.....	153
V.3.3. Flux des puissances.....	155
V.4. Analyse du mode 2 : $I_r = 500 \text{ w/m}^2$ .....	156
V.4.1. Les puissances injectées par le système PV-STATCOM.....	156
V.4.2. Flux des puissances.....	157
V.5. Analyse du mode 3 : $I_r = 0 \text{ w/m}^2$ .....	159
V.5.1. Les puissances injectées par le système PV-STATCOM.....	159
V.5.2. Flux des puissances.....	160
V.6. Analyse du système pour une irradiation variable et une charge variable.....	161
V.6.1. Profil d'irradiation.....	161
V.6.2. Profil de la charge variable.....	161
V.6.3. Les puissances injectées par le système PV-STATCOM.....	162
V.6.4. Flux des puissances.....	164
V.7. Conclusion.....	165
Conclusion général.....	167
Perspective.....	171

ANNEXES.....174

Annexe A : Réseau étudié.....174

Annexe B : Les onduleurs.....177

Annexe C : Transformation de PARK.....178

Annexe D : PLL.....179

Annexe E : Générateur Photovoltaïque.....180

Bibliographies.....181

---

## Liste des symboles et abréviations

### 1. Abréviations.

<b>FACTS</b>	Flexible Alternatif Curant Transmission Systems.
<b>TCR</b>	Thyristor Controlled Reactor.
<b>TSC</b>	Thyristor Switched Capacitor.
<b>SVC</b>	Static Var Compensator.
<b>STATCOM</b>	Static Compensator.
<b>TCSC</b>	Thyristor Controlled Series Capacitor.
<b>TSSC</b>	Thyristor Switched Serie Capacitor.
<b>TCSR</b>	Thyristor Controlled Series Reactor.
<b>TSSR</b>	Thyristor Switched Series Reactor.
<b>SSSC</b>	Static Synchronous Series Compensator.
<b>IPFC</b>	Interline Power Flow controller.
<b>UPFC</b>	Unified Power Flow controller.
<b>MLI</b>	Modulation de Largeur d'Impulsion.
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking.
<b>PV</b>	Photovoltaïque.
<b>FLC</b>	Fuzzy Logic Control.
<b>DPC</b>	Direct power control.
<b>THD</b>	Total Harmonic Distortion.
<b>IGBT</b>	Insulated-Gate Bipolar Transistor.
<b>PI</b>	Proportional-Integral.
<b>PLL</b>	Phase-Locked Loop.
<b>PWM</b>	Pulse-Width Modulation.
<b>AC</b>	Alternating Current.
<b>DC</b>	Direct Current.
<b>JB1</b>	Jeu de barre 1.
<b>JB2</b>	Jeu de barre 2.
<b>FP</b>	Facteur de puissance.

## 2. Variables

$V_s$	Tension au point de départ (génération).
$V_R$	Tension au point d'arrivée (le récepteur).
$V_{abc\_Ch}$	Tension composé de la charge.
$I_{abc\_Ch}$	Courant de la charge.
$I_{abc\_f}$	Courant du filtre.
$I_r$	Courant du réseau électrique.
$I_{inj}$	Courant injecté par le PV-STATCOM.
$I_{ch}$	Courant de la charge.
$V_{abc\_S}$	Tension de la source.
$V_{se}$	Tension générée par le compensateur série (SSSC).
$V_{sed}$	La composante directe de la tension générée par le compensateur série.
$V_{pq}$	La tension à la sortie du transformateur série.
$V_{sh}$	La tension générée par le compensateur shunt (STATCOM).
$V_{shd}$	La composante directe de la tension générée par le compensateur shunt.
$V_{shq}$	La composante quadrature de la tension générée par le compensateur shunt.
$I_s$	Courant de la ligne.
$I_{sd}$	Composante du courant de la ligne selon l'axe d.
$I_{sq}$	Composante du courant de la ligne selon l'axe q.
$I_{sh}$	Courant fournit par le compensateur shunt.
$I_{shd}$	Composante directe du courant fournit par le STATCOM.
$I_{shq}$	Composante quadrature du courant fournit par le STATCOM.
$P_s$	Puissance active fournit par la source.
$Q_s$	Puissance réactive fournit par la source.
$P_R$	Puissance active au point d'arrivée (le récepteur).
$Q_R$	Puissance réactive au point d'arrivée (le récepteur).
$P_0$	Puissance active sans compensation.
$Q_0$	Puissance réactive sans compensation.
$P_{se}$	Puissance active fournit par le compensateur série (SSSC).
$P_{sh}$	Puissance active fournit par le compensateur shunt (STATCOM).
$Q_{se}$	Puissance réactive fournit parle compensateur série (SSSC).
$Q_{sh}$	Puissance réactive fournit par le compensateur shunt (STATCOM).
$P_{inj}$	Puissance active injecté par le PV-STATCOM.

---

<b>Q<sub>inj</sub></b>	Puissance réactive injecté par le PV-STATCOM.
<b>Pres</b>	Puissance active du réseau électrique.
<b>Qres</b>	Puissance réactive du réseau électrique.
<b>Pch</b>	Puissance active de la charge.
<b>Qch</b>	Puissance réactive de la charge.
<b>S</b>	Puissance apparente.
<b>δ</b>	L'angle de charge (l'angle entre la tension de départ et la tension d'arrivée).
<b>δ<sub>se</sub></b>	Le déphasage de la tension fournit par le compensateur série (SSSC).
<b>δ<sub>sh</sub></b>	Le déphasage de la tension fournit par le compensateur shunt (STATCOM).
<b>Imppt</b>	Courant du point de puissance maximale.
<b>Voc</b>	Tension du circuit ouvert.
<b>Isc</b>	Courant de court-circuit.
<b>I<sub>pv</sub></b>	Courant photovoltaïque (PV).
<b>I<sub>o</sub></b>	Courant de saturation inverse.
<b>T</b>	Température de la cellule.
<b>G</b>	Eclairement solaire.
<b>GPV</b>	Générateur photovoltaïque.

### 3. Paramétrés

<b>R<sub>1</sub></b>	Résistance au début de la ligne.
<b>L<sub>1</sub></b>	Inductance au début de la ligne.
<b>R<sub>2</sub></b>	Résistance à la fin de la ligne.
<b>L<sub>2</sub></b>	Inductance à la fin de la ligne.
<b>R<sub>se</sub></b>	La résistance du compensateur série.
<b>L<sub>se</sub></b>	L'inductance du compensateur série.
<b>R<sub>sh</sub></b>	La résistance du compensateur shunte.
<b>L<sub>sh</sub></b>	L'inductance de fuit du compensateur shunt.
<b>C</b>	La capacité du circuit commun DC.

Liste des Figures

<b>Figure (I.1)</b>	Ligne électrique alimentant une charge	18
<b>Figure (I.2)</b>	Ligne de charge du système	19
<b>Figure (I.3)</b>	Ligne électrique avec compensateur	20
<b>Figure (I.4)</b>	Diagramme des tensions pour une ligne compensée (tension constante)	21
<b>Figure (I.5)</b>	Ligne électrique avec inductance série et capacité shunt distribuées.	23
<b>Figure (I.6)</b>	Variation de $V_s$ en fonction de P avec plusieurs facteurs de puissance.	24
<b>Figure (I.7)</b>	Ligne de transmission avec compensateur à point milieu.	25
<b>Figure (I.8)</b>	Diagramme des courants et Tensions d'un compensateur shunt.	26
<b>Figure (I.9)</b>	Puissance active et réactive en fonction de $\delta$	27
<b>Figure (I.10)</b>	Ligne électrique avec compensation série	28
<b>Figure (I.11)</b>	Les puissances transportées par une ligne pour différentes valeurs de K	29
<b>Figure (I.12)</b>	Circuit équivalent de deux réseaux connectés par une ligne de transmission.	29
<b>Figure (I.13)</b>	Grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques.	31
<b>Figure (I.14)</b>	Structure d'un SVC	34
<b>Figure (I.15)</b>	Fonctionnement du compensateur statique.	35
<b>Figure (I.16)</b>	Schéma de base du STATCOM.	36
<b>Figure (I.17)</b>	Diagramme Vectorielle du STATCOM.	37
<b>Figure (I.18)</b>	Caractéristique Statique du STATCOM.	38
<b>Figure (I.19)</b>	Exemple d'un STATCOM.	39
<b>Figure (I.20)</b>	Insertion d'un TCSC sur une ligne.	40
<b>Figure (I.21)</b>	Régime de fonctionnement du TCSC	41
<b>Figure (I.22)</b>	Réactance équivalente en fonction de l'angle d'amorçage.	42
<b>Figure (I.23)</b>	Exemple d'un TCSC.	42
<b>Figure (I.24)</b>	Structure du TCSR	42
<b>Figure (I.25)</b>	Schéma de base du SSSC	43
<b>Figure (I.26)</b>	Caractéristique Statique du SSSC	44
<b>Figure (I.27)</b>	Schéma de Principe du SPS.	45
<b>Figure (I.28)</b>	Contrôleur de puissance interlignes.	45
<b>Figure (I.29)</b>	Structure d'un UPFC.	46
<b>Figure (I.30)</b>	Les différents mode de fonctionnement d'un UPFC.	47

---

<b>Figure (I.31)</b>	Actions possibles sur le flux de la puissance active.	48
<b>Figure (I.32)</b>	Une ligne de transmission avec UPFC.	49
<b>Figure (II.1)</b>	Schéma représentatif d'un UPFC, schéma équivalent de l'UPFC.	52
<b>Figure (II.2)</b>	Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.	53
<b>Figure (II.3)</b>	Schéma équivalent du STATCOM	53
<b>Figure (II.4)</b>	Identification des Courants de Référence.	55
<b>Figure (II.5)</b>	Le transfert $I_{shd}$ en fonction de $X_1$	56
<b>Figure (II.6)</b>	Le transfert $I_{shq}$ en fonction de $X_2$	57
<b>Figure (II.7)</b>	Régulation de découplage de $I_{shd}$	57
<b>Figure (II.8)</b>	Schéma de régulation du STATCOM.	58
<b>Figure (II.9)</b>	Schéma bloc de la Régulation PI des courants du Statcom.	59
<b>Figure (II.10)</b>	Régulation de la tension continu.	60
<b>Figure (II.11)</b>	Quelques propriétés des sous-ensembles flous.	63
<b>Figure (II.12)</b>	Formes usuelles des fonctions d'appartenance.	64
<b>Figure (II.13)</b>	Répartition des fonctions d'appartenance.	65
<b>Figure (II.14)</b>	Opérateurs de complément, intersection et union	67
<b>Figure (II.15)</b>	Schéma synoptique général d'un contrôleur flou	68
<b>Figure (II.16)</b>	Contrôleur de Mamdani	71
<b>Figure (II.17)</b>	Structure interne du contrôleur flou proposé par <i>Mamdani</i>	71
<b>Figure (II.18)</b>	Répartition des fonctions d'appartenances choisies.	73
<b>Figure (II.19)</b>	Régulation de la tension continu par un PI flou.	75
<b>Figure (II.20)</b>	Structure de base d'un SSSC couplé au réseau	75
<b>Figure (II.21)</b>	Schéma équivalent de l'SSSC.	76
<b>Figure (II.22)</b>	Schéma de régulation du SSSC.	78
<b>Figure (II.23)</b>	Schéma global de contrôle l'SSSC par la méthode Watt-Var découplée.	79
<b>Figure (II.24)</b>	Structure de puissance de l'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC.	80
<b>Figure (II.25)</b>	Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire diode-transistor.	81
<b>Figure (II.26)</b>	Caractéristique statique de l'interrupteur (T) et la diode (D).	81
<b>Figure (II.27)</b>	Caractéristiques statiques de l'interrupteur bidirectionnel en courant.	82
<b>Figure (II.28)</b>	Bras d'onduleur à trois niveaux.	83
<b>Figure (II.29)</b>	Les différentes configurations électriques possibles d'un bras d'onduleur à trois niveaux NPC.	85

---

---

<b>Figure (II.30)</b>	Contrôle es onduleurs par MLI.	88
<b>Figure (III.1)</b>	Signaux de la commande MLI avec deux porteuses unipolaires.	90
<b>Figure (III.2)</b>	Tension simple et sons Spectre harmonique $V_{an}$ (p.u) pour $r = 0.85$ et $m= 40$	91
<b>Figure (III.3)</b>	Tension composée et son Spectre harmonique $V_{ab}$ (p.u) pour $r = 0.85$ et $m= 40$	91
<b>Figure (III.4)</b>	Le courant de la phase a ( $I_a$ ) en (p.u) pour $F_p = 1000\text{Hz}$ .	92
<b>Figure (III.5)</b>	Le courant de la phase a ( $I_a$ ) en (p.u) pour $F_p = 4000\text{Hz}$ .	92
<b>Figure (III.6)</b>	Taux de distorsion harmonique de la tension de phase.	93
<b>Figure (III.7)</b>	Caractéristique de réglage pour $m=40$ .	94
<b>Figure (III.8)</b>	Puissance active et réactive de la ligne sans compensation.	95
<b>Figure (III.9)</b>	Courant de la ligne.	95
<b>Figure (III.10)</b>	Déphasage entre la tension et le courant.	96
<b>Figure (III.11)</b>	Facteur de puissance.	96
<b>Figure (III.12)</b>	Schéma global de réseau étudié.	97
<b>Figure (III.13)</b>	Les tensions simples de la source $V_{abc}$ .	98
<b>Figure (III.14)</b>	Valeur efficace de la tension composée de la source.	98
<b>Figure (III.15)</b>	Tension et courant de la source.	98
<b>Figure (III.16)</b>	Facteur de puissance.	99
<b>Figure (III.17)</b>	Les puissances de la source.	99
<b>Figure (III.18)</b>	Tension simple de la ligne.	100
<b>Figure (III.19)</b>	Courant de la ligne.	100
<b>Figure (III.20)</b>	Les puissances de la ligne.	100
<b>Figure (III.21)</b>	Tensions simples injectées par le STATCOM.	101
<b>Figure (III.22)</b>	Tension et courant injectée par le STATCOM.	101
<b>Figure (III.23)</b>	Les puissances injectée par le STATCOM.	102
<b>Figure (III.24)</b>	Tension $V_{dc}$ et $V_{dc-ref}$ .	102
<b>Figure (III.25)</b>	La tension aux bornes des deux condensateurs.	103
<b>Figure (III.26)</b>	Le courant active et sa référence injectée par le STATCOM.	103
<b>Figure (III.27)</b>	Le courant réactive et sa référence injectée par le STATCOM.	104
<b>Figure (III.28)</b>	Tension et courant de la source en régime transitoire.	105
<b>Figure (III.29)</b>	Les tensions injectée par le SSSC.	106
<b>Figure (III.30)</b>	Les tensions des JB $V_s$ , $V_r$ et $V_{se}$ .	106

---

---

<b>Figure (III.31)</b>	Courant dans la ligne Ise.	107
<b>Figure (III.32)</b>	La réactance équivalente injecté par le SSSC.	107
<b>Figure (III.33)</b>	Flux des puissances dans la ligne.	108
<b>Figure (IV.1)</b>	Energie solaire.	111
<b>Figure (IV.2)</b>	Energie solaire thermique.	112
<b>Figure (IV.3)</b>	Champ photovoltaïque	113
<b>Figure (IV.4)</b>	Structure d'un système PV autonome.	114
<b>Figure (IV.5)</b>	Exemple de la structure d'un système PV hybride.	114
<b>Figure (IV.6)</b>	Structure d'un système PV raccordé au réseau.	115
<b>Figure (IV.7)</b>	Structure triphasée du système photovoltaïque couplé au réseau.	117
<b>Figure (IV.8)</b>	Schéma équivalent de cellule PV.	118
<b>Figure (IV.9)</b>	Effet de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) et (P-V) d'un module photovoltaïque « BP3280T ».	120
<b>Figure (IV.10)</b>	Effet de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) et (P-V) d'un champ photovoltaïque.	120
<b>Figure (IV.11)</b>	Effet de la température sur la caractéristique I-V et P-V	121
<b>Figure (IV.12)</b>	Schéma de principe d'un hacheur boost.	122
<b>Figure (IV.13)</b>	Schémas équivalents de l'hacheur boost.	123
<b>Figure (IV.14)</b>	Formes d'ondes obtenues en conduction continue.	124
<b>Figure (IV.15)</b>	Génération des impulsions de commande de l'hacheur.	126
<b>Figure (IV.16)</b>	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.	127
<b>Figure (IV.17)</b>	Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O.	129
<b>Figure (IV.18)</b>	Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.	130
<b>Figure (IV.19)</b>	Schémas réelle et équivalent du bus continu d'un onduleur NPC.	132
<b>Figure (IV.20)</b>	Schéma simplifié de la liaison au réseau	134
<b>Figure (IV.21)</b>	La structure de contrôle de courant.	135
<b>Figure (IV.22)</b>	Schéma du centrale PV associer au réseau.	136
<b>Figure (IV.23)</b>	Schéma bloc de régulation des courants par des régulateurs PI.	137
<b>Figure (IV.24)</b>	Schéma bloc de régulation de la tension continue par un régulateur PI.	138
<b>Figure (IV.25)</b>	Profile d'éclairement.	140
<b>Figure (IV.26)</b>	Tension du module PV et Vs (sortie de l'hacheur).	141
<b>Figure (IV.27)</b>	Courant et puissance du module GPV.	141

---

---

<b>Figure (IV.28)</b>	Forme des Impulsions de commande de l’hacheur.	142
<b>Figure (IV.29)</b>	Commande MLI avec deux porteuses unipolaires.	142
<b>Figure (IV.30)</b>	Tension simple et Composé de l’onduleur.	143
<b>Figure (IV.31)</b>	Tensions aux bornes des condensateurs.	143
<b>Figure (IV.32)</b>	Tension du bus continu et sa référence (sortie de l’hacheur, entrée de l’onduleur).	144
<b>Figure (IV.33)</b>	Les courants active et réactive et leurs références.	144
<b>Figure (IV.34)</b>	Les puissances active et réactive injectée par le PV.	145
<b>Figure (IV.35)</b>	Les puissances active et réactive du réseau.	145
<b>Figure (IV.36)</b>	Les puissances active et réactive de la charge.	146
<b>Figure (IV.37)</b>	Flux des puissances active.	146
<b>Figure (IV.38)</b>	Flux des puissance réactive.	147
<b>Figure (IV.39)</b>	Flux des puissance active.	148
<b>Figure (V.1)</b>	Système PV-STATCOM.	151
<b>Figure (V.2)</b>	Profil de la charge variable.	152
<b>Figure (V.3)</b>	Les puissances injectées par le PV-STATCOM, avec le facteur de puissance.	153
<b>Figure (V.4)</b>	Les courant injectées ( $I_d$ et $I_q$ ) par le PV-STATCOM.	154
<b>Figure (V.5)</b>	La tension $V_{dc}$ et sa référence.	154
<b>Figure (V.6)</b>	Ecoulement des puissances active et réactive.	155
<b>Figure (V.7)</b>	Facteur de puissance du (JB2)	156
<b>Figure (V.8)</b>	Les puissances injectées par le PV-STATCOM, avec le facteur de puissance.	156
<b>Figure (V.9)</b>	Ecoulement des puissances active et réactive.	157
<b>Figure (V.10)</b>	Facteur de puissance du (JB2)	158
<b>Figure (V.11)</b>	Les puissances injectées par le PV-STATCOM, avec le facteur de puissance.	159
<b>Figure (V.12)</b>	Ecoulement des puissances active et réactive.	160

---

<b>Figure (V.13)</b>	Facteur de puissance du (JB2)	160
<b>Figure (V.14)</b>	Profil d'irradiation.	161
<b>Figure (V.15)</b>	Profil de la charge variable.	161
<b>Figure (V.16)</b>	Les puissances injectées par le PV-STATCOM, avec le facteur de puissance.	162
<b>Figure (V.17)</b>	Les courants injectées par le PV-STATCOM.	163
<b>Figure (V.18)</b>	Ecoulement des puissances active et réactive.	164
<b>Figure (V.19)</b>	Facteur de puissance du (JB2).	165

---

## Liste des Tableaux

<b>Tableau (I.1)</b>	Type de connexion et applications associées.	32
<b>Tableau (I.2)</b>	Dispositifs FACTS installés dans le monde et leurs puissances totales	33
<b>Tableau (I.3)</b>	Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau	49
<b>Tableau (II.1)</b>	Table de règles floues.	73
<b>Tableau (II.2)</b>	Grandeurs connues pour chacune des configurations d'un bras k d'onduleur triphasé à trois niveaux.	84
<b>Tableau (III.1)</b>	Les performance de PI et PI floue pour Vdc.	103
<b>Tableau (III.2)</b>	Les performance de PI et PI floue pour Iq	104
<b>Tableau (IV.1)</b>	Spécifications du module solaire SUNPOWER SPR-315E-WHT-D	119

## INTRODUCTION GENERALE

### - Etat de l'art :

Le **développement durable** du secteur énergétique repose aujourd'hui sur une modernisation profonde des systèmes de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique. Face à l'augmentation continue de la demande mondiale, l'intégration massive de sources d'énergie renouvelable intermittentes telles que l'éolien et le solaire, ainsi que la complexité croissante des réseaux électriques interconnectés, les infrastructures de transport d'électricité doivent désormais répondre à des exigences sans précédent en termes de **flexibilité**, de **stabilité** et de **fiabilité** [1].

Dans ce contexte, les **systèmes FACTS** (Flexible AC Transmission Systems), fondés sur les technologies avancées de l'**électronique de puissance**, ont émergé comme des solutions innovantes pour améliorer la performance opérationnelle des réseaux à courant alternatif. Ces dispositifs ont été introduits à partir des années 1990 pour pallier les limitations des réseaux traditionnels. Ils permettent un **contrôle dynamique** des paramètres essentiels du réseau, tels que la **tension**, le **flux de puissance** et l'**impédance de ligne**, contribuant ainsi à une **meilleure stabilité**, un **rendement énergétique accru**, et une **exploitation plus souple** de l'infrastructure existante. Cette flexibilité dynamique est primordiale pour assurer une gestion optimale des réseaux, notamment en présence de nouvelles sources de génération décentralisée et intermittente [2].

Les travaux de recherche menés ces dernières années ont permis de franchir plusieurs étapes majeures dans l'évolution des systèmes FACTS. Parmi les principales avancées, on note le **développement de nouvelles générations de dispositifs**, tels que le **STATCOM** (Static Synchronous Compensator), le **SSSC** (Static Synchronous Series Compensator) ou encore l'**UPFC** (Unified Power Flow Controller), qui permettent de réguler simultanément plusieurs paramètres du réseau et d'assurer une gestion plus fine de la puissance active et réactive. Ces dispositifs ont été accompagnés de **modèles dynamiques améliorés**, de **stratégies de commande intelligentes** adaptées aux conditions de réseau en temps réel, et de techniques d'**optimisation du placement et de la coordination** dans des environnements de plus en plus complexes et interconnectés [3].

Les recherches récentes s'orientent également vers l'**intégration des systèmes FACTS dans les réseaux dits "intelligents" (smart grids)**, où la gestion des flux énergétiques devient non seulement technique mais aussi numérique, décentralisée et proactive. Dans cette nouvelle ère, les **données massives** (Big data), la **communication bidirectionnelle** et l'**automatisation** jouent un rôle essentiel pour garantir une gestion optimale et rapide des flux d'énergie, tout en intégrant de manière transparente les énergies renouvelables. Par ailleurs, les défis de **coûts d'investissement** et de **rentabilité à grande échelle** demeurent des obstacles à surmonter pour une adoption plus large des systèmes FACTS dans les réseaux mondiaux [4].

- **Problématique : [5]**

Cependant, malgré leur potentiel indéniable, plusieurs défis majeurs subsistent dans la mise en œuvre de ces dispositifs :

- **La complexité de leur modélisation** : La modélisation dynamique des systèmes FACTS, en particulier lorsqu'ils sont intégrés à des réseaux complexes et interconnectés, reste un enjeu scientifique important.
  - **Le coût élevé de leur déploiement** : Les coûts d'installation et de maintenance des systèmes FACTS peuvent être prohibitifs, ce qui limite leur adoption dans certains contextes économiques.
  - **La nécessité de méthodes de commande robustes et adaptatives** : La commande des systèmes FACTS, en particulier dans des environnements de réseau variables, nécessite des approches plus intelligentes et capables de s'adapter à des perturbations imprévues.
- **Défis liés à l'intégration des énergies renouvelables et solutions apportées par les FACTS [6].**

Bien que les systèmes FACTS soient une réponse efficace pour améliorer la stabilité du réseau face à l'intermittence des énergies renouvelables, leur **intégration dans un réseau dominé par ces nouvelles sources** comporte plusieurs défis. Parmi ces défis, on peut citer :

- **La gestion de la variabilité des sources d'énergie renouvelable** : Les systèmes FACTS doivent être capables de réagir très rapidement aux changements de production des énergies renouvelables, qui peuvent survenir en minutes ou même en secondes. Cela

---

nécessite une **commande intelligente adéquate** et une coordination entre les différents dispositifs de compensation pour maintenir la stabilité du réseau.

- **L'interconnexion avec d'autres réseaux** : L'intégration des énergies renouvelables, souvent localisées dans des zones géographiques éloignées des centres de consommation, impose de relier ces zones à des réseaux plus larges. Les systèmes FACTS peuvent jouer un rôle crucial dans l'optimisation du flux de puissance entre ces différents réseaux, réduisant ainsi les pertes et augmentant la capacité de transmission.

- **Contributions** :

Dans ce cadre, la présente thèse s'inscrit dans la dynamique des recherches actuelles visant à développer, modéliser et optimiser l'utilisation des dispositifs FACTS pour contribuer à la performance, à la stabilité et à l'intelligence des réseaux électriques modernes.

En s'intéressant spécifiquement à l'intégration des énergies renouvelables et à l'optimisation des réseaux électriques, cette thèse cherche à proposer des stratégies qui permettent une gestion plus souple et plus efficace des réseaux électriques du futur.

En permettant un **contrôle en temps réel des paramètres électriques** du réseau (tension, flux de puissance, réactivité), les dispositifs FACTS jouent un rôle crucial dans la **stabilisation du réseau** face à ces fluctuations. Par exemple, un **STATCOM** peut ajuster rapidement la puissance réactive pour compenser les variations de tension dues à des apports intermittents en énergie renouvelable. De même, des dispositifs comme l'**UPFC** (Unified Power Flow Controller) permettent une gestion simultanée de la puissance active et réactive, assurant ainsi une meilleure gestion de l'intermittence des ER tout en optimisant la capacité de transmission du réseau.

Ainsi, les **systèmes FACTS** se révèlent non seulement comme des outils essentiels pour la gestion de l'intermittence des énergies renouvelables, mais également comme des catalyseurs pour la mise en place de réseaux électriques plus **flexibles, intelligents** et **résilients**. En optimisant la régulation dynamique des flux électriques, en permettant une gestion décentralisée et en favorisant une meilleure interconnexion entre les différents segments du réseau, les dispositifs FACTS sont au cœur de la transition énergétique, facilitant une intégration harmonieuse des énergies renouvelables dans le mix énergétique mondial [6].

- **Objectifs de la thèse en lien avec l'intégration des énergies renouvelables**

Dans cette perspective, la présente thèse a pour objectif de contribuer à l'optimisation de l'utilisation des systèmes FACTS dans les réseaux électriques en milieu de **transition énergétique**. Les axes principaux de cette recherche sera de :

- **Développer des stratégies de commande intelligentes (logique floue,..)**, adaptées aux conditions fluctuantes des énergies renouvelables, permettant de maximiser l'efficacité des systèmes FACTS tout en assurant une stabilité optimale du réseau.
- **Évaluer l'impact de l'intégration des FACTS dans les réseaux électriques**, en présence des énergies renouvelables (photovoltaïque dans notre cas), et en particulier sur la gestion des flux de puissance, la réduction des pertes et l'amélioration de la résilience du réseau face aux perturbations dues à l'intermittence des énergies renouvelables.

Cette approche permettra de mieux comprendre le rôle des FACTS dans la gestion des réseaux modernes et de proposer des solutions adaptées aux défis énergétiques actuels, avec une attention particulière portée à la durabilité et à la flexibilité du système électrique en présence des énergies renouvelables (PV dans notre cas).

- **Structure du manuscrit :**

Le travail doctoral est organisé en cinq chapitres.

Le premier chapitre donne une brève aperçue sur l'état de l'art des systèmes FACTS.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la modélisation de système de contrôle série et parallèle de l'UPFC et la synthèse des régulateurs PI et PI floue avec la modélisation et la commande des onduleurs de tension à trois niveaux, structure NPC.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse de l'impact de l'UPFC sur le contrôle de la tension et du flux de puissance des lignes électriques.

Dans le quatrième chapitre. Nous avons présenté la modélisation complète, et la commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique, Ce chapitre sera divisé en trois parties. La première c'est l'état de l'art des énergies renouvelable tel que l'énergie solaire, la deuxième partie concernera l'étude de l'hacheur boost et sa commande MPPT, et dans la

dernière partie on procède à la modélisation du système complet et la commande de bus continu et des courants de côté FACTS en utilisant des régulateurs de type PI.

Le dernier chapitre présente les résultats de simulation du système PV-STATCOM connecté au Réseau. Nous étudions aussi l'exploitation du STATCOM dans la compensation de l'énergie réactive.

La thèse de doctorat sera clôturée par une conclusion générale récapitulant le travail développé suivi par quatre annexes et un résumé succinct en trois langues.

*« Continue à travailler fort et tu pourras obtenir tout ce que tu voudras ! »*

*Aaliyah*

# *Chapitre I*

## **Etat de l'Art des Systèmes**

### **FACTS**

## *Chapitre I :*

# *Etat de l'Art des Systèmes FACTS*

### **I.1. Introduction**

Le stockage massif de l'énergie électrique sous une forme immédiatement disponible n'est, actuellement, pas possible. Le problème majeur des exploitant est donc de maintenir en permanence l'équilibre entre l'offre disponible et les demandes potentielle, étant entendu que l'équilibre instantané entre production et consommation est une condition nécessaire de fonctionnement du système production-transport-consommation, appelé souvent système électrique plutôt que réseau.

Pour des raisons économiques et techniques les unités de production sont souvent géographiquement concentrées. Par contre la consommation est beaucoup plus dispersée. Les réseaux de transport et d'interconnexion assurent l'acheminement de l'énergie depuis ces unités vers les lieux de consommation à travers des lignes électriques (aériennes, ou souterraine).

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institue) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques, [6].

Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (à base d'interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, ils peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux. Les systèmes FACTS. Peuvent être classés en trois catégories :

- ✓ Les compensateurs parallèles
- ✓ Les compensateurs séries

✓ Les compensateurs hybrides (série - parallèle)

Dans cette partie nous parlerons de ces compensateurs en général et de l'UPFC en particulier.

### I.2. Puissance transmise par une ligne électrique [6]

L'énergie électrique est transportée par des lignes électriques de capacités limitées à cause des limites thermiques des câbles, des tensions appliquées aux bornes et de l'angle de charge.

Les puissances transmises par une électrique radiale sont données par les formules qui suivantes :

Considérant la figure (I.1) qui représente une ligne électrique alimentant une charge (P+jQ) en admettant que la résistance de la ligne est très faible vis-à-vis sa réactance l'impédance donc :  $Z_S = jX_S$

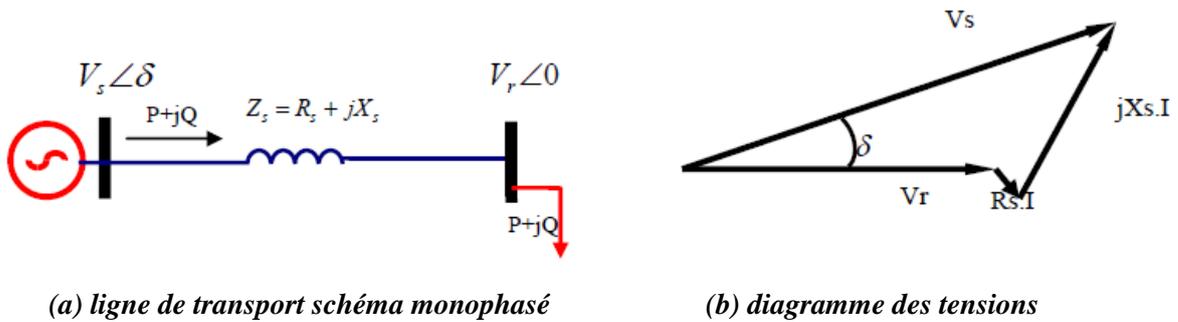


Figure (I.1) : Ligne électrique alimentant une charge

En prenant la tension au borne de la charge comme référence des phases figure (I.1.b) et en négligeant la résistance  $R_s$ , le courant sera en phase avec  $V_r$ , La puissance demandée par la charge sera donnée par les équations qui suivantes :

$$S_r = P + jQ = V_r V_S^* \quad \text{avec} \quad I_r = \frac{V_S - V_r}{Z_S}$$

$$P = \frac{V_S V_r}{X_S} \sin \delta \tag{I.1}$$

$$Q = \frac{V_S V_r}{X_S} \cos \delta - \frac{V_r^2}{X_S} \tag{I.2}$$

La relation entre la tension au jeu de barre de charge et le courant de charge  $I$  est décrite par la droite de la figure (I.2) appelée ligne de charge du système qui est définie par l'équation d'une droite qui passe par  $V_s$  et de pente  $-Z_s$  :

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

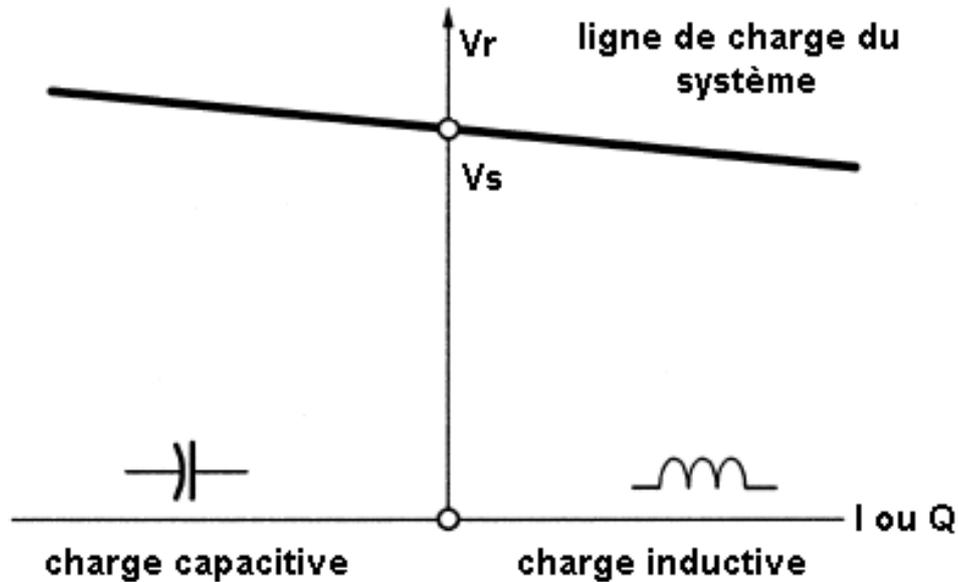


Figure (I.2) : Ligne de charge du système.

Si la charge varie et aucune précaution n'est prise pour maintenir la tension  $V_r$  égale à  $V_s$  alors depuis le diagramme de phase de la figure (I.1.b) :

$$V_r = V_s \cos \delta$$

En remplaçant dans (I.1) on aura :

$$P = \frac{V_s^2}{X_s} \sin \delta \cdot \cos \delta = \frac{V_s^2}{2X_s} \sin 2\delta$$

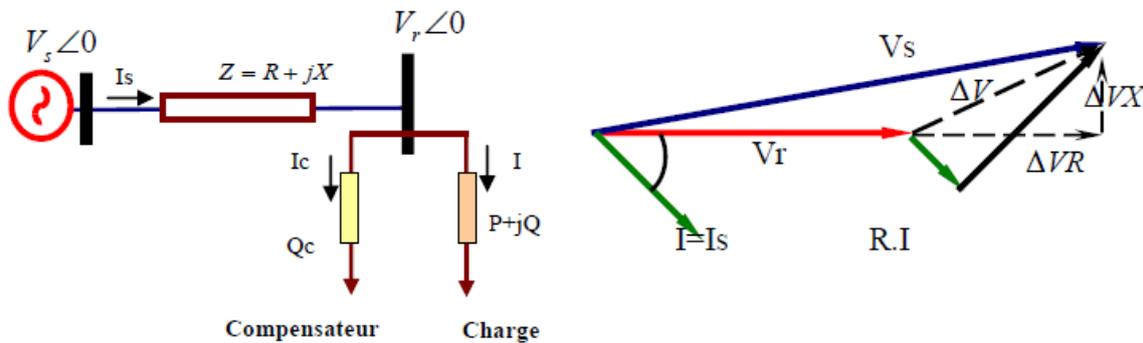
Dans ce cas on ne peut transporter qu'une puissance maximale pour un angle  $\delta = 45^\circ$  égale à :

$$P_{max} = \frac{V_s^2}{2X_s}$$

Dans le cas où on maintient la tension  $V_r$  égale à  $V_s$  on peut avoir, depuis l'équation (1.1), une puissance maximale :  $P_{max} = \frac{V_s^2}{X_s}$ .

### I.3. Chute de Tension et Compensation Réactive [7]

En considérant la ligne électrique de la figure (I.3) sans tenir en compte le compensateur, la représentation du diagramme des tensions est donnée sur la figure (I.3.b). Lorsque la charge appelle un courant  $I$  à partir de la source  $V_s$ , la tension  $V_r$  chute au-dessous de la valeur  $V_s$ .



(a) Circuit équivalent d'une ligne avec charge et compensateur

(b) diagramme des tensions sans compensation

Figure (I.3) : Ligne électrique avec compensateur.

La chute de tension  $\Delta V$ , à partir du schéma équivalent et du diagramme des tensions de la figure (I.3.b) est donnée par l'équation :

La chute de tension  $\Delta V$ , à partir du schéma équivalent et du diagramme des tensions de la figure I.3 (b) est donnée par la formulation qui suit :

$$\Delta V = V_s - V_r = Z_s \cdot I \tag{I.3}$$

Avec  $I$  le courant de charge. Il est donné en fonction des puissances  $P$  et  $Q$  de la charge par l'équation :

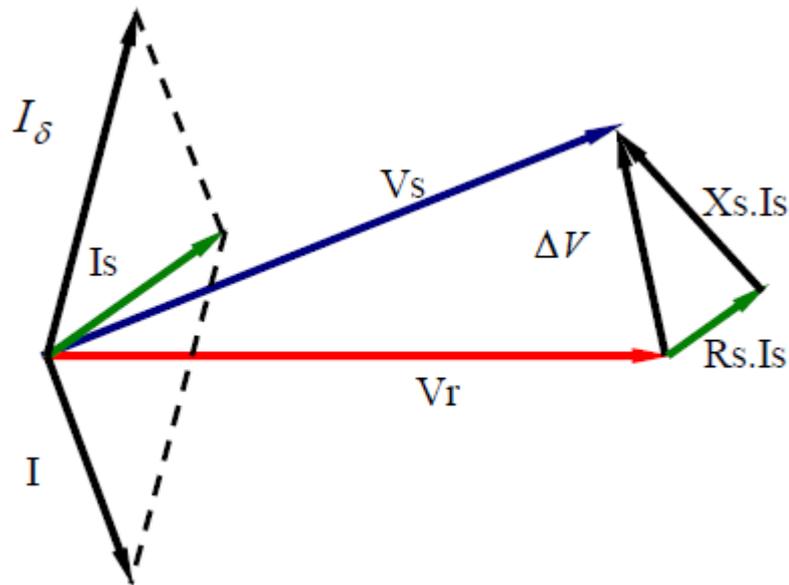
$$I = \frac{P-jQ}{V_r} \quad (\text{I.4})$$

En tenant la tension  $V_r$  comme référence des phases donc  $\bar{V}_r = V_r + j0$ , on peut écrire alors:

$$\Delta V = (R_S + jX_S) \left( \frac{P-jQ}{V_r} \right) = \frac{R_S \cdot P + X_S Q}{V_r} + j \frac{X_S \cdot P - R_S \cdot Q}{V_r} = \Delta V_R + j \Delta V_X \quad (\text{I.5})$$

La chute de tension possède donc deux composantes  $\Delta V_R$  en phase avec la tension  $V_r$  et une composante  $\Delta V_X$  en quadrature avec  $V_r$ . D'après l'équation (I.5) la chute  $\Delta V$  dépend de la puissance active et réactive de la charge.

En connectant un compensateur de puissance réactive en parallèle avec la charge, il sera possible de maintenir la tension  $V_r$  égale en module à la tension  $V_s$ . La puissance réactive totale connectée au jeu de barre de charge sera remplacée par  $Q_s = Q + Q_\delta$ , où  $Q_\delta$  est la puissance réactive injectée par le compensateur et qui sera ajustée pour faire tourner le vecteur  $\Delta V$  jusqu'à ce que la tension  $|V_r|$  sera égale à la tension  $V_s$  comme le montre la figure (I.4).



**Figure (I.4) :** Diagramme des tensions pour une ligne compensée (tension constante)

A partir des équations (I.3) et (I.5) nous avons :

$$|V_S|^2 = \left[ V_r + \frac{R_S P + X_S Q}{V_r} \right]^2 + \left[ \frac{X_S P - R_S Q}{V_r} \right]^2 \quad (I.6)$$

La valeur de  $Q_\delta$  nécessaire pour maintenir la tension  $V_r$  constante. Est obtenue en résolvant l'équation (1.6) pour  $Q_S$ . En considérant  $V_r = |V_S|$ , puis  $Q_\delta = Q_S - Q$ . Pratiquement cette valeur est obtenue automatiquement par une boucle de contrôle fermée de  $V_r = V_{ref} = V_S$ . [2]

Si on veut par la compensation réactive améliorer le facteur de puissance ( $\cos\phi = 1$ ), c.à.d. que :  $Q_S = 0$  dans ce cas  $Q_\delta = Q$

$$\text{Alors : } \Delta V = \frac{R_S P + jX_S P}{V_r} = (R_S + jX_S) \frac{P}{V_r}$$

Cette équation est indépendante de  $Q$  donc elle n'est plus sous contrôle du compensateur, et par conséquent on perd le contrôle de la tension. [2, 3]

#### I.4. Ligne Electrique Non Compensée [7, 8]

##### I.4.1. Equation des tensions et courants d'une ligne électrique :

La figure (I.5) représente une ligne de transport électrique d'une inductance et capacité régulièrement distribuées le long de la ligne de longueur '  $a$  '. La tension et le courant, en un point distant de '  $x$  ' de la source  $E_S$ , obéissent à l'équation différentielle de propagation suivante:

$$\begin{cases} \frac{d^2 V}{dx^2} = \Gamma^2 V \\ \frac{d^2 I}{dx^2} = \Gamma^2 I \end{cases} \quad (I.7)$$

$$\text{Avec : } \Gamma = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)}$$

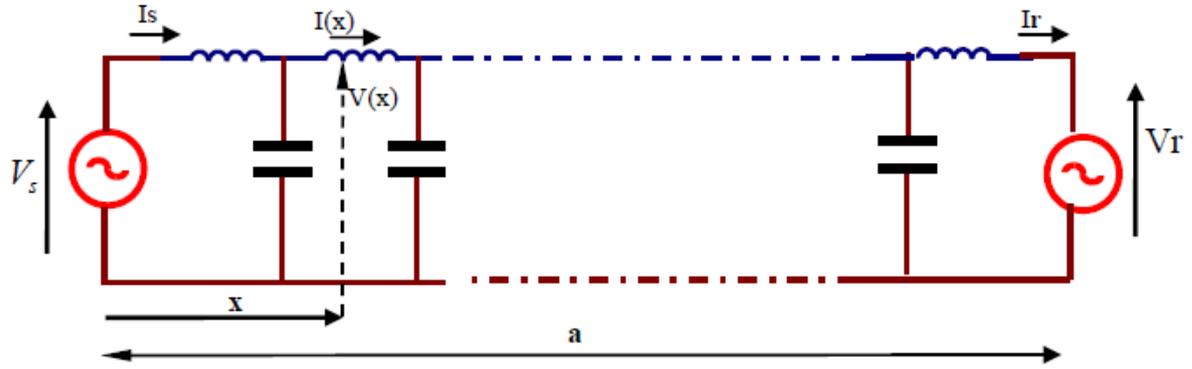


Figure (I.5) : Ligne électrique avec inductance série et capacité shunt distribuées

Avec :

- $\mathbf{R}$  : La résistance de la ligne par unité de longueur **ohm/m** ;  $\mathbf{L}$  : son inductance en série avec  $\mathbf{R}$ ;  $\mathbf{G}$  la conductance shunt de ligne.

Si :

- $\mathbf{R}$  et  $\mathbf{G}$  son très petits et négligeable, alors :  $\Gamma = j\omega\sqrt{LC} = j\beta$

La solution des équations (1.7) pour une ligne sans pertes est :

$$\begin{cases} V(x) = V_r \cos\beta(a - x) + ZI_r \sin\beta(a - x) \\ I(x) = j \frac{V_r}{Z} \sin\beta(a - x) + I_r \cos\beta(a - x) \end{cases} \quad (\text{I.8})$$

- $Z = \sqrt{L/C}$  : L'impédance caractéristique de charge de la ligne en [ohm].
- $\theta = \beta a$  (Pour  $x = 0$ ) : Représente l'angle électrique de la ligne.

#### I.4.2. Ligne électrique non compensée ave charge :

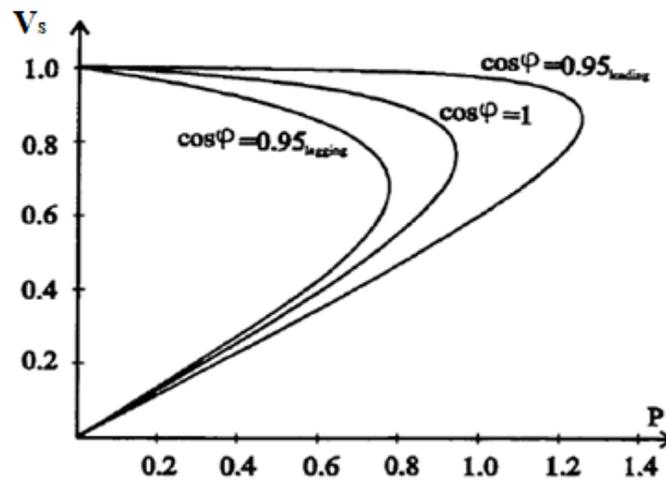
Soit la ligne électrique de la figure I.1 alimentant une charge quelconque ( $L = P + jQ$ ) ; le courant absorbé par cette charge est donné par la relation suivante :

$$I_r = \frac{P - jQ}{V_r^*} \quad (\text{I.9})$$

Les tensions des extrémités de la ligne sont reliées par l'équation (1.10) qui suit, en injectant l'équation (I.9) dans (I.8) :

$$V_s = V_r \cos\theta + Z \left( \frac{P-jQ}{V_r^*} \right) \sin\theta \quad (\text{I.10})$$

La solution de cette équation pour  $V_s$ , représentée dans la figure I.6 montre la variation de la tension  $V_s$  en fonction de la charge  $P$ , et pour des différentes valeurs du facteur de puissance, en considérant la tension de départ constante.



**Figure (I.6) :** Variation de  $V_s$  en fonction de  $P$  avec plusieurs facteurs de puissance

Pour toute valeur de  $P$  ( $P_{\max}$ ) nous avons deux solutions pour  $V_s$ , puisque l'équation (I.10) est quadratique, le point de fonctionnement normale est pour les grandes valeurs de  $V_s$  autour de 1 pu.

Le facteur de puissance de la charge à une grande influence sur la tension  $V_r$  à l'extrémité réceptrice de la ligne ; les charges ayant un facteur de puissance en retard (inductive) tendent à réduire  $V_s$ , par contre ceux qui sont en avance (capacitive) augmente de la valeur de la tension  $V_s$ . [2].

### I.5. Compensation réactive dans une ligne électrique

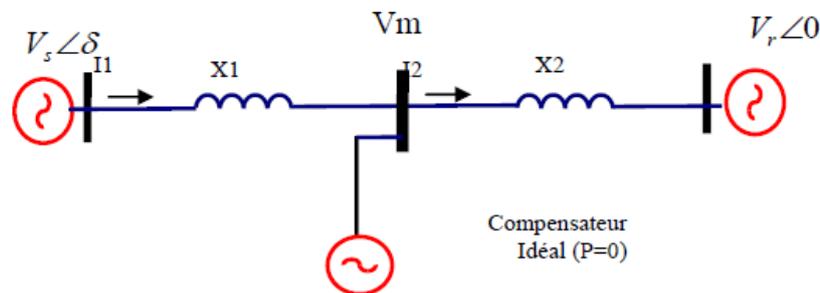
La compensation réactive représente l'application de tous les dispositifs de puissance réactive dans un réseau électrique pour :

- ✓ Maintenir la tension stable pour les différents niveaux des puissances transportées.
- ✓ Améliorer la stabilité du système par augmentation de la puissance maximale transmissible.
- ✓ Modeler le besoin en puissance réactive sur la majorité des sites.

Idéalement la compensation réactive doit modifier l'impédance de charge en agissant sur la capacité et/ou l'inductance de la ligne pour obtenir une impédance de charge virtuelle s'adaptant aux valeurs de la puissance actuelle transportée par la ligne. [7][9]

### I.5.1. Compensateur shunt au point milieu

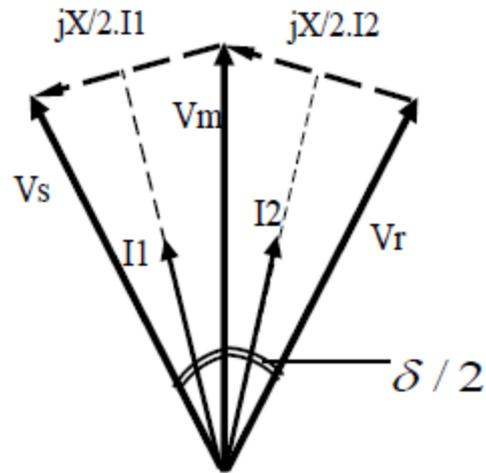
Considérant un réseau électrique simple avec un compensateur shunt idéal connecté au point milieu de la ligne de transport donné sur la figure I.7.



**Figure (I.7) :** Ligne de transmission avec compensateur à point milieu.

Le compensateur est représenté par une source de tension sinusoïdal (en considère uniquement la composante de fréquence fondamentale) en phase avec la tension  $V_m$  du point milieu de la ligne. Le compensateur échange uniquement la puissance réactive avec le réseau. Ce compensateur découpe la ligne en deux segments égales d'impédance  $X/2$ , le premier segment transporte la puissance depuis la source  $V_s$  au point milieu, quant au deuxième transfère cette puissance du point milieu au jeu de barre de réception. [9]

La relation entre les tensions des extrémités de la ligne et la tension du compensateur  $V_m$  ainsi que les courants dans les deux segments de la ligne est représenté par le diagramme de phase de la figure (I.8).



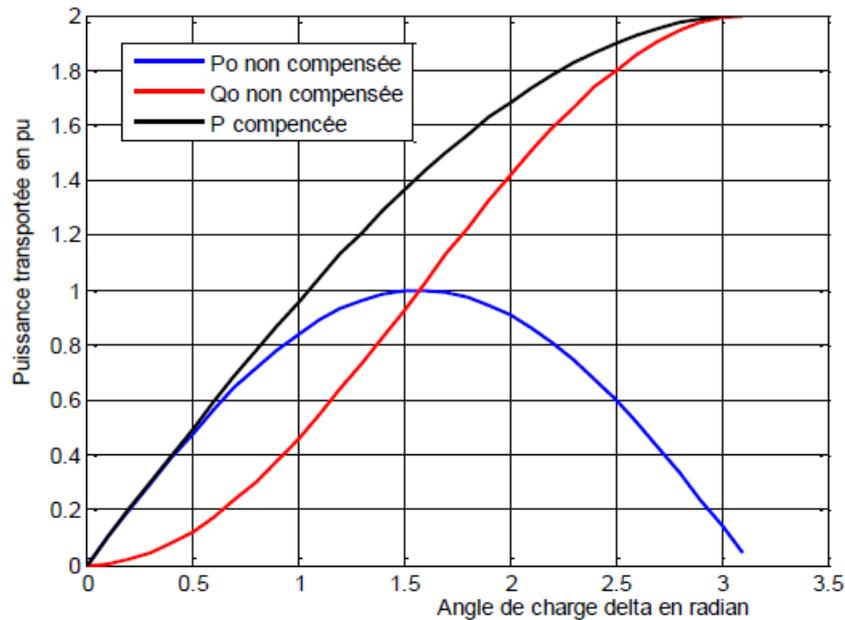
**Figure (I.8) :** Diagramme des courants et Tensions d'un compensateur shunt

Les puissances active et réactive transportées par une ligne électrique donnée par les équations (1.1) et (1.2) seront modifiés, en ajoutant le compensateur shunt au point milieu, et données par les équations (1.11) et (1.12) suivantes :

$$P_c = \frac{2V_s V_r \sin(\delta/2)}{X} \quad (\text{I.11})$$

$$Q_c = \frac{4V_r (V_s \cos(\delta/2) - V_r)}{X} \quad (\text{I.12})$$

La variation de la puissance active et réactive en fonction de l'angle de charge  $\delta$  est représentée par la figure I.9 et comparée avec les puissances de la ligne non compensée.



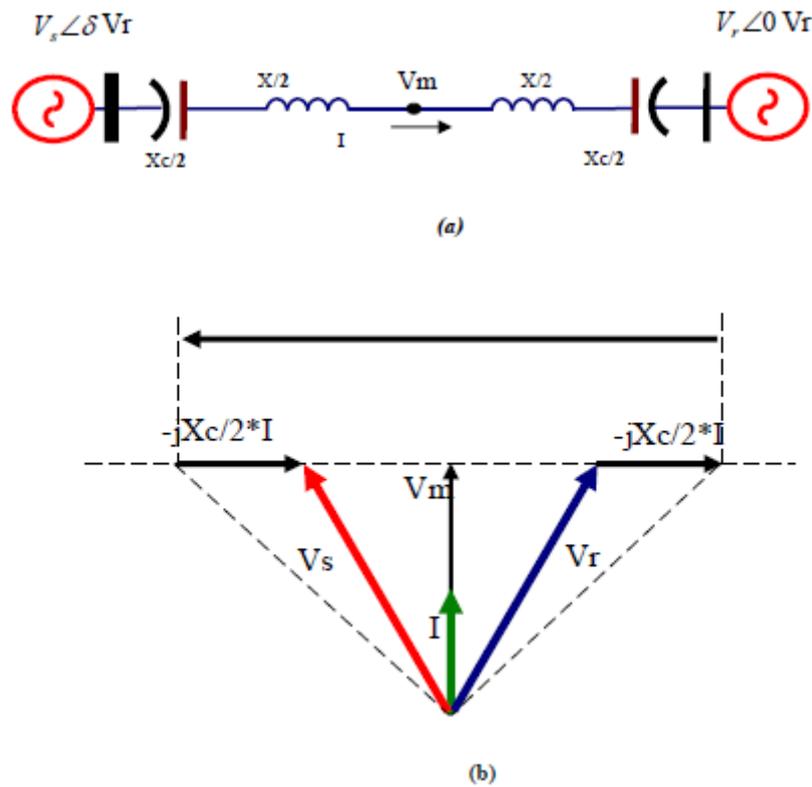
**Figure (I.9) :** Puissance active et réactive en fonction de  $\delta$

On peut simplement observer à partir de la courbe que le compensateur shunt, au point milieu, a l'habileté d'augmenter d'une manière significative la puissance maximale transmissible d'une ligne électrique jusqu'au double (pour la valeur  $\delta = \pi$ ).

### I.5.2. Compensation série

La compensation série est basée sur le principe de réduire la réactance effective d'une ligne de transport électrique. Conventionnellement c'est la réactance du compensateur série capacitif qui élimine une quantité de la réactance de la ligne et donc l'impédance effective de la ligne électrique est réduite comme si sa longueur physique a été diminuée. Également on peut atteindre cet objectif en injectant une tension alternative, de même fréquence que le réseau, en série dans la ligne et qui est en quadrature avec le courant de celle-ci. [9]

Le simple composant ou dispositif pour achever une compensation série dans une ligne est l'insertion des condensateurs en série dans cette dernière comme dans la figure ci-dessous figure (I.10) :



**Figure (I.10) :** Ligne électrique avec compensation série

La relation entre les différentes tensions et courants, dans l'ensemble ligne électrique et compensateur série, est expliquée par le diagramme de la figure (I.10.b).

Systématiquement, en insérant ces condensateurs, la réactance effective de la ligne  $X_{eff}$  doit être diminué et avoir la nouvelle valeur :

$$X_{eff} = X - X_c = X(1 - k)$$

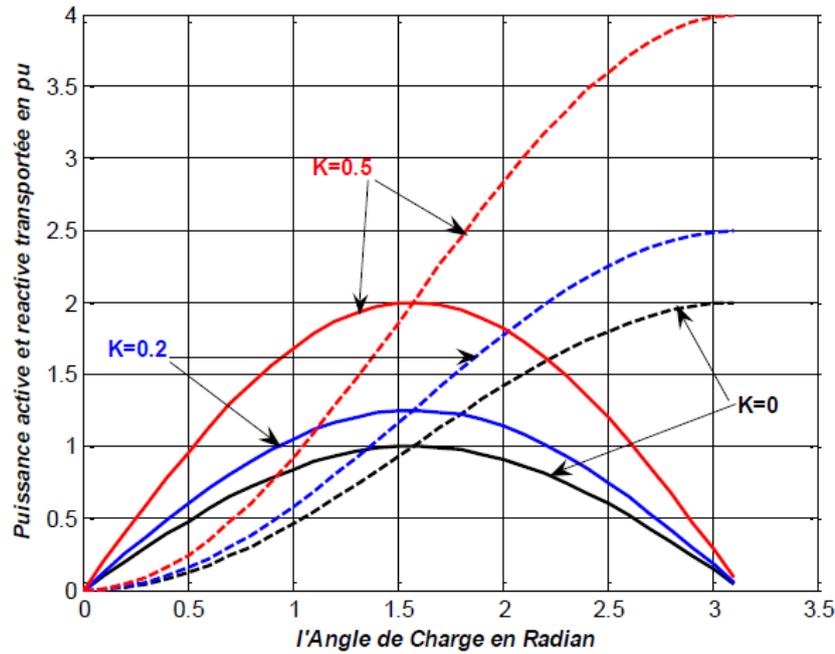
Avec :

- $K = X/X_c$  : Est défini comme le coefficient de Compensation série.

La puissance transportée par une telle ligne est donnée par l'équation (1.13) [9] :

$$P_C = \frac{V_S V_r \sin \delta}{X(1-k)} \tag{I.13}$$

La puissance varie selon la valeur du degré de compensation K comme le montre la figure (I.11).



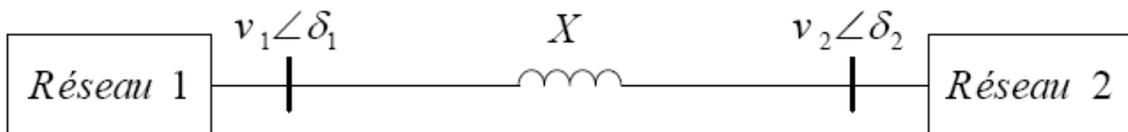
**Figure (I.11) :** Les puissances transportées par une ligne pour différentes valeurs de K [9].

Il est facile d'observer à partir des courbes de la figure (I.11) que la compensation série peut augmenter significativement la capacité de transport de la puissance à travers une ligne électrique.

**I.6. Application des systèmes FACTS**

Les systèmes FACTS permettent de contrôler dynamiquement l'écoulement de puissance moyennant l'utilisation des divers composants de l'électronique de puissance.

L'idée principale des dispositifs FACTS peut être expliquée par l'équation de base (I-1) de la puissance active (P) transitée entre deux réseaux de tensions  $V_s$  et  $V_r$ , présentant un angle de transport ( $\delta$ ) (déphasage entre  $V_s$  et  $V_r$ ) et connectés par une liaison d'impédance X.



**Figure (I.12) :** Circuit équivalent de deux réseaux connectés par une ligne de transmission.

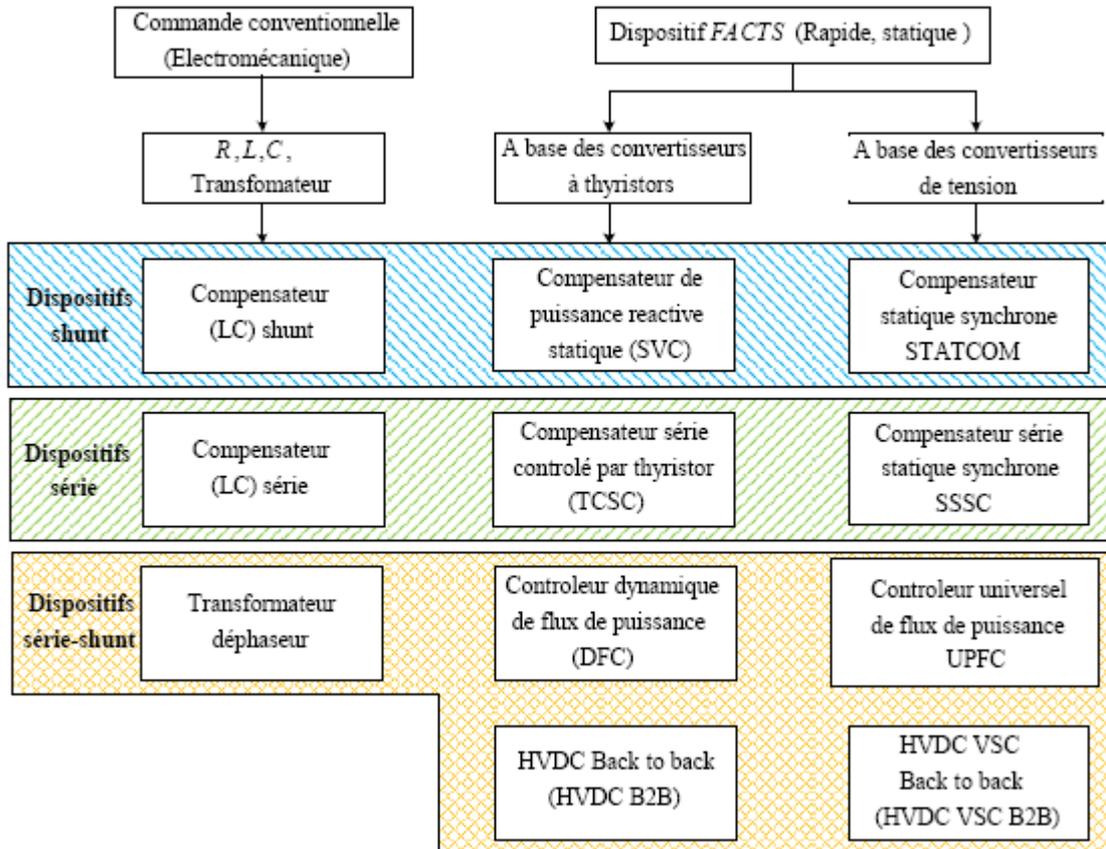
---

Cette équation montre qu'il est possible d'augmenter la puissance active transitée entre deux réseaux soit en augmentant la tension des systèmes, ou en augmentant l'angle de transport entre eux, ou encore réduisant artificiellement l'impédance de la liaison. En jouant sur un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettent un contrôle précis des transits de puissance réactive.

Ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tensions créées par des variations rapides de la demande de puissance réactive et ainsi d'augmenter les productions réduire les coûts et d'allonger la durée de vie des équipements. [12]

### II.7. Différentes catégories des dispositifs FACTS [8]

L'organigramme de la figure (I.13) représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques. La colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composants de base (R, L et C) et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variables commandées par des interrupteurs électro-mécaniques. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commandés avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance. La colonne au milieu des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base de convertisseurs à thyristors tel que le SVC et le TCSC qui sont connus depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leurs fiabilités dans le contrôle des réseaux. Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs à base d'interrupteurs statiques tels que les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) pour donner naissance à des nouveaux dispositifs comme le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs fournissent ou injectent une tension ou un courant, totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle, dans le réseau selon les exigences de contrôle.



**Figure (I.13) :** Grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques. [13]

En générales les dispositifs FACTS sont devisé en trois grandes catégories principales :

### I.7.1. Dispositifs séries

Ces dispositifs 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 [11].

### I.7.2. Dispositifs shunts

Ils consistent en une impédance variable, ou source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont utilisés principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquence contrôler de tension des nœuds.

### I.7.3. Dispositifs hybrides série-shunt

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts 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.

Le tableau (I.1) montre les applications de ces dispositifs en fonction de leur type de connexion avec le réseau.

Type de connexion	Application
<b>Série</b>	Réduction des creux et déséquilibres des tensions, compensation des harmoniques de tension, réglage d'impédances de lignes et de flux de puissance.
<b>Shunt</b>	Filtrage actif de courant, réglage de plan de tension, compensation du réactif, soutien du réseau, réduction de l'effet de Flicker, équilibrage de charge.

**Tableau (I.1) :** Type de connexion et applications associées. [13]

### I.8. Apports et Avantages des FACTS [9]

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 utilisables des présentes lignes sous les conditions normales. Ces possibilités résultent par l'habilité des contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres intervenants dans l'équation (I.1) qui gouverne l'opération de transmission de l'énergie dans une ligne tel que les impédances séries, impédances shunts, courant, tension angle de phase.

Les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir bénéfiques suivants :

- Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS. Ce contrôle doit être réalisé selon un cahier de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs.
- Améliorer la stabilité dynamique du système FACTS l'amélioration de la stabilité transitoire, atténuation des oscillations et le contrôle de la stabilité des tensions.
- Contrôle des tensions dans les nœuds.
- 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'énergies active et par conséquent réduire les pertes de transmission.
- Amélioration de la qualité de l'énergie.

### I.9. Applications Pratiques des Dispositifs FACTS

Les systèmes FACTS sont habituellement connus comme nouvelle technologie, mais des centaines d'installations dans le monde, plus particulièrement du SVC existe depuis 1970 avec une puissance totale de 90.000 MVAR, prouvent l'acceptation de ce genre de technologie. Le tableau de la figure (1.2) montre des chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde avec les puissances totales.

Type	Nombre	Puissance installée en MVA
SVC	600	90.000
STATCOM	15	1.200
Série Compensation	700	350.000
TCSC	10	2.000
HVDC B2B	41	14.000
UPFC	2-3	250

**Tableau (I.2) :** Dispositifs FACTS installés dans le monde et leurs puissances totales [14]

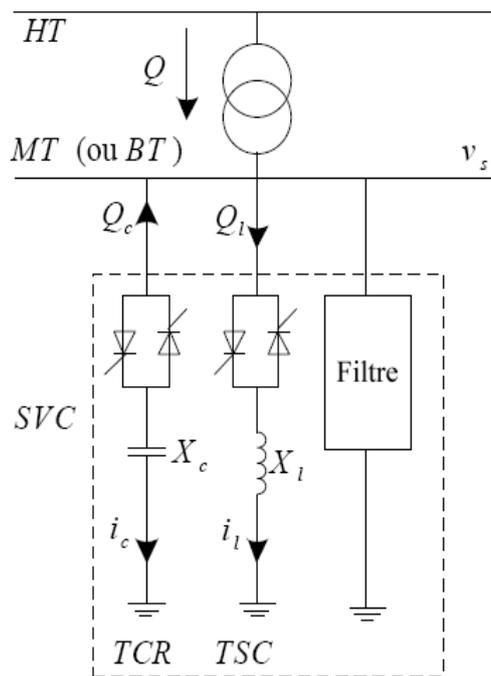
### I.10. Structure des principaux dispositifs FACTS : [15, 16,17]

#### I.10.1. Dispositifs shunts :

L'objectif principal de la compensation shunt est l'accroissement de la puissance transmissible dans le réseau. Le principe consiste à fournir ou absorber de la puissance réactive de façon à modifier les caractéristiques naturelles des lignes pour les rendre plus compatibles avec la charge. En régime permanent, la compensation réactive est utilisée pour le maintien de la tension aux nœuds. En régime transitoire, les dispositifs shunts permettent un contrôle dynamique de la tension pour l'amélioration de la stabilité transitoire et l'amortissement des oscillations de puissance. Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont les suivants :

- **Compensateur statique de puissance réactive (SVC) [15, 19]**

Le Compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif de compensation shunts de la famille flexible de systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS). Il peut fournir une puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'installation de SVC en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes tout en maintenant un profil de tension stable sous différents régimes.



**Figure (I.14) :** Structure d'un SVC

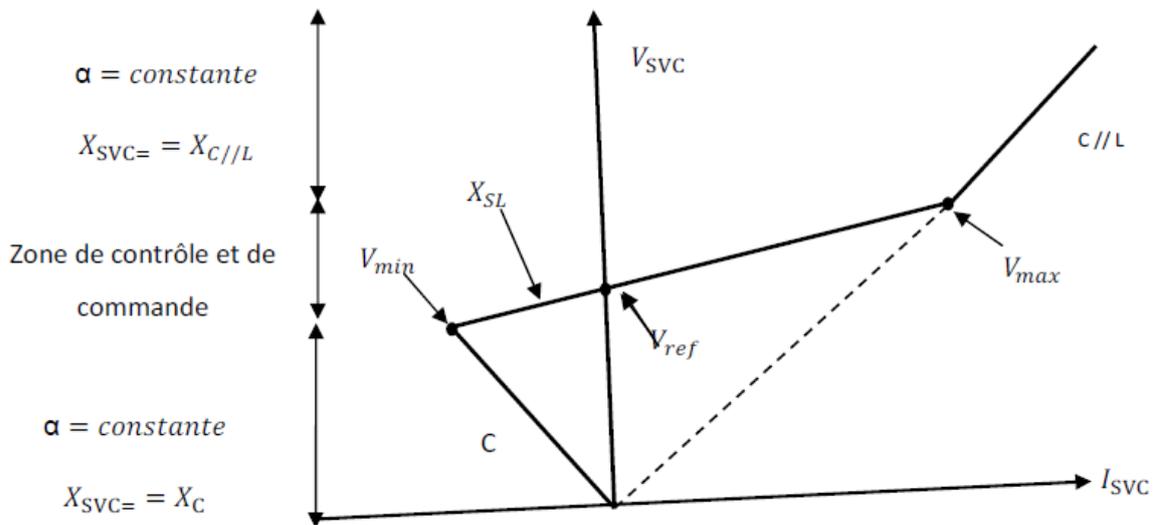
Le SVC est considéré comme un commutateur qui peut fixer le signe de la puissance réactive. Cette dernière est positive lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (comportement inductif). Par contre lorsque le compensateur fournit de la puissance réactive (comportement capacitif), le courant et la puissance réactive prennent un signe négatif.

Les (SVC) permettent de stabiliser la tension du réseau à la valeur de consigne. La tension mesurée est comparée avec la valeur de référence. Si la tension change à la suite d'une manœuvre ou d'une instabilité de réseau, l'erreur est détectée par le système de commande. Celui-ci réajuste automatiquement la puissance réactive absorbée ou générée, en sélectionnant le nombre approprié de condensateurs ou d'inductances à mettre en service et la valeur de l'angle d'amorçage  $\alpha$  des thyristors. Ceci a pour effet d'améliorer la qualité de service et

contribue à l'amélioration de la stabilité du réseau. L'action rapide des thyristors fait que le temps de réponse du compensateur statique (SVC) est très court.

La caractéristique statique de SVC est donnée par la figure I.16. Trois zones sont distinctes:

- Pour  $V_{min} < V < V_{max}$  : est une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des CCT et RCT.
- Pour  $V > V_{max}$  : est une zone où le RCT donne son énergie maximale, les condensateurs sont déconnectés.
- Pour  $V < V_{min}$  : est une zone où les capacités seul sont connectées au réseau.



**Figure (I.15) :** Fonctionnement du compensateur statique. [15, 7]

Le dispositif SVC présente les avantages suivants :

- ✓ Régler la tension de la ligne.
- ✓ Fournir de l'énergie lors d'une panne momentanée.
- ✓ Éliminer la distorsion de tension atténuer les oscillations de puissance, augmenter la capacité de transport et la limite de stabilité.
- ✓ Réduire les pertes de transmission.

- **Compensateur synchrone statique STATCOM [18,19]**

Le STATCOM est la version avancée des SVC, constitué d'un convertisseur de tension à base des thyristors ou transistor associé à des batteries de condensateurs comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle au réseau à travers un transformateur de couplage. Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70 dix,

mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateurs a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte puissance.

Il est basé sur la structure d'un convertisseur de tension triphasé. Il est principalement utilisé pour la compensation dynamique des réseaux, afin de faciliter la tenue en tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et d'amortir les oscillations de puissance.

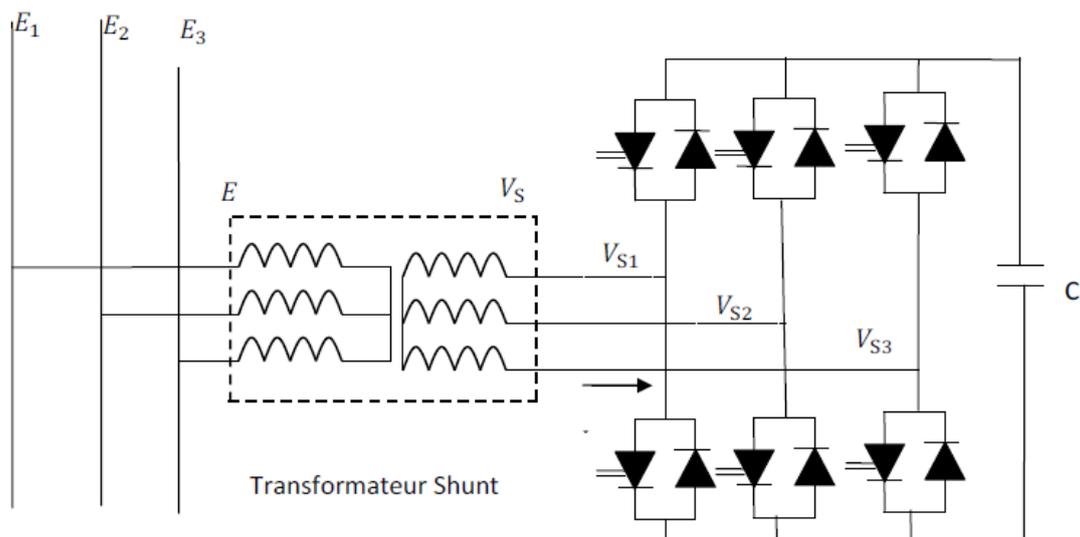
Le STATCOM présente plusieurs avantages :

- 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.

Le STATCOM peut être conçu pour agir également en tant que filtre active pour absorber les harmoniques du système. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est-à-dire les formes de GTO et de diodes sont en antiparallèle. Le schéma de base du STATCOM est donné par la figure (I.16).

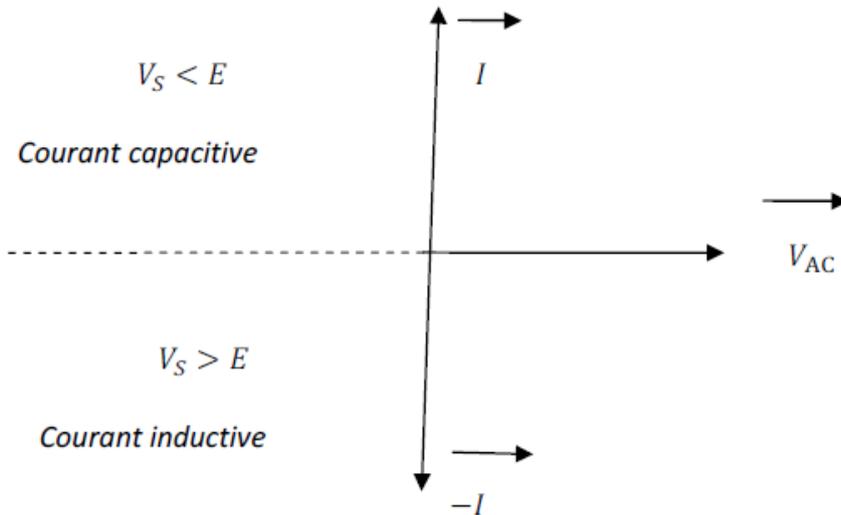
Le principe de fonctionnement de STATCOM est similaire à celui du SVC. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'avoir été créées par un groupe tournant.

Le STATCOM est un circuit qui utilise la commutation forcée. La fréquence de commutation des interrupteurs est élevée, son élément de stockage d'énergie est un condensateur et ceci implique un port DC.



**Figure (I.16) :** Schéma de base du STATCOM.

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse. L'avantage de ce dispositif est de pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance de liaison. Ce dispositif peut travailler avec son courant nominal même à des tensions réduites, donc, sa puissance réactive varie linéairement avec la tension. Par contre, le courant injecté par le SVC diminue linéairement avec la tension [16] et par conséquent la puissance réactive diminue quadratiquement. Cette caractéristique montre que le STATCOM est mieux adapté aux transitoires.

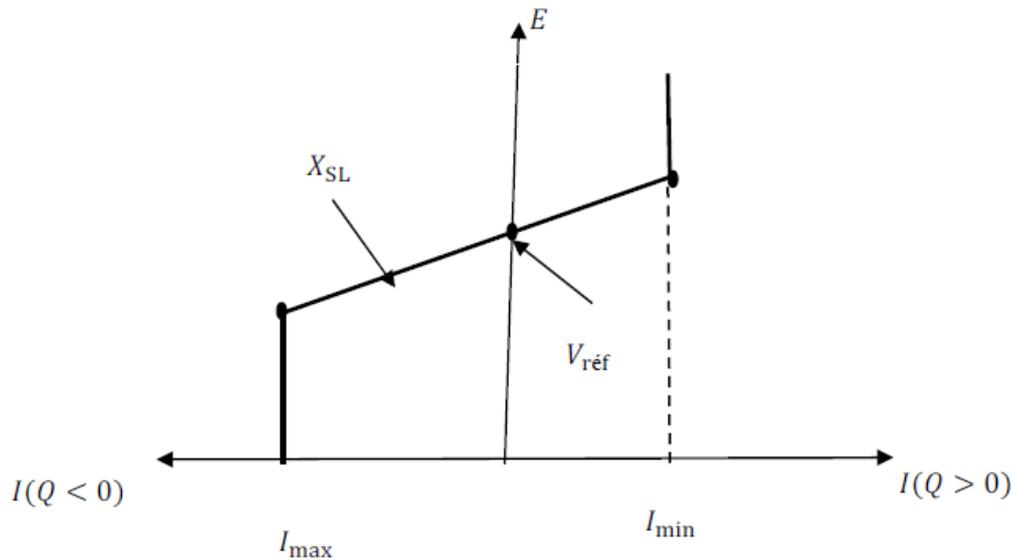


**Figure (I.17) :** Diagramme Vectorielle du STATCOM.

L'échange de puissance réactive avec le réseau se fait en faisant varier l'amplitude des tensions de sortie. Selon l'amplitude de ces tensions, les trois régimes de fonctionnement suivants sont possibles pour le STATCOM figure (I.17).

- Si :  $V_S < E$  , le courant circulant dans l'inductance le courant est déphasé de  $\pi/2$  par rapport à la tension E ou le courant est capacitif.
- Si :  $V_S > E$  , le courant circulant dans l'inductance le courant est déphasé de  $-\pi/2$  par rapport à la tension E ou le courant est inductif.
- Si :  $V_S = E$  , le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie. On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrées. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur [18,19].

La caractéristique statique de ce convertisseur est donnée par la figure (I.18). Ce dispositif a l'avantage, contrairement au SVC, de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension  $V$  diminue.



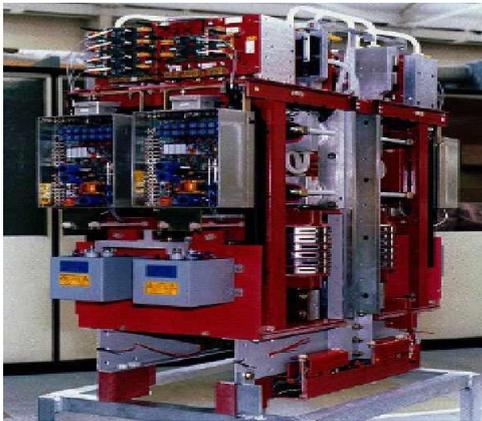
**Figure (I.18) :** Caractéristique Statique du STATCOM.

Les principales applications des compensations shunts sont [11] :

- Soutien de la tension en régime permanent.
- Compensation rapide de la puissance réactive.
- Stabilisation statique et transitoire de la tension.
- Réduction des risques de résonance hypo-synchrone.
- Equilibrage dynamique des charges.
- Amélioration de la stabilité transitoire.



(a) *Emplacement d'un STATCOM.*



(b) *Une cellule STATCOM*



(c) *Une phase d'un STATCOM.*

**Figure (I.19) :** Exemple d'un STATCOM.

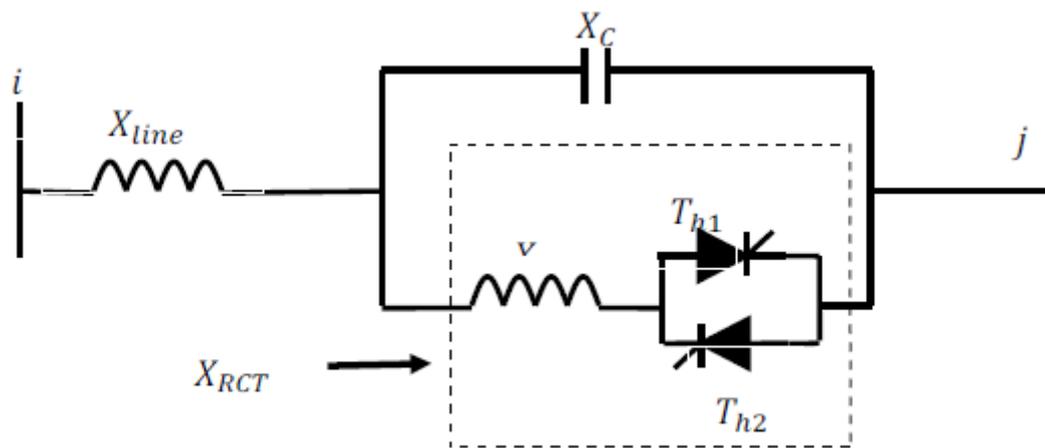
### **I.10.2. Dispositifs séries [16,17,21]**

La réactance des lignes est une des limitations principales de la transmission de courant alternatif à travers les longues lignes. Pour remédier à ce problème, la compensation série capacitive a été introduite afin de réduire la partie réactive de l'impédance de la ligne. Les dispositifs FACTS de compensation série sont des évolutions des condensateurs série fixes. Ils agissent généralement en insérant une tension capacitive sur la ligne de transport qui permet de compenser les chutes de tension inductive.

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

- **Le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) [15,22].**

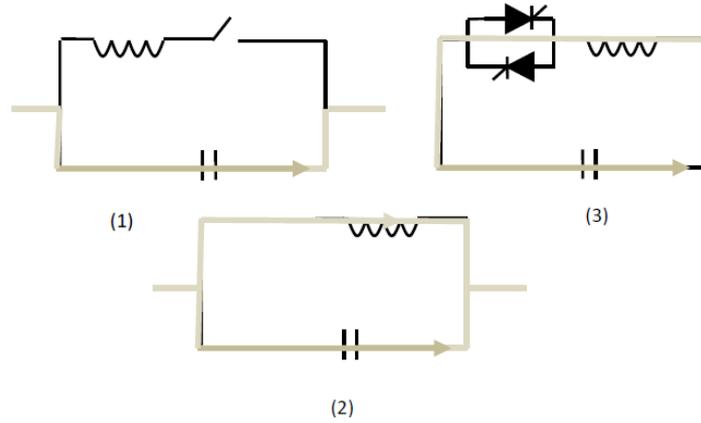
Il est constitué par un ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors montés en tête-bêche dans chaque phase, chacun d'entre eux étant ainsi conducteur pendant une demi-période. La puissance réactive absorbée par l'inductance varie en contrôlant la valeur efficace du courant qui la traverse en agissant sur l'angle d'amorçage des thyristors figure (I.20). Ces appareils ont vu leurs possibilités de s'accroître grâce aux progrès de l'électronique de puissance. Ils sont capables de remplir de diverses fonctions telles que le maintien de la tension, le contrôle de la gestion des flux de puissance et l'augmentation de la puissance maximale transmissible.



**Figure (I.20) :** Insertion d'un TCSC sur une ligne.

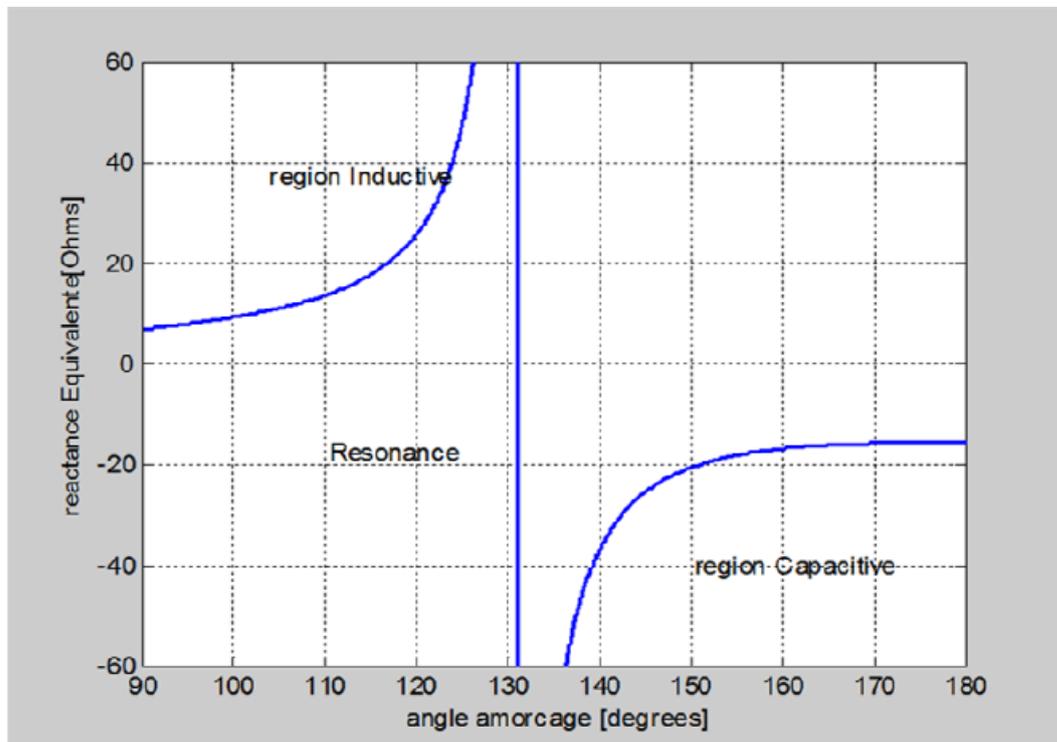
La valeur de l'impédance du TCSC est modifiée en contrôlant le courant circulant dans l'inductance au moyen de circuit de commande des thyristors. Trois régimes de fonctionnement peuvent être distingués figure (I.21).

- Les thyristors sont bloqués ; le courant de la ligne passe uniquement par le condensateur, le TCSC a alors une impédance fixe correspondant à celle du condensateur.
- Les thyristors sont en pleine conduction ; l'impédance du TCSC est fixe et correspond à l'impédance équivalente résultant de la mise en parallèle de la capacité et l'inductance.
- Les thyristors sont commandés en conduction partielle. Un courant de boucle circule dans le TCSC et la réactance apparente de ce dernier est supérieure à celle de la capacité (ou de l'inductance) seule.



**Figure (I.21) :** Régime de fonctionnement du TCSC

La figure (I.22) représente la réactance équivalente du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors.



**Figure (I.22) :** Réactance équivalente en fonction de l'angle d'amorçage.

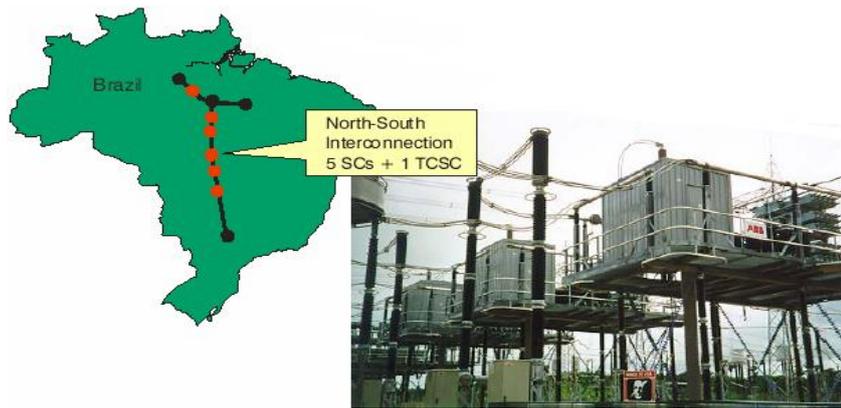


Figure (I.23) : Exemple d'un TCSC.

- **TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)**

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90 degrés soit de 180 degrés.

- **TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)**

Le TCSR est un compensateur inductif une autre inductance commandé par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable figure (I.24).

Lorsque l'angle d'amorçage de la réactance commandée par thyristor est de 180 degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable  $X_1$  agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90 degrés, ou elle est la combinaison parallèle de deux réactances.

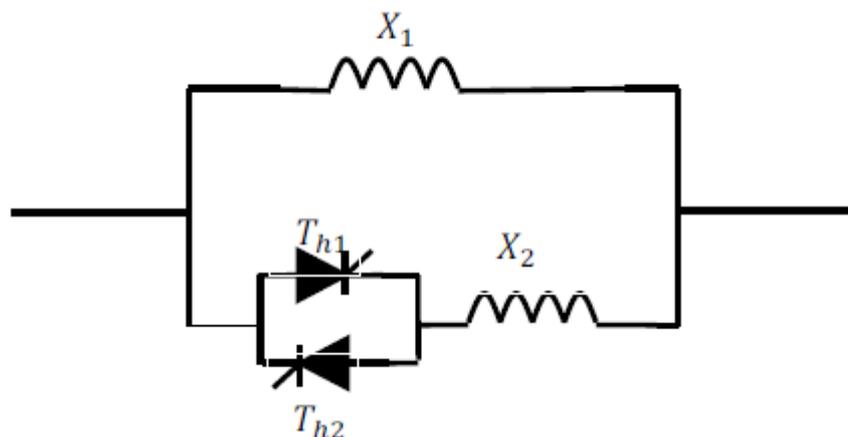


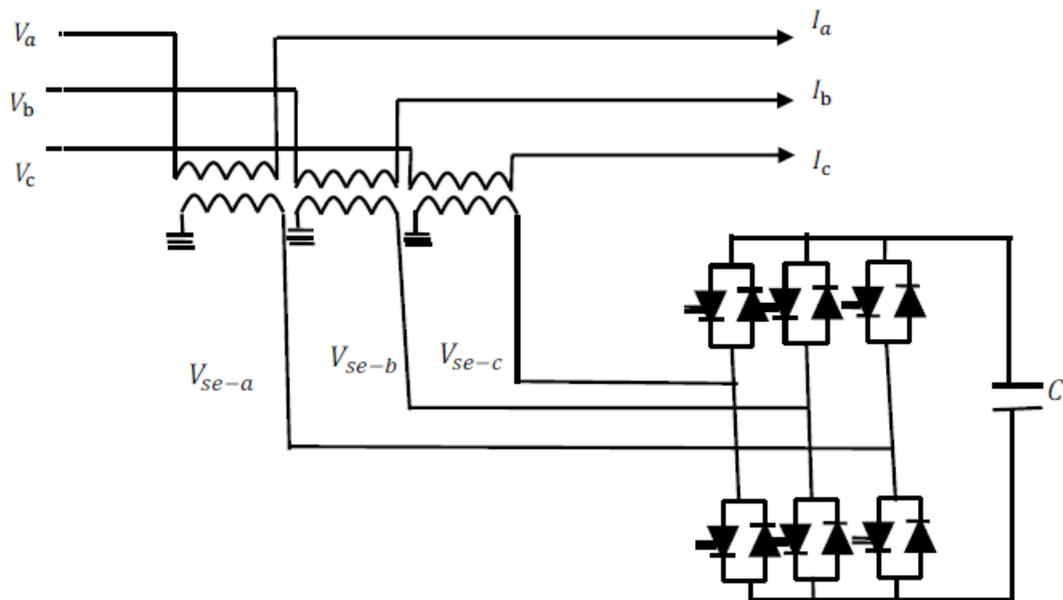
Figure (I.24) : Structure du TCSR

- **TSSR (Thyristor Switched Series Reactor)**

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de 90 degrés ou de 180 degrés.

- **SSSC (Static Synchronous Series Compensator)**

C'est l'un des plus importants dispositifs FACTS similaire à un STATCOM mais avec une tension de sortie injectée en série dans la ligne, son schéma de principe est donné par la figure (I.25). Ce dispositif appelé aussi DVR (Dynamic Voltage Restorer) est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants.

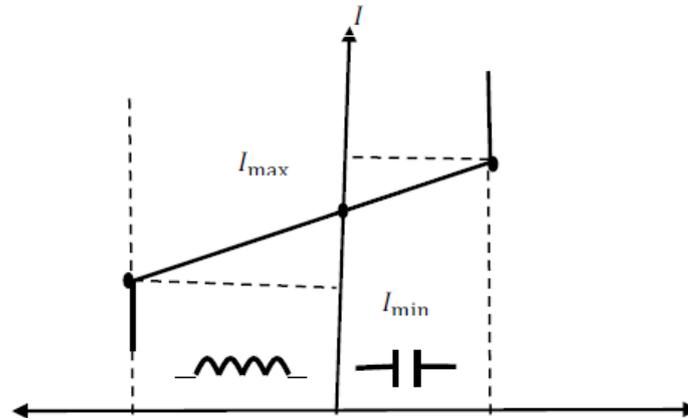


**Figure (I.25) :** Schéma de base du SSSC

Dans le but d'un fonctionnement stable, ce dispositif performe les mêmes fonctions d'un SPS (Static Phase Shifter) ou d'une impédance série variable de compensation.

Il injecte une tension en quadrature avec le courant de la ligne pour contrôler le flux de puissance active. Et comme ce système ne consomme pas de réactive à partir du réseau et possède son propre énergie réactive stockée dans les batteries de condensateur il a l'aptitude de contrôler à la fois la puissance active et réactive.

Et comme ce système ne consomme pas de réactive à partir du réseau et possède son propre énergie réactive stockées dans les batteries de condensateur il a l'aptitude de contrôler à la fois la puissance active et réactive. Sa caractéristique statique est donnée sur la figure (I.26).



**Figure (I.26) :** Caractéristique Statique du SSSC

Les principales applications de la compensation série sont :

- L'augmentation du transit de puissance sur les lignes.
- La compensation du déséquilibre des courants de charge.
- L'amélioration de la stabilité dynamique.
- L'amortissement des oscillations de puissance.
- La réduction des risques de résonance hypo-synchrone.
- L'interconnexion des réseaux.
- La stabilisation de la tension.

#### • Dispositifs hybrides

Ces dispositifs constituent une combinaison des dispositifs séries et shunts commandés d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ces dispositifs permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport.

#### • SPS (Static Phase Shifter) [15 ,22]

Le déphaseur statique est un transformateur déphaseur à base de thyristors, ce dispositif a été conçu pour remplacer les anciens transformateurs déphaseurs commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs l'un branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle, la figure (I.27) donne un schéma de principe de ce dispositif.

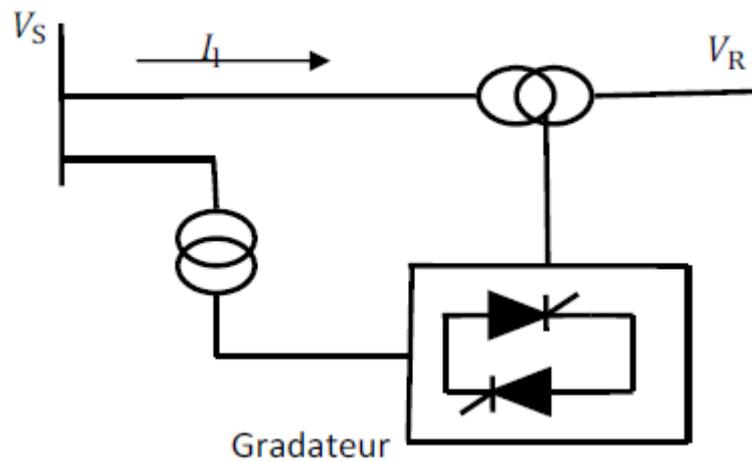


Figure (I.27) : Schéma de Principe du SPS.

- **Contrôleur de puissance interlignes IPFC**

La combinaison de deux ou plusieurs SSSC, couplés via un bus continu commun, permet de faciliter l'échange de puissance active entre les différentes lignes. Ils sont contrôlés pour assurer une compensation réactive des lignes pour ajuster le flux de puissance active et la distribution désirée de la puissance réactive le long des lignes. La Figure (I.28) montre une structure générale d'un IPFC. Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DCDC placés en série avec la ligne à compensé.

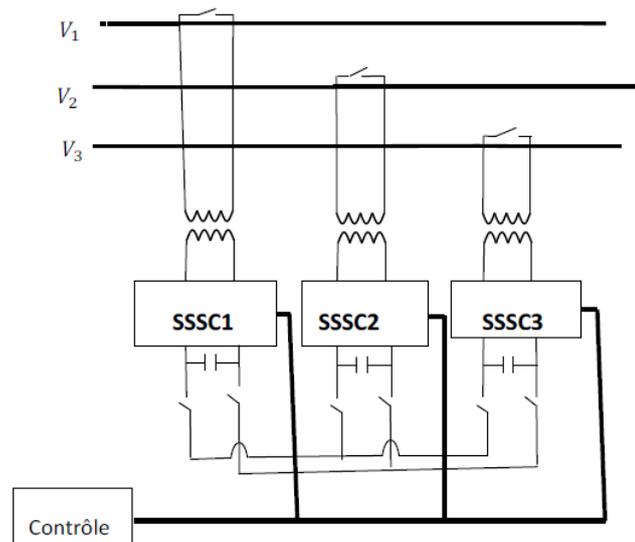


Figure (I.28) : Contrôleur de puissance interlignes.

L'IPFC trouve application dans les grandes stations afin d'assurer la compensation de plusieurs lignes de transport. Les SSSC sont utilisés afin de maximiser la puissance active transmissible sur une ligne. Avec l'IPFC, la puissance active peut être transférée entre les différentes lignes. Donc, il sera possible de :

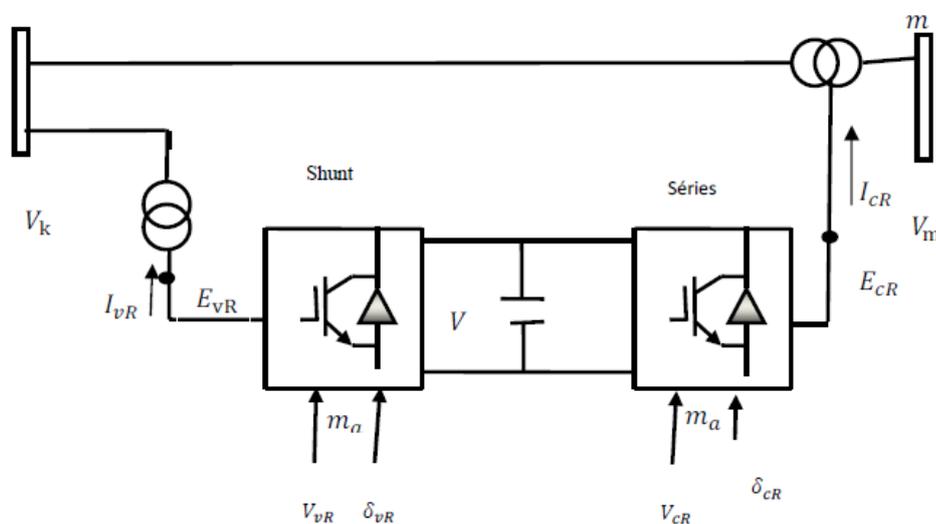
- Egaliser les puissances active et réactive entre les lignes de transport
- Augmenter la puissance maximale transmise à travers les lignes de transport.
- La compensation de la demande en puissance réactive et ainsi réduire les chutes de tension.
- Améliorer l'efficacité des systèmes électriques en régime dynamique.

- **Unified Power Flow Controller UPFC [15]**

L'UPFC est une combinaison d'un STATCOM et un SSSC, couplés par une ligne DC commune, pour permettre un flux bidirectionnel de la puissance active entre la sortie série du SSSC et la sortie shunt du STATCOM. Il est contrôlé pour fournir une compensation série d'énergie active et réactive sans avoir besoin d'une source d'énergie électrique externe.

L'UPFC est capable d'assurer un contrôle de la tension de l'impédance et l'angle de ligne ainsi qu'assurer une compensation en énergie réactive. Ceci rend l'UPFC un des éléments FACTS clé dans l'exploitation moderne des réseaux électriques.

Le dispositif UPFC est constitué de deux onduleurs triphasés de tension à thyristors GTO, l'un connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé, l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile figure (I.29).



**Figure (I.29) :** Structure d'un UPFC.

On constate que l'UPFC de la figure (I.30) est un contrôleur de puissance extrêmement flexible. Etant donné qu'il peut commander le flux de puissance sur la ligne et lors d'un changement sur les réseaux, l'UPFC peut réagir en quelques millisecondes. A cause de sa réponse ultra rapide, qui dépend uniquement de la vitesse de commutation des GTO, ce contrôleur peut réagir efficacement à n'importe quelle perturbation.

Les principales applications du contrôleur de puissance universel sont :

- La commande des transits de puissances sur les lignes.
- L'amélioration de la stabilité des réseaux électriques.
- L'exploitation à pleine capacité des équipements et des lignes.
- L'interconnexion des réseaux.

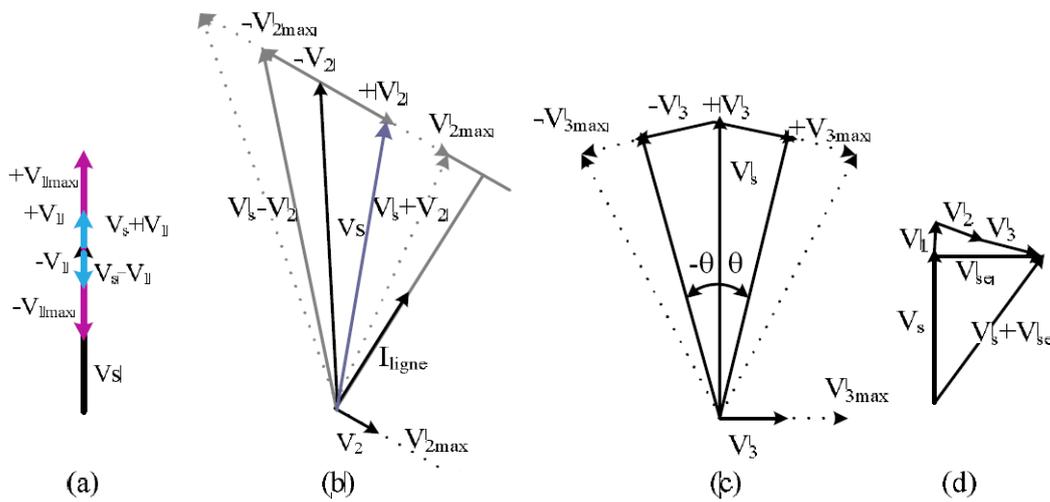


Figure (I.30) : Les différents mode de fonctionnement d'un UPFC.

Dans la figure (I.30.a) et le cas de la régulation de tension. La tension de départ  $V_s$  est augmentée (ou diminuée) en injectant une tension série  $V_1$ , en phase avec  $V_s$ . La tension  $V_1$  est réglable en module et possède une amplitude maximale  $V_{1max}$ .

Figure (I.30.b) compensation série (régulateur d'impédance). La tension injectée  $V_2$  est en quadrature avec le courant de ligne. La tension  $V_2$  possède une amplitude maximale  $V_{2max}$ . Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série.

Figure (I.30.c). Contrôle de phase, L'angle de la tension injectée  $V_3$  est variable alors que l'amplitude de la tension  $V_s$  reste constante.

Figure (I.30.d) contrôle simultané, Il est possible à l'UPFC d'accomplir trois fonctions à savoir le réglage de la tension, la compensation série et le réglage de l'angle de phase simultanément c'est le mode de fonctionnement automatique. L'angle de phase et l'amplitude

de la tension injectée  $V_{se} = V_1 + V_2 + V_3$  sont choisis d'une manière à produire un courant de ligne qui permet d'obtenir les puissance active et réactive désirées.

Donc, le convertisseur l'UPFC peut être opérer dans les quatre modes :

- Réglage de la tension.
- Compensation série.
- Réglage de l'angle de phase.
- Mode automatique.

La figure (I.31), résume l'influence des différentes parties de l'UPFC sur le flux de puissance.

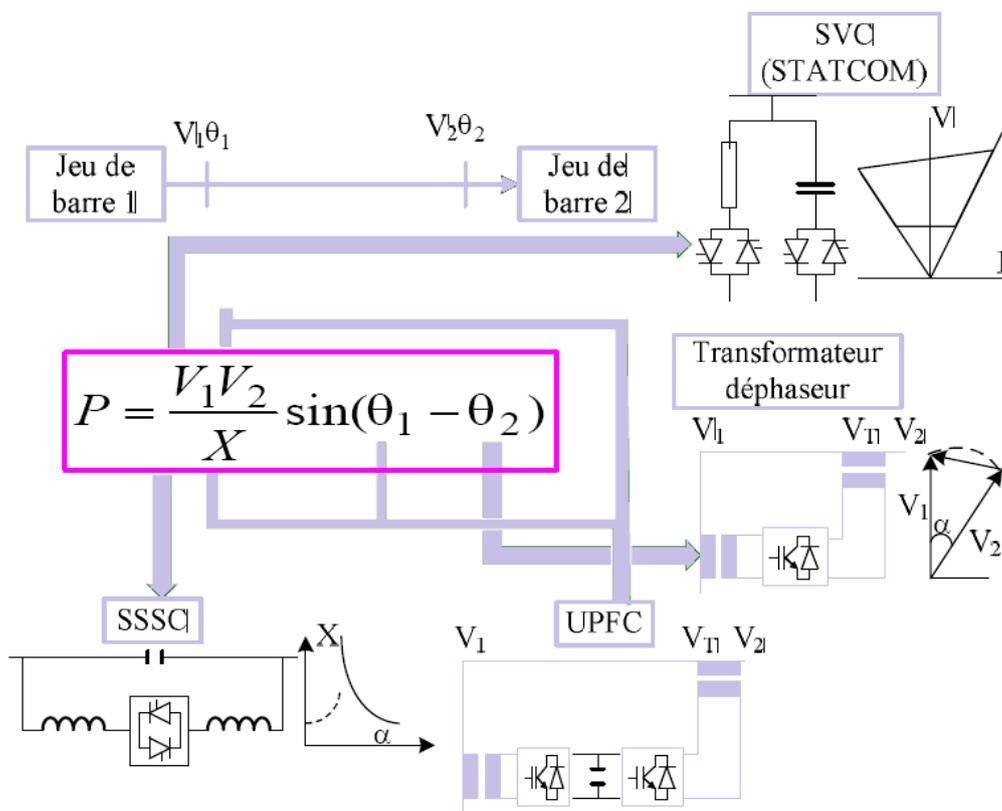


Figure (I.31) : Actions possibles sur le flux de la puissance active. [25]

Le mode automatique ne peut être accompli par des compensateurs conventionnels. Pour montrer comment l'UPFC peut affecter le flux de puissance dans ce mode l'UPFC est connecté au point de départ S, figure (I.32). L'UPFC est représenté par deux sources de tension idéales. Les bus S et R représentent l'entrée et la sortie de l'UPFC respectivement [26], [27], [28].

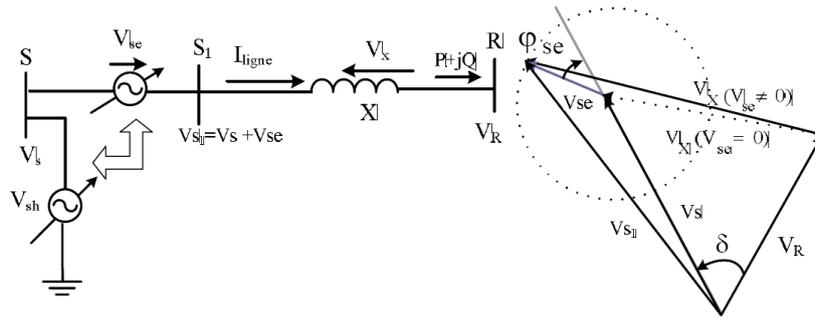


Figure (I.32) : Une ligne de transmission avec UPFC.

Le tableau (I.3) résume d'une manière simple l'impact de l'utilisation de chaque FACTS, à la résolution des différents problèmes qui entravent le bon fonctionnement du réseau électrique.

	Contrôle de Charge	Contrôle de Tension	Stabilité Transitoire	Amplitude des Oscillations
SVC	+	++	+	++
STATCOM	+	+++	+	++
TCSC	++	+	+++	++
SSSC	+++	++	+++	++
UPFC	+++	+++	+++	+++
(+): Petite, (++) : Moyenne, (+++) : Forte				

Tableau (I.3) : Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau [12].

### I.11. Conclusion

Dans ce chapitre on à présenter l'état de l'art des systèmes FACTS :

- Les problématiques des lignes de transports de l'énergie électrique (contrôle du flux des puissances actives et réactives, stabilité des réseaux électriques, chute des tensions dans les lignes, facteur de puissance des sources et rendement des lignes de transports...etc.).
- Présentation des compensateurs conventionnelles électromécaniques (circuits LC série, parallèle et transformateur déphaseur...etc.).

- Présentation des systèmes FACTS de première génération, à base de Thyristors : le SVC (Static VAR Compensator) le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), le TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)...etc.
- Présentation des systèmes FACTS de deuxième génération, à base d'interrupteurs de puissance rapides et bi-commandables (IGBT), comme solutions aux problèmes des réseaux électriques, je site à titre d'exemples : le STATCOM (Static Compensator), comme compensateur shunt, le SSSC (Static Synchronous Series Compensator) comme compensateur série et l'UPFC (Unified Power Flow Controller) combine à la fois la compensation série et la compensation parallèle. C'est le système FACTS le plus puissant, dans la mesure où il permet de régler la puissance active et réactive ainsi que la tension du jeu de barre ou il est inséré.
- Différentes structures de systèmes FACTS sont présentés et comparés.

*« Je peux accepter l'échec, tout le monde peut échouer, mais je n'accepterai  
jamais de ne pas avoir essayé »*

*Michael Jordan*

## *Chapitre II*

# **Modélisation de l'UPFC et Synthèse des Régulateurs**

## *Chapitre II :*

# *Modélisation de l'UPFC et Synthèse des Régulateurs*

### **II.1. Introduction :**

L'utilisation des dispositifs de compensation statique SVC dans les systèmes électriques pour réguler la tension, améliorer le facteur de puissance, et stabiliser le réseau, l'UPFC est une union de deux SVC l'un est un dispositif shunt STATCOM et l'autre est un composant série SSSC, les deux dispositifs peuvent fonctionner indépendamment, ils agissent sur le contrôle de la tension et/ou l'impédance de la ligne en injectant la quantité de la puissance active et /ou réactive nécessaire, ou simultanément.

L'UPFC combine à la fois la compensation série et la compensation parallèle, c'est le dispositif le plus puissant dans le contrôle de flux de puissance, ou il permet de régler les trois grandeurs du réseau à savoir, la tension, l'angle de charge et l'impédance de la ligne.

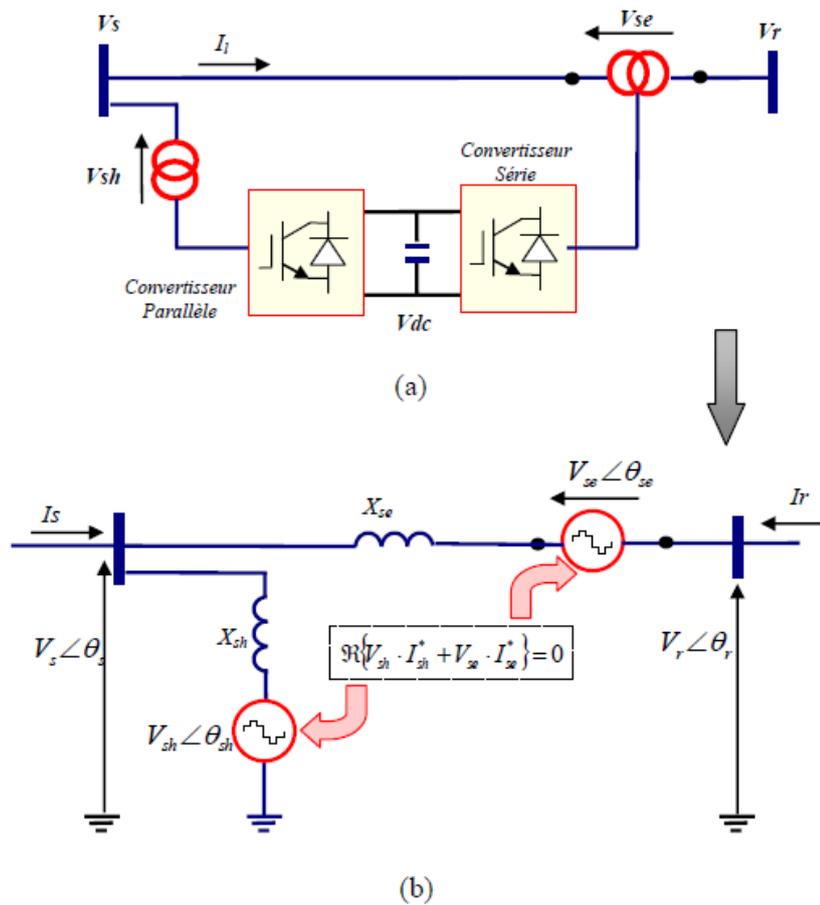
Le but de ce chapitre est la modélisation et la commande des dispositifs FACTS.

**II.2. Structure et conception de base de l'UPFC [30, 23]**

Le dispositif UPFC est le plus sophistiqué des dispositifs FACTS, il présente une structure de puissance en cascade, les principales caractéristiques de l'UPFC sont :

- Il peut contrôler le flux des puissances, pour le contrôle des tensions, l'impédance de la ligne ou l'angle de charge.
- Ne présente aucune inertie mécanique.
- Caractérisé par une réponse très rapide.

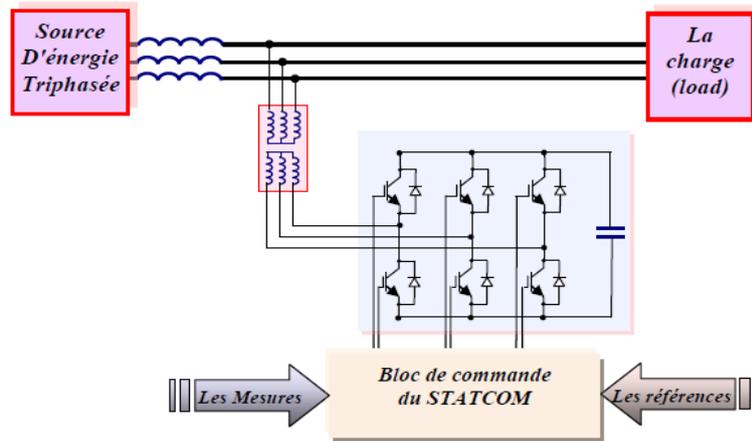
La structure de base d'un UPFC connecté au réseau d'énergie électrique est représentée par La figure (II.1). Elle consiste en deux onduleurs triphasés, l'un connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés entre eux, en étoile, et l'autre connecté en parallèle avec le réseau via un transformateur triphasé. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur C.



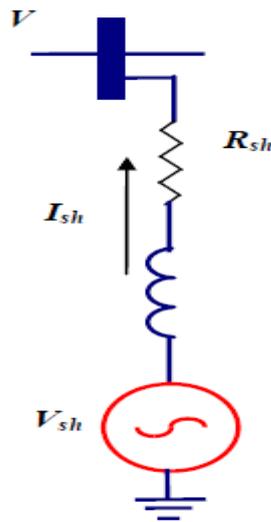
**Figure (II.1) :** (a) schéma représentatif d'un UPFC, (b) schéma équivalent de l'UPFC.

**II.3. Modélisation de la partie shunt de l'UPFC (STATCOM) [31]**

La figure (II.2) représente la structure triphasée de la partie shunt de l'UPFC nommée STATCOM. L'onduleur est modélisé par des interrupteurs idéaux. Les tensions simples ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ) représentent les tensions des points auxquels le STATCOM est raccordé avec la ligne de transport. Le bus de tension continu (DC) est représenté par la capacité (C).



**Figure (II.2) :** Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.



**Figure (II.3) :** Schéma équivalent du STATCOM

L'équation (II.1) illustre la relation vectorielle entre les courants et les tensions d'une phase, côté alternatif.

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \tag{II.1}$$

Avec :

- $\bar{V}$  : Vecteur de tension de la source.
- $\bar{V}_{sh}$  : Vecteur de tension générée par le compensateur shunt.
- $R_{sh}$  : La résistance du compensateur shunt.
- $L_{sh}$  : L'inductance de fuite du transformateur shunt.
- $\bar{I}_{sh}$  : Vecteur de courant fournit par le compensateur shunt.

Ou les grandeurs sont en triphasé :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \quad \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bsh} \\ V_{csh} \end{bmatrix}; \quad I_{sh} = \begin{bmatrix} I_{ash} \\ I_{bsh} \\ I_{csh} \end{bmatrix}$$

On passe au repère tournant (d, q), le référentiel du synchronisme, sous forme matricielle on écrit le système d'état du STATCOM comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} \quad (II.2)$$

Avec :

- $I_{shd}$  : Composante directe du courant fournit par le STATCOM.
- $I_{shq}$  : Composante quadrature du courant fournit par le STATCOM.
- $\omega$  : Impulsion.
- $V_d$  : La composante directe de la tension.
- $V_q$  : La composante quadrature de la tension.
- $V_{shd}$  : La composante directe de la tension générée par le compensateur shunt.
- $V_{shq}$  : La composante quadrature de la tension générée par le compensateur shunt.

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

**II.2.1. Contrôle du STATCOM [32,24]**

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

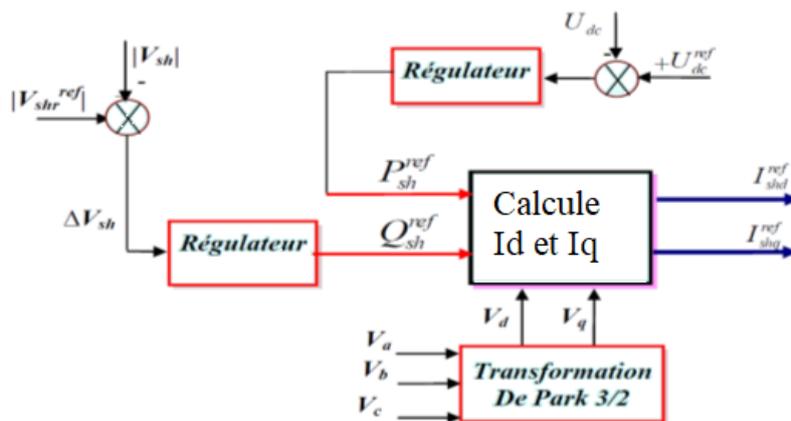
Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive  $Q_{sh}^*$  calculée en fonction de la chute de tension et la puissance active ( $P_{sh}^* = 0$ ) représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur.

Ces puissances qui sont les images des courants ( $I_{shd}^*$ ,  $I_{shq}^*$ ) active et réactive qu'on détermine depuis le système d'équation suivant écrit dans le référentiel tournant au synchronisme (d, q) :

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{sh}^* \\ Q_{sh}^* \end{bmatrix} \tag{II.3}$$

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 (II.4) suivante :



**Figure (II.4) :** Identification des Courants de Référence (c'est un système du deuxième ordre).

### II.2.2. Méthode watt var découplée [33]

D'après le système d'équation (II.2), on voit qu'il y a un couplage entre les deux composantes du courant  $i_{sh}$ . Pour pouvoir aboutir à une commande aisée du système, il est indispensable de procéder à un découplage des deux composantes.

On pose les nouvelles grandeurs de commande :

$$\begin{cases} X_1 = \frac{1}{L_{sh}} (V_d - V_{shd}) \\ X_2 = \frac{1}{L_{sh}} (V_q - V_{shq}) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega \cdot I_{shq} + X_1$$

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

$$\left( s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right) I_{shd} = \omega \cdot I_{shq} + X_1 = \tilde{X}_1$$

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

$$\frac{I_{shd}}{\tilde{X}_1} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (\text{II.5})$$

Notre commande en réalité est en  $X_1$  et comme  $\tilde{X}_1 = \omega I_{shq} + X_1$ , on doit ajouter donc le terme  $\omega \cdot I_{shq}$  pour trouver  $\tilde{X}_1$  à l'entrée de ce transfert comme l'indique le schéma de la figure (II.5) suivante :

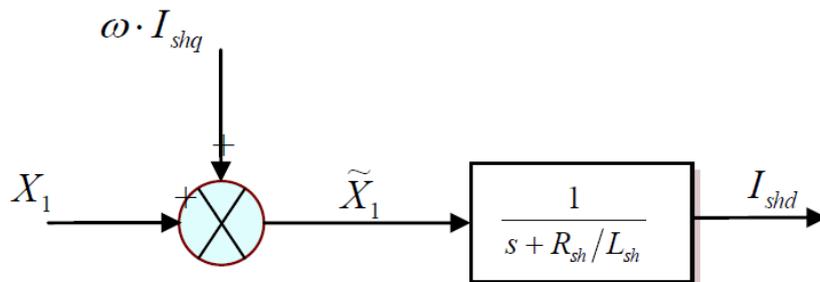


Figure (II.5) : Le transfert  $I_{shd}$  en fonction de  $X_1$

De la même manière en prenant la deuxième équation du modèle précédant on trouve le transfert  $I_{shq}$  en fonction de  $\tilde{X}_2$  qui suit :

$$\frac{I_{shq}}{\tilde{X}_2} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \tag{II.6}$$

Avec :  $\tilde{X}_2 = -\omega I_{shd} + X_2$

Le schéma suivant résume ce transfert :

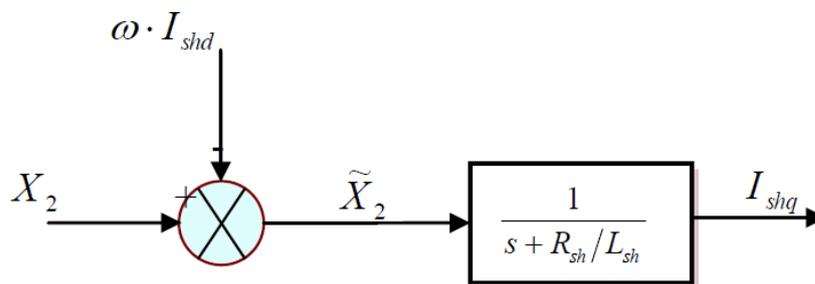


Figure (II.6) : Le transfert  $I_{shq}$  en fonction de  $X_2$

De ce qu'on vient de voir on constate qu'il y a un couplage naturel dans les transferts des courant  $I_{shd}$  et  $I_{shq}$  pour éliminer ce couplage on utilise la méthode de compensation avec des régulateurs PI on peut contrôler les courant de sortie du STATCOM et les faire suivre leurs consignes  $I_{shd}^*$  et  $I_{shq}^*$  comme le représente le schéma bloc de la figure (II.7)

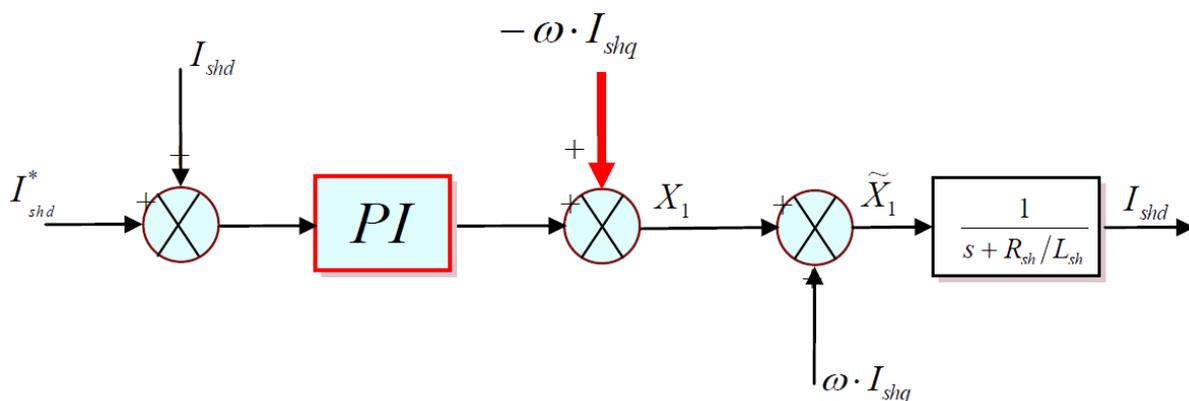


Figure (II.7) : Régulation de découplage de  $I_{shd}$

De la même pour le courant réactif on doit ajouter la composante  $\omega I_{shd}$  et finalement arriver au schéma de régulation du STATCOM par la méthode Watt-Var découplée de la figure (II.8) [34].

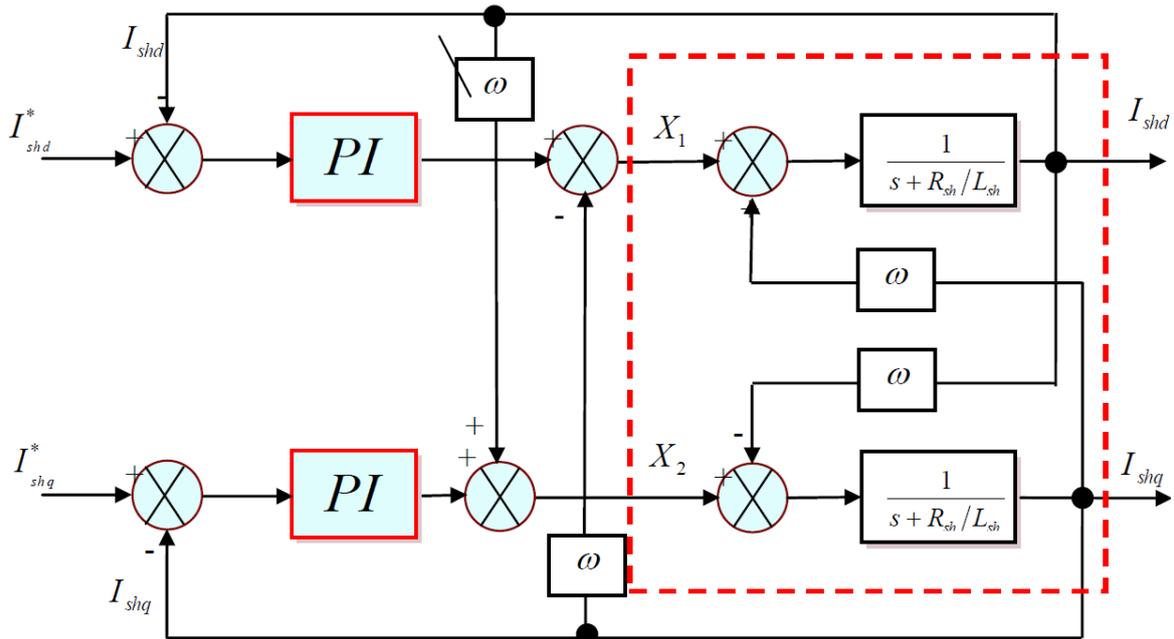


Figure (II.8) : Schéma de régulation du STATCOM.

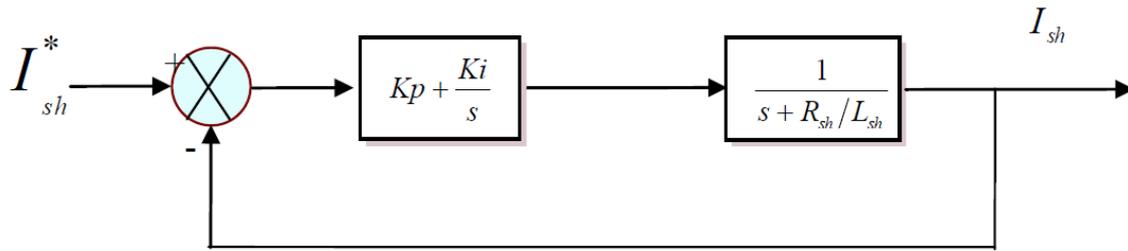
## II.4. Synthèse du régulateur du bus continu

### II.4.1. Commande par un PI classique

Afin de satisfaire ces objectifs de commande, un régulateur est synthétisé. D'abord, il est utilisé pour la poursuite des références en puissance en situation normale ; celles-ci sont dictées, en général, par l'opérateur du système électrique (OS dans le cas du système électrique national). Ensuite, à la régulation des grandeurs électriques dans les situations de défaillance.

#### II.4.1.1. Régulateurs des courants :

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



**Figure (II.9)** : Schéma bloc de la Régulation PI des courants du Statcom

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

$$G(s) = \left( K_P + \frac{K_i}{s} \right) \left( \frac{1}{s + R_{sh}/L_{sh}} \right) = K_P \left( \frac{s + K_i/K_P}{s} \right) \left( \frac{1}{s + R_{sh}/L_{sh}} \right)$$

Et par compensation du pôle on doit avoir :

$$\frac{K_i}{K_P} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \quad (\text{II.7})$$

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

Avec :

- $T_{BO}$  : Constante de temps en boucle ouverte [s].

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

$$F(S) = \frac{G(S)}{1 + G(S)} = \frac{G(S)}{1 + G(S)} = \frac{1}{T_{BF}S + 1}$$

Avec :

$$T_{BF} = \frac{1}{K_P} \quad (\text{II.8})$$

Avec est la constante de temps de la régulation en boucle fermée.  $B_{FT}$ . En faisant un choix convenable du temps de réponse en boucle fermée (de l'ordre de 1/3 du temps de

réponse en boucle ouverte) on déterminera à l'aide des équations (II.8 et II.7) les gains du contrôleur PI.

$$K_P = \frac{1}{3} T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \quad \text{et} \quad K_i = K_P * \frac{R_{sh}}{L_{sh}}$$

#### II.4.1.2. Régulation de la tension continue Udc [35, 36,37]

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

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \Rightarrow \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2 * P_{sh}}{C} \quad (\text{II.9})$$

En passant au domaine fréquentiel (Laplacien) on aura :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{C * S} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

- **Udc** : La tension tension continu aux bornes du condensateur.
- **Psh** : La Puissance active fournit par le compensateur shunt (STATCOM).
- **C** : Condansateurs du bus continu.

Pour générer le signal  $P_{sh}$ , on peut utiliser soit un régulateur proportionnel, soit un régulateur proportionnel-intégral. Ce dernier est généralement privilégié car il permet de supprimer l'erreur statique.

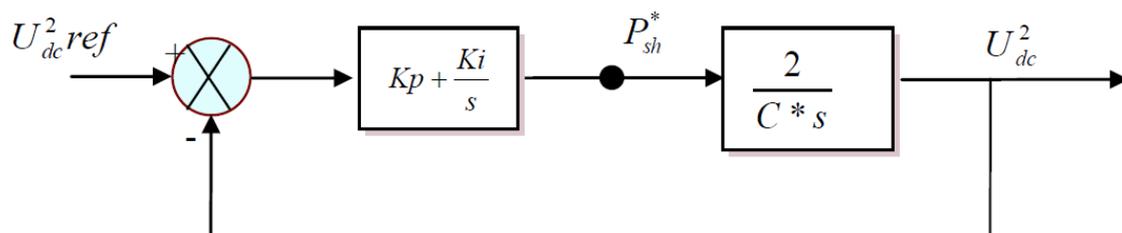


Figure (II.10) : Régulation de la tension continu.

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

$$F(S) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc-ref}^2} = \frac{\frac{2K_P}{C}S + \frac{2K_I}{C}}{S^2 + \frac{2K_P}{C}S + \frac{2K_I}{C}}$$

Avec :  $\omega_n^2 = \frac{2K_I}{C}$  c'est un système du deuxième ordre.

Par identification :

$$\xi = K_P \sqrt{\frac{1}{2CK_I}} \quad (\text{II.11})$$

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

$$\omega_n = \frac{2\pi \times 300}{10} \text{rad/sec},$$

Avec :  $\omega_n$  la pulsation du système du deuxième ordre et  $\xi$  le facteur d'amortissement

Et finalement on détermine à partir des équations (II.11) les valeurs des gains  $K_P = 0.105$  et  $K_I = 10$ .

#### II.4.2. Commande par un PI flou [12]

Le principe général de la théorie de base de la logique floue englobe des aspects de la théorie des possibilités qui fait intervenir des ensembles d'appartenance appelés ensembles flous caractérisant les différentes grandeurs du système à commander. Le raisonnement flou qui emploie un ensemble de règles floues établies par le savoir-faire humain et dont la manipulation permet la génération de la commande adéquate ou la prise de la décision. Ainsi, les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont :

- Les variables linguistiques et les ensembles flous.
- Les fonctions d'appartenance.
- Les opérateurs.
- Les inférences floues.

### II.4.2.1. Variables linguistiques et ensembles flous [38, 39]

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions floues à savoir {grand, petit, positif, négatif, etc...}. Ces différentes classes d'expressions floues dites ensembles flous forment ce qu'on appelle des variables linguistiques. Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques (normalisées généralement sur un intervalle bien déterminé appelé univers de discours), il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous-ensembles flous de la même classe

Un sous-ensemble flou  $A$  de  $X$  (communément appelé univers de discours) est défini par une fonction d'appartenance  $\mu_A(x)$  qui associe à l'élément  $x$ , son degré d'appartenance au sous-ensemble  $A$ , compris entre 0 et 1. On note alors :

$$\mu_A: X \rightarrow [0 \ 1]$$

$$A[x, \mu_A(x)], x \in A, \text{ et } A \subset X \quad (\text{II.12})$$

Nous rappelons dans cette partie quelques propriétés essentielles qui sont associées aux sous-ensembles flous comme le montre la figure (II.11).

- 1- **Hauteur,  $\text{hgt}(A)$**  : On définit la hauteur d'un sous-ensemble  $A$  de  $X$ , par le plus fort degré d'appartenance d'un élément  $x$  à  $A$  :

$$\text{hgt}(A) = \sup(\mu_A)_{x \in X} \quad (\text{II.13})$$

Afin de normaliser un sous-ensemble flou, on posera généralement  $\text{hgt}(A)=1$ .

- 2- **Support,  $\text{supp}(A)$**  : Le support est défini comme l'ensemble des éléments de  $X$  appartenant au sous-ensemble  $A$  :

$$\text{Supp}(A) = \{x \in X / \mu_A \neq 0\} \quad (\text{II.14})$$

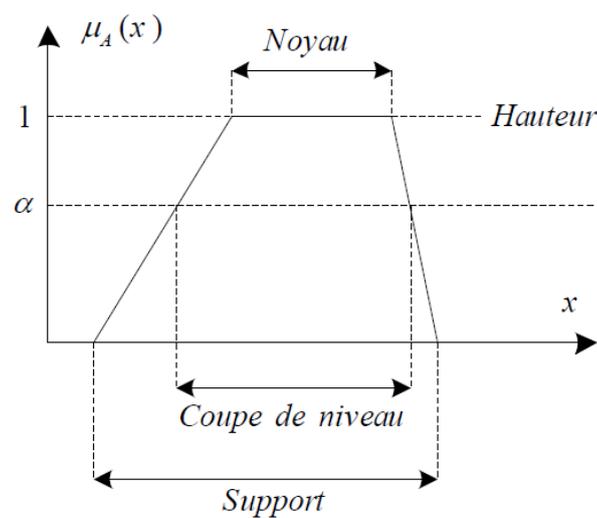
L'ensemble flou dont le support est *Singleton*, est représenté par une fonction d'appartenance de forme particulière appelé le singleton. Elle est définie par  $\mu_A(x)=1$  si  $x=x_0$  et 0 sinon.

- 3- **Noyau,  $\text{noy}(A)$**  : Le noyau d'un sous-ensemble flou  $A$  de  $X$  est défini comme l'ensemble des éléments  $x$  de  $X$  appartenant à  $A$  avec un degré d'appartenance égal à 1 :

$$\text{noy}(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\} \quad (\text{II.15})$$

- 4- **Coupe de niveau,  $\alpha\text{-cut}(A)$**  : pour toute valeur  $\alpha$  de  $[0,1]$ , la coupe de niveau  $\alpha$  d'un sous-ensemble flou  $A$  de  $X$  est définie par le sous-ensemble :

$$\alpha\text{-cut}(A) = \{x \in X / \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (\text{II.16})$$



**Figure (II.11)** : Quelques propriétés des sous-ensembles flous.

- 5- **Sous-ensemble flou convexe** : un sous-ensemble flou sera convexe s'il vérifie :

$$\forall x_1, x_2, x_3 \in X \text{ si } x_1 \leq x_2 \leq x_3 \text{ alors } \mu_A(x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_3)) \quad (\text{II.17})$$

Pour l'application de la commande floue, on utilisera surtout des sous-ensembles flous convexes.

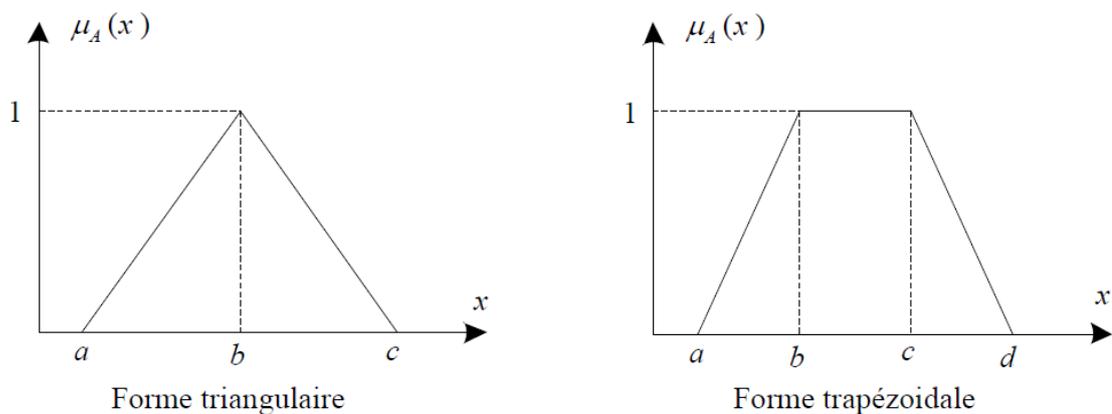
6- **Partition flou** : on définit na sous-ensembles flous ( $A_i$ ) de X. ( $A_1, A_2, \dots, A_{na}$ ) est appelée une partition floue de X si la condition (II.17) est satisfaite:

$$\forall x \in X, \sum_{i=1}^{na} \mu_{A_i}(x) = 1 \quad (\text{II.18})$$

### II.4.3. Différentes formes des fonctions d'appartenance [12]

Le plus souvent, on utilise pour les fonctions d'appartenance des formes trapézoïdales ou triangulaires.

Il s'agit des formes les plus simples, composées par morceaux de droites. L'allure est complètement définie par 3 points a, b et c pour la forme triangulaire, voire 4 points a, b, c et d pour la forme trapézoïdale, figure (II.12). Dans la plupart des cas, en particulier pour le réglage par logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous. Cependant, il existe d'autres formes possibles comme la forme de cloche (Gaussienne) et la Monotones croissantes ou décroissantes. La forme rectangulaire est utilisée pour représenter la logique classique.



**Figure (II.12)** : Formes usuelles des fonctions d'appartenance

Le degré d'appartenance associé à la forme triangulaire est défini par l'une des expressions suivantes :

$$\mu_A = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{si } x \in [a, b] \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{si } x \in [b, c] \\ 0 & \text{si } x \text{ est ailleurs} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Ou :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \tag{II.20}$$

Le degré d'appartenance associé à la forme trapézoïdale est défini par l'une des expressions suivantes :

$$\mu_A = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{si } x \in [a, b] \\ 1 & \text{si } x \in [b, c] \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } x \in [c, d] \\ 0 & \text{si } x \text{ est ailleurs} \end{cases} \tag{II.21}$$

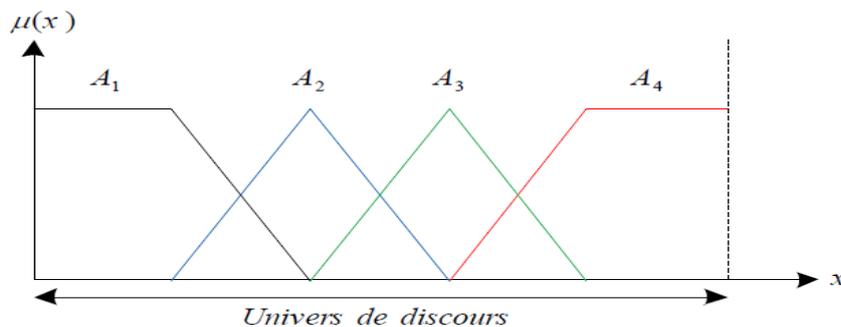
Ou :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \tag{II.22}$$

Il est alors possible d'associer aux variables linguistiques des coefficients d'appartenance à des sous-ensembles flous prenant des valeurs dans l'intervalle [0, 1] et quantifiant l'incertitude sur la variable.

Un évènement certain pour la variable se traduira par un coefficient d'appartenance au sous-ensemble flou égal à "1" alors que la valeur sera inférieure à "1" en présence d'incertitude. Il vient alors qu'une valeur nulle pour un coefficient d'appartenance indique que la possibilité d'appartenance au sous-ensemble sélectionné de la variable représentant la grandeur concernée est complètement rejetée.

L'univers de discours d'une variable x, c'est-à-dire son domaine de variation, peut alors être divisé en plusieurs sous-ensembles au moyen de fonctions d'appartenance (Ai), comme illustré sur la figure (II.13) avec des fonctions d'appartenance triangulaire.



**Figure (II.13) :** Répartition des fonctions d'appartenance.

Pour chaque valeur de la variable considérée, des degrés d'appartenance à chacun des sous-ensembles flous vont être définis. Notons que les fonctions d'appartenance se chevauchent et que ce chevauchement est tout à fait logique. En effet, le passage de la variable floue caractérisée par la fonction d'appartenance  $A_2$  à la variable floue caractérisée par  $A_3$  ne s'effectue pas brutalement, mais progressivement. Cette propriété est d'un grand intérêt pour la stabilité des systèmes commandés à base de la logique floue.

#### II.4.4. Opérateurs

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences par des opérateurs flous.

Parmi ces opérateurs, on présente les plus utilisés :

##### II.4.4.1. Intersection et union des sous-ensembles flous

L.A.Zadeh a proposé en 1965, [38] les opérateurs min et max pour respectivement l'intersection (ET) et l'union (OU). Nous présentons d'abord ces deux opérateurs et nous donnerons par la suite les propriétés générales que doivent posséder ces opérateurs.

L'union de deux sous-ensembles flous  $A$  et  $B$  s'écrit comme suit :

$$\forall x \in X, \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II.23})$$

L'intersection de  $A$  et  $B$  est définie par :

$$\forall x \in X, \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II.24})$$

##### II.4.4.2. Complément d'un sous-ensemble flou

Dans la logique floue cet opérateur peut être appelé aussi (NON, Négation ou Inverse), et défini par des fonctions d'appartenance de la manière suivante :

$$\forall x \in X, \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{II.25})$$

Contrairement aux sous-ensembles classiques, le complément ne vérifie pas la propriété du tiers exclus ( $A \cap \bar{A} = \emptyset$ ), ni la propriété de la non contradiction ( $A \cup \bar{A} = X$ ), comme l'illustre la figure (II.14) pour les opérations *min* et *max*.

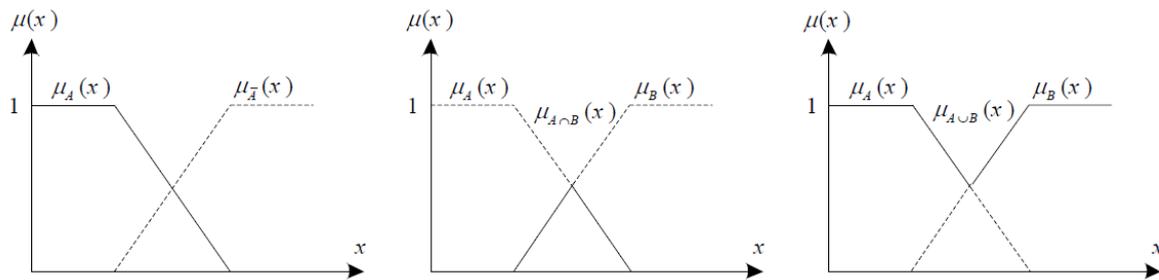


Figure (II.14) : Opérateurs de complément, intersection et union

#### II.4.5. Inférences flous

Nous allons détailler dans cette section comment, à partir d'une règle du type "Si ... alors", il est possible d'effectuer une déduction. Ce mécanisme, appelé inférence, est bien connu en logique classique sous le nom modus ponens et modus tollens, [39] selon le mode de déduction. Ces deux modes de déduction sont généralisés dans le cadre de la logique floue.

Nous ne développons ici que la généralisation du modus ponens proposé par L. A. Zadeh et utilisée en commande floue. Souvent la commande floue a recours à des règles de type :

$$R: \text{si } x_1 \text{ est } A_1 \text{ et } x_2 \text{ est } A_2 \text{ alors } y \text{ est } B \quad (\text{II.26})$$

Pour un problème d'asservissement, la variable  $x_1$  représente l'erreur entre la référence et la mesure de la grandeur commandée et  $x_2$  la variation de l'erreur.

Dans le cas d'une base de règles (tableau), chacune des règles donne une caractérisation pour la sortie ou la variable de commande dans le cas de la commande floue. Il est donc nécessaire d'effectuer une synthèse de toutes ces règles pour parvenir à prendre une décision. Soit  $R_k$ , la  $k^{\text{ième}}$  règle d'une base de  $Nr$  règles s'exprime par :

$$R_k: \text{si } x_1 \text{ est } A_{1k} \text{ et } x_2 \text{ est } A_{2k} \text{ alors } y \text{ est } B_k \quad (\text{II.27})$$

L'influence de chaque règle est caractérisée par une inférence et donne un sous-ensemble flou  $B_k$  ayant comme fonction d'appartenance  $\mu_{B_k}(y)$ . Pour obtenir une décision prenant en compte toutes les règles.

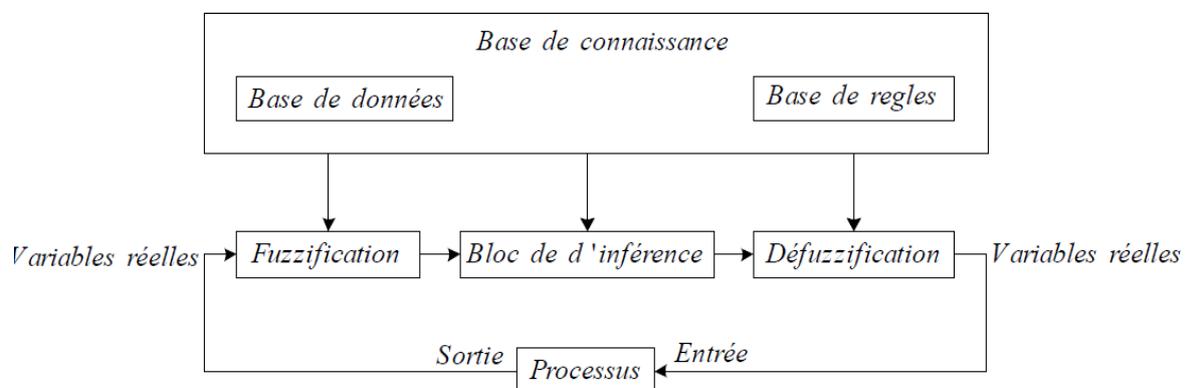
## II.5. Présentation d'un régulateur par logique floue

L'idée centrale de la commande par logique floue est la règle de commande linguistique. Cette règle peut prendre plusieurs formes, cependant elle indique invariablement quelle action de commande prendre face à une condition donnée. Ces actions de commandes peuvent avoir la forme : « augmenter le courant », « diminuer de beaucoup la tension », et les conditions peuvent avoir la forme : « si l'erreur de tension est assez grande », « si l'erreur de courant est très petite ». Les mots clés ici sont « assez grande », « beaucoup » et « très petite », ils correspondent à des informations imprécises mais utiles et dans la théorie de la logique floue, ils sont représentés par un sous-ensemble flou d'un certain univers de discours. Une règle de commande est une combinaison d'une condition et d'une action. Plusieurs règles sont nécessaires pour la construction d'un contrôleur à logique floue, ces règles forment un algorithme. La forme générale d'une règle de commande floue est de :

SI l'erreur est ... ET la variation de l'erreur est ... Alors la variation de la sortie est.....(II.28)

### II.5.1. Eléments de base d'un contrôleur flou

Le schéma général d'un régulateur flou est donné par la figure (II.15) :



**Figure (II.15) :** Schéma synoptique général d'un contrôleur flou

Nous procédons tout d'abord à la partition en sous-ensembles flous des différents univers de discours que le système impose. Ensuite nous déterminons la base de règles qui va caractériser le fonctionnement désiré en variables floues. Cette étape est appelée la fuzzification. Les variables sont utilisées dans un mécanisme d'inférence qui crée et détermine les variables floues de sortie en utilisant des opérations sur les fonctions d'appartenance.

---

### II.5.1.1. Interface de fuzzification [38]

C'est une opération qui consiste à transformer les données numériques  $X$  d'un phénomène à des valeurs linguistiques, ces données sont réduites à des grandeurs normalisées  $x$  sur un domaine normalisé pour faciliter le calcul. A partir de ces domaines numériques appelés univers de discours, souvent  $[-1, 1]$ , qui peut être soit discret, soit continu. Bien souvent, cet univers de discours est borné, en appliquant une limitation sur la valeur numérique de  $|x| \leq 1$ , pour pallier le problème des grandes variations de  $X$ . Les gains de normalisation caractérisent des facteurs d'échelles d'entrée  $x$  et  $X$ . Pour chaque grandeur d'entrée ou de sortie, on peut calculer les degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous de la variable linguistique correspondant. Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, non symétriques et équidistantes ou non équidistantes. Il faut éviter les chevauchements trop importants et les lacunes entre les fonctions d'appartenance de deux ensembles voisins. En effet, cela provoque des zones de non intervention du régulateur (zones mortes), ce qui conduit le plus souvent à une instabilité de réglage. En général, on introduit pour une variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous représentés par des fonctions d'appartenance. Le choix du nombre d'ensembles dépend de la résolution et de l'intervention du réglage désirée.

### II.5.1.2. Base de connaissance

La base de connaissance est composée de deux blocs :

- La base de données qui fournit les définitions nécessaires utilisées pour définir les règles de contrôles linguistiques et la manipulation des données floues dans le contrôleur ;
- La base de règles qui caractérise les buts et stratégies de commande émis par les experts du domaine au moyen d'un ensemble de règles linguistiques du contrôle.

### II.5.1.3. Interface de défuzzification

Le résultat de l'agrégation des règles d'inférence s'exprime sous forme d'une fonction d'appartenance  $\mu_B(y)$ . Cette quantité correspond à un sous-ensemble flou et ne représente pas une grandeur réelle. Néanmoins, en commande floue, les actionneurs commandés ne s'accrochent généralement pas avec ce type de grandeur. Il convient alors de la transformer en une valeur de commande précise réelle. C'est le but de la défuzzification. Comme pour toutes les opérations utilisées et utilisables en commande floue, cette étape de

défuzzification peut être envisagée avec différentes méthodes. Parmi ces méthodes, seules les plus couramment utilisées seront présentées ici.

### II.5.1.3.1. Méthode du centre de gravité

Le centre de gravité de la fonction d'appartenance  $\mu_B(y)$  est calculé simplement pour obtenir la commande réelle  $u$ . On obtient alors :

$$u = \frac{\int y \mu_B(y) dy}{\int \mu_B(y) dy} \quad (\text{II.29})$$

Dans le cas d'un univers discret l'équation (II.29) s'écrit :

$$u = \frac{\sum_{q=1}^{N_q} \mu_B(y_q) y_q}{\sum_{q=1}^{N_q} \mu_B(y_q)} \quad (\text{II.30})$$

Où :  $N_q$  est le nombre d'intervalles de quantification de la fonction  $\mu_B(y)$  ;  $y_q$  est l'abscisse du centre de fonction d'appartenance.

### II.5.1.3.2. Méthode de maximum et de moyenne des maximums [34]

Cette méthode est beaucoup plus simple. La valeur de sortie est choisie comme l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance. Le principe de cette méthode réside dans le choix de l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante. Cependant cette méthode présente un inconvénient. Lorsque l'abscisse de la valeur maximale est limitée entre deux valeurs  $x_1$  et  $x_2$ ; toutes les valeurs comprises entre ces deux limites peuvent être utilisées. Cette méthode n'est donc pas recommandable pour le réglage par logique floue. Pour remédier cette inconvénient, on utilise la méthode de moyenne des maximums, cette méthode génère une commande précise en calculant la moyenne des valeurs pour lesquelles l'appartenance est maximale. Sa relation est donnée par :

$$u = \frac{\sum_{k=1}^m y_k}{m} \quad (\text{II.31})$$

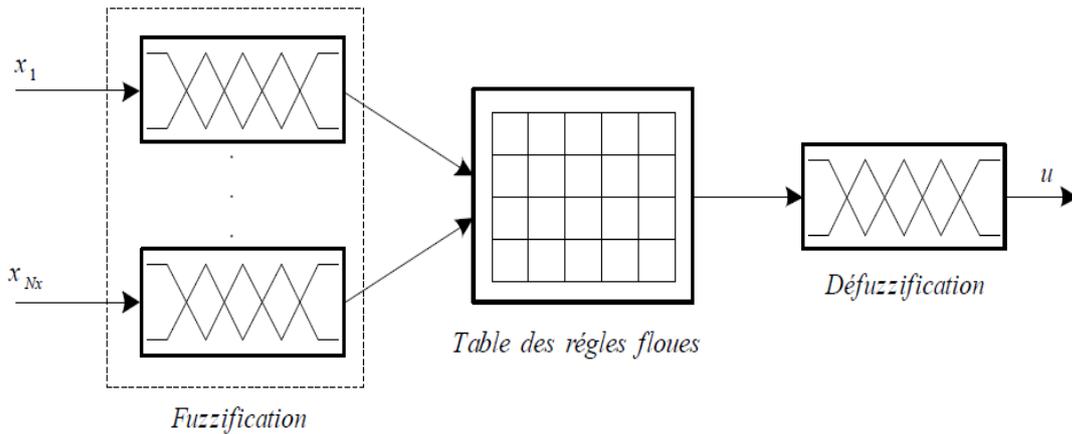
Où  $m$  est le nombre de valeurs quantifiées  $y_k$  pour lesquelles l'appartenance est maximale.

**II.5.2. Contrôleur de Mamdani**

Nous allons examiner dans ce qui suit le principal type de contrôleur flou, celui de Mamdani. Ce type de contrôleur a été présenté dans une application floue [41] et a la forme générale suivante pour  $N_x$  entrées :

$$R_k: \text{si } x_1 \text{ est } A_{1k} \text{ et } \dots \dots \text{ et } x_{N_s} \text{ est } A_{N_s} \text{ alors } y \text{ est } B_k \tag{II.32}$$

Un synoptique de ce type de contrôleur est représenté sur la figure (II.16).

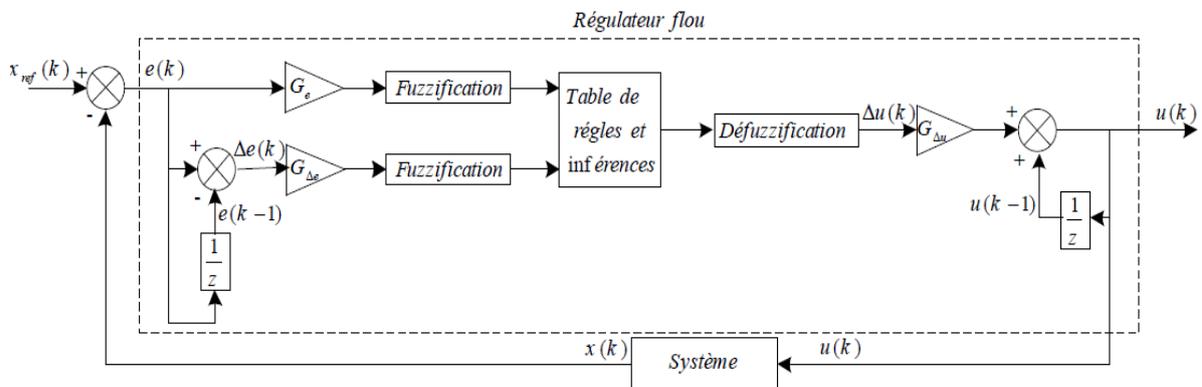


**Figure (II.16) :** Contrôleur de Mamdani

Souvent, la commande floue possède comme variables d'entrées l'écart  $e$  entre la variable à contrôler et sa référence ainsi que sa variation  $\Delta e$ . On se sert de l'opérateur "min" pour le "et" et l'implication "alors", le "max" pour l'agrégation des règles "ou". Le type d'inférence obtenu est connu sous le nom de "min-max".

**II.5.2.1. Structure du contrôleur flou**

La structure du contrôleur flou FLC (Fuzzy Logic Controller) proposée par Mamdani pour un système simple a une seule entrée et une seule sortie est présentée par la figure (II.17) représente sa structure interne



**Figure (II.17) :** Structure interne du contrôleur flou proposé par Mamdani

Les deux grandeurs d'entrée sont discrétisées avec une période d'échantillonnage de  $T_e$  et normalisées au moyen de gains de normalisation ( $G_e$  pour l'erreur et  $G\Delta e$  pour la variation de l'erreur). Elles sont définies par les expressions suivantes :

- L'erreur de réglage de la grandeur à contrôler est définie par l'écart :

$$e(k) = x^*(k) - x(k) \quad (\text{II.33})$$

- La variation incrémentale de l'erreur de réglage est définie par :

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (\text{II.34})$$

La sortie du contrôleur flou est la variation de la grandeur de sortie. La nouvelle grandeur, ajustée à chaque instant d'échantillonnage, est définie par l'équation de récurrence ci-dessous

$$u(k) = u(k - 1) + G_u \Delta_u(k) \quad (\text{II.35})$$

Avec :

- $\Delta_u$  : La variation de l'erreur.

Où  $G_u$  est un gain de dénormalisation de la grandeur de sortie. Les trois gains permettent d'agir de façon globale sur la surface de commande en élargissant ou réduisant l'univers de discours de la grandeur de commande.

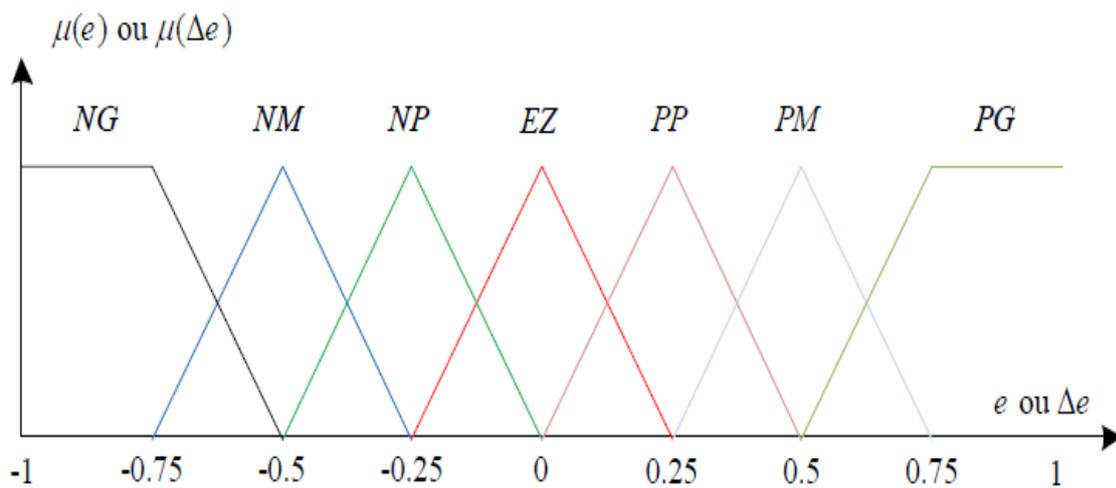
### II.5.2.2. Caractéristiques principales du contrôleur flou utilisé

Les caractéristiques principales du contrôleur flou utilisé dans ce travail sont les suivantes

- a. La fuzzification avec un univers de discours continu  $[-1,1]$ .
- b. Implication utilise l'inférence min-max de Mamdani.
- c. Sept ensembles flous pour l'erreur et pour sa variation définie par des fonctions d'appartenances triangulaires comme suit :

- $NG_{e,\Delta e} = \max(\min(1, -(x+b)/(c-b)), 0)$  ; " **Négatif Grand** ".
- $NMe_{,\Delta e} = \max(\min((x+c)/(c-b), -(x+a)/(b-a)), 0)$  ; " **Négatif Moyen** ".
- $NPe_{,\Delta e} = \max(\min((x+b)/(b-a), -x/a), 0)$  ; " **Négatif Petit** ".
- $EZe_{,\Delta e} = \max(\min(1+(x/a), 1-(x/a)), 0)$  ; " **Egal à Zéro** ".
- $PPe_{,\Delta e} = \max(\min(x/a, (b-x)/(b-a)), 0)$  ; " **Positif prtit** ".
- $PMe_{,\Delta e} = \max(\min((x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)), 0)$  ; " **Positif Moyen** ".
- $PGe_{,\Delta e} = \max(\min((x-b)/(c-b), 1), 0)$  ; " **Positif Grand** ".

Avec :  $a=0.25, b=0.5, c=0.75$  ;  $x \in [-1, 1]$  : prend soit  $e$  ou  $\Delta e$



**Figure (II.18)** : Répartition des fonctions d'appartenances choisies.

d. La base de règles est calculée selon le tableau (II.1).

		e						
		NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
Δe	NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	EZ
	NM	NG	NM	NM	NM	NP	EZ	PP
	NP	NG	NM	NP	NP	EZ	PP	PP
	EZ	NM	NM	NP	EZ	PP	PM	PM
	PP	NP	NP	EZ	PP	PP	PM	PM
	PM	NP	EZ	PP	PM	PM	PM	PG
	PG	EZ	PP	PM	PG	PG	PG	PG

**Tableau (II.1)** : Table de règles floues.

Le tableau (II.1) donne l'ensemble de règles floues utilisées dans la conception de ce contrôleur. La perception humaine de la commande des systèmes est ainsi traduite, c'est-à-dire que lorsque la valeur de la grandeur commandée est éloignée de la référence et qu'elle continue à s'en éloigner, une très forte variation va être appliquée à la grandeur de commande. Au contraire, au voisinage de la référence, la variation sera moindre. Il est donc aisé d'introduire la non linéarité de la commande. Le tableau permet d'agir très localement sur la surface de commande et donc une variation de l'un de ses paramètres n'aura qu'une répercussion locale sur la réponse globale. De plus, le nombre de paramètres à régler ici est très important ( $7 \times 7 = 49$  paramètres). Le correcteur sera donc réglé par rapport aux degrés de liberté sur les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de la variable de sortie, qui ont une influence globale, ce qui permet de limiter le nombre de variables du contrôleur.

e. La défuzzification par centre de gravité présentée précédemment, est adoptée :

$$\Delta u = \frac{\sum_{q=1}^7 \mu_{\Delta u q} x_{Gq}}{\sum_{q=1}^7 N_{\Delta u q}} \quad (\text{II.36})$$

Où :

- $\mu_{\Delta u q}$  : est la degré d'appartenance de la prémisse ou de la condition de la  $q^{\text{ème}}$  règle.
- $x_{Gq}$  : est l'abscisse du centre de gravité de la surface  $S_q$ .
- $S_q$  : est l'aire de la fonction d'appartenance de la sortie en liaison avec la  $q^{\text{ème}}$  règle, elle ne dépend pas des entrées.

### II.5.3. Application du contrôleur flou au STATCOM

Après avoir vu le fondement théorique de la commande par logique floue, nous nous intéressons ici à son application sur le STATCOM. La commande de ce dispositif doit permettre la régulation de la tension du bus continu vdc, ainsi que la régulation des courants actif et réactif injecté dans le réseau. On a remplacé les régulateurs classiques de type PI par des régulateurs flous FLC.

Le schéma bloc de la structure de commande par régulateurs flous d'un STATCOM est illustré par la figure (II.19)

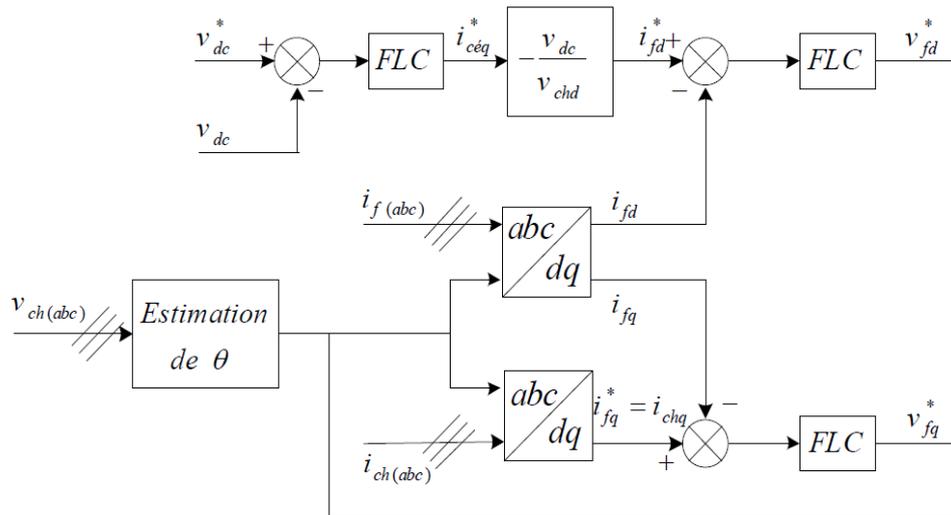


Figure (II.19) : Régulation de la tension continu par un PI flou.

### II.5. Modélisation de la partie série de l'UPFC [43]

Comme il est représenté sur la figure (II-10), la structure de cette partie est identique à celle de la partie parallèle. Le bus de la tension continue est le même. Pour le côté alternatif de cette partie, le transformateur de couplage est composé de trois transformateurs monophasés élévateurs.

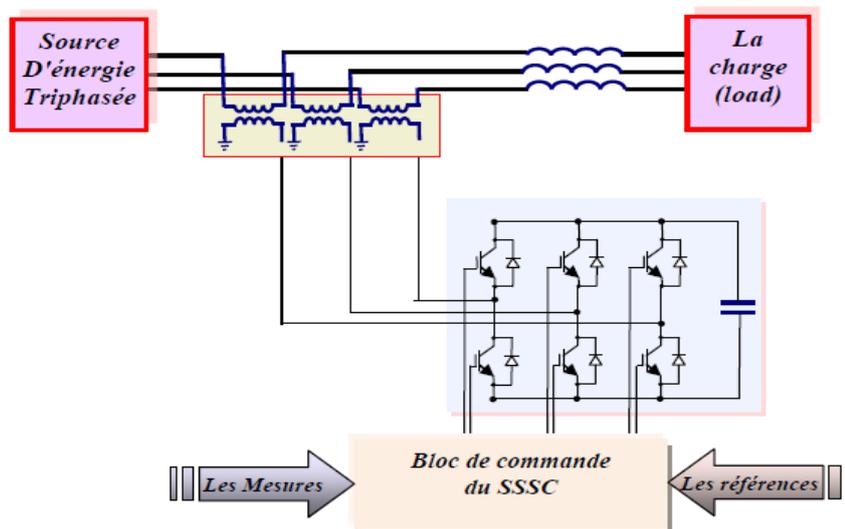
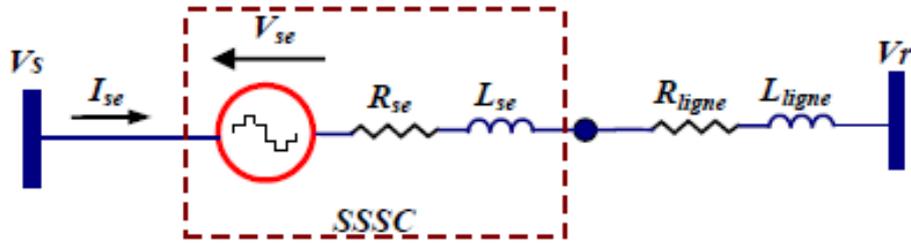


Figure (II.20) : Structure de base d'un SSSC couplé au réseau



**Figure (II.21)** : Schéma équivalent de l'SSSC.

Le courant dans la ligne dépend en premier de la différence du potentiel des deux extrémités de la ligne et en second de la tension série injectée, L'équation vectorielle régissant ce circuit donc est :

$$\bar{V}_s - \bar{V}_r - \bar{V}_{se} = (R_{se} + R_{ligne})\bar{I}_{se} + (L_{se} + L_{ligne}) \frac{d\bar{I}_{se}}{dt} \quad (II.37)$$

Avec :  $R_{se}$  ,  $L_{se}$  sont la résistance représentant les pertes des interrupteurs de l'onduleur et dans le transformateur de couplage, et l'inductance du transformateur série respectivement.

En passant au référentiel (d\_q) avec la transformation de Park l'équation (II.37) devient sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{rd} - V_{sed} \\ V_{sq} - V_{rq} - V_{seq} \end{bmatrix} \quad (II.38)$$

Avec :  $R = R_{se} + R_{ligne}$  ,  $L = L_{se} + L_{ligne}$

Le système d'équations différentielles (II.38) représente le modèle d'état simplifié de l'SSSC dans le référentiel synchrone (d, q) qui présente un couplage entre les deux grandeurs  $I_{sed}$  et  $I_{seq}$  par le terme  $\omega$ .

### II.5.1. Contrôle de l'SSSC [44]

La partie série de l'UPFC est utilisée pour le contrôle des puissances active et réactive transitées dans la ligne de transmission, en contrôlant l'amplitude et l'angle de phase de la tension injectée par le convertisseur série. La détermination des références est nécessaire pour la commande de cette partie. Il existe plusieurs méthodes d'identification des références. Comme pour la partie shunt on va utiliser la méthode watt-var découplé.

Les valeurs d'entrée du régulateur permettant d'obtenir une commande séparée de la puissance active  $P$  et la puissance réactive  $Q$  qui transitent dans la ligne sont :

- Les valeurs instantanées des tensions  $V_s$  et  $V_r$ .
- Le courant de la ligne  $i_r$ .
- Les valeurs de référence des puissances  $P_r^*$  et  $Q_r^*$ .

### II.5.2. Identification des références [43,45, 46]

Comme nous l'avons déjà expliquée dans le contrôle du STATCOM, la méthode Watt-Var découplé consiste à contrôler la puissance active et réactive séparément l'une de l'autre. On considérant les équations du système (II.2) nous pouvons appliquer une commande par découplage des courants  $I_{sed}$  et  $I_{seq}$  de la manière suivante :

Comme pour la partie shunt, à fin d'aboutir à une commande facile du système, on va procéder au découplage des deux composantes de courant de la ligne  $i_r$ , Pour cela on pose :

$$\begin{cases} X_1 = \frac{1}{L}(V_{sd} - V_{rd} - V_{sed}) \\ X_2 = \frac{1}{L}(V_{sq} - V_{rq} - V_{seq}) \end{cases} \quad (II.39)$$

Avec :

$$\begin{cases} X_1 = \left(K_P + \frac{K_i}{S}\right) \cdot (i_{rd}^* - i_{rd}) - \omega \cdot i_{rq} \\ X_2 = \left(K_P + \frac{K_i}{S}\right) \cdot (i_{rq}^* - i_{rq}) + \omega i_{rd} \end{cases} \quad (II.40)$$

$X_1$  et  $X_2$  étant les sorties des deux régulateurs PI des courants  $i_{sed}$  et  $i_{seq}$  respectivement.

Les valeurs des courants  $i_{sed}^*$  et  $i_{seq}^*$  sont les références des courants actif et réactif de la ligne de transmission.

En substituant les équations (II.38), et (II.39) dans le système d'équation (II.37) après avoir appliqué la transformation de Laplace, on aboutit à un système de deux équations découplées ayant les fonctions de transfert en boucle fermée suivantes :

$$F(S) = \frac{i_{sed}}{i_{sed}^*} = \frac{K_i + SK_p}{K_i + S\left(\frac{R}{L} + K_p\right) + S^2} \quad (II.41)$$

$$F(S) = \frac{i_{seq}}{i_{seq}^*} = \frac{K_i + SK_p}{K_i + S\left(\frac{R}{L} + K_p\right) + S^2} \quad (II.42)$$

Comme nous l'avons déjà montré dans la partie parallèle, le contrôle est optimal si les gains  $K_p$  et  $K_i$  sont maximaux, [43].

Le schéma bloc de la méthode watt-var découplé est représenté sur la figure (II.22).

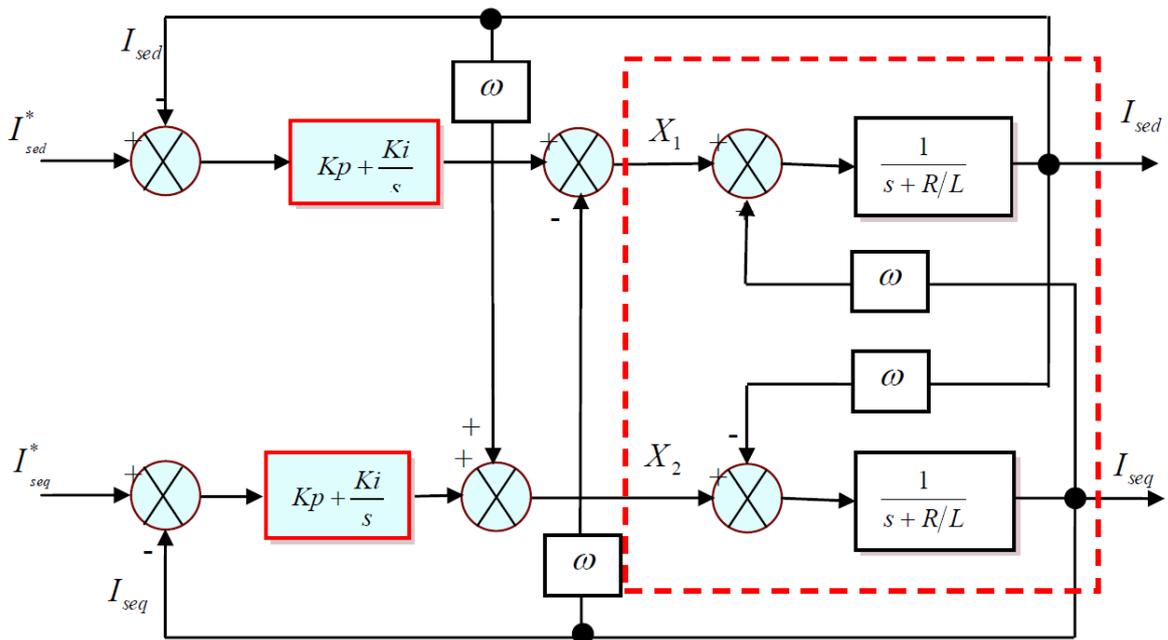


Figure (II.22) : Schéma de régulation du SSSC.

Le SSSC est installé en série pour le contrôle du flux de puissance dans la ligne de transport, en d'autre terme afin d'obtenir la puissance active et réactive désirées au jeu de barre de réception. [35- 37- 46].

Ces puissances dans l'hypothèse de la superposition de la composante  $V_{rd}$  sur l'axe q du référentiel synchrone (d,q) ( $V_{rq} = 0$  et  $V_{rd} = V_r$ ) sont exprimées par les équations suivantes :

$$P_r = \frac{3}{2} V_{rd} * I_{sed} \quad \text{et} \quad Q_r = -\frac{3}{2} V_{rd} * I_{seq} \quad (\text{II.43})$$

Les grandeurs d'entrée de cette méthode de régulation, expliquée ci-dessus, étant les courant de l'SSSC qui sont également les courants de ligne. Il est possible de calculer leurs valeurs de référence dans le repère (d,q) à partir des équations suivantes :

$$I_{sed}^* = \frac{2 P_r^*}{3 V_{rd}} \quad \text{et} \quad I_{seq}^* = \frac{2 Q_r^*}{3 V_{rd}} \quad (\text{II.44})$$

Avec :  $P_r^*$ ,  $Q_r^*$  les puissances désirés transporter par la ligne.

Les variables X1 et X2 associées au schéma de contrôle de la figure (II.22) sont utilisées pour déterminer les composantes de la tension série du convertisseur  $V_{sed}$  et  $V_{seq}$  en s'appuyant sur les équations (II.39) comme suit :

$$V_{sed} = (V_{sd} - V_{rd}) - L \cdot X1 \quad \text{et} \quad V_{seq} = (V_{sq} - V_{rq}) - L \cdot X2$$

Le schéma bloc de cette méthode de régulation est donné par la figure suivante :

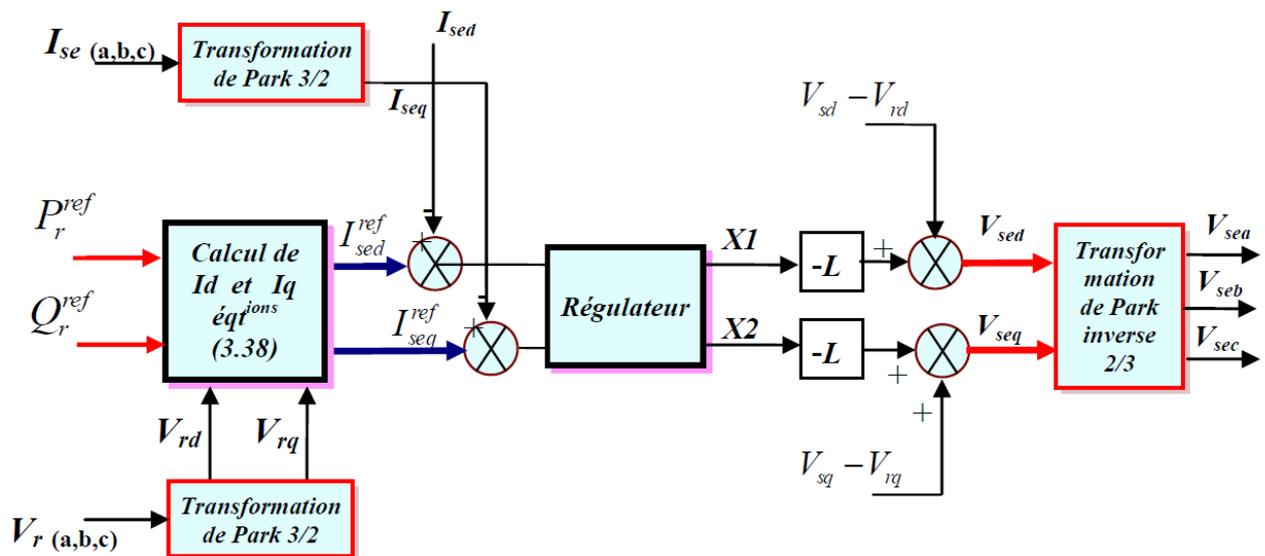
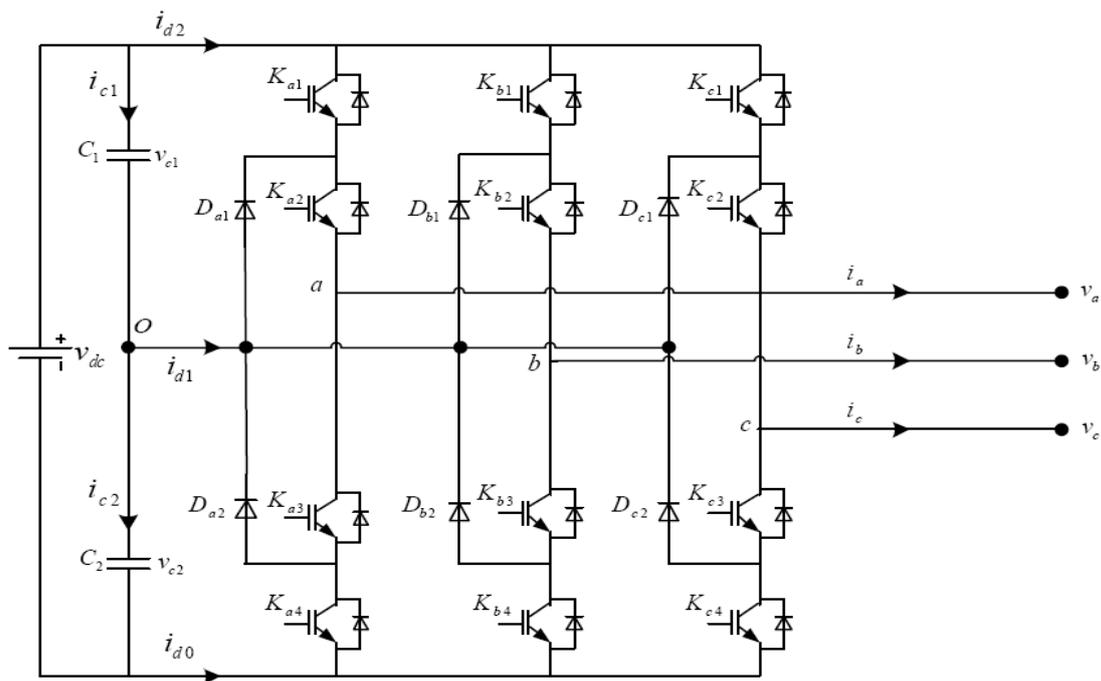


Figure (II.23) : Schéma global de contrôle l'SSSC par la méthode Watt-Var découplée.

## II.6. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux NPC [47]

La figure (II.24) représente la structure générale de l'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes, appelé aussi onduleur NPC (Neutral Point Clamped). Cette structure est composée de deux condensateurs identiques à point milieu commun notée  $o$  qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux.

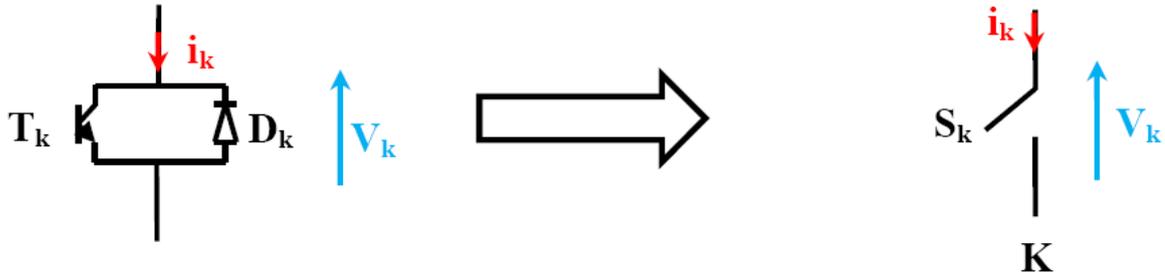
La tension totale du bus continu vaut  $v_{dc}$ , dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux condensateurs qui possèdent alors une tension  $v_{dc} / 2$ , à leurs bornes (c'est l'hypothèse que l'on retiendra dans cette section). La sortie est reliée à une charge triphasée équilibrée couplée en étoile avec un neutre isolé. L'onduleur possède trois bras  $a, b$  et  $c$ . Chacun se compose de quatre interrupteurs totalement commandables ( $K_{x1}$ ,  $K_{x2}$ ,  $K_{x3}$  et  $K_{x4}$  avec  $x$  : indice du bras) mis en série, en antiparallèles avec quatre diodes principales afin assurer la réversibilité des courants dans la charge, et deux diodes de clamp ( $D_{x1}$  et  $D_{x2}$ ) connectées au point milieu du bus continu.



**Figure (II.24) :** Structure de puissance de l'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC.

### II.6.1. Modèle de l'interrupteur bidirectionnel en courant [48]

La symétrie de l'onduleur triphasé à trois niveaux permet sa modélisation par bras, et afin de faciliter l'étude on remplace chaque paire diode-transistor par un seul interrupteur bidirectionnel en courant Figure (II.25).

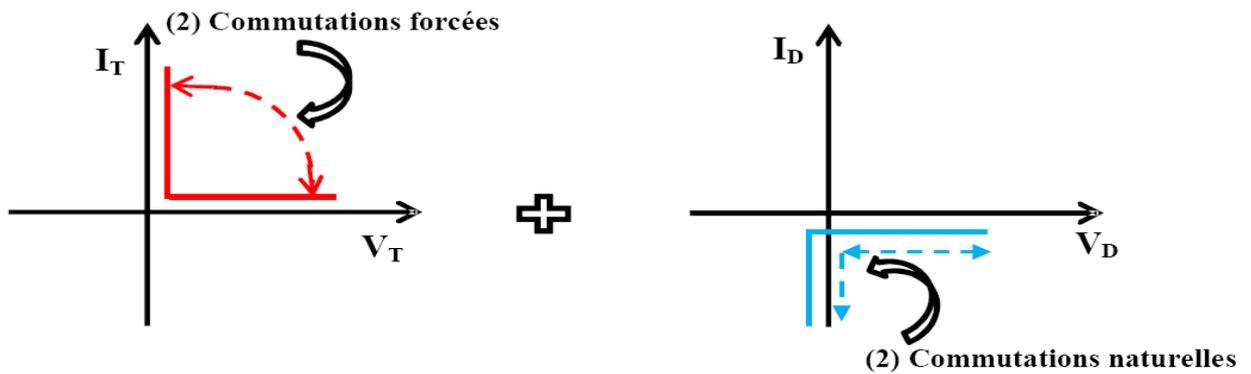


**Figure (II.25) :** Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire diode-transistor.

Avec :

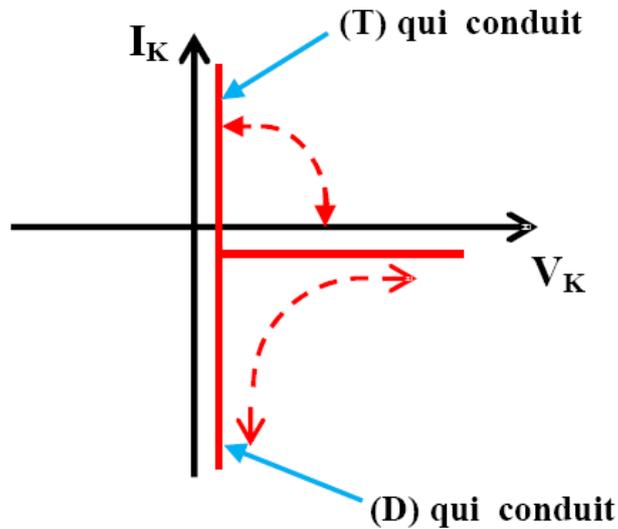
- $S_k$  la commande de l'interrupteur (K)

La synthèse de l'interrupteur bidirectionnel en courant est illustrée par les caractéristiques statiques ci-dessous.



**Figure (II.26) :** Caractéristique statique de l'interrupteur (T) et la diode (D).

La combinaison des deux caractéristiques statiques conduit à :



**Figure (II.27) :** Caractéristiques statiques de l'interrupteur bidirectionnel en courant.

On définit deux états stables pour l'interrupteur (K) :

- (1) pour l'état fermé de l'interrupteur (K).
- (0) pour l'état ouvert de l'interrupteur (K).

### II.6.2. Modèle de fonctionnement d'un bras de l'onduleur [48]

Pour décrire le fonctionnement de l'onduleur du type NPC, on étudie le comportement d'un seul bras.

La tension polaire  $V_{AM}$  entre la borne A de la charge et le point neutre M est entièrement défini par l'état des quatre interrupteurs bidirectionnels en courant (K) du bras d'onduleur, cette tension doit prendre les trois potentiels ( $-v_{dc}$ , 0,  $+v_{dc}$ ) d'où l'appellation onduleur triphasé à trois niveaux.

### II.6.3. Commandabilité d'un bras d'onduleur [49]

Afin d'avoir un fonctionnement totalement commandables qui permet à l'onduleur de délivrer les trois niveaux de tensions désirés. On doit le faire fonctionner en son mode commandables.

C'est-à-dire les transitions entre ses différentes configurations dépendant uniquement de la commande externe des transistors.

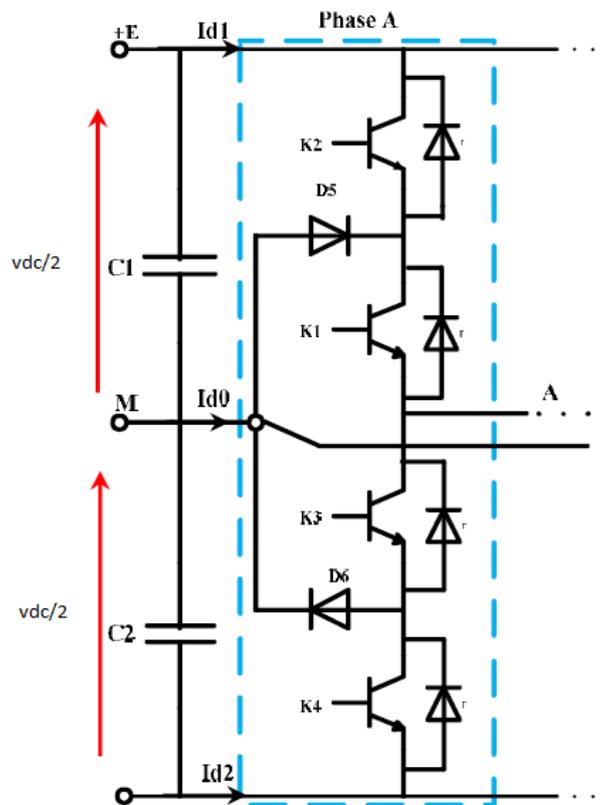
Trois commandes complémentaires peuvent être appliquées sur un bras :

$$\begin{cases} S_{k1} = \bar{S}_{k2} \\ S_{k3} = \bar{S}_{k4} \end{cases} \quad \begin{cases} S_{k1} = \bar{S}_{k3} \\ S_{k2} = \bar{S}_{k4} \end{cases} \quad \begin{cases} S_{k1} = \bar{S}_{k4} \\ S_{k2} = \bar{S}_{k3} \end{cases} \quad (II.45)$$

Cette dernière est la seule qui donne les trois niveaux de tensions  $v_{dc}$ ,  $0$ ,  $-v_{dc}$  donc qui permet le fonctionnement en mode commandables.

**II.6.4. Les différentes configurations électriques d'un bras d'onduleur à trois niveaux [33]**

Vu la symétrie de la structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux, la modélisation de ce dernier se fait par bras figure (II.28) :



**Figure (II.28) : Bras d'onduleur à trois niveaux.**

Le sens positif ou négatif des courants  $I_{d0}$ ,  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant.

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont représentées dans le tableau (III-4). (Avec  $M$  origine des potentiels et  $V_k$  le potentiel du nœud  $K$  du bras  $i$ ). Avec  $i = 1, 2, 3$

Configuration	$V_k$
<b>E<sub>0</sub></b>	Dépend de la charge
<b>E<sub>1</sub></b>	$v_k = v_{dc}$
<b>E<sub>2</sub></b>	<b>0</b>
<b>E<sub>3</sub></b>	$v_k = -v_{dc}$
<b>E<sub>4</sub></b>	<b>0</b>

**Tableau (II.2) :** Grandeurs connues pour chacune des configurations d'un bras  $k$  d'onduleur triphasé à trois niveaux.

Les configurations possibles d'un seul bras de 4 interrupteurs sont de  $2^4 = 16$  états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et 1 suivant l'état des interrupteurs  $K_1, K_2, K_3$  et  $K_4$ .

Une analyse topologique d'un bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux montre qu'il existe cinq configurations possibles en mode commandables, la figure (III-23) représente Les différentes configurations électriques possibles d'un bras d'onduleur à trois niveaux.

- **Configuration E0 :**  $(S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}) = (0 0 0 0)$

Les interrupteurs  $(K_1, K_2)$  et  $(K_3, K_4)$  sont bloqués et la tension de sortie  $v_{ao}$  est imposé par la charge, cette configuration indésirable pour la commande de l'onduleur.

- **Configuration E1 :**  $(S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}) = (1 1 0 0)$

Les interrupteurs  $(K_1, K_2)$  sont passants et  $(K_3, K_4)$  sont bloqués et la tension de sortie :  $V_{ao} = +v_{dc} = +v_{dc} / 2$ .

- **Configuration E2 :**  $(S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}) = (1 0 0 0)$

L'interrupteur  $K_1$  est passant et  $(K_2, K_3, K_4)$  sont bloqués et la tension de sortie :  $V_{ao} = 0$ .

- **Configuration E3 :**  $(S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}) = (0 0 1 1)$

Les interrupteurs ( $K_1, K_2$ ) sont bloqués et ( $K_3, K_4$ ) sont passants et la tension de sortie :  $V_{ao} = -v_{dc} = -v_{dc} / 2$ .

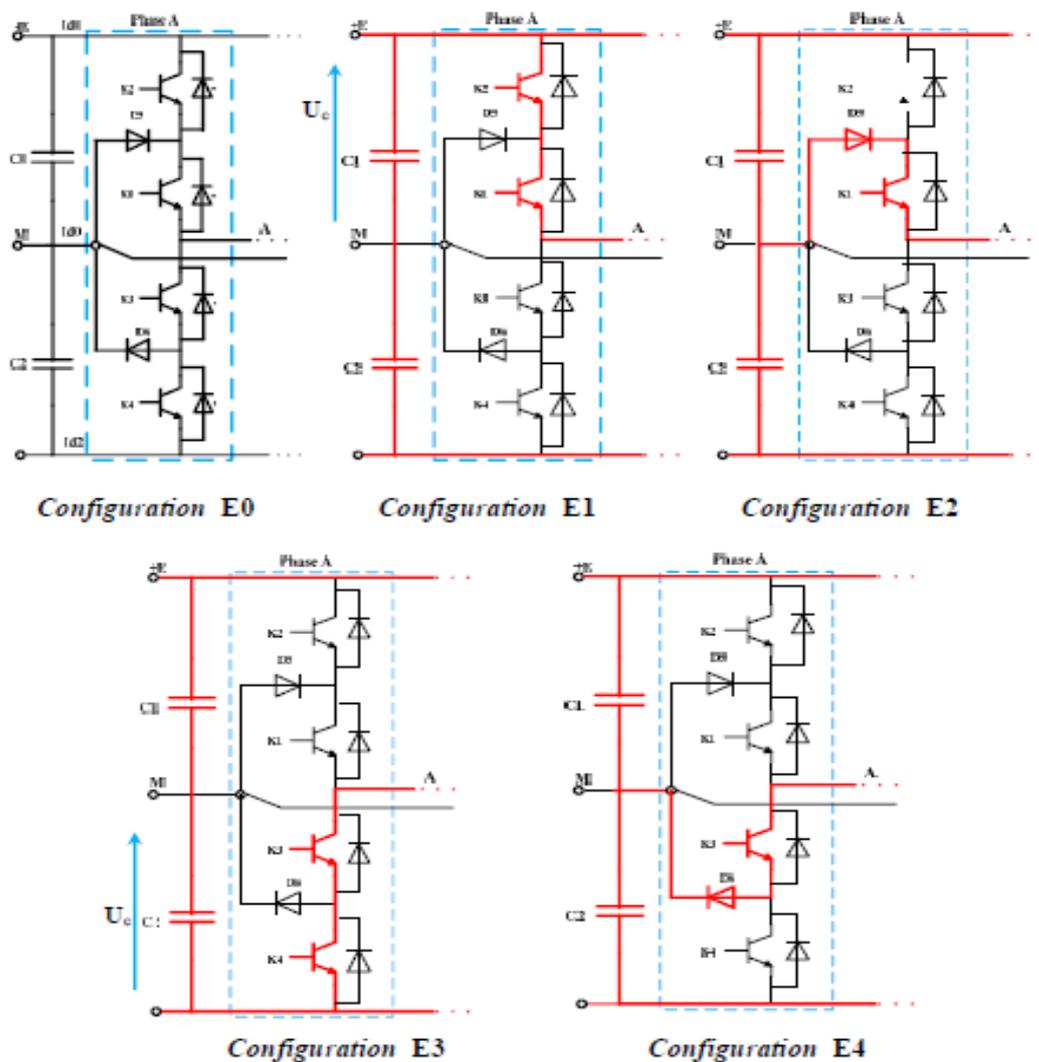
- **Configuration E4 :** ( $S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}$ ) = (0 0 1 0)

L'interrupteur  $K_3$  est passant et ( $K_2, K_1, K_4$ ) sont bloqués et la tension de sortie :  $V_{ao} = 0$ .

En effet, elles provoquent, soient, des court-circuits des sources de tension continue :

- Court-circuit de  $v_{C1}$  et de  $v_{C2}$  avec les configurations [1111] et [1001].
- Court-circuit de  $v_{C1}$  avec les configurations [1110], [1000] et [1010].
- Court-circuit de  $v_{C2}$  avec les configurations [0111], [0001] et [0101].

Soient, elles provoquent la déconnexion de la charge pour la configuration [0000]. Soient encore, elles ne permettent pas d'assurer la connexion de la charge au point neutre pour les configurations [0100] et [0010].



**Figure (II.29) :** Les différentes configurations électriques possibles d'un bras d'onduleur à trois niveaux NPC.

### II.6.5. Fonction de commutation

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion. Cette dernière décrit leurs états ouverts ou fermés. Chaque interrupteur  $K_{xi}$  est associé à une fonction de connexion  $S_{xi}$ , tel que :

$$\begin{cases} S_{xi} = 1 \text{ si } K_{xi} \text{ fermé} \\ S_{xi} = 0 \text{ si } K_{xi} \text{ ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Avec

-  $i=1,2,3,4$  : numéro de l'interrupteur du bras x

### II.6.6. Commande complémentaire des interrupteurs

Afin d'éviter la destruction des composants soit par surintensité soit par surtension lors de la fermeture ou l'ouverture simultanées des quatre interrupteurs d'un seul bras, il est indispensable de prévoir une commande complémentaire entre les interrupteurs du même bras. Cette commande complémentaire est définie comme suit :

$$S_{x(j+2)} = \bar{S}_{xj} = 1 - S_{xj} \quad (\text{II.47})$$

Nous définissons pour chaque état h du bras x une fonction de connexion. Elle est notée,  $F_x^h$ , et s'exprime au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_x^2 = S_{x1} S_{x2} \\ F_x^1 = S_{x2} \bar{S}_{x1} \\ F_x^0 = \bar{S}_{x2} \bar{S}_{x1} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

### II.6.7. Tension de sortie

L'onduleur de tension à structure NPC délivre trois niveaux de tensions ( $v_c$ , 0,  $-v_c$ ), suivant les fonctions de connexion  $F_x^2$ ,  $F_x^1$ , et  $F_x^0$ , comme illustré dans l'équation (II.49).

$$v_{xo} = \begin{cases} v_c & \text{si } F_x^2 = 1 \\ 0 & \text{si } F_x^1 = 1 \\ -v_c & \text{si } F_x^0 = 1 \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

L'équation (II.49) peut être exprimée par la forme suivante :

$$v_{xo} = v_{co}(F_x^2 - F_x^0) \quad (\text{II.50})$$

Et pour les trois tensions phases-point milieu, et  $v_{ao}$ ,  $v_{bo}$ , et  $v_{co}$ , on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = v_c \begin{bmatrix} F_a^2 - F_a^0 \\ F_b^2 - F_b^0 \\ F_c^2 - F_c^0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

Les tensions composées  $v_{ab}$ ,  $v_{bc}$ , et  $v_{ca}$ , et peuvent être exprimées par :

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ao} - v_{bo} \\ v_{bo} - v_{co} \\ v_{co} - v_{ao} \end{bmatrix} = v_c \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (F_a^2 - F_a^0) \\ (F_b^2 - F_b^0) \\ (F_c^2 - F_c^0) \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

Les tensions simples aux bornes de la charge seront données, en fonction des tensions composées puis en fonction des tensions phases-point milieu, par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{ab} - v_{ca} \\ v_{bc} - v_{ab} \\ v_{ca} - v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II.53})$$

A partir des relations (II.51) et (II.53), nous obtenons le système matriciel donnant l'expression des tensions simples aux bornes de la charge en fonction des fonctions de connexions.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{v_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (F_a^2 - F_a^0) \\ (F_b^2 - F_b^0) \\ (F_c^2 - F_c^0) \end{bmatrix} \quad (\text{II.54})$$

**II.7. Commande de l'onduleur à trois niveaux NPC**

**II.7.1. MLI classique sans injection de l'harmonique trois à deux porteuses unipolaires**

Les signaux de commande d'un bras de l'onduleur sont déterminés par la comparaison de deux porteuses triangulaires et d'une référence sinusoïdale. Les deux ondes porteuses sont définies par les équations suivantes :

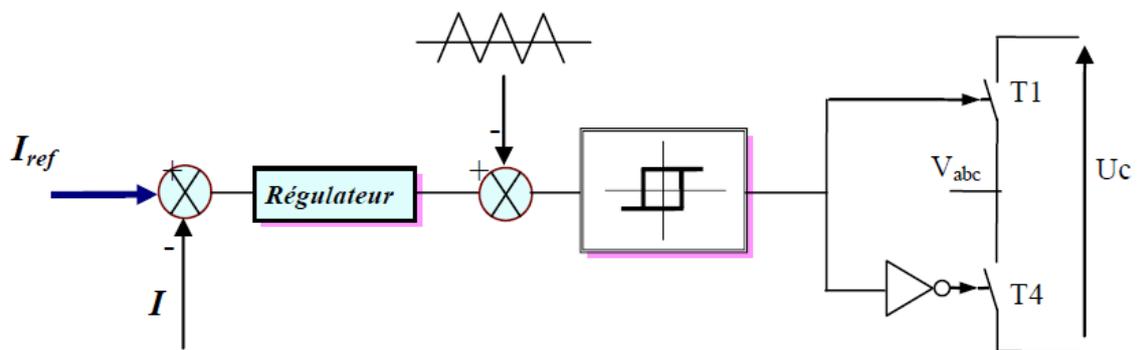
$$U_{p1} = \begin{cases} 2U_{p \max} \frac{t}{T_p} ; \text{pour } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ 2U_{p \max} \left(-\frac{t}{T_p} + 1\right) ; \text{pour } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

Et :  $U_{p2} = U_{p1} - U_{p \max}$

L'algorithme qui nous permet de réaliser cette technique de modulation est le suivant :

$$\begin{cases} \text{if } (V_{\text{réfk}} > U_p) \ \& \ (V_{\text{réfk}} > U_{p2}) \text{ then } S_{k1} = 1 \\ \text{else } S_{k1} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.56})$$

Avec :  $S_{k2} = \bar{S}_{k1}$



**Figure (II.30) :** Contrôle es onduleurs par MLI.

## II.8. Conclusion

La seconde partie est dédiée à la modélisation et la commande d'un compensateur série-parallèle UPFC, utilisé comme contrôleur universel du flux de puissance (Unified Power Flow Controller) :

- Présentation de la structure de puissance de l'UPFC et élaboration d'un schéma équivalent unifilaire.
- Modélisation du compensateur shunt : le STATCOM.
- Contrôle de la tension du bus continu par un régulateur PI classique.
- Contrôle des courants par la méthode watt-var découplé : élaboration de la référence et synthèse des régulateurs PI des courants, pour le maintien de la tension et le fonctionnement avec facteur de puissance unitaire des sources.
- Présentation de l'approche de la logique floue.
- Elaboration d'un contrôleur PI flou du type Mamdani.
- Modélisation du compensateur série : le SSSC.
- Elaboration de la commande du SSSC pour le contrôle du flux des puissances actives et réactives dans les lignes de transport et amélioration de la capacité de transit des lignes.
- Modélisation de l'onduleur de tension à trois niveaux du type NPC, commandé par MLI triangulo-sinusoidale à deux porteuses unipolaires.

***« J'admire ceux qui continuent à danser même lorsque la musique s'est  
arrêtée, car ce sont ceux qui continuent d'avancer lorsque tout espoir est  
perdu »***

***Wilson Kanadi***

## *Chapitre III*

# **Résultat de simulation de l'UPFC**

## Chapitre III :

### Résultat de simulation de l'UPFC

#### III.1. Introduction :

Une complète simulation des deux dispositifs, STATCOM et SSSC introduits dans un réseau étudié (voir annexe (A-1)) sera présentée dans ce chapitre. Cette simulation à été exécutée dans l'environnement Matlab-Simulink est basée sur les équations de fonctionnement et de commande développées dans le chapitre II. La simulation de fonctionnement de ces deux dispositifs, dans une ligne de transport d'énergie électrique, sera validée dans les deux modes de compensation capacitifs et inductifs.

#### III.2. Simulation de l'onduleur trois niveaux

##### III.2.1.MLI classique à deux porteuses unipolaires triangulaires

Les signaux de commande d'un bras de l'onduleur sont déterminés par la comparaison de deux porteuses triangulaires et d'une référence sinusoïdale (figure (III.1)).

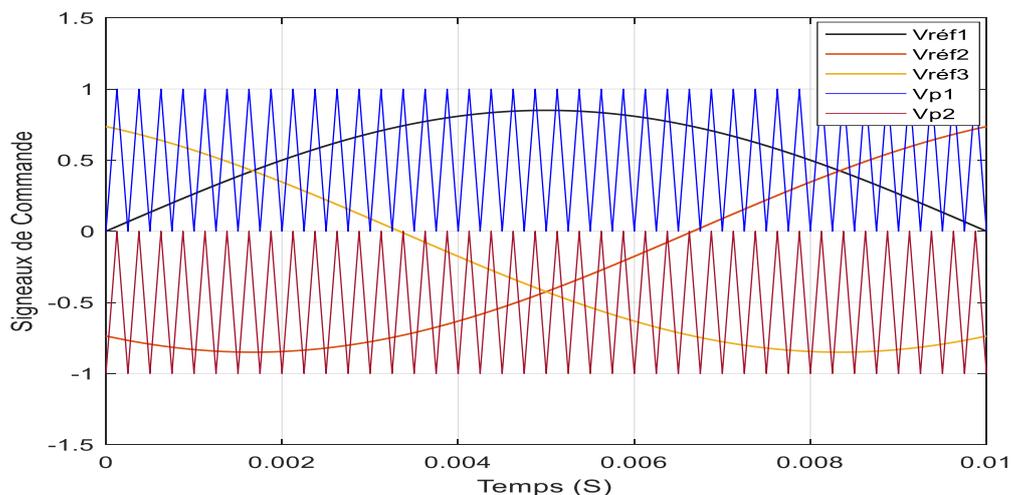


Figure (III.1) : Signaux de la commande MLI avec deux porteuses unipolaires.

III.2.2. Tension simple  $V_{an}$

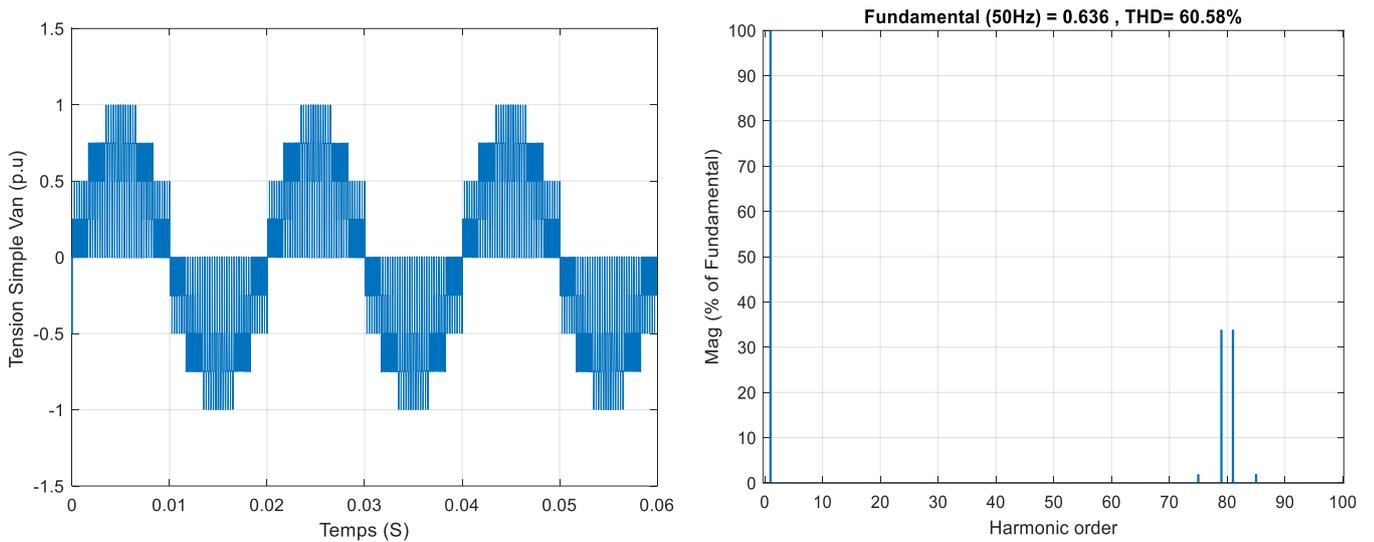


Figure (III.2) : Tension simple et sons Spectre harmonique  $V_{an}$  (p.u) pour  $r = 0.85$  et  $m= 40$

III.2.3. Tension composé  $V_{ab}$

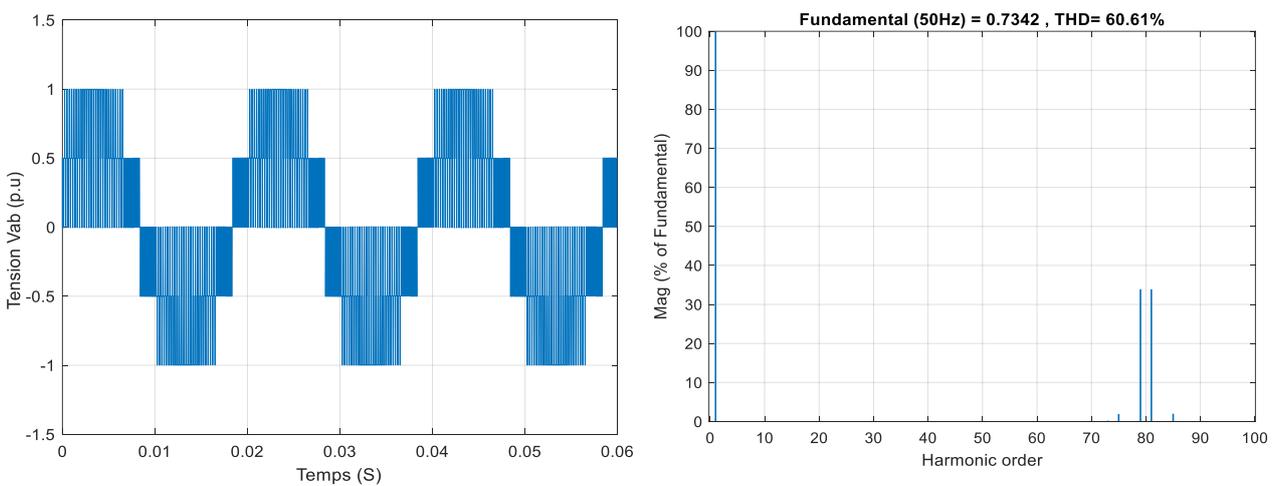
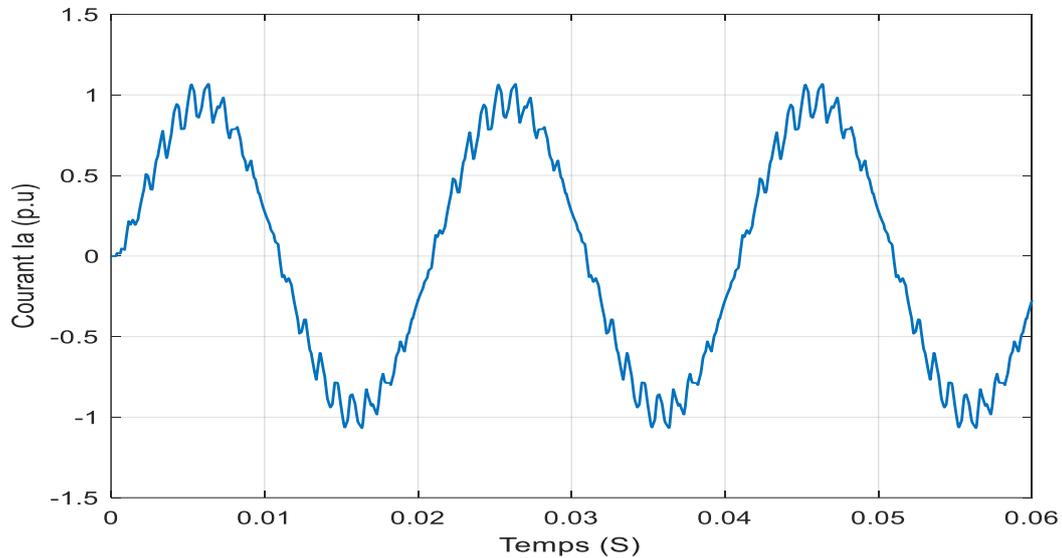


Figure (III.3) : Tension composée et son Spectre harmonique  $V_{ab}$  (p.u) pour  $r = 0.85$  et  $m= 40$

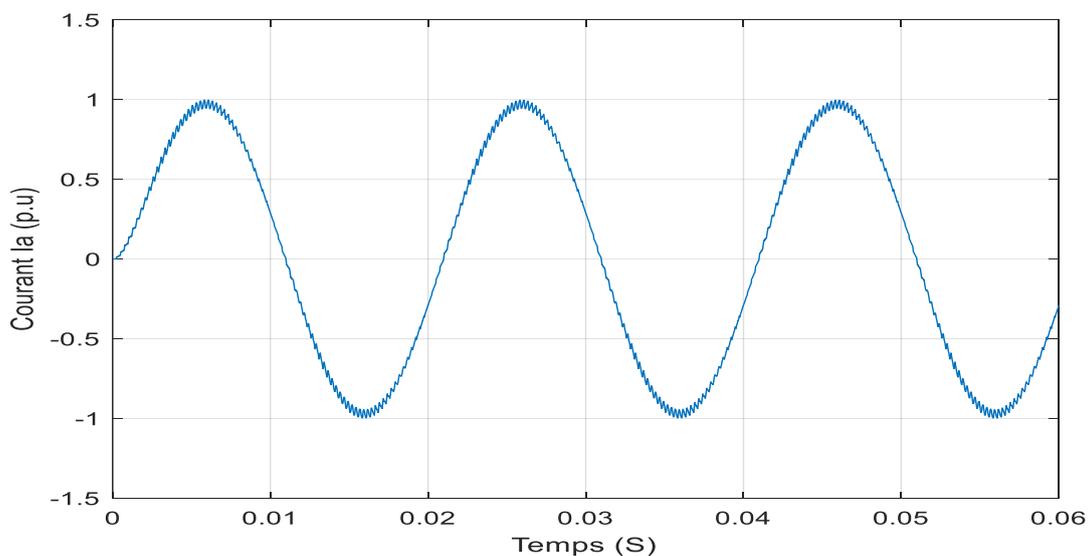
Les figures (III.2) et (III.3), représentent les tensions simple et composée à la sortie de l'onduleur du STATCOM et leurs spectres. Pour la tension composée on peut constater les quatre niveaux, ( $E, E/2, -E/2, -E$ ), de la tension composée, ainsi que son spectre harmonique avec un taux de distorsion harmonique THD% de 71.22% pour un coefficient de réglage ( $r = 0.8$ ) et un indice de modulation en fréquence ( $m = 40$ ). On note que pour un onduleur classique

à deux niveaux, le THD% est de l'ordre du double, ce qui présente un avantage de l'onduleur à trois niveaux.

### III.2.4. Influence de la fréquence du découpage sur le courant de phase



**Figure (III.4) :** Le courant de la phase a ( $I_a$ ) en (p.u) pour  $F_p = 1000\text{Hz}$ .



**Figure (III.5) :** Le courant de la phase a ( $I_a$ ) en (p.u) pour  $F_p = 4000\text{Hz}$

Les figures (III.4) et (III.5), représentent le courant de sortie de STATCOM, pour deux fréquences de la porteuse (1kHz, 4kHz). On constate que plus cette fréquence est élevée, l'ondulation du courant est plus faible et le courant se rapproche de la sinusoïdale. Cependant cette fréquence est limitée par la technologie des interrupteurs de puissance utilisés.

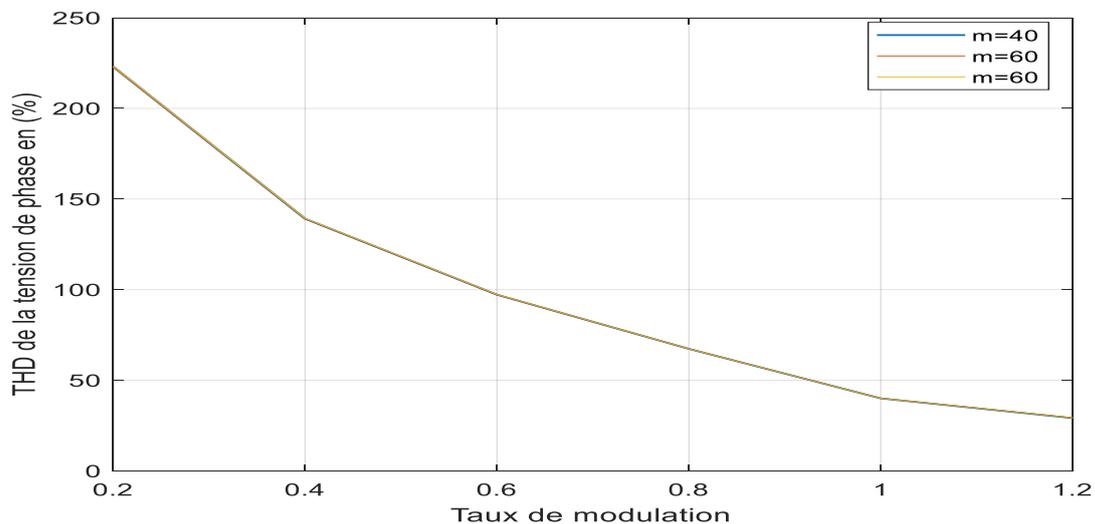
### III.2.5. Taux de distorsion harmonique [48]

L'augmentation de l'indice de modulation permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées. Cependant, la figure (III.6) montre que cette augmentation n'altère pas le taux de distorsion harmonique qui diminue plutôt en fonction de l'augmentation du taux de modulation

$$\text{THD \%} = \frac{\sqrt{\sum_2^N V_h^2}}{V_f} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Avec :

- $V_f$  : est la valeur efficace du fondamental.
- $V_h$  : est la valeur efficace de l'harmonique d'ordre h.
- $N$  : est le nombre d'harmoniques retenues, avec N est fixé à 100.

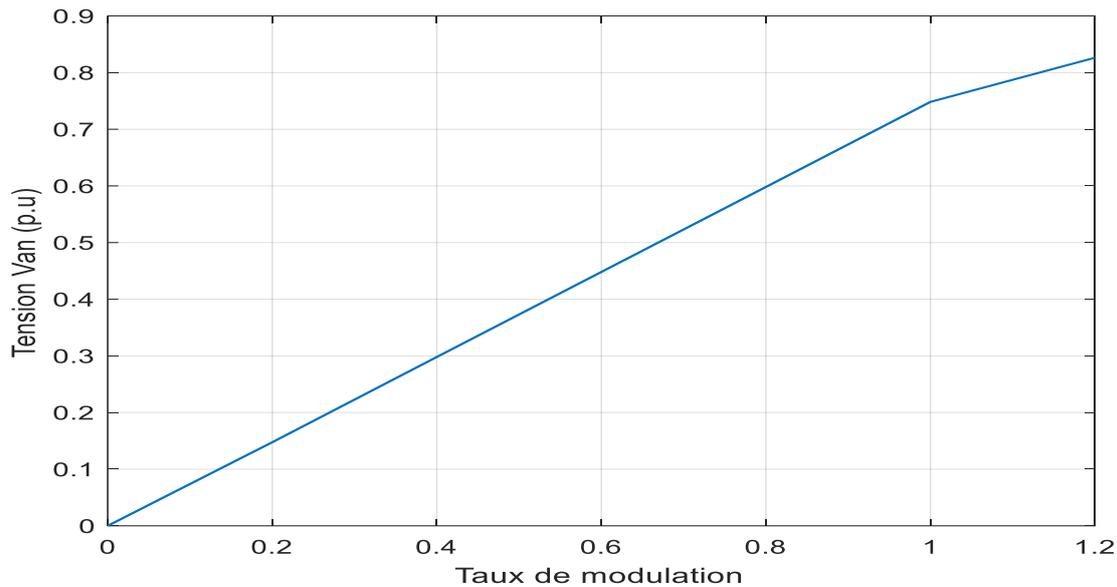


**Figure (III.6) :** Taux de distorsion harmonique de la tension de phase.

L'augmentation de l'indice de modulation permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées. Cependant, la figure (III.6) montre que cette augmentation n'altère pas le taux de distorsion harmonique qui a diminué plutôt en fonction de l'augmentation du taux de modulation.

L'utilisation des onduleurs à trois niveaux utilisé pour l'UPFC semble une solution assez intéressante. Cette figure montre que :

- L'augmentation du taux de modulation ( $r = 0 \dots 1.2$ ) permet de diminuer le THD.
- La variation de l'amplitude de l'harmonique fondamental ne dépend pas de la variation de l'indice de modulation m.



**Figure (III.7) :** Caractéristique de réglage pour  $m=40$ .

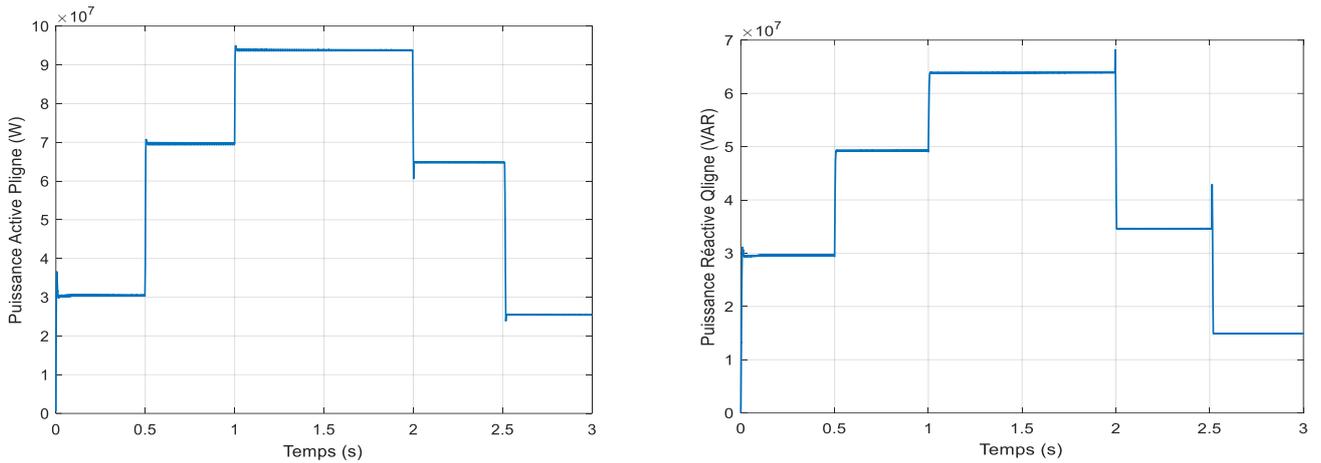
A partir de figure (III.7), il est possible de déduire que le taux de modulation permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental dans l'intervalle  $r \in [0, 1]$ .

### III.3. Simulation du réseau électrique sans compensation

Dans cette partie, on va présenter le comportement du réseau électrique, sans système de compensation, pour différents points de fonctionnement, relatifs à différentes valeurs des puissances actives et réactives transmises :

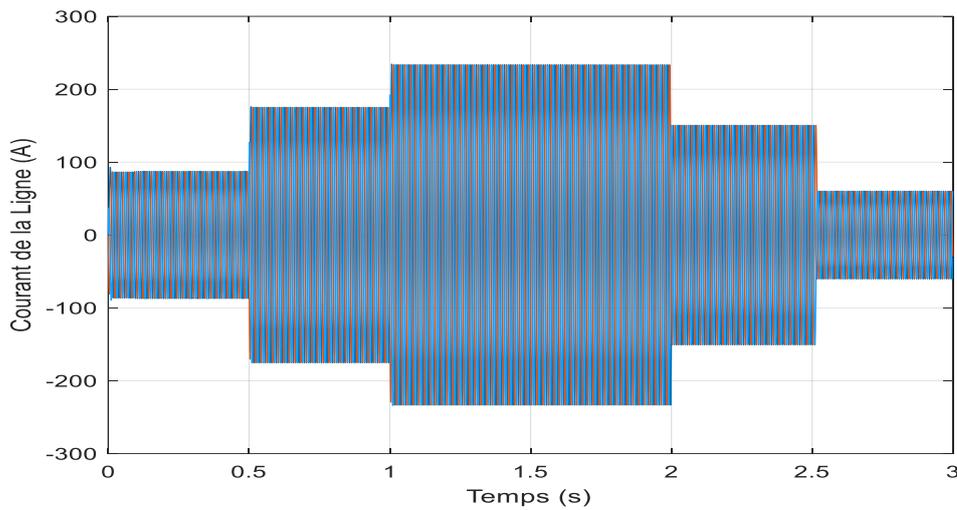
- à  $t = 0s$  ; on applique une charge de (30MW, 30MVAR).
- à  $t = 0.5s$  ; on augmente la charge à (70MW, 50MVAR).
- à  $t = 1.5s$  ; on augmente encore la charge à (95MW, 65MVAR).
- à  $t = 2s$  ; on réduit la charge à (65MW, 30MVAR).
- Et enfin à  $t = 2.5s$  ; on réduit la charge à (25MW, 15MVAR).

L'objectif de cette partie montre la nécessité d'un dispositif de compensation. Les résultats de simulations montrent les puissances actives et réactives, transmises par la ligne, les courants de ligne et les tensions de lignes.



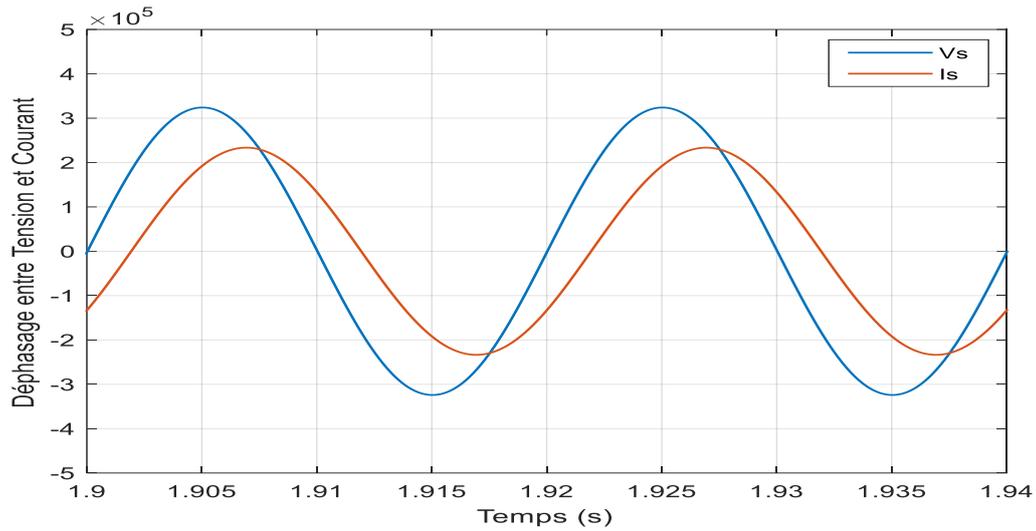
**Figure (III.8) :** Puissance active et réactive de la ligne sans compensation.

La figure (III.8), montre la puissance réactive transmise par la ligne, ce qui se traduit par un facteur de puissance non unitaire et par conséquent, la chute de tension et la réduction de la capacité de transit des lignes.



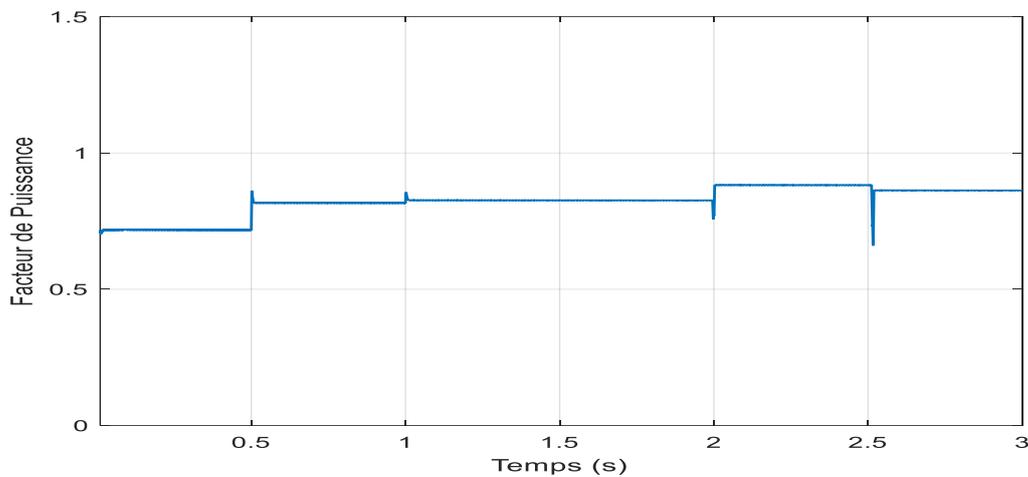
**Figure (III.9) :** Courant de la ligne.

La figure (III.9) montre que les courants suivent le profil de la puissance active.



**Figure (III.10) :** Déphasage entre la tension et le courant.

Dans la figure (III.10), on remarque le déphasage entre la tension et le courant de la source. La tension de la source est en quadrature avec le courant dû à la présence de la puissance réactive transmise dans la ligne électrique. La figure (III-11) montre le facteur de puissance pour les différentes charges appliquées.



**Figure (III.11) :** Facteur de puissance.

### III.4. Pourquoi la compensation de l'énergie réactive

#### III.4.1. Effet de puissance réactive sur les lignes.

- Appel supplémentaire de courant des lignes.

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos\varphi}$$

Si la puissance réactive augmente, le  $\sin \varphi$  diminue automatiquement le  $\cos \varphi$  aussi diminue donc le courant de la ligne augmente.

- Echauffement supplémentaire des lignes.
- Durée de vie des lignes diminue.
- Chute de tension.

$$\Delta U_L \text{ augmente} \Rightarrow \Delta P_L \text{ augment} \Rightarrow \eta_L \text{ diminue}$$

### III.4.2. Effet de puissance réactive sur le facteur de puissance

Si la puissance réactive augmente alors le facteur de puissance diminue donc :

- Mauvaise exploitation de la source.
- Le coût de l'exploitation du réseau augmente.

### III.5. Impact du STATCOM sur la qualité de l'énergie transité

Dans cette partie on va montrer l'importance du STATCOM, pour le contrôle de la tension et la compensation de la puissance réactive des lignes.

#### III.5.1 Description du réseau étudié

Le réseau est composé de d'un générateur de puissance nominale de 1000 MVA et une tension de 400 KV. La ligne de transport de réseau est de 500 Km modélisée en  $\pi$  pour chaque 100 Km. Le transformateur Tsh sert à abaisser la tension de 400 KV (tension du réseau) à 20 KV (tension d'entrée des convertisseurs), la ligne alimente une charge (L1, L2, L3) au jeu de barre 'R' (figure III-12).

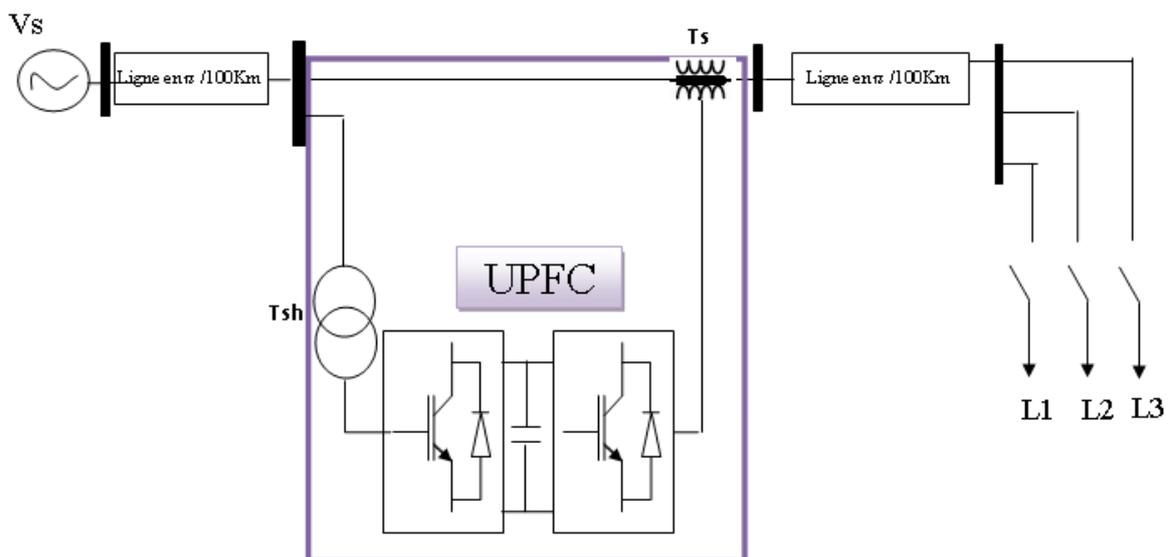


Figure (III-12) : Schéma global de réseau étudié.

III.5.2 Présentation des courants et tensions de la source

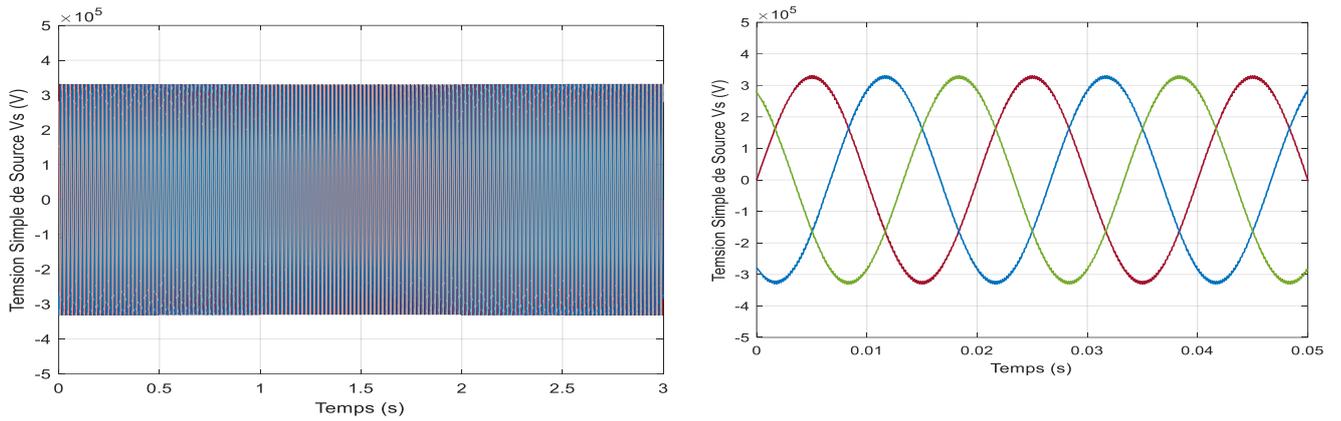


Figure (III.13) : Les tensions simples de la source Vabc.

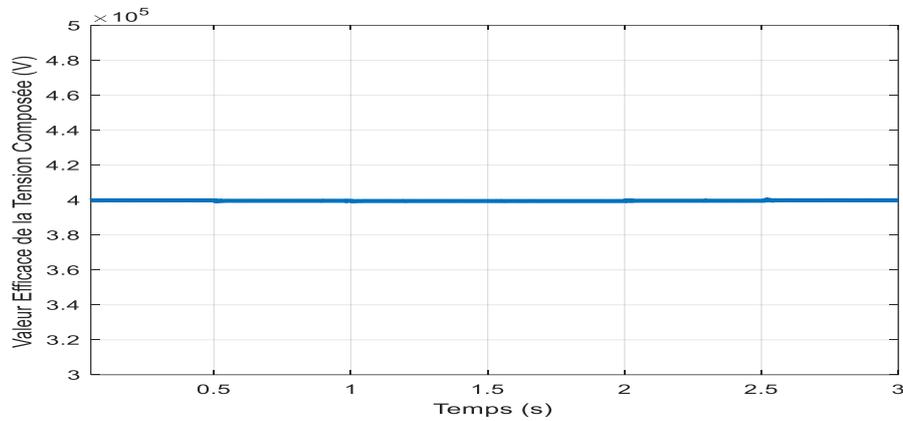


Figure (III.14) : Valeur efficace de la tension composée de la source.

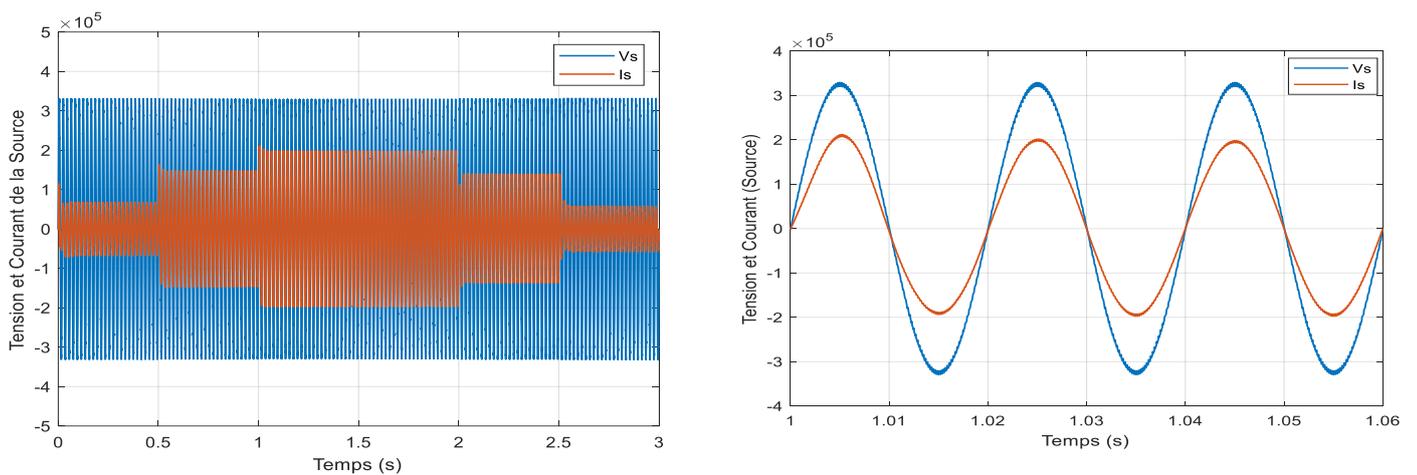


Figure (III.15) : Tension et courant de la source.

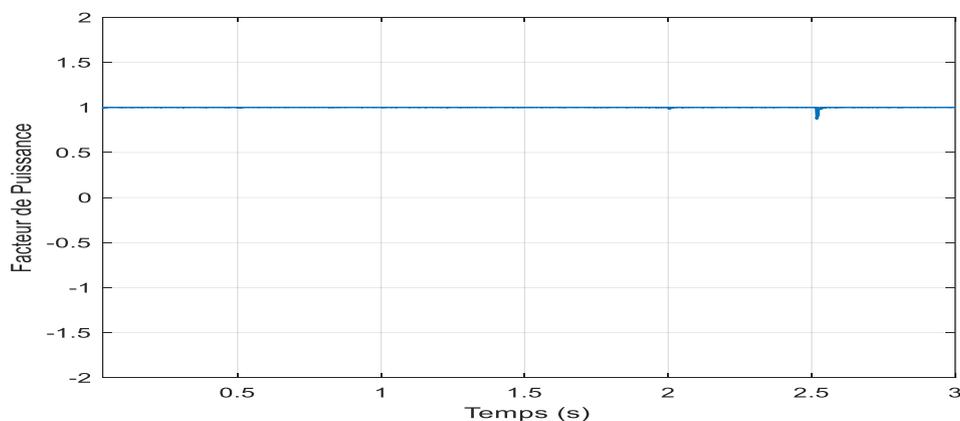
Sur Matlab on a modélisé et simulé le système global de la figure (III.12).

Dans la figure (III-13) on présente les tensions de la source triphasée ( $V_{abc}$ ) de système (à droite vue globale, à gauche vue zoomée).

La figure (III-14) montre la valeur efficace de la tension composée de la source utilisée dans notre simulation (400KV).

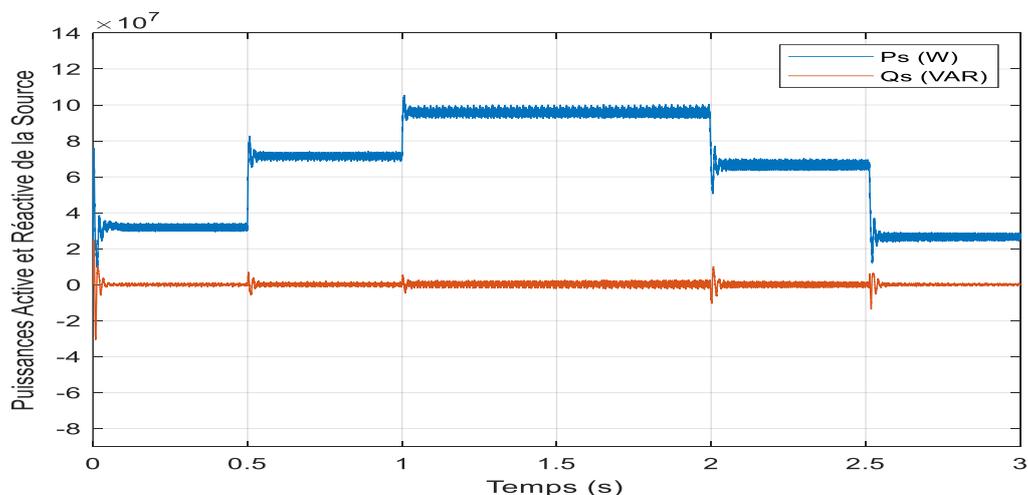
La figure (III.15), montre les résultats de simulation en associant le STATCOM dans notre réseau. On visualise l'absence de déphasage entre la tension et le courant de la source. On constate que la tension de la source est en phase avec le courant (vue gauche zoomée de la figure).

Le courant source varie en fonction de la charge, mais la tension est maintenue constante (vue droite de la figure).



**Figure (III.16) :** Facteur de puissance.

Les figure (III.16) montre un facteur de puissance unitaire du au déphasage nul entre le courant et tension source.



**Figure (III.17) :** Les puissances de la source.

Pour la figure (III-17) elle reflète le comportement des puissances lord de la compensation par le STATCOM.

### III.3.3 Présentation des courants et tensions de la ligne

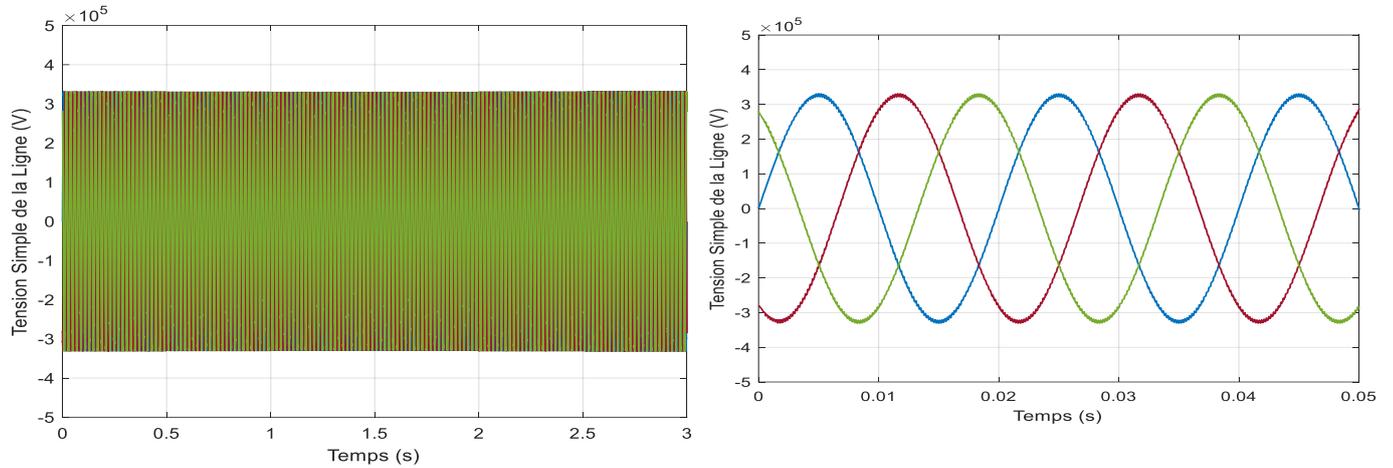


Figure (III.18) : Tension simple de la ligne.

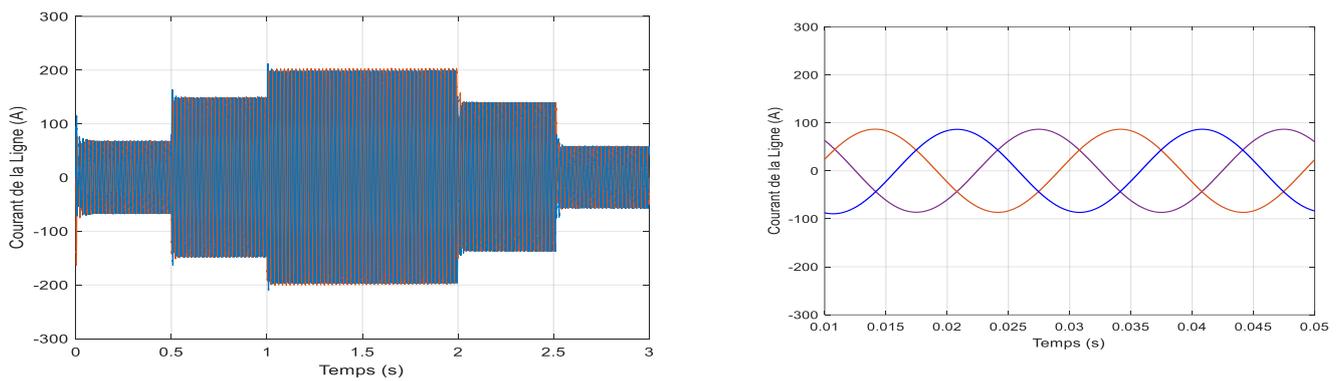


Figure (III.19) : Courant de la ligne.

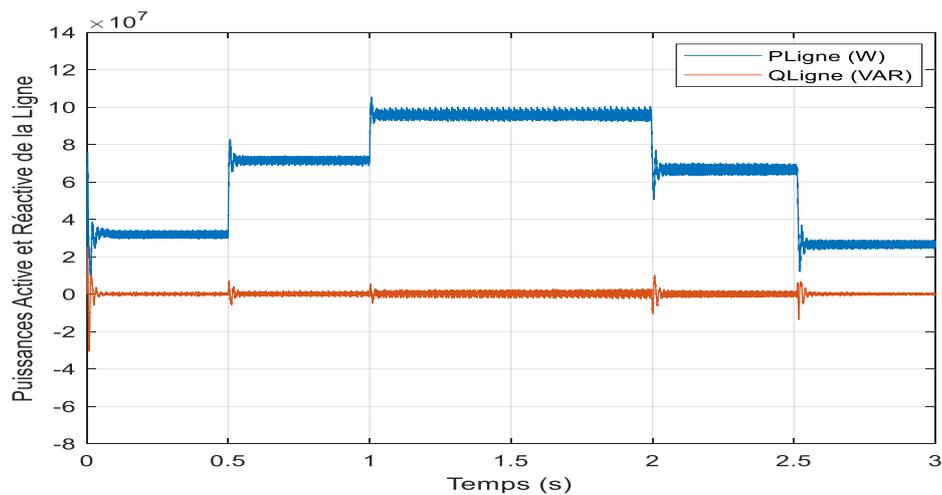
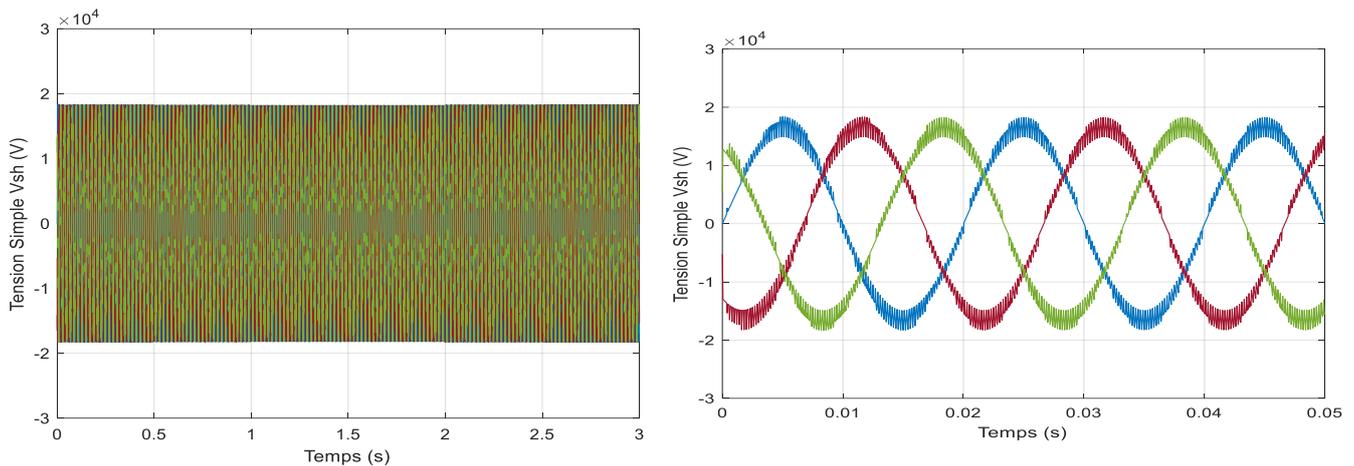


Figure (III.20) : Les puissances de la ligne.

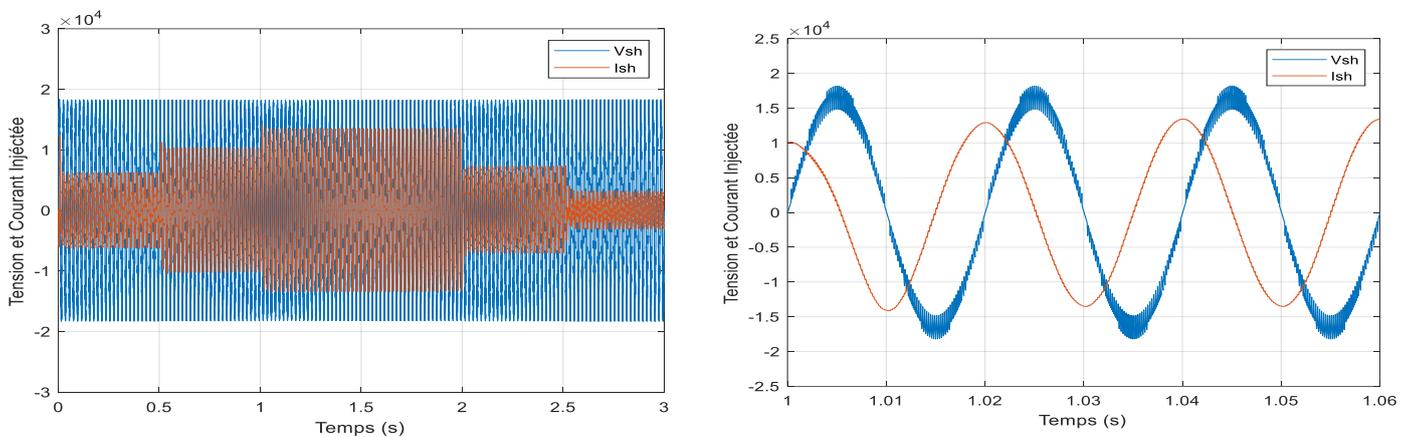
Les résultats de simulation pour les tensions (courants) de la ligne et puissances sont présentés dans les figures (III-18, 19, 20). On remarque qu'elles sont identiques à celles de la source et étant que le STATCOM est en mode d'emplacement shunt dans le fonctionnement de notre simulation.

### III.5.4 Simulation de comportement de STATCOM

#### III.5.4.1 Etage de puissance



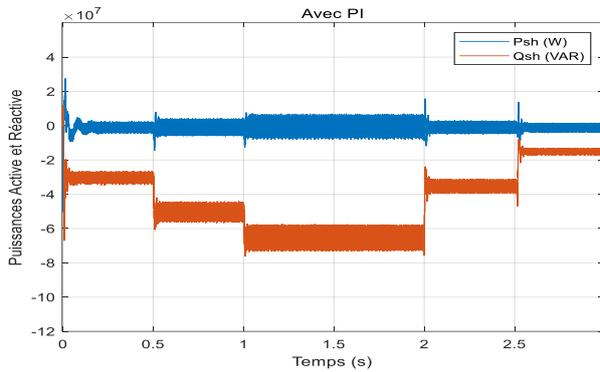
**Figure (III.21) :** Tensions simples injectées par le STATCOM.



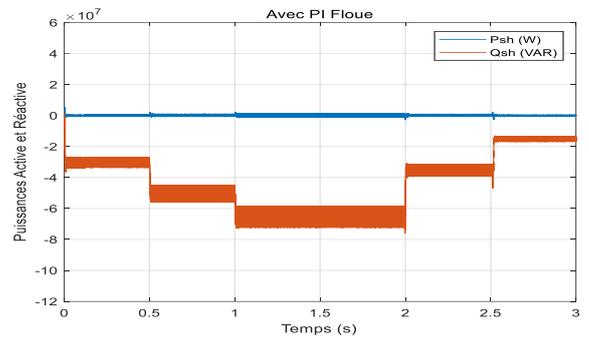
**Figure (III.22) :** Tension et courant injectée par le STATCOM.

Afin de compenser l'énergie réactive de réseau, le STATCOM a pour tâche d'injecter une énergie contraire à celle fournie par la source. Les résultats de simulation de STATCOM dans le système de la figure (III-12) confirment ce comportement. La figure (III-21) montre les tensions simples qui seront injectées par le STATCOM. La figure (III-22) montre les courants

(zoomés) de STATCOM qui sont en quadrature l'un de l'autre exhibant une image miroir par rapport à ceux de réseau.



(b) Avec un PI classique



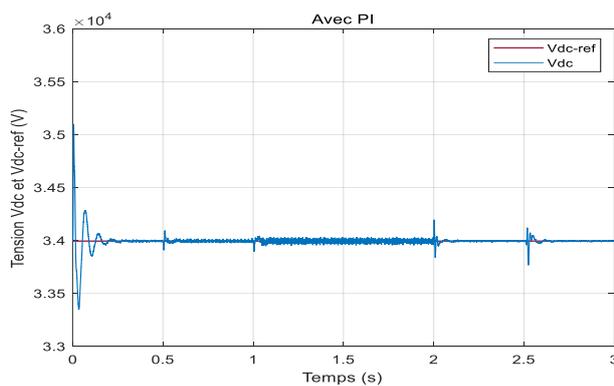
(a) Avec un PI Floue

**Figure (III.23) :** Les puissances injectée par le STATCOM.

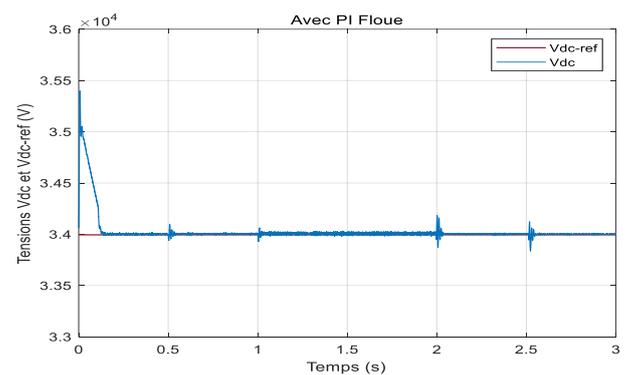
La figure (III.23.a) une faible consommation de la puissance active par le STATCOM est constaté. Cela peut être argumenter du généralement par l'usage de contrôleur classique. Par contre le STATCOM injecte la puissance réactive nécessaire dans le réseau électrique en fonction des variations des puissances réactives des charges.

La figure (III.24.b), on a une très bonne réponse des puissances de STATCOM :

- Pas d'oscillation au démarrage et des faibles ondulations ainsi qu'un très bon rejet des perturbation (variation de la charge).



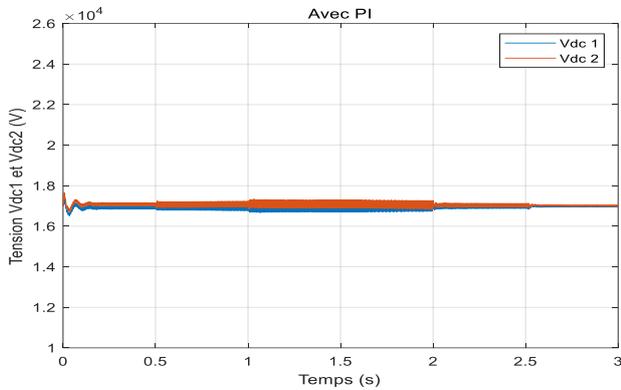
(a) Avec un PI classique



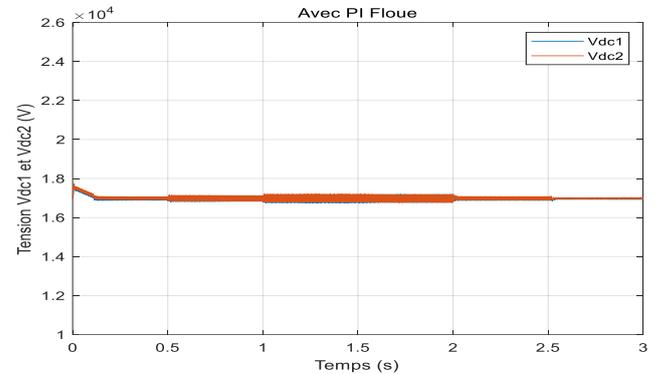
(b) Avec un PI Floue

**Figure (III.24) :** Tension Vdc et Vdc-ref.

Les figures (III.24.a), (III.24.b) montrent que le bloc de régulation de la tension continue a prouvé son efficacité dans le maintien d'une tension constante aux bornes de bus continu global (voir figure II.1).



(a) Avec un PI classique



(b) Avec un PI Floue

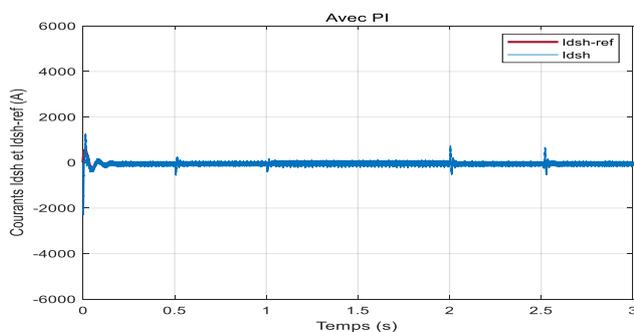
**Figure (III.25) :** La tension aux bornes des deux condensateurs.

La figure (III.25), illustre bien la stabilisation et l'équilibre des tensions des deux condensateurs du bus continu.

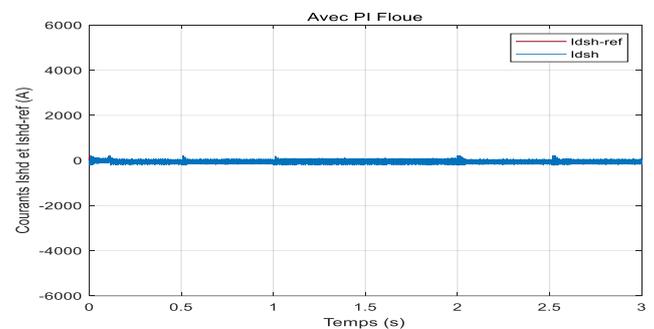
Le tableau (III.1), représente des résultats comparatifs faites par Matlab de l'utilisation des deux contrôleurs PI, et PI floue dans les deux cas des figures (III.24.a), (III.24.b).

Vdc	PI	FLC
<b>1<sup>er</sup> Dépassement (%)</b>	5.15	4.64
<b>2<sup>eme</sup> Dépassement (%)</b>	1.91	0
<b>3<sup>eme</sup> Dépassement (%)</b>	0.65	0
<b>Taux Ondulations (%)</b>	0.132	0.073
<b>Temps de repense (s)</b>	0.2	0.122

Tableau (III.1) : Les performance de PI et PI floue pour Vdc.

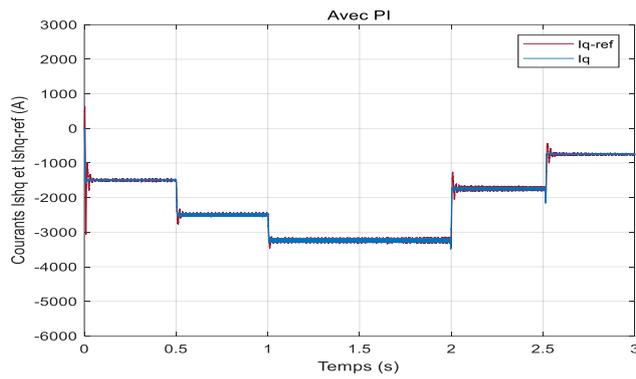


(b) Avec un PI classique

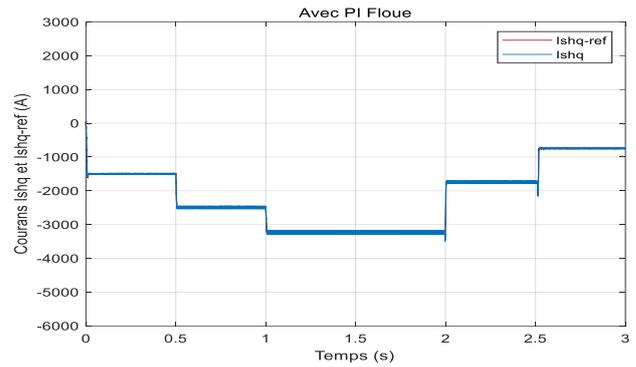


(a) Avec un PI Floue

**Figure (III.26) :** Le courant active et sa référence injectée par le STATCOM.



(b) Avec un PI classique



(a) Avec un PI Floue

**Figure (III.27) :** Le courant réactif et sa référence injectée par le STATCOM.

Les figures (III.23) au (III.37) témoignent l'efficacité des contrôleurs utilisés où le courant réactif, le courant actif et la tension continue suivent leurs références avec un faible dépassement et une erreur statique nulle en régime permanent avec un atout de côté PI flou.

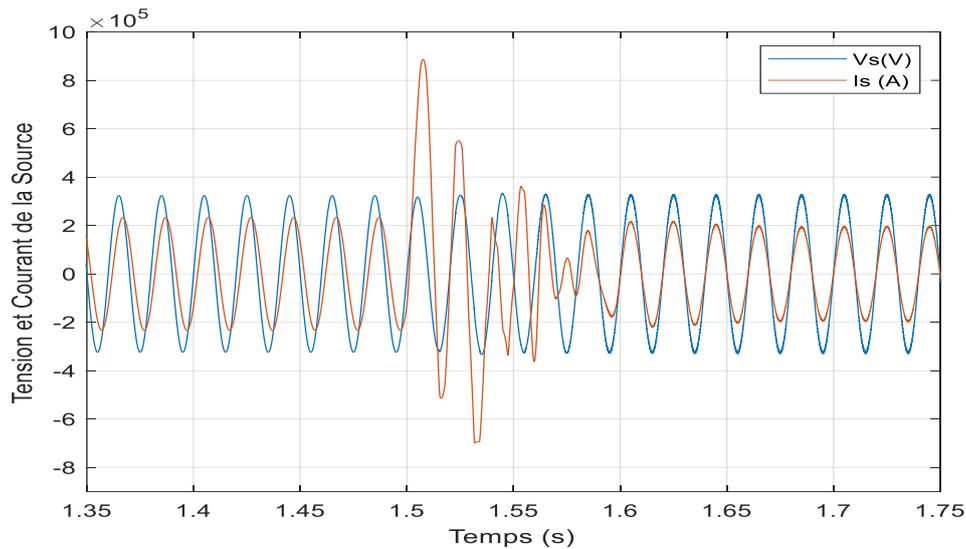
Un tableau comparatif de courant réactif ( $I_{qsh}$ ) qui réalise le contrôle direct de la puissance réactive injectée. Est montré ci-dessous.

<b><math>I_{qsh}</math></b>	<b>PI</b>	<b>FLC</b>
<b>1<sup>er</sup> Dépassement (%)</b>	1.20	1.01
<b>2<sup>eme</sup> Dépassement (%)</b>	2.48	0
<b>3<sup>eme</sup> Dépassement (%)</b>	2.05	0
<b>Taux Ondulations (%)</b>	2.64	0.71
<b>Temps de repense (s)</b>	0.064	0.019

Tableau (III.2) : Les performance de PI et PI floue pour  $I_q$

### III.5.5. Régime transitoire lors de la connexion du STATCOM au réseau

Il est bien de prendre une idée sur le passage d'un réseau fournissant une énergie réactive a un réseau la compensant. Ceci peut être bien illustré si on simule la phase transitoire entre les deux fonctionnements.



**Figure (III.28)** : Tension et courant de la source en régime transitoire.

La figure (III.28), permet de voir l'allure de la tension et du courant source avant et après la connexion de STATCOM au réseau. Le courant et la tension source entre en phase après quatre période d'ondulation indiquant un facteur de puissance unitaire.

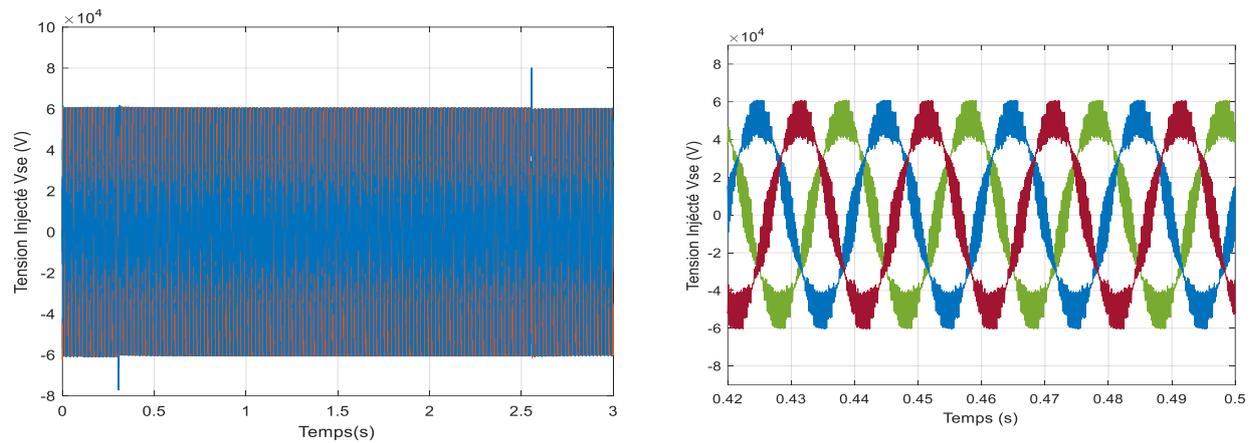
### III.6. Présence de compensateur série SSSC et son Impact sur le réseau électrique

Dans cette partie, on va présenter le comportement du réseau électrique, avec un système de compensation série **SSSC**, pour différents points de fonctionnement, relatifs à différentes valeurs des puissances actives et réactives transmises :

- à  $t = 0s$  ; on applique une charge de (30MW, 22.3MVRA).
- à  $t = 0.1s$  ; on augmente la charge à (6MW, 4.46MVAR).
- à  $t = 0.3s$  ; on réduit la charge à (24MW, 17.84MVAR).

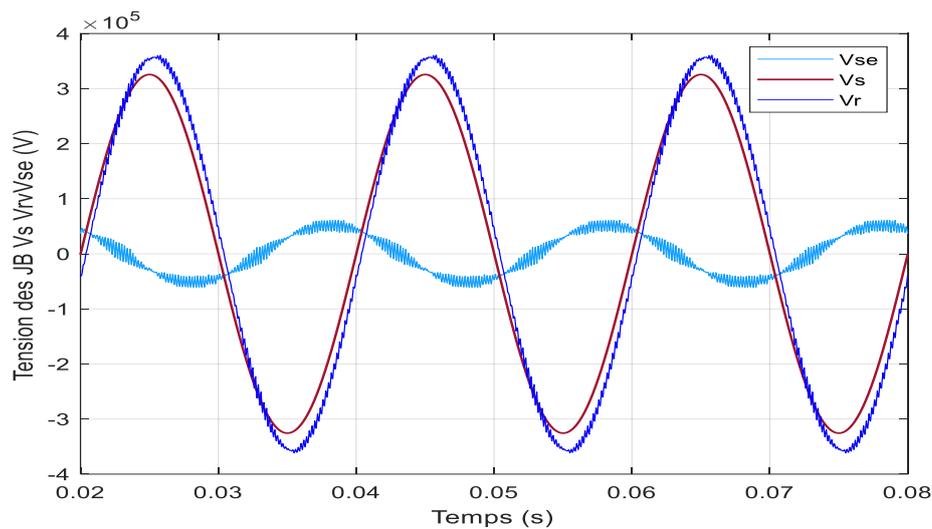
Dans cette partie, on s'intéresse au contrôle du flux de puissance dans la ligne et la possibilité d'augmenter la capacité de transit des lignes. Le SSSC permet de compenser les chutes de tensions.

### III.6.1. Les tensions



**Figure (III.29) :** Les tensions injectée par le SSSC.

La figure (III.29), montre les tensions injectées par le SSSC, pour contrôler le flux des puissances transmises par la ligne.



**Figure (III.30) :** Les tensions des JB Vs, Vr et Vse.

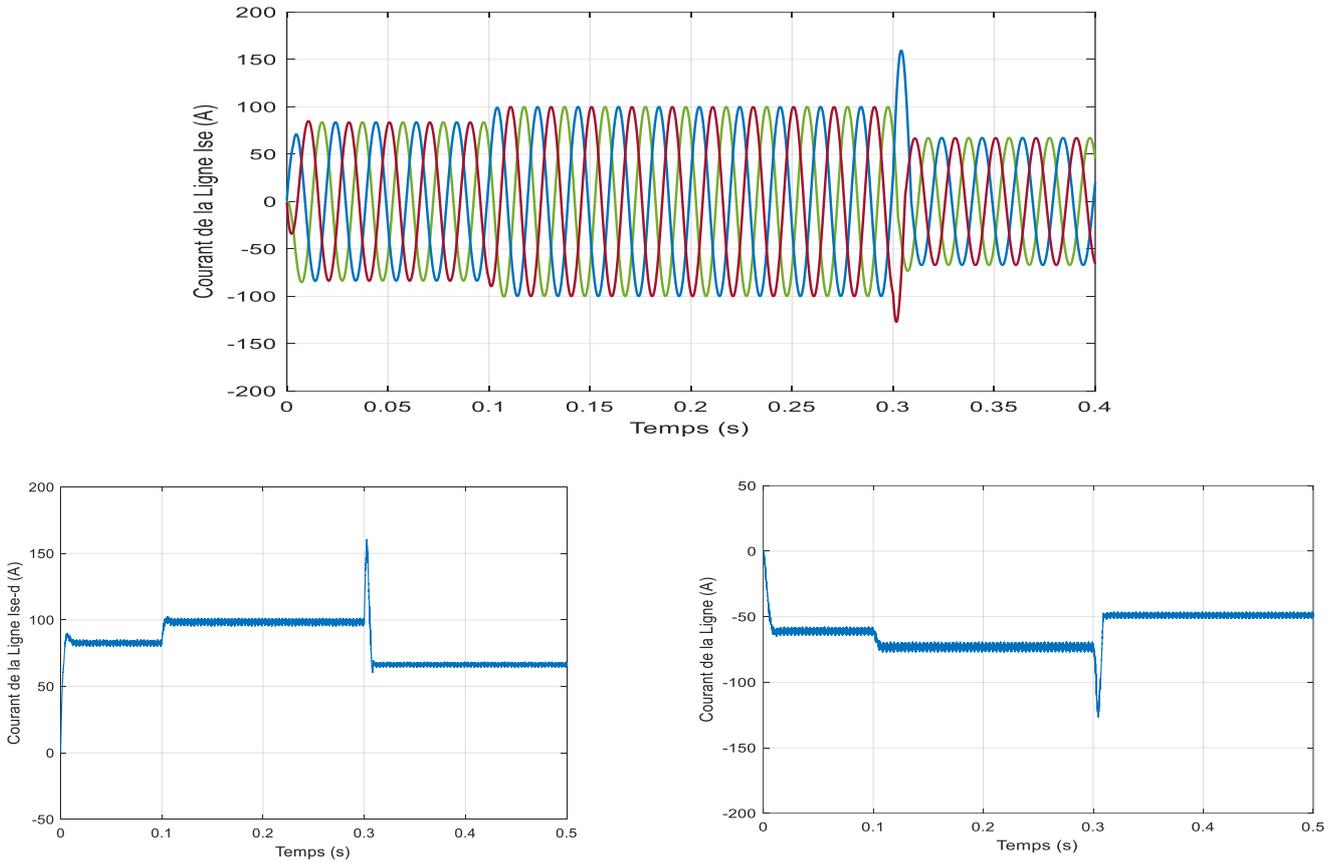
La figure (III.30), permet de visualiser les différentes tensions au niveau de notre réseau électrique :

- **Vs** : La tension au début de la ligne.
- **Vr** : La tension à la fin de la ligne après compensation.
- **Vse** : La tension injectée par le SSSC pour compenser la chute de tension de Vs.

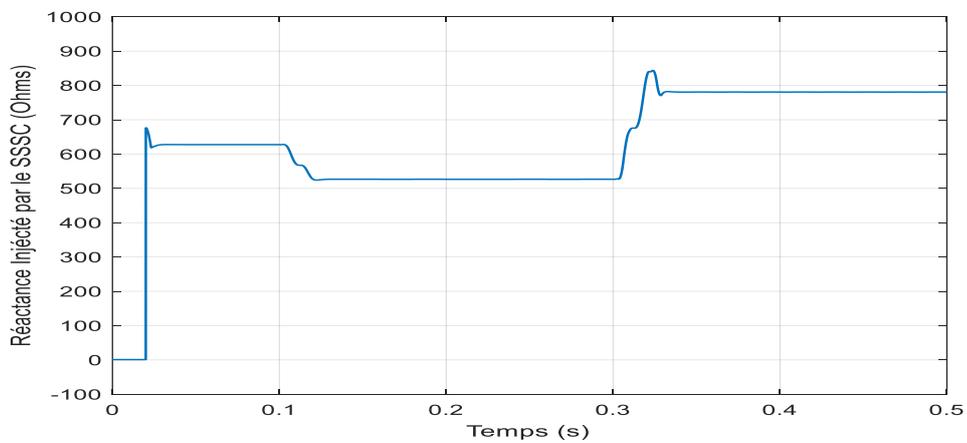
On constate que la tension injectée est en quadrature avec les tensions de la ligne.

Lorsque le SSSC injecte une tension en série avec la ligne, il permet de modifier la réactance de la ligne, et par conséquent il peut contrôler la capacité de transit de la ligne, ainsi que le flux des puissances (active et réactive).

**III.6.2. Les courants**

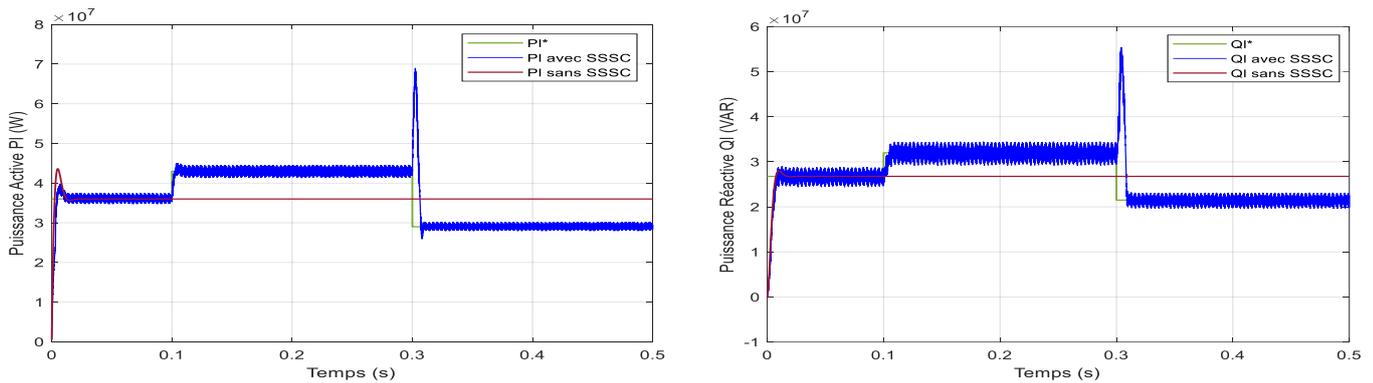


**Figure (III.31) :** Courant dans la ligne Ise.



**Figure (III.32) :** La réactance équivalente injecté par le SSSC.

### III.6.3 Le flux de puissance



**Figure (III.33) :** Flux des puissances dans la ligne.

On peut constater, que le SSSC, peut contrôler efficacement le flux des puissances active et réactive, dans la ligne de transport en présence de différentes charges.

Sans le SSSC le flux de puissance reste constant, par contre lorsqu'on introduit le SSSC, on peut contrôler le flux des puissances, en injectant une tension en série avec la ligne, ce qui se traduit par une modification de la réactance de celle-ci et par conséquent on contrôle la capacité de transit de la ligne (qui doit être suivant les normes entre 80% et 120% de sa capacité initiale).

### III.7. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats de simulation d'une ligne de 400Kv avec une charge variable et contrôlé par l'UPFC présenté dans le chapitre précédent, sous l'environnement Matlab/Simulink :

- On commence par l'analyse du réseau électrique sans compensation : on constate la présence de la puissance réactive dans la ligne de transport avec un faible facteur de puissance de la source.
- Puis on va analyser l'impact du STATCOM sur la ligne étudiée :
  - On constate une parfaite compensation de l'énergie réactive de la ligne, un très bon maintien de la tension et un fonctionnement avec facteur de puissance unitaire de la source. Ce qui témoigne du bon choix des régulateurs.
  - De même la tension du bus continu est maintenue constante, par la boucle de contrôle, pour assurer un couplage correct sur le réseau électrique (20Kv/400Kv)

- Une étude comparative entre le PI classique et le PI flou, pour le contrôle de l'UPFC, a permis de confirmer que le correcteur flou donne de meilleures performances dynamiques du système et spécialement : les dépassements, temps de réponse et rejets des perturbations liées aux variations des charges.
- L'insertion du SSSC permet de modifier l'impédance de la ligne et par conséquent l'amélioration de la capacité de transit des puissances (Contrôle direct du flux des puissances), tout en respectant les limites thermiques des lignes électriques et des postes de transformateurs de puissance.

*« Aime la vie intensément et tu n'auras plus de temps pour la haine, le regret  
ou la peur »*

*Karen Salmansohn*

## *Chapitre IV*

# **Modélisation et Commande du Système Photovoltaïque Connecté au Réseau Electrique**

## *Chapitre IV :*

# *Modélisation et Commande du Système Photovoltaïque Connecté au Réseau Electrique*

### **IV.1. Introduction [49]**

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, compris dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes nommés cellules photovoltaïque. Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium.

Le point de départ de l'énergie photovoltaïque remonte à 1839 après la découverte de l'effet photovoltaïque par le savant français Alexandre-Edmond Becquerel. Quelques années plus tard, en 1918, le scientifique polonais Jan Czochralski développe un procédé pour créer du silicium monocristallin qui sera utilisé par un groupe de chercheurs américains de Bell Labs au New Jersey (USA) en 1954 pour fabriquer la première cellule capable de transformer l'énergie solaire en courant électrique capable de transformer plus de 4% de la lumière reçue en électricité [50]. Resté très longtemps comme une curiosité de laboratoire, l'effet photovoltaïque a d'abord connu une utilisation dans le domaine du spatial, avant d'être utilisé comme source d'énergie en site isolé et de connaître le développement qu'on lui connaît aujourd'hui en application connectée au réseau.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque qui a une caractéristique statique courant-tension  $I(V)$  non linéaire et présentant

un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble.

Dans ce chapitre nous aborderons le domaine photovoltaïque dans sa généralité. Nous donnerons quelques statistiques sur la production mondiale d'énergie photovoltaïque et la fabrication des modules. Ensuite, nous rappellerons brièvement le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique reposant sur l'effet photoélectrique, c'est à dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Après, nous développerons les caractéristiques des cellules photovoltaïques et leur modélisation afin de définir leurs modes de fonctionnement. Enfin, nous étudierons leurs interconnexions et les éléments de sécurité à introduire lors de la réalisation d'un module ou d'un champ photovoltaïque.

## IV.2. Energie solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel se trouvent notamment les rayons cosmiques,  $\delta$ , rayon X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnements électromagnétiques véhiculent de l'énergie. Le niveau d'irradiation (le flux énergétique) mesuré à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire. Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent :

- L'énergie solaire thermique, utilisation de la chaleur transmise par rayonnement.
- L'énergie photovoltaïque, utilisation du rayonnement lui-même pour produire de l'électricité.



**Figure (IV.1) :** Energie solaire.

### IV.2.1. Energie solaire thermique [50]

L'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement :

- Directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architecture bioclimatique, panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des aliments (fours solaires).
- Indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entraîner des turbines et ainsi, obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique (ou hélio thermodynamique)).

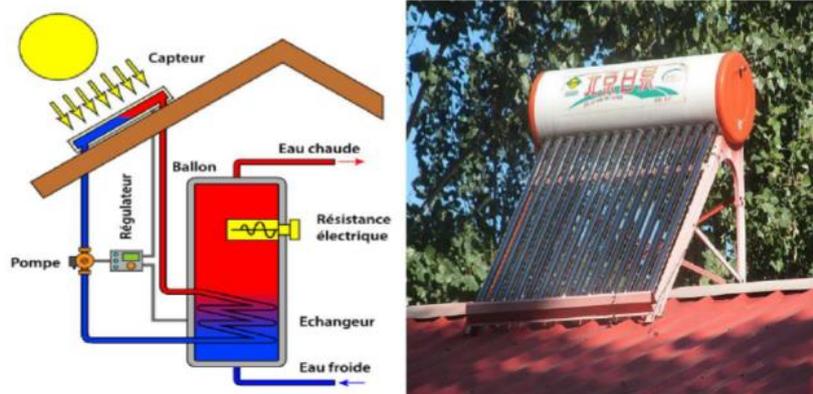


Figure (IV.2) : Energie solaire thermique.

### IV.2.2. Energie photovoltaïque [51]

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers. Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques : Les modules solaires monocristallins possèdent le meilleur rendement au m<sup>2</sup> et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque.

- Les modules solaires poly-cristallins représentent une technologie proposant des rendements plus faibles que la technologie monocristalline.

- Les modules solaires amorphes sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée.



**Figure (IV.3) :** Champ photovoltaïque

### **IV.3. Modes d'utilisation d'un système solaire photovoltaïque [52]**

Le choix du mode d'utilisation d'un système solaire se fait selon des exigences imposées que ce soit technique, économique ou géométrique. Pour cela il existe principalement trois modes à savoir :

- Autonome.
- Hybride.
- Raccordée au réseau

#### **IV.3.1. Système autonome [52]**

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure (IV.4) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de La production Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement.

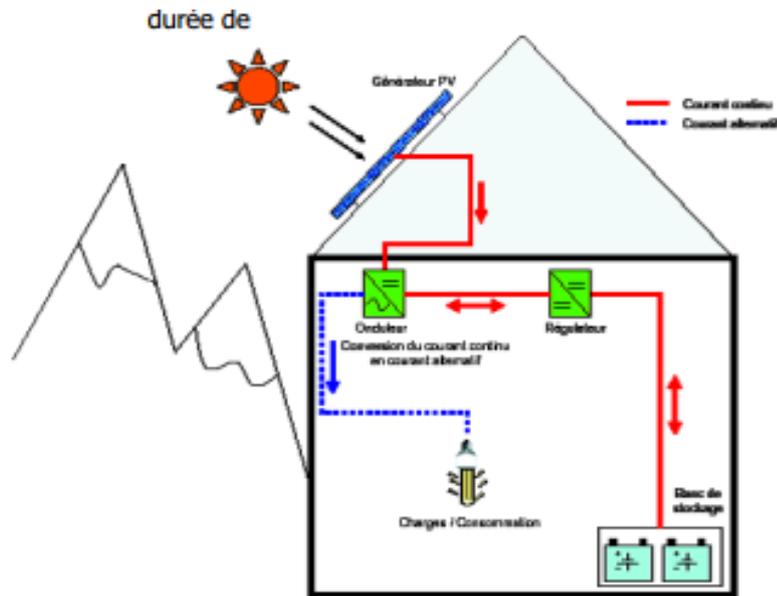


Figure (IV.4) : Structure d'un système PV autonome.

### IV.3.2. Système hybride [52]

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

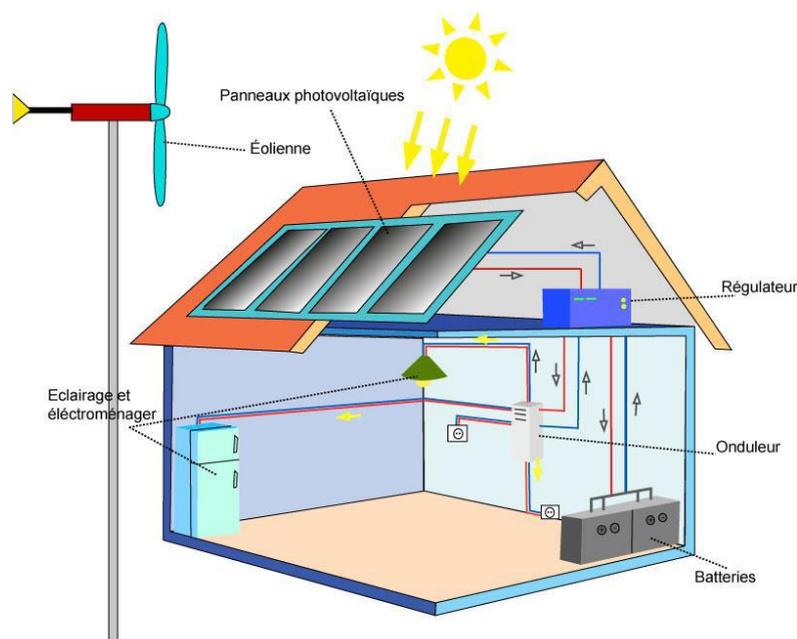
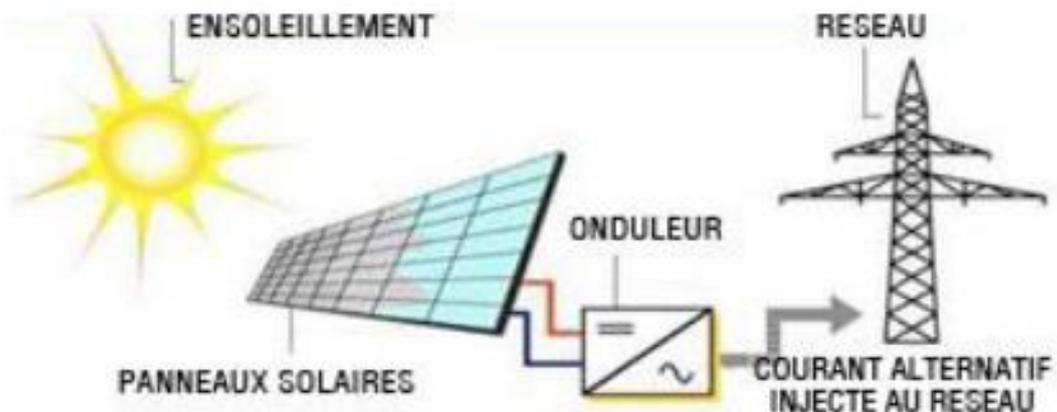


Figure (IV.5) : Exemple de la structure d'un système PV hybride.

### IV.3.3. Système PV raccordée au réseau [53]

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings. Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs.



**Figure (IV.6) :** Structure d'un système PV raccordé au réseau.

## IV.4. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque [54]

### IV.4.1. Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

#### IV.4.1. Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients...

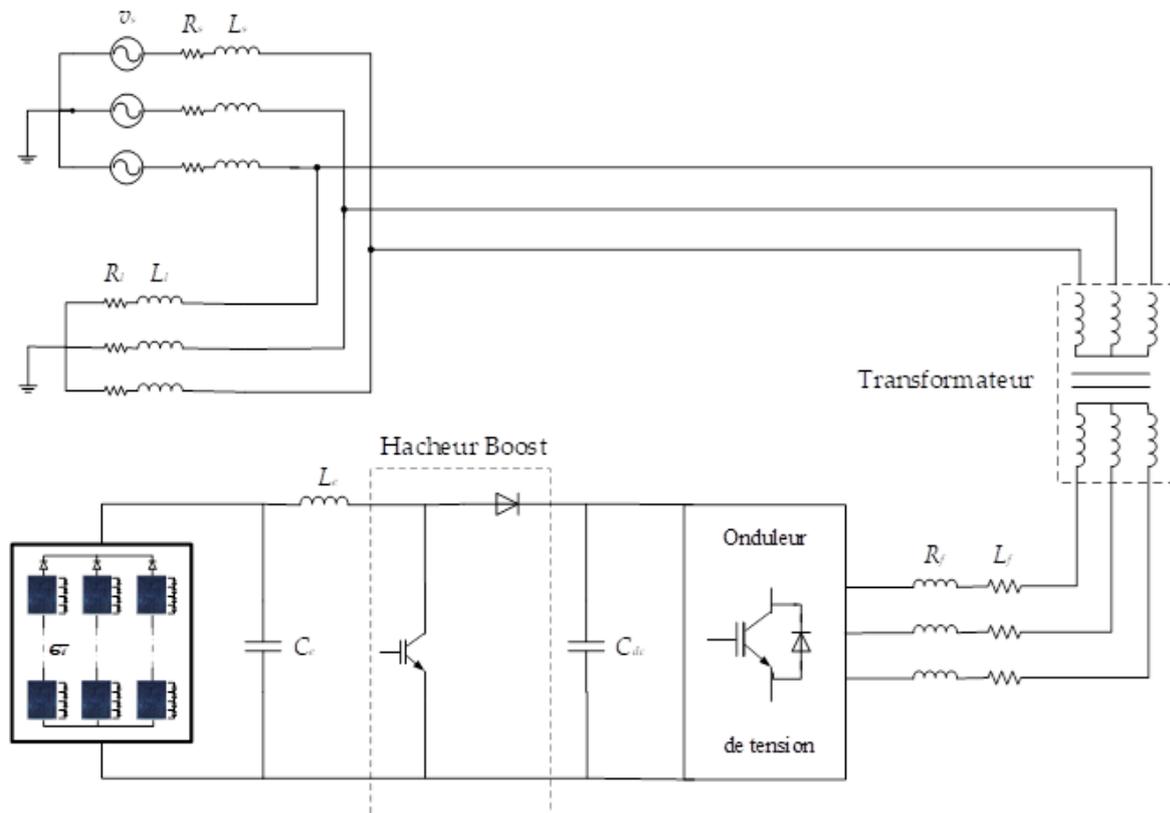
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

#### IV.5. Système photovoltaïque étudié [49]

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque seul ne permet pas d'obtenir de grands résultats : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait associer étroitement ces modules à un système complet correspondant à une application bien spécifique. La figure (IV.7) représente la configuration du système photovoltaïque raccordé au réseau électrique de distribution.

Cette structure est constituée des éléments suivants :

- Un champ photovoltaïque produisant la puissance fournie.
- Un hacheur survolteur et sa commande.
- Un bus continu pour le stockage et le filtrage de l'énergie.
- Un onduleur de tension triphasé et sa commande pour l'interconnexion avec le réseau.
- Un transformateur de tension.



**Figure (IV.7) :** Structure triphasée du système photovoltaïque couplé au réseau.

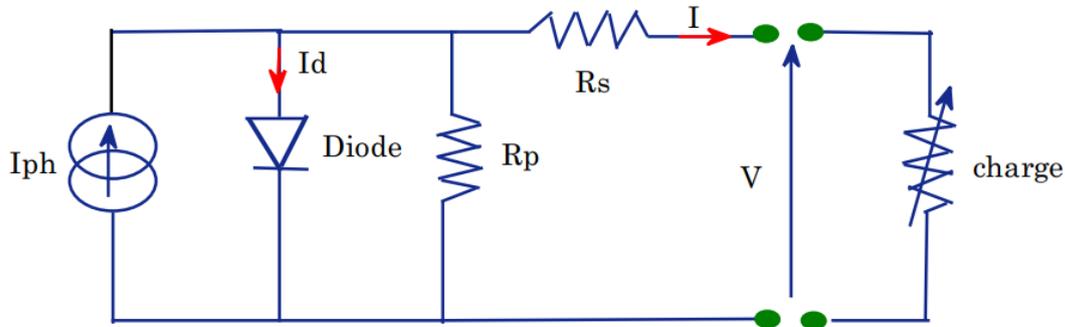
Le générateur photovoltaïque est relié à un hacheur boost qui assure le suivi du point de fonctionnement optimal et alors l'ensemble est connecté au réseau électrique par l'intermédiaire d'un onduleur de tension commandé par une stratégie qui permet de synchroniser la source photovoltaïque avec le réseau. Le bus continu découple chacune des deux convertisseurs et son but est d'agir en tant qu'un filtre et un élément de stockage de l'énergie. Le transformateur, en plus de fournir l'isolement galvanique, adapte la tension de sortie de l'onduleur au niveau de la tension du réseau et il assure la suppression de la composante continue du courant injecté.

#### IV.5.1. Modélisation du générateur photovoltaïque [55]

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules sont assemblées pour former un module. Les cellules individuelles sont généralement connectées dans une chaîne en série (typiquement 36 ou 72) pour atteindre la tension de sortie désirée. L'interconnexion de modules entre eux - en série- permet d'augmenter la tension générée pour un même courant et leur interconnexion -en parallèle- permet d'augmenter le courant délivré pour une même tension, mais pour obtenir

une puissance plus grande, les modules sont connectés en série et en parallèle, ceci définit la notion de champ photovoltaïque.

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé est représenté sur la Figure (IV.8).



**Figure (IV.8) :** Schéma équivalent de cellule PV.

Comme montre la figure (IV.8) une cellule photovoltaïque comporte en réalité une résistance série  $R_S$  et une résistance shunt  $R_P$ .

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique (I-V) de la cellule :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (IV.1)$$

$$I = I_{sc} \left( \frac{G}{1000} \right) - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (IV.2)$$

Avec :

- **I**: Le courant fourni par la cellule.
- **I<sub>ph</sub>**: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G). Ce courant correspond également au courant de court-circuit.

- **I<sub>d</sub>**: Le courant traversant la diode.
- **I<sub>p</sub>**: Le courant dérivé par la résistance parallèle.
- **I<sub>0</sub>**: Le courant de saturation inverse d'une diode.
- **V<sub>T</sub> =  $\frac{kT}{e}$** : La tension thermique.

Où :

- **e** : charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$  C),
- **K** : constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K)
- **n** : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 2 dans la pratique.
- **T** : La température ambiante effective de la cellule en kelvin.

Pour une application de la modélisation de panneau photovoltaïque sur l'environnement Matlab on aurait besoin des données techniques de module unitaire utilisé- cellules ; vu que sur internet le data sheet de module (composé de 96 cellules) type SUNPOWER SPR-315E-WHT-D est disponible (Annexe E). Ce dernier a été choisi ; le tableau suivant résume ses caractéristiques électriques du module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

<b>Température (T<sub>ref</sub>)</b>	<b>25 °C</b>
<b>Eclairement (E<sub>ref</sub>)</b>	1000 W/m <sup>2</sup>
<b>Tension du circuit ouvert (V<sub>co</sub>)</b>	64.6 V
<b>Courant du court-circuit (I<sub>cs</sub>)</b>	6.14 A
<b>Tension du point de puissance maximale (V<sub>m</sub>)</b>	54.7 V
<b>Courant du point de puissance maximale (I<sub>m</sub>)</b>	5.76 A
<b>Puissance maximale (P<sub>m</sub>)</b>	315 W

**Tableau (IV.1)** : Spécifications du module solaire SUNPOWER SPR-315E-WHT-D

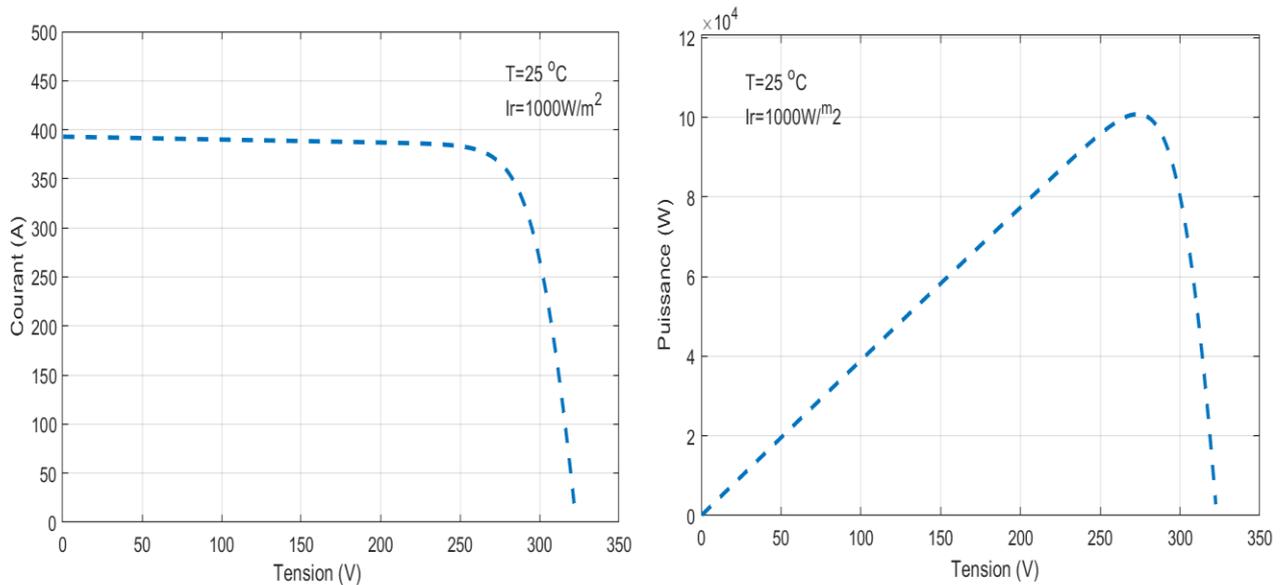
Donc les caractéristiques du champ PV deviennent :

$$\begin{cases} V_{pv} = 5 \times 54.7 = 273.5V \\ I_{pv} = 64 \times 5.76 = 368.64 A \\ P_{pv} = 320 \times 315 = 100 kW \end{cases} \quad (IV.3)$$

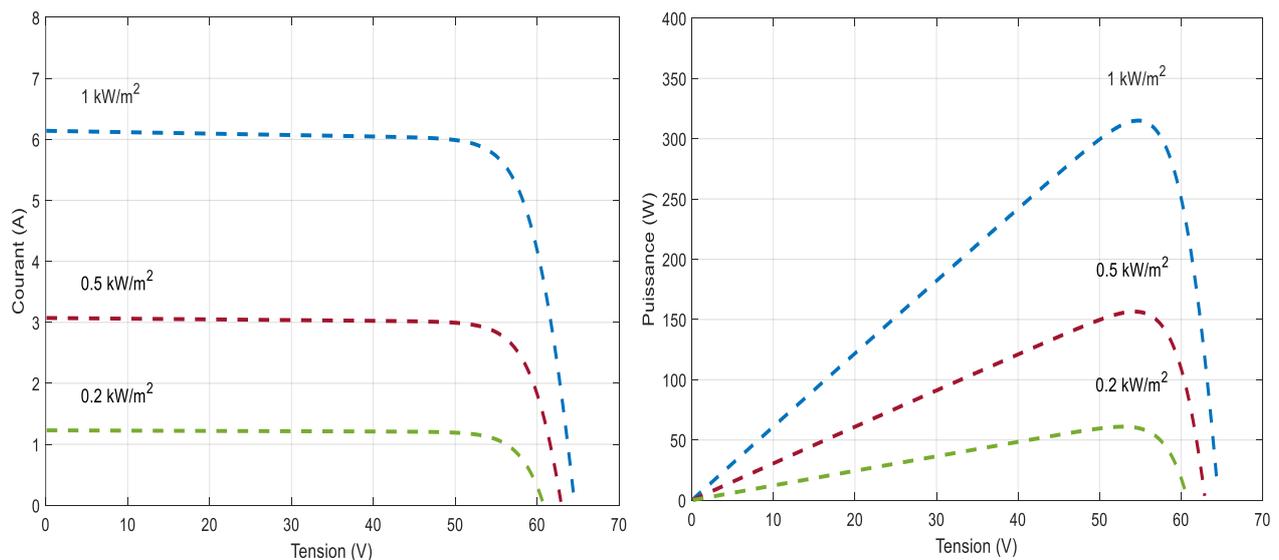
Notre champ PV, est composé de modules, 64 rangé en parallèle et 5 rangé en série,

### IV.5.1.1. L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du panneau PV [55, 65]

La variation des caractéristiques est représentée par les figures (IV.9) et (IV.10). Pour différents niveaux d'irradiation, le changement du courant est très important. Ceci confirme l'approximation faite classiquement sur le courant délivré par un générateur PV qui est globalement proportionnel au niveau d'irradiation. Nous pouvons le voir aussi sur les figures (IV.9) et (IV.10). Selon les conditions météorologiques, nous obtenons différentes courbes avec différentes puissances maximales au cours d'une même journée.



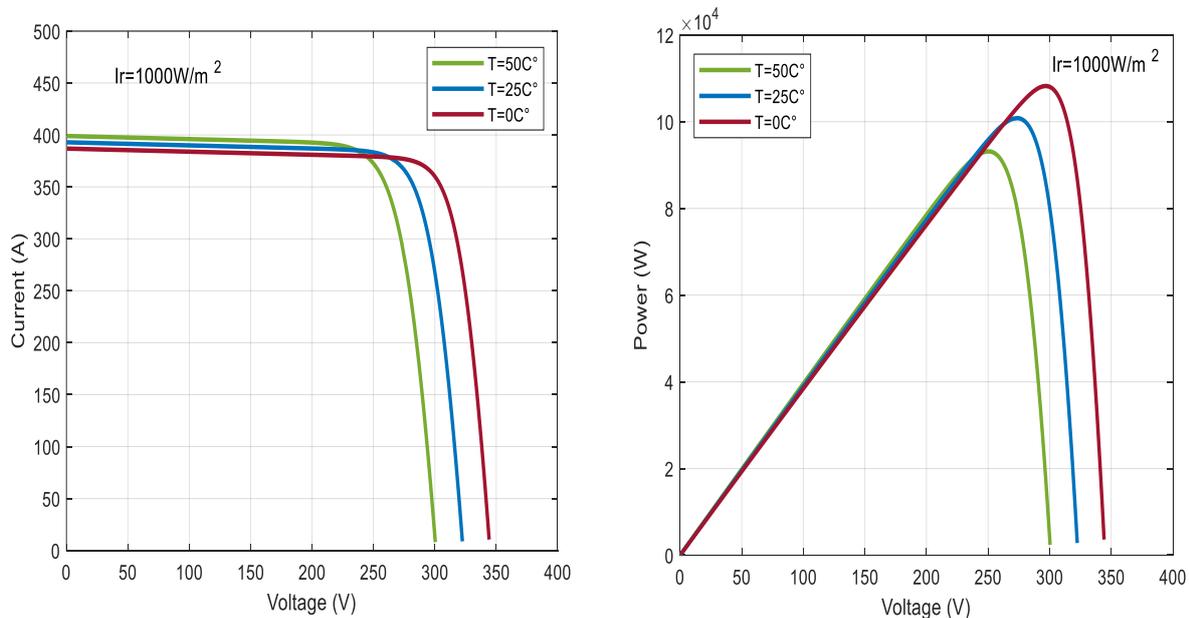
**Figure (IV.9) :** Effet de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) et (P-V) d'un module photovoltaïque « BP3280T ».



**Figure (IV.10) :** Effet de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) et (P-V) d'un champ photovoltaïque.

### IV.5.1.2. L'influence de la température sur le fonctionnement du panneau PV [54, 55]

La figure (IV.11) ci-dessous montre clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur de la cellule. La tension à vide d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule. L'ordre de grandeur des pertes est de 2.3 mV / par degré Celsius / par cellule. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule (environ 0.05 % par degré Celsius). On peut remarquer sur la figure (IV.11) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.



**Figure (IV.11) :** Effet de la température sur la caractéristique I-V et P-V

### IV.5.2. Convertisseur continu-continu (DC-DC) [49]

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Dans cette partie, nous allons à présent étudier le montage le plus couramment étudié pour élever une tension continue. Il s'agit du montage Boost bien connu sous le nom d'élévateur de tension abaisseur de courant. Le schéma de principe d'un hacheur Boost est donné par la figure (IV.12).

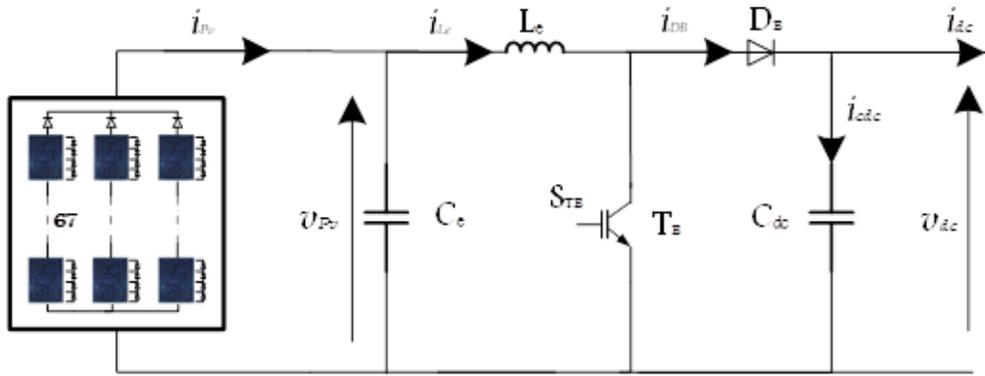


Figure (IV.12) : Schéma de principe d'un hacheur boost.

L'étude qui suit est basée sur les hypothèses suivantes :

- La tension d'alimentation  $v_{Pv}$  est parfaitement continue et constante.
- La valeur du condensateur  $C_{dc}$  est suffisamment grande afin de pouvoir considérer la tension de sortie  $v_{dc}$  comme continue et constante.
- Les composants sont idéaux.

#### IV.5.2.1. Principe de fonctionnement

Pour déterminer les relations reliant les grandeurs électriques d'entrée et de sortie du convertisseur ainsi que les formules permettant de dimensionner les différents composants, on a le schéma équivalent de l'hacheur est mesuré dans la figure (IV.13)

- **Séquence 1** : À l'instant  $t = 0$ , on ferme l'interrupteur  $T_B$  pendant une durée  $\alpha T_s$ . Le courant qui circule dans l'inductance augmente linéairement à partir de sa valeur minimale  $i_{Le\_min}$ . La tension aux bornes de la diode  $D_B$  est égale à  $v_{DB} = -v_{dc}$ . La diode est donc bloquée puisque  $v_{dc} > 0$ . Dans ces conditions, on obtient alors le schéma équivalent de la figure (IV.13.a). La tension aux bornes de l'inductance est alors :

$$v_{Le} = v_{pv} = L_e \frac{di_{Le}}{dt} > 0 \tag{IV.4}$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient la formule suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

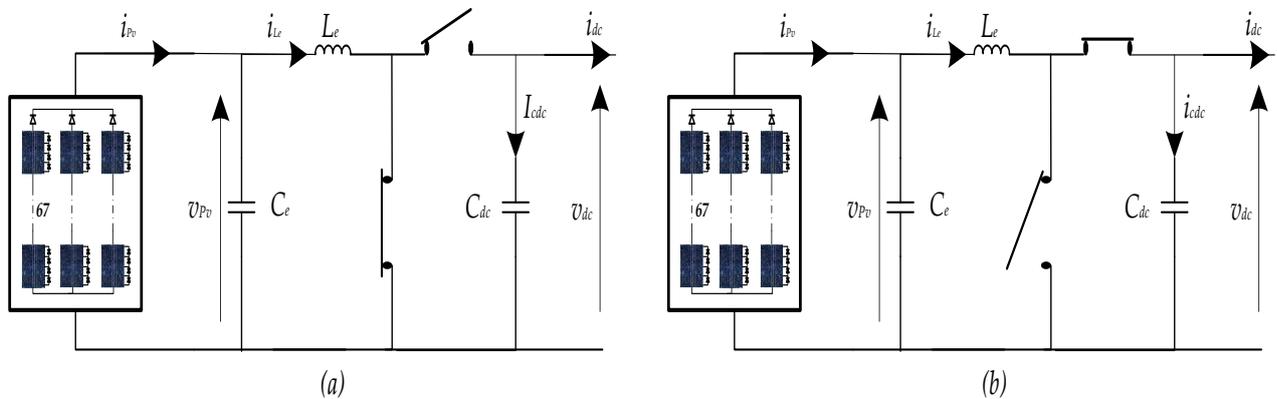
$$i_{Le} = \frac{v_{pv}}{L_e} t + i_{Le\_min} \tag{IV.5}$$

- **Séquence 2 :** À l'instant  $t = \alpha T_s$ , on ouvre l'interrupteur  $T_B$  pendant une durée  $T_s (1 - \alpha)$ . Pour assurer la continuité du courant, la diode  $D_B$  entre en conduction et le courant de l'inductance diminue linéairement à partir de sa valeur maximale  $i_{Le\_max}$ . On obtient alors le schéma équivalent de la figure (IV.13.b). La tension aux bornes de l'inductance est alors :

$$v_{Le} = v_{pv} - v_{dc} = L_e \frac{di_{Le}}{dt} < 0 \tag{IV.6}$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient la formule suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_{Le} = \frac{v_{pv} - v_{dc}}{L_e} (t - \alpha T_s) + i_{Le\_max} \tag{IV.7}$$



**Figure (IV.13) :** Schémas équivalents de l'hacheur boost, (a) séquences 1, (b) séquence 2.

#### IV.5.2.2. Formes d'ondes des principaux signaux

Les formes d'ondes des principaux signaux sont données à la figure (IV.14). A partir de ces formes d'ondes, on peut exprimer les valeurs moyennes des courants qui traversent la diode  $D_B$  et l'interrupteur  $T_B$ . Nous pouvons également en déduire les ondulations en tension et courant. Ces relations seront utilisées lors du dimensionnement des différents composants de la structure.

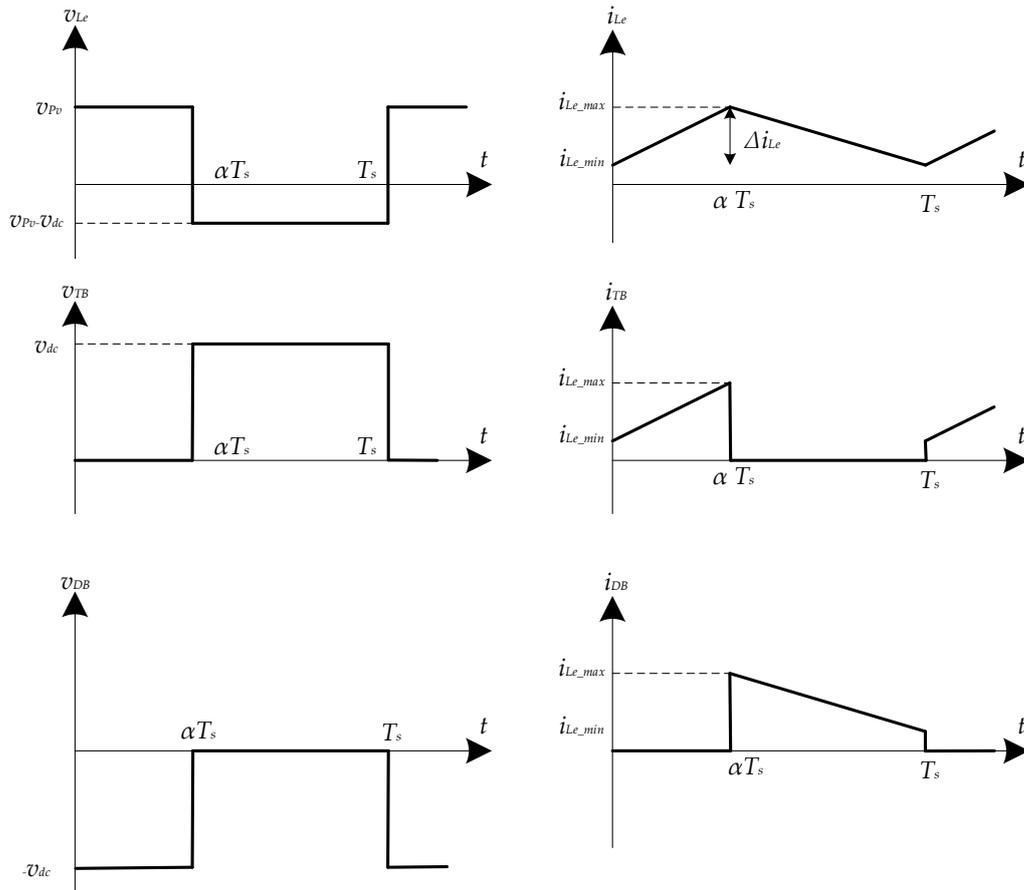


Figure (IV.14) : Formes d'ondes obtenues en conduction continue.

### IV.5.2.3. Dimensionnement des composants de l'hacheur boost

#### IV.5.2.3.1. L'inductance d'entrée

L'ondulation absolue du courant  $i_{Le}$  est défini par  $\Delta i_{Le} = i_{Le\_max} - i_{Le\_min}$ . A partir de relation (IV.5) à  $t = \alpha T_s$ , on en déduit l'expression de  $\Delta i_{Le}$  suivante :

$$\Delta i_{Le} = i_{Le\_max} - i_{Le\_min} = \frac{\alpha v_{pv}}{L_e f_s} \quad (IV.8)$$

Comme  $v_{pv} = v_{dc}(1 - \alpha)$ , on peut écrire :

$$\Delta i_{Le} = \frac{\alpha(1-\alpha)v_{dc}}{L_e f_s} \quad (IV.9)$$

Cette expression nous montre que l'ondulation en courant diminue lorsque la fréquence de commutation  $f_s$  ou la valeur de l'inductance  $L_e$  augmente.

En résolvant  $\frac{\partial \Delta i_{Le}}{\partial \alpha} = 0$ , on trouve que l'ondulation en courant  $\Delta i_{Le}$  est maximale pour  $\alpha=0,5$ . Le dimensionnement de l'inductance  $L_e$ , à partir d'une ondulation en courant donnée, s'effectue à l'aide l'équation suivante :

$$L_e = \frac{v_{dc}}{4\Delta i_{Le} f_s} = \frac{v_{dc}}{2\Delta i_{Le} f_s} \quad (\text{IV.10})$$

#### IV.5.2.3.2. Condensateur de sortie

Pour déterminer l'expression de l'ondulation en tension  $\Delta v_{dc}$ , on fait l'hypothèse que le courant  $i_{dc}$  est parfaitement constant. Durant la première séquence, on a la relation suivante :

$$i_{dc} = C_{dc} \frac{\partial v_{dc}}{\partial t} = -i_{dc} \quad (\text{IV.11})$$

La résolution de cette équation différentielle donne :

$$v_{dc}(t) = \frac{-i_{dc}}{C_{dc}} t + v_{dc\_max} \quad (\text{IV.12})$$

A  $t = \alpha T_s$ , on a :

$$v_{dc}(\alpha T_s) = \frac{-i_{dc}}{C_{dc}} \alpha T_s + v_{dc\_max} = v_{dc\_min} \quad (\text{IV.13})$$

Par suite, on a :

$$\Delta v_{dc} = \frac{\alpha i_{dc}}{C_{dc} f_s} = \frac{\alpha(1-\alpha) i_{pv}}{C_{dc} f_s} \quad (\text{IV.14})$$

Cette expression nous montre que l'ondulation en tension diminue lorsque la fréquence de commutation  $f_s$  ou la valeur du condensateur  $C_{dc}$  augmente. Le dimensionnement du

condensateur  $C_{dc}$ , à partir d'une ondulation en tension donnée, s'effectue à l'aide l'équation suivante :

$$C_{dc} = \frac{i_{pv}}{4\Delta v_{dc}f_s} \quad (IV.15)$$

#### IV.5.2.3.3. Condensateur d'entrée [57]

La valeur de la capacité du condensateur d'entrée  $C_e$  est donnée par :

$$C_e = \frac{i_{pv}}{2\Delta v_{pv}f_s} \quad (IV.16)$$

#### IV.5.2.4. Commande MLI de l'hacheur [49]

Le signal de contrôle de l'interrupteur  $T_B$  par la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion) est le résultat de la comparaison entre le rapport cyclique  $\alpha$  et celui généré par un générateur triangulaire, ou en dent de scie, de fréquence fixée par le fonctionnement du convertisseur comme le montre la figure (IV.15).

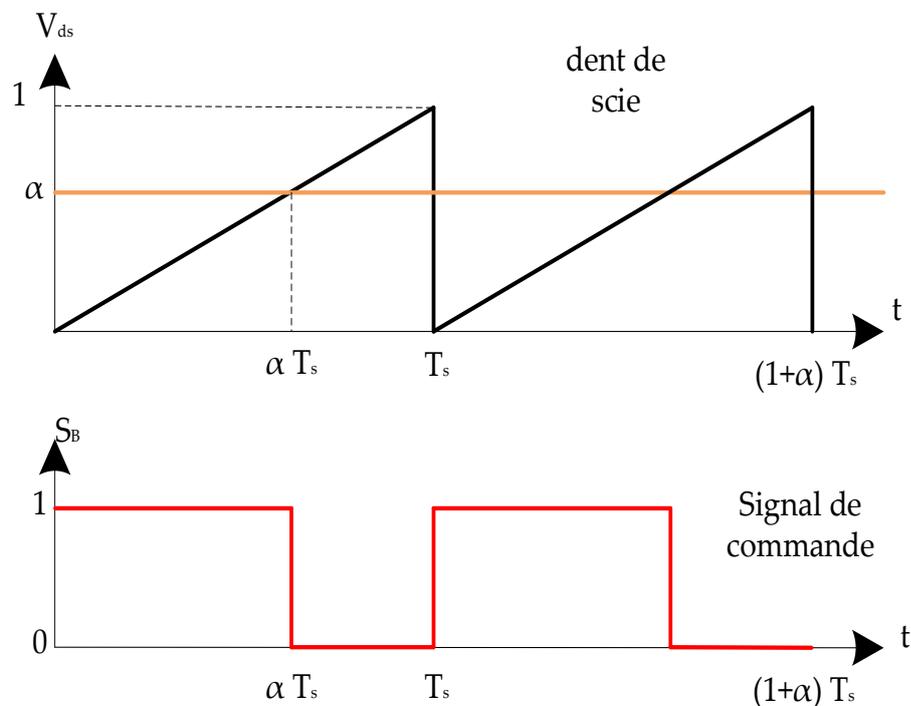


Figure (IV.15) : Génération des impulsions de commande de l'hacheur.

La génération des impulsions de commande s'effectue comme suit :

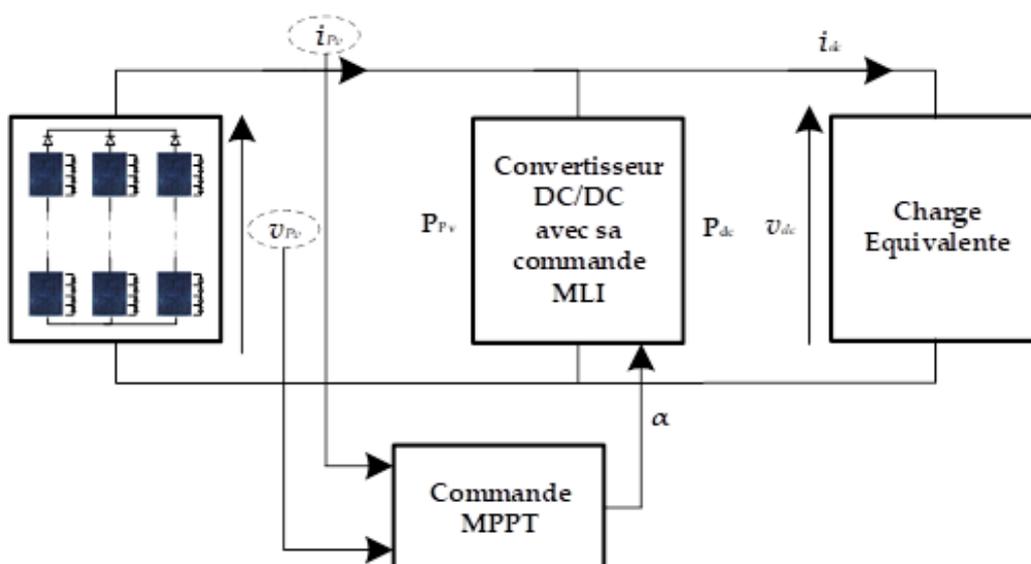
- Si  $\alpha > V_{ds}$  alors  $S_B = 1$ , l'interrupteur  $T_B$  est fermé (séquence 1).
- Si  $\alpha < V_{ds}$  alors  $S_B = 0$ , l'interrupteur  $T_B$  est ouvert (séquence 2).

#### IV.5.2.5. Concept de la MPPT [58]

Dans un système photovoltaïque comprenant une source photovoltaïque et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente une étape importante. Cette technique de commande est souvent nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » (Maximum Power Point Tracking, MPPT).

Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et irradiation) et quels que soit la charge, la commande d'étage d'adaptation place le système au point de fonctionnement maximums ( $v_{mpp}$ ,  $i_{mpp}$ ).

La figure (IV.16) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le champ PV corresponde à la puissance maximale ( $P_{mpp}$ ) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.



**Figure (IV.16) :** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les conditions météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

De nombreuses méthodes de commandes MPPT existent et font appel à des algorithmes plus ou moins complexes en fonction des critères de précision et de rapidité exigés. Certains systèmes sont précis mais peu rapides, d'autres sont plus rapides mais moins efficaces. Les différentes méthodes de maximisation de puissance sont classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes.

#### **IV.5.2.5.1. Les méthodes indirectes**

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques du champ photovoltaïque dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement, etc.) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum.

Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser. Parmi elles, on peut citer :

- La méthode d'ajustement de courbe.
- La méthode « look-up table ».
- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.
- La méthode de court-circuit.

#### **IV.5.2.5.2. Les méthodes directes [58]**

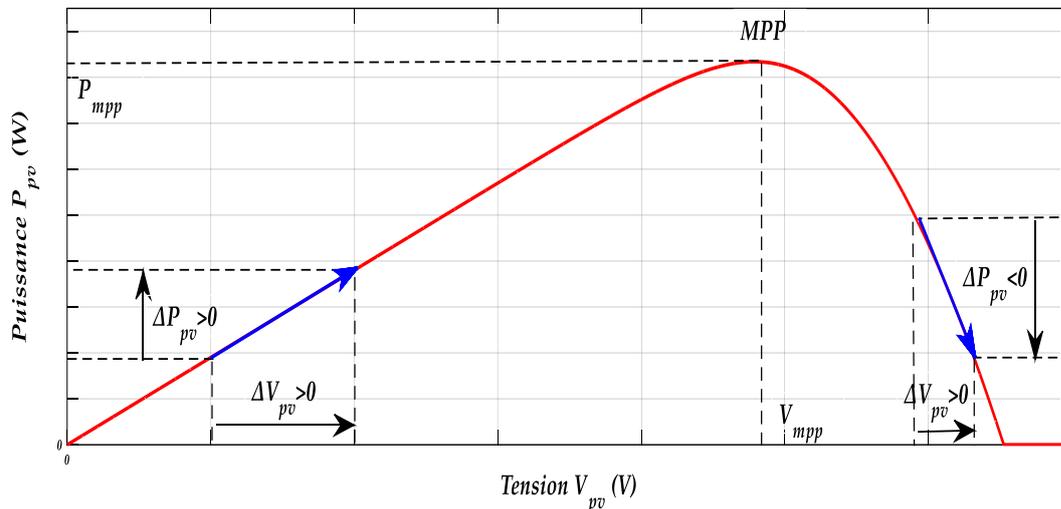
Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant du champ et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques du champ PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturb & Observ (P&O) et l'incrémentation de conductance.

Toutes ces méthodes sont présentées dans la référence. Dans ce chapitre, il s'agit de détailler les plus simples à savoir :

- Perturbation & observation (P&O).
- Incrémentation de conductance.

#### IV.5.2.5.2.1 Méthode Perturb & Observe (P&O), Argument le choix [34]

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{Pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{Pv}$  qui en résulte.



**Figure (IV.17) :** Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O.

Ainsi, comme l'illustre la figure (IV.17) pour différentes zones de fonctionnement, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{Pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{Pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{Pv}(V_{Pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande.

On résume cette figure dans quatre cas à savoir :

- **Premier cas :**  $\Delta P_{Pv} > 0$  et  $\Delta V_{Pv} > 0$

Dans ce cas le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; en plus  $\Delta V_{Pv}$  est positive, on est donc dans la bonne direction. Pour la prochaine itération, on augmente la tension du champ photovoltaïque. Ceci peut être réalisé par une diminution du rapport cyclique. Soit donc,  $\alpha(k) = \alpha(k-1) - \Delta\alpha$ .

- **Deuxième cas :  $\Delta P_{Pv} > 0$  et  $\Delta V_{Pv} < 0$**

Le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP ; en plus  $\Delta V_{Pv}$  est négative, la recherche du MPP se fait dans la bonne direction.

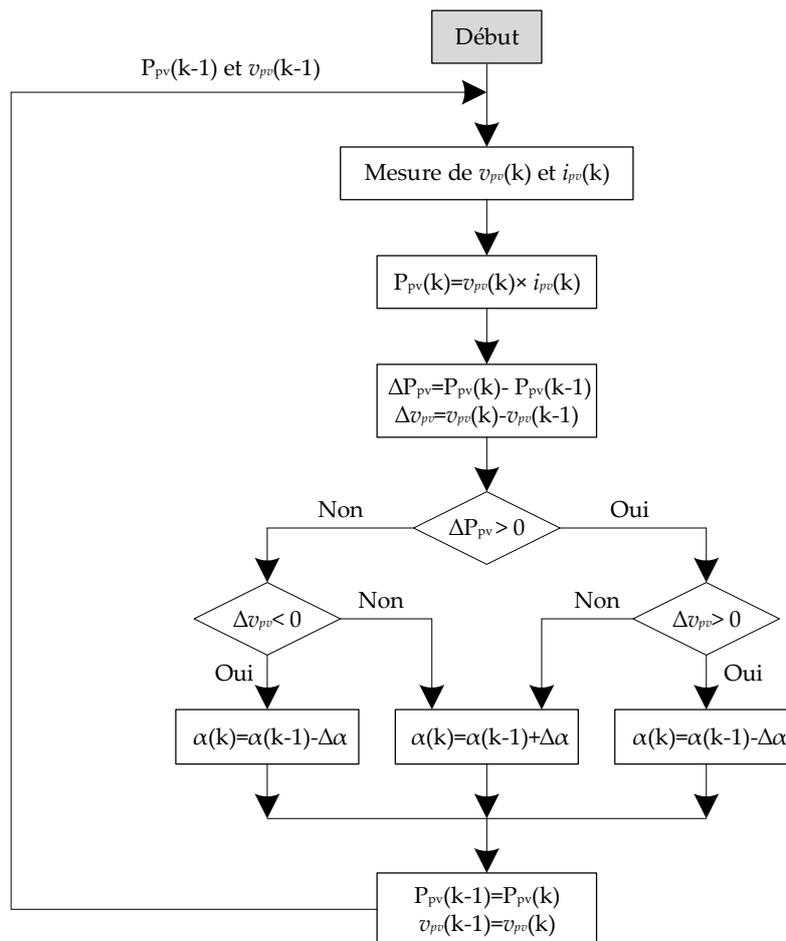
On va donc pour la prochaine itération continuer à diminuer la tension (donc à augmenter le rapport cyclique). Soit donc,  $\alpha(k) = \alpha(k-1) + \Delta\alpha$ .

- **Troisième cas :  $\Delta P_{Pv} < 0$  et  $\Delta V_{Pv} < 0$**

Le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; et comme  $\Delta V_{Pv}$  est négative on se dirige dans le mauvais sens. Lors de la prochaine itération on doit corriger le sens de la recherche en augmentant la tension. Soit donc,  $\alpha(k) = \alpha(k-1) - \Delta\alpha$ .

- **Quatrième cas :  $\Delta P_{Pv} < 0$  et  $\Delta V_{Pv} > 0$**

Le point de fonctionnement actuel est à droite du MPP ; en plus  $\Delta V_{Pv}$  est positive, la recherche se fait donc dans la mauvaise direction. Pour la prochaine itération, on va diminuer la tension (donc augmenter le rapport cyclique). Soit donc,  $\alpha(k) = \alpha(k-1) + \Delta\alpha$ .



**Figure (IV.18) :** Organigramme de l’algorithme perturbation et observation.

La figure (IV.18) représente l'algorithme de la commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du champ PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du champ PV à chaque instant. Avec cet algorithme la tension de fonctionnement  $V_{Pv}$  est perturbée à chaque cycle du MPPT.

Dès que le MPP sera atteint,  $vPv$  oscillera autour de la tension idéale  $v_{mpp}$  de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple.

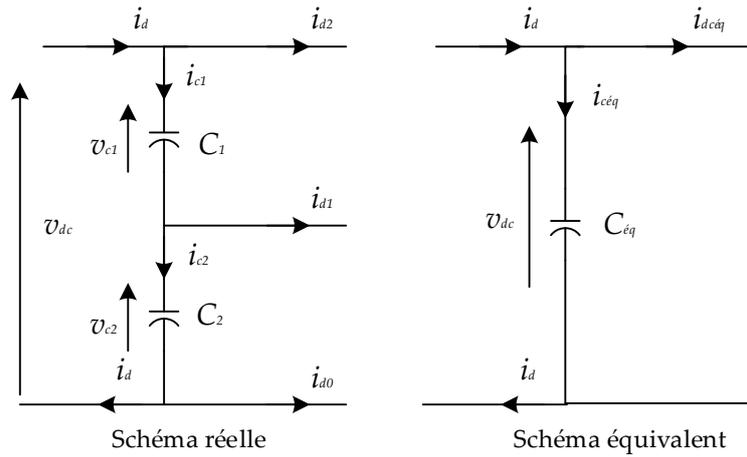
Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues relativement aux conditions stables ou lentement changeantes. Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les conditions de stabilité ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

Un inconvénient de la méthode de P&O est décrit par (Hussein et al). En effet, si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continue jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement, moment où il revient vers le vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance.

### IV.5.3. Régulation de la tension du bus continu

La régulation de la tension du bus continu a pour but de la maintenir à une valeur de référence constante, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur.

Dans le cas des onduleurs multiniveaux, le bus continu peut être modélisé par un condensateur fictif  $C_{eq}$  comme il est représenté dans la figure (IV.19). Ce condensateur est équivalent aux condensateurs réels du diviseur capacitif, sa capacité est déterminée selon le nombre des niveaux de l'onduleur utilisé.



**Figure (IV.19) :** Schémas réelle et équivalent du bus continu d'un onduleur NPC.

À l'aide de l'équivalence en puissance côté continu on peut écrire :

$$P_{éq} = P_{réelle} \tag{IV.17}$$

Pour un onduleur NPC, les puissances fictive  $P_{éq}$  et réelle  $P_{réelle}$  sont exprimées, en fonction de la puissance à la sortie de l'hacheur ( $P_{dc} = i_d v_{dc}$ ), comme suit :

$$\begin{cases} P_{éq} = P_{dc} - v_{dc} i_{c_éq} = P_{dc} - C_{éq} v_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} \\ P_{réelle} = P_{dc} - (v_{c1} i_{c1} + v_{c2} i_{c2}) \end{cases} \tag{IV.18}$$

En supposant que les deux condensateurs sont identiques ( $C_1 = C_2 = C$ ) et que la tension totale  $v_{dc}$  est presque uniformément répartie sur ces condensateurs ( $v_{c1} \approx v_{c2} \approx v_{dc}/2$ ), on peut écrire :

$$P_{réelle} = P_{dc} - \left( \frac{v_{dc}}{2} (i_{c1} + i_{c2}) \right) = P_{dc} - \left( \frac{C}{2} v_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} \right) \tag{IV.19}$$

A partir des trois équations précédentes, on peut déterminer la relation entre la capacité équivalente et les capacités réelles comme suit :

$$C_{éq} = \frac{C}{2} \tag{IV.20}$$

Et le courant dans le condensateur équivalent s'exprime comme suit :

$$i_{c\acute{e}q} = \frac{i_{c1} + i_{c2}}{2} \quad (\text{IV.21})$$

Le courant équivalent à l'entrée de l'onduleur est :

$$i_{dc\acute{e}q} = \frac{P_{dc}}{v_{dc}} - \left( \frac{i_{c1} + i_{c2}}{2} \right) \quad (\text{IV.22})$$

#### IV.5.4. Onduleur de tension multiniveaux [61, 62].

Les onduleurs connectés au réseau permettent de convertir le courant continu produit par les panneaux solaires en un courant alternatif. L'onduleur synchronise parfaitement son courant de sortie à la fréquence de 50 Hz du réseau électrique public.

Durant ces dernières années, on a vécu la naissance des onduleurs multiniveaux qui ont été rapidement intégrés dans le domaine photovoltaïque. Cette nouvelle technologie est réalisée par la mise en série des éléments semi-conducteurs. Parmi les topologies multiniveaux les plus répondues on peut évoquer la structure NPC (Neutral Point Clamped) proposée initialement par A. Nabae.

#### IV.5.5. Modélisation de l'interface réseau [63]

L'objectif de la commande du système PV à base d'onduleur de tension est d'obtenir un système de courants sinusoïdaux équilibrés et en phase avec la tension, ceci implique que la puissance réactive générée doit être nulle. La structure de contrôle générique d'un système PV connecté au réseau est constituée de deux boucles de régulation imbriquées : une boucle externe pour le contrôle de la tension du bus continu et une boucle interne de contrôle des courants direct et quadrature.

En effet, la puissance exploitée est injectée au réseau via un onduleur de tension connecté à ce dernier, cet onduleur assure la phase d'injection de l'énergie par les deux tâches suivantes:

- Maintenir la tension du bus continu constante en contrôlant la puissance transitée vers le réseau via l'onduleur de tension.
- Commander les interrupteurs statiques afin d'injecter la puissance de référence (puissance du panneau photovoltaïque en retranchant celle du condensateur) au réseau.

##### IV.5.5.1. Association de l'onduleur au réseau [64]

Comme le montre la figure (IV.20), pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et le faire travailler comme une source de courant, il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive (LRL ou LCL).

Le schéma équivalent monophasé du système du point de vue des grandeurs fondamentales sera celui de la figure (IV.19) :

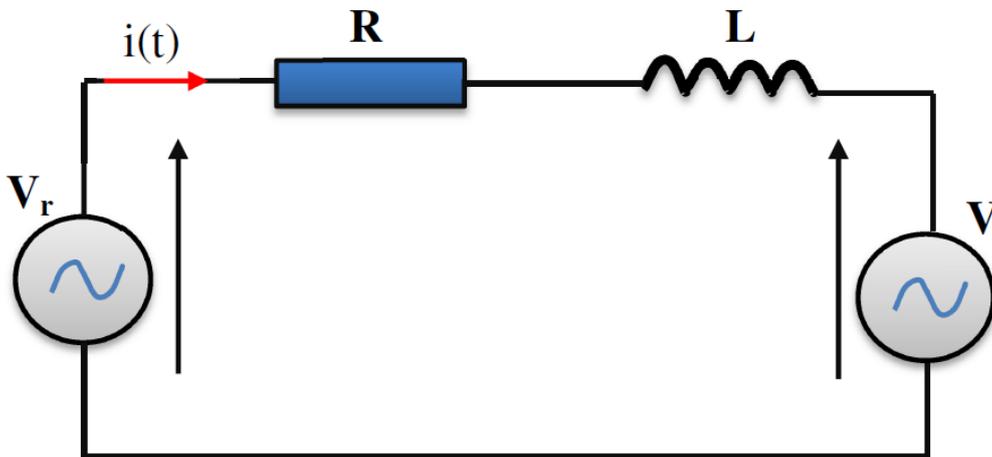


Figure (IV.20) : Schéma simplifié de la liaison au réseau

Avec :

- $V_r$  : Tension simple efficace modulée en sortie de l'onduleur [V]
- $I(t)$  : Courant transitant vers le réseau [A]
- $L$  : Inductance de sortie de l'onduleur [H]

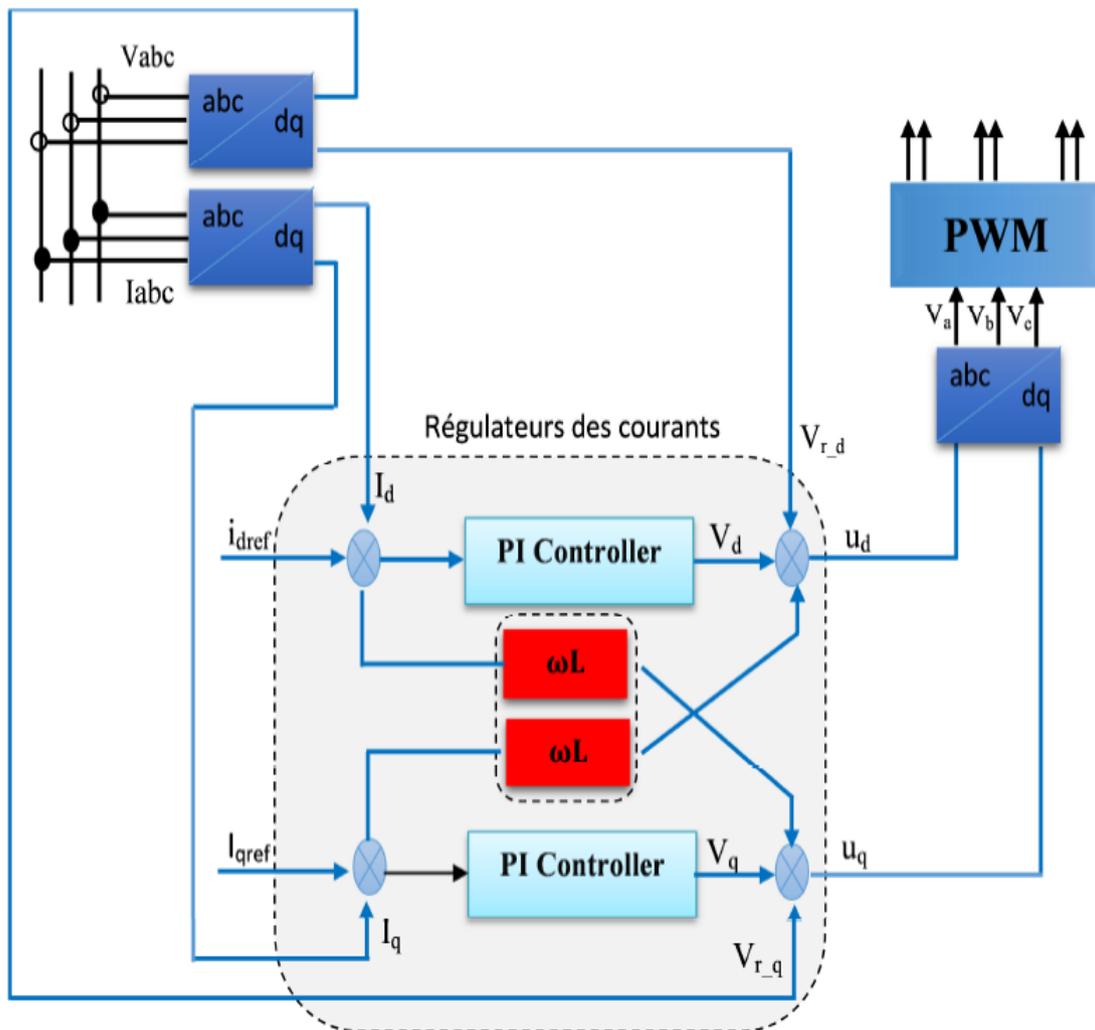
Le réseau triphasé a trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de  $2\pi/3$ , et ayant la même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré. La tension du réseau électrique triphasé équilibrée s'exprime de la manière suivante :

$$\begin{cases} V_a = V_m \cos \omega t \\ V_b = V_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (IV.23)$$

#### IV.5.5.2. Découplage du modèle de l'onduleur [66]

La Figure (IV.21) présente la structure de la boucle interne de contrôle de courant ? L'équation (IV.28) peut être décrite comme suit :

$$\begin{cases} V_d = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q + V_{r_d} \\ V_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d + V_{r_q} \end{cases} \quad (IV.24)$$



**Figure (IV.21) :** La structure de contrôle de courant.

Le but de cette commande est d'imposer les valeurs des puissances actives et réactives injectées au réseau de distribution.

Le champ PV à la présence de toutes les dispositifs hacheur, onduleur, interface et système de commande (MPPT et régulation de la puissance) appelée ce qui communient centrale photovoltaïque. La figure (IV.22) montre cette centrale PV associer au réseau électrique

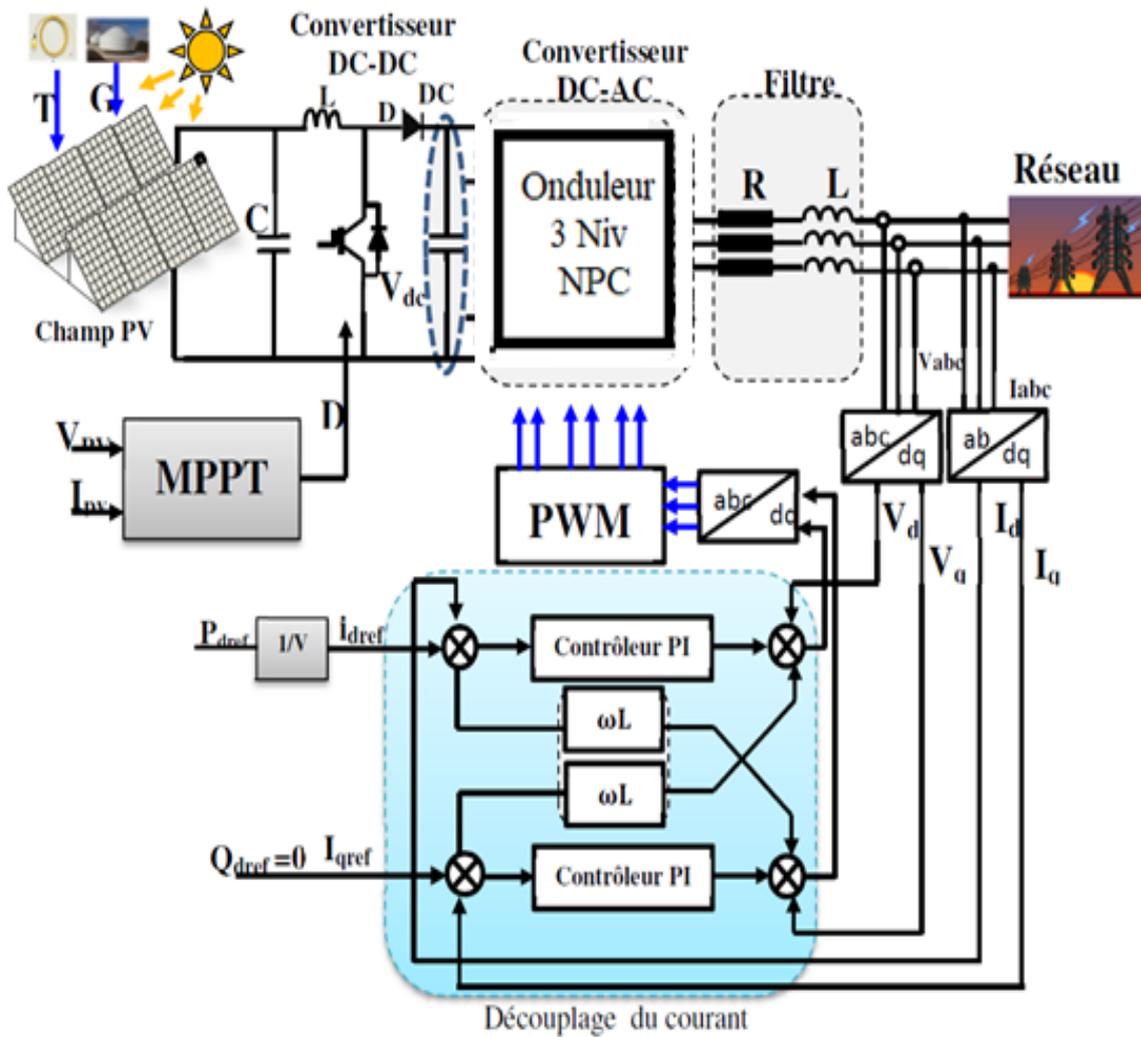


Figure (IV.22) : Schéma du centrale PV associée au réseau.

### IV.5.5.3. Synthèse des régulateurs des courants

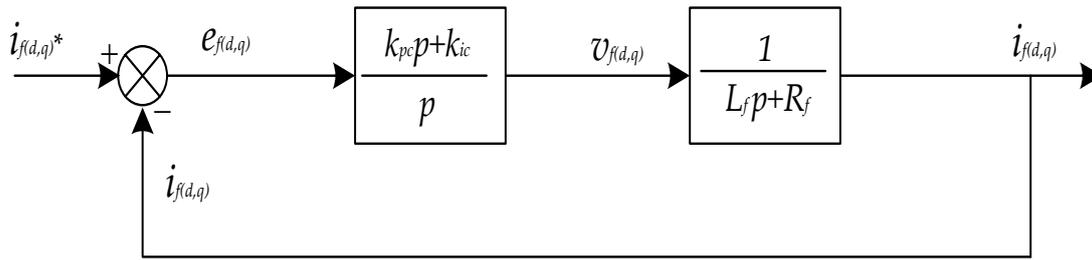
Le correcteur proportionnel-intégral est le correcteur le plus classiquement utilisé pour le contrôle du courant à cause de sa simplicité. La fonction de transfert correspondante est donnée par :

$$R(p) = \frac{k_p p + k_i}{p} \tag{IV.25}$$

Où :

- **p** : L'opérateur de Laplace.
- **K<sub>P</sub>** et **k<sub>I</sub>** : Désignent les gains de régulateur.

Après compensation, le schéma simplifié de la boucle de régulation du courant est illustré par la figure (IV.23).



**Figure (IV.23) :** Schéma bloc de régulation des courants par des régulateurs PI.

La fonction de transfert en boucle ouverte correspondante à ce schéma est :

$$F(p) = \frac{k_{pc}p + k_{ic}}{p} \frac{1}{L_f p + R_f} \quad (IV.26)$$

La fonction de transfert en boucle fermée sera donc :

$$H(p) = \frac{k_{pc}p + k_{ic}}{L_f p^2 + (R_f + k_{pc})p + k_{ic}} \quad (IV.27)$$

Pour commander le système en boucle fermée, il est nécessaire de bien choisir les coefficients  $k_{pc}$  et  $k_{ic}$ . Dans la méthode d'imposition des pôles, on doit faire une analogie entre l'équation caractéristique de la fonction  $H(p)$  et celle de la fonction de transfert d'un système du deuxième ordre en boucle fermée donnée par :

$$G(p) = p^2 + 2\xi_c \omega_{nc} p + \omega_{nc}^2 \quad (IV.28)$$

$$G(p) = p^2 + 2\xi_c \omega_{nc} p + \omega_{nc}^2 \quad (IV.29)$$

Finalement on en déduit les valeurs des constantes du régulateur comme suit :

$$\begin{aligned} k_{pc} &= 2\xi_c \omega_{nc} L_f - R_f \\ k_{ic} &= L_f \omega_{nc}^2 \end{aligned} \quad (IV.30)$$

Où :

- $\xi_c$  et  $\omega_{nc}$  : Représentent respectivement le facteur d'amortissement et la pulsation du système du deuxième ordre.
- $K_{pc}$  et  $K_{Ic}$  : Gains du régulateur PI des courants actif et réactif.

#### IV.5.5.4. Synthèse du régulateur de la tension continue

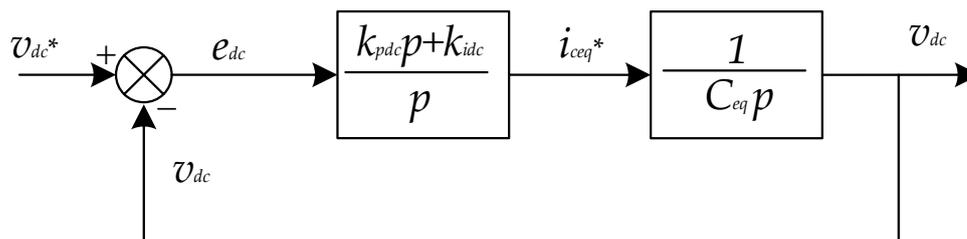
La tension continue  $V_{dc}$  aux bornes du bus continu, doit être maintenue constante. Les fluctuations de cette tension doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, et d'autre part pour ne pas dégrader les performances de l'onduleur. Afin d'assurer la régulation de la tension continue, un régulateur est indispensable.

L'application de la transformation de Laplace de la tension  $V_{dc}$  :

$$V_{dc}(p) = \frac{1}{C_{eq}p} i_{ceq}(p) \quad (IV.31)$$

Pour obtenir le signal  $i_{ceq}$  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.

Le bloc de régulation de la tension continue peut-être représenté par le schéma illustré dans la figure (IV.24).



**Figure (IV.24) :** Schéma bloc de régulation de la tension continue par un régulateur PI.

La fonction de transfert en boucle ouverte correspondante à ce schéma est :

$$F_{dc}(p) = \frac{k_{pdc}p + k_{idc}}{p} \frac{1}{C_{eq}p} \quad (IV.32)$$

La fonction de transfert en boucle fermée sera donc :

$$H_{dc}(p) = \frac{k_{pdc}p + k_{idc}}{C_{eq}p^2 + k_{pdc}p + k_{idc}} \quad (IV.33)$$

On doit faire une analogie entre l'équation caractéristique de la fonction  $H_{dc}(p)$  et celle de la fonction de transfert d'un système du deuxième ordre en boucle fermée donnée par :

$$G_{dc}(p) = p^2 + 2\xi_{dc}p + \omega_{ndc}^2 \quad (IV.34)$$

Finalement on trouve les valeurs des constantes du régulateur comme suit :

$$\begin{aligned} k_{pdc} &= 2\xi_{dc}\omega_{ndc}C_{eq} \\ k_{idc} &= C_{eq}\omega_{ndc}^2 \end{aligned} \quad (IV.35)$$

La régulation du bus continu fournit la référence du courant côté continu  $i_{ceq}^*$ , puis on calcul la référence du courant actif du côté alternatif  $i_{fd}^*$  :

$$i_{fd}^* = \frac{P_{pv} - v_{dc}i_{ceq}^*}{v_{dc}} \quad (IV.36)$$

## IV.6 Résultat de simulation

### IV.6.1 Présentation de la structure de système photovoltaïque

Sous l'espace Matlab on va simuler, sur la base de modèle mathématique représenté ci-dessus, deux centrales photovoltaïques associées au réseau électrique. Chaque centrale PV est composée de quatre modules de 100Kw dont les caractéristiques sont les suivantes :

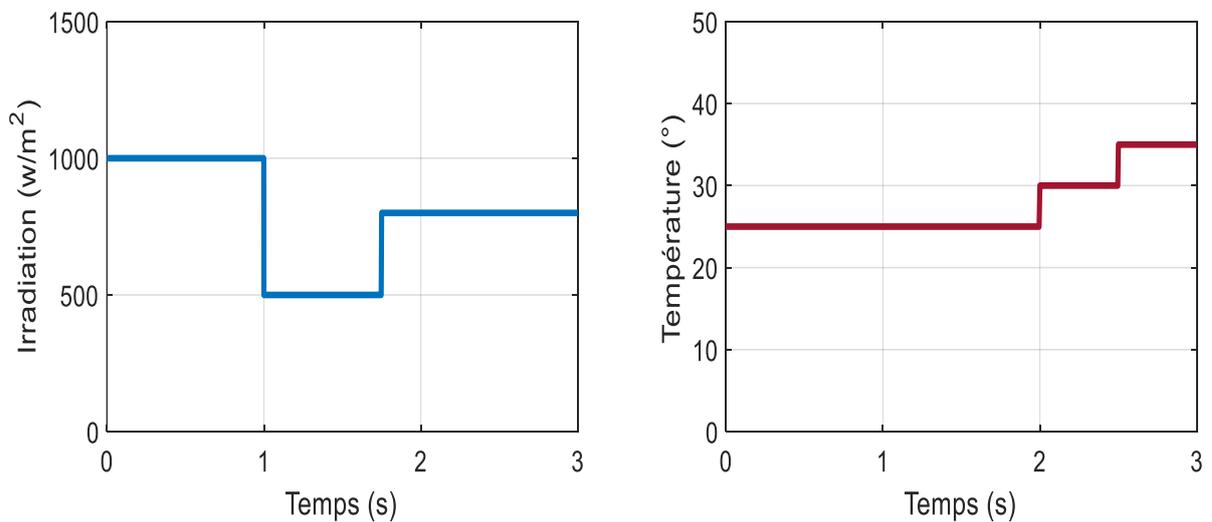
- Un générateur photovoltaïque de 400KW.
- Un hacheur survolteur « boost », de 500V avec une commande MPPT de type P&O.
- Un onduleur trois niveaux de structure NPC, avec une commande MLI à deux porteuses.
- Transformateur de 400KVA, (160V-25KV).
- Deux charges (Charge constante et charge variable inductif).
- Réseaux de 2500MVA.

### IV.6.2. Charge constante

On maintient une charge constante de 600 Kw et avec un profil d'éclairement variable comme suit :

- Au début  $Ir = 1000 \text{ w/m}^2$  et  $T = 25^\circ$ .
- A  $t = 1\text{s}$ ,  $Ir = 500 \text{ w/m}^2$ .
- A  $t = 1.75\text{s}$ ,  $Ir = 800 \text{ w/m}^2$ .
- A  $t = 2\text{s}$ ,  $Ir = 800 \text{ w/m}^2$  et  $T = 30^\circ$ .
- A  $t = 2.5\text{s}$ ,  $Ir = 800 \text{ w/m}^2$  et  $T = 35^\circ$ .

On lance une simulation afin d'évaluer le comportement des paramètres d'un module des centrales.



**Figure (IV.25) :** Profile d'éclairement.

#### IV.6.2.1. Générateur PV

Les figures suivantes sont pour les, tension courant et puissance, d'un module de 100 kw.

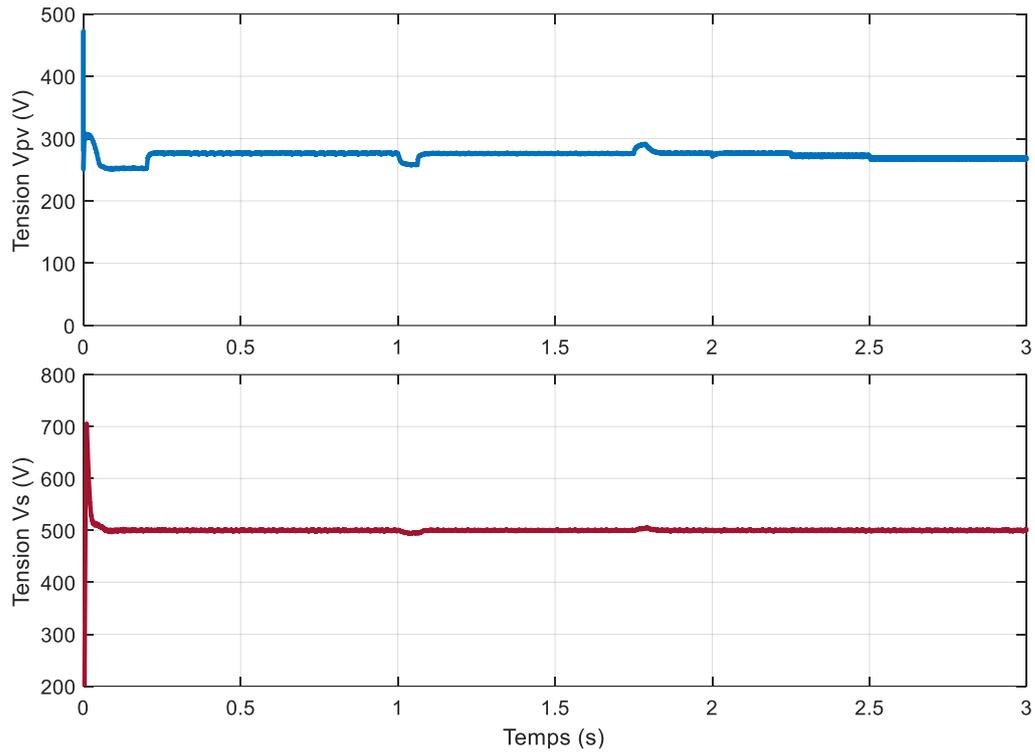


Figure (IV.26) : Tension du module PV et Vs (sortie de l’hacheur).

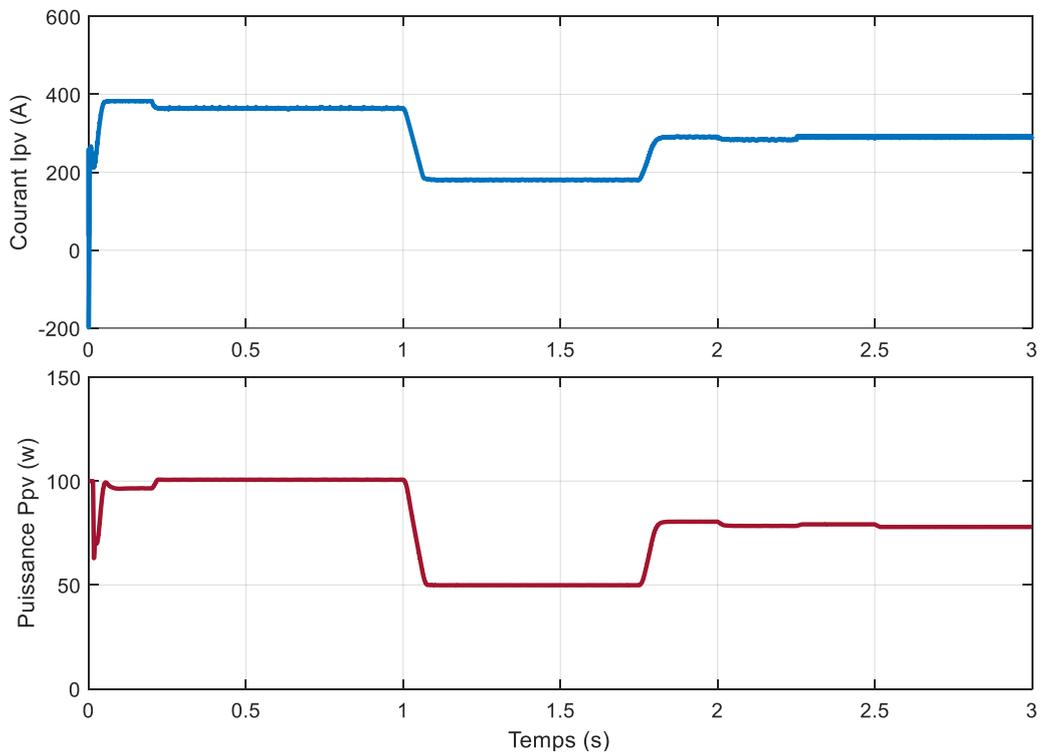
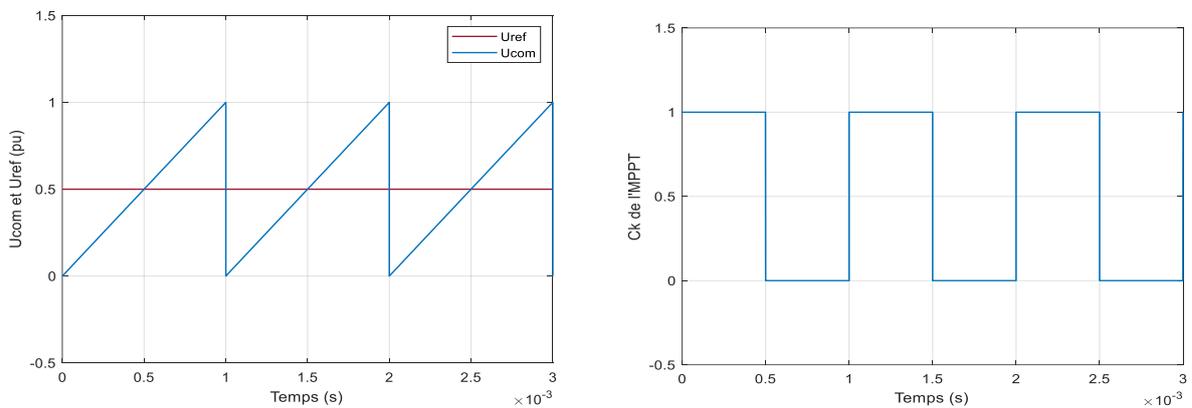


Figure (IV.27) : Courant et puissance du module GPV.

### IV.6.2.2. Hacheur Boost

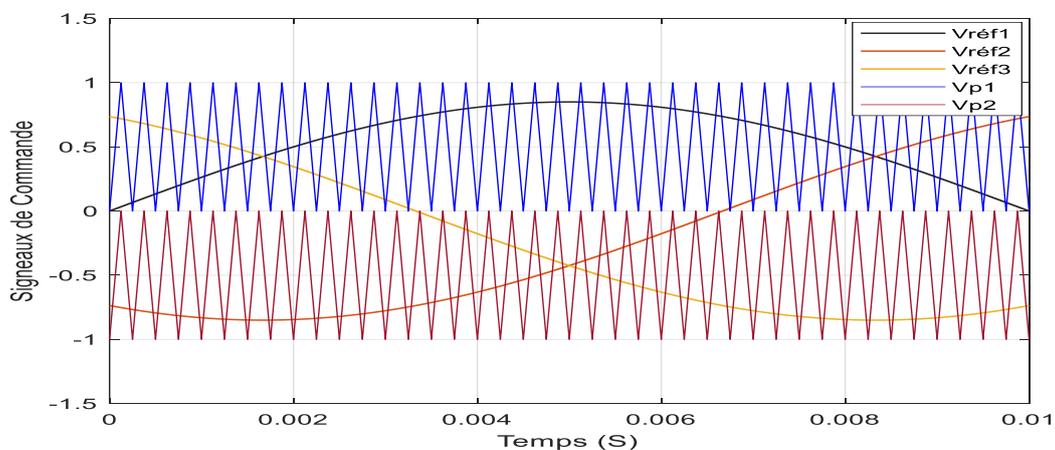
Le rôle de l'hacheur boost est d'adapter la tension des modules à celle de réseau. Etant commandé, suivant la présence des correcteurs, témoigne que malgré le changement de l'allure de profile la tension se maintient constante à cause de la présence de l'hacheur boost et, la commande de la tension par une boucle fermée qui impose de suivre la référence donnée  $V_{ref}$ . Alors que la tension reste constante. Et sans fluctuation le changement de profile se reflète par l'abaissement de courant et la diminution de la puissance totale. Aussi la loi de la tension est gouvernée par la présence de l'algorithme de L'MPPT qui fournit le paramètre  $C_k$  figure (VI.28).



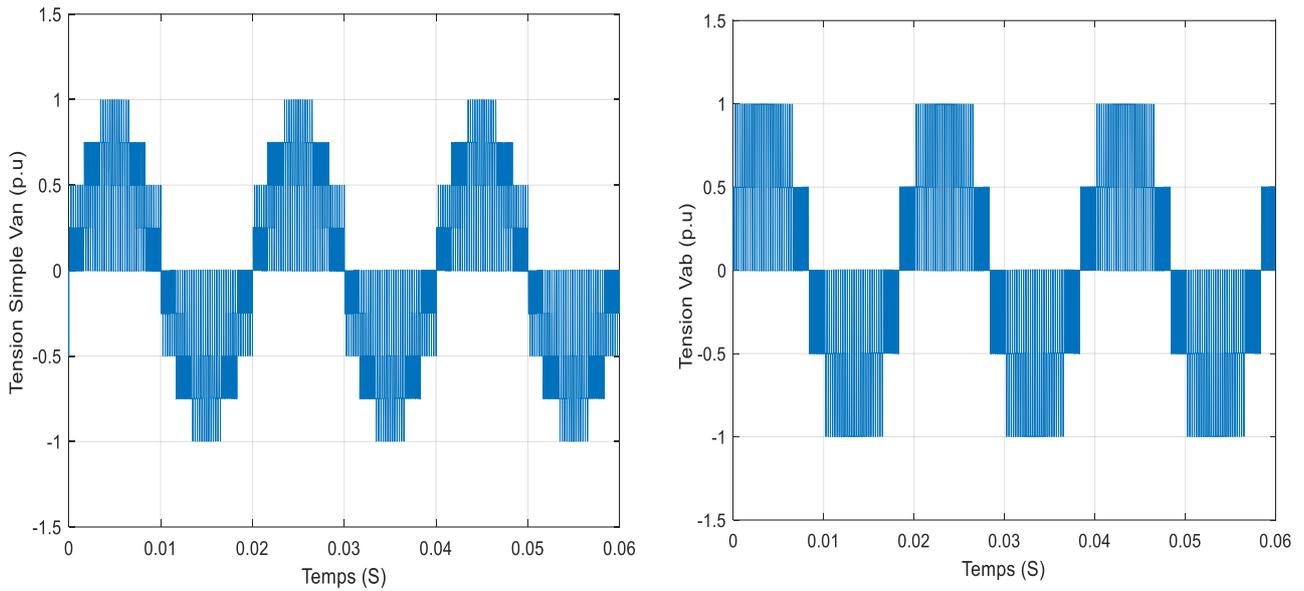
**Figure (IV.28) :** Forme des Impulsions de commande de l'hacheur.

### IV.6.2.3. Convertisseur Continu-Alternatif

Le passage vers le réseau ou vers le consommateur se fait via l'étage de l'onduleur (connu dans le chapitre précédent) a dont les figures (29 et 30) sont présentées juste pour compléter.

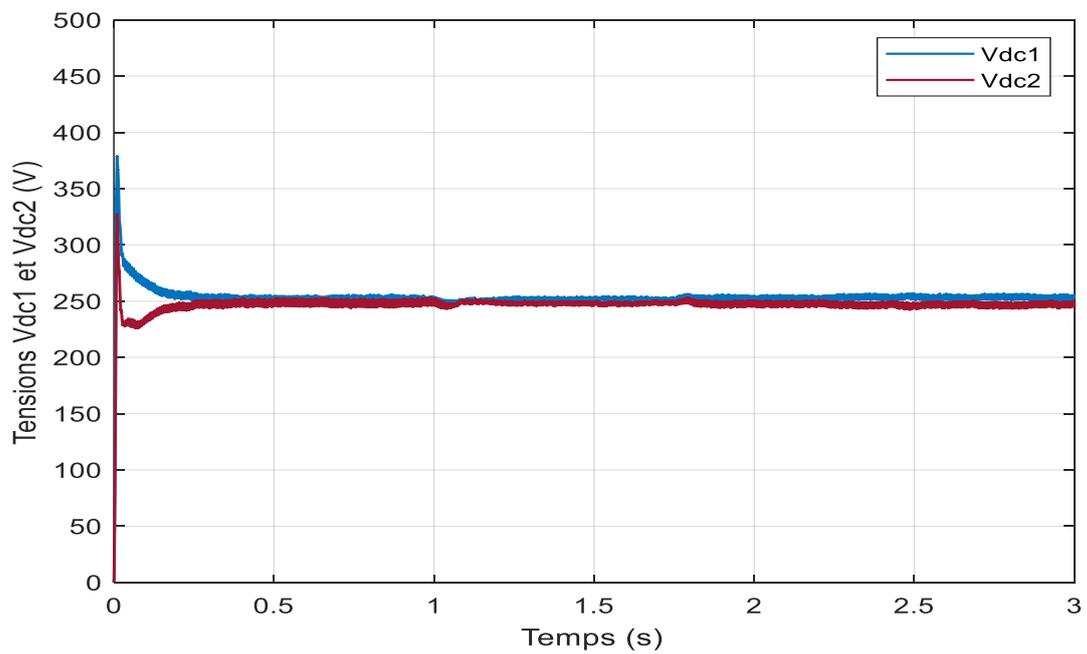


**Figure (IV.29) :** Commande MLI avec deux porteuses unipolaires.



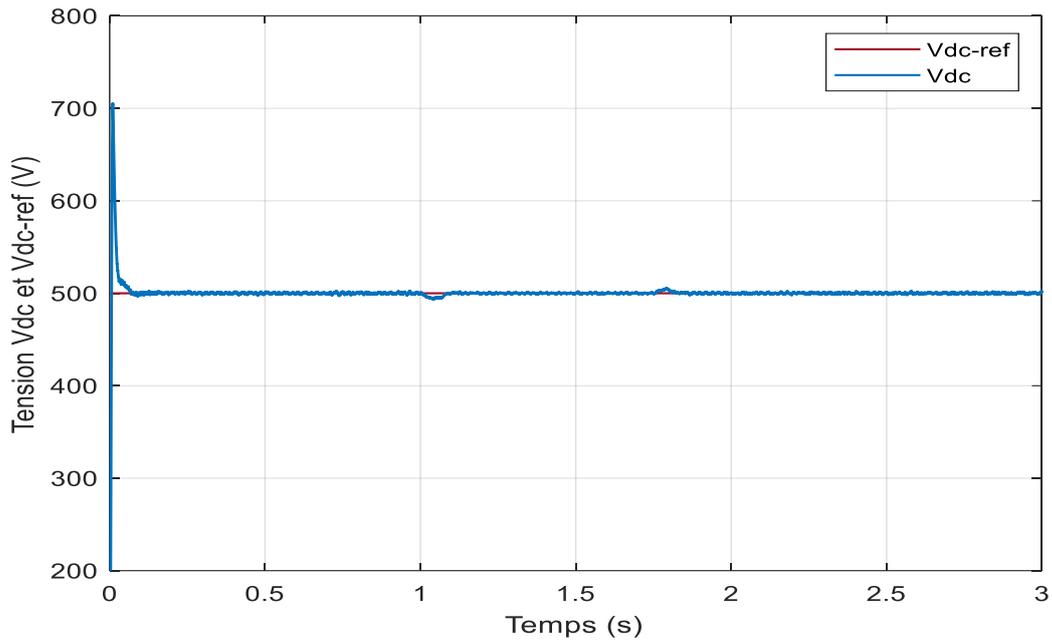
**Figure (IV.30) :** Tension simple et Composé de l'onduleur.

Les figures (31 et 32) montrent les tensions de bus continu avant onduleur et que la commande choisi la maintient à la référence imposée  $v_{ref}$ .

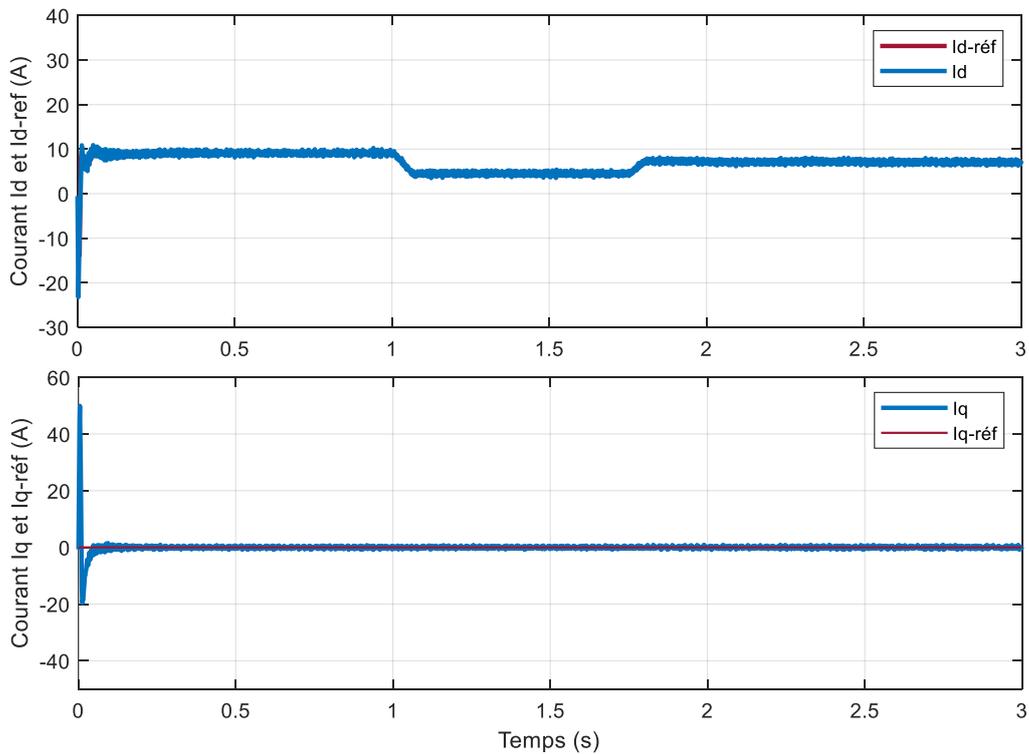


**Figure (IV.31) :** Tensions aux bornes des condensateurs.

La figure (IV.31) montre les deux tensions au bornes des deux condensateurs de bus continu.



**Figure (IV.32) :** Tension du bus continu et sa référence (sortie de l’hacheur, entrée de l’onduleur).



**Figure (IV.33) :** Les courants active et réactive et leurs références.

Les figures (IV.32) et (IV.33) prouvent l'efficacité des régulateurs utilisées où la tension continue, courant actif et le courant réactif, et suivent leurs références avec un faible dépassement et une erreur statique nulle en régime permanent.

Le courant ( $I_q=0$ ), donc la puissance réactive injectée est nulle et le courant  $I_d$  permet le contrôle de la puissance active injectée au réseau électrique et on constate que c'est l'image du profile de l'éclairément.

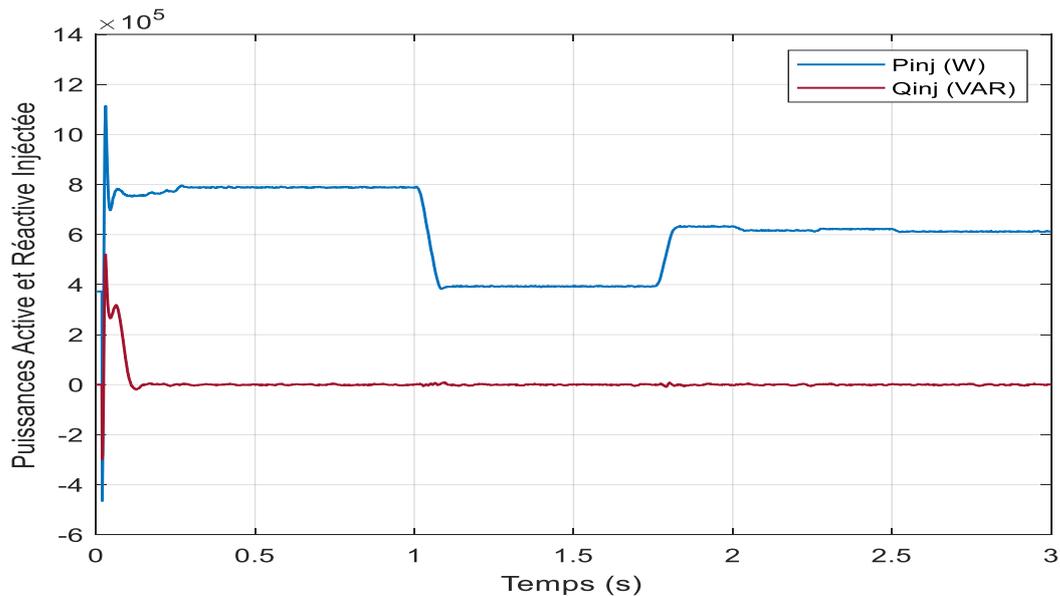


Figure (IV.34) : Les puissances active et réactive injectée par le PV.

#### IV.6.2.4. Le réseau électrique

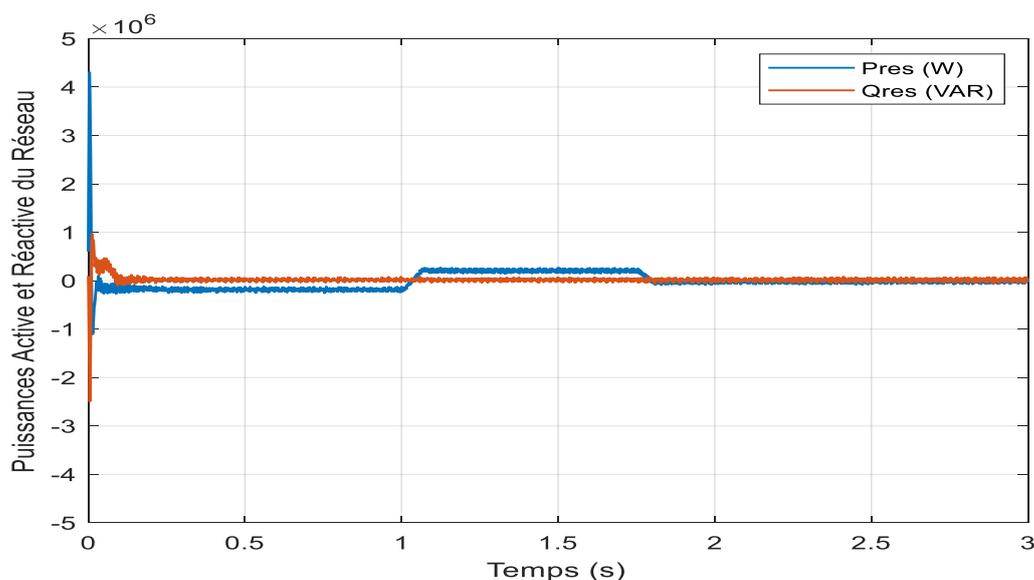
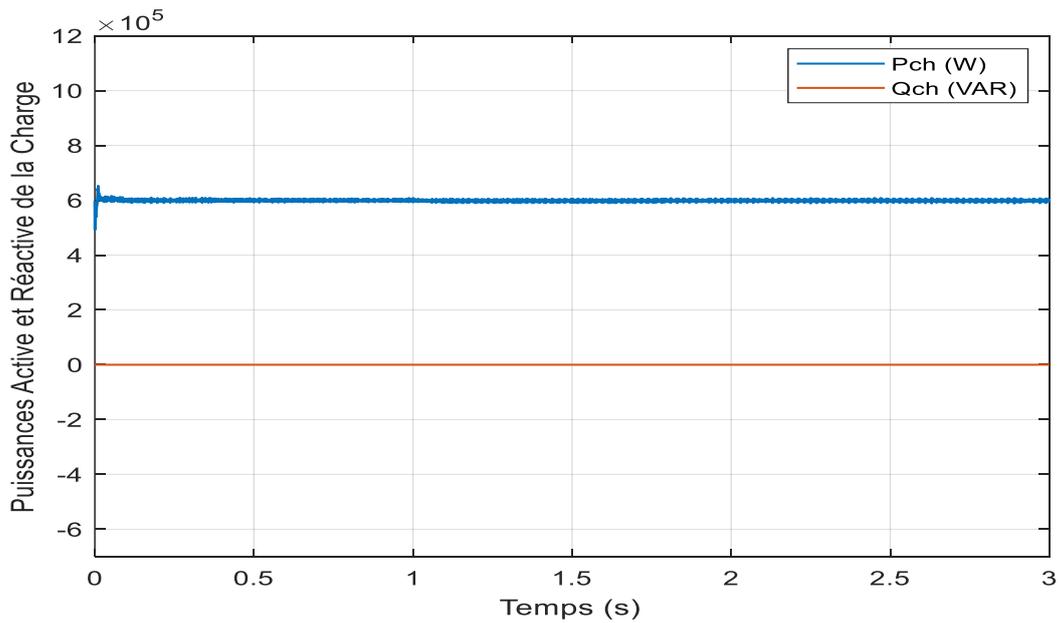
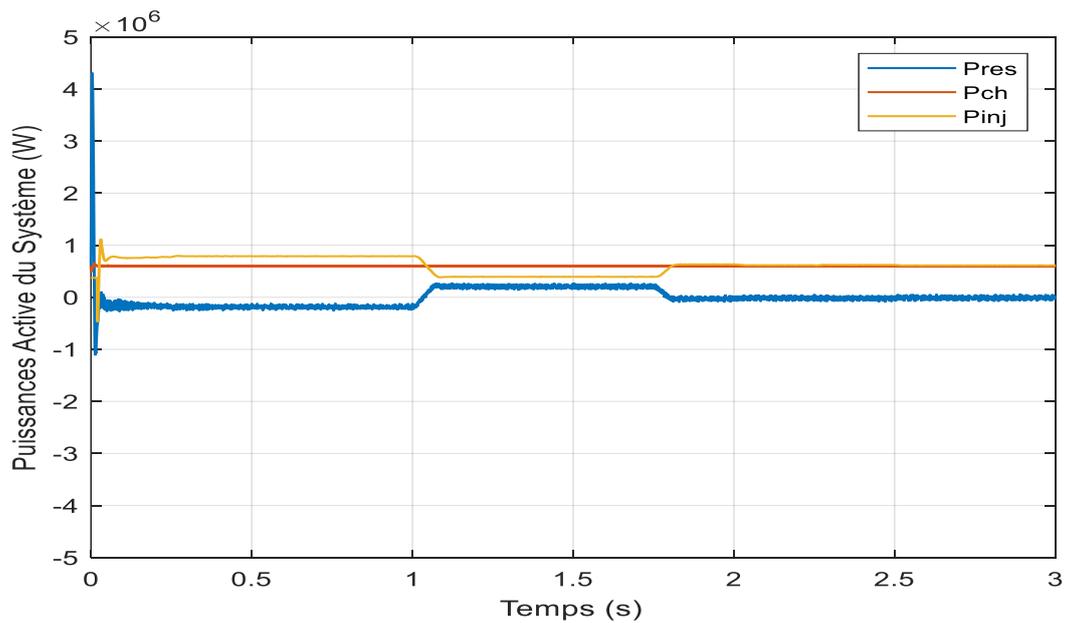


Figure (IV.35) : Les puissances active et réactive du réseau.

## IV.6.2.4. La charge

**Figure (IV.36) :** Les puissances active et réactive de la charge.**Figure (IV.37) :** Flux des puissances active.

D'après la figure (IV.37), on constate bien nettement que la puissance consommée par la charge est égale à la somme des puissances produite par le champ PV et celle fournit par le réseau, autrement dit la charge est alimentée des deux côtés.

### IV.6.3. Charge variable inductif

Afin de bien étudier le comportement de notre système face aux changements climatiques avec un profil d'éclairement variable et d'une charge inductive variable, on a soumis le système photovoltaïque aux variations suivantes :

- Au début, le système alimente la charge (500KW) avec ( $I_r = 1000 \text{ w/m}^2$  et  $T = 25^\circ$ ).
- À  $t = 1\text{s}$ , on augmente la charge à (1500MW, 500KVAR) avec ( $I_r = 500 \text{ w/m}^2$  et  $T = 25^\circ$ ).
- À  $t = 1.75\text{s}$ , ( $I_r = 800 \text{ w/m}^2$  et  $T = 25^\circ$ ).
- Et enfin à  $t = 2\text{s}$  ; on réduit la charge à (300KW, 100KVAR) avec ( $I_r = 1000 \text{ w/m}^2$  et  $T = 30^\circ$ ).
- À  $t = 2.5\text{s}$ , ( $I_r = 800 \text{ w/m}^2$  et  $T = 35^\circ$ ).

L'objectif de cette partie est de montres le comportement du réseau électrique, pour cela on va montres des résultats de simulations et spécialement : les puissances active et réactive transmises par le réseau.

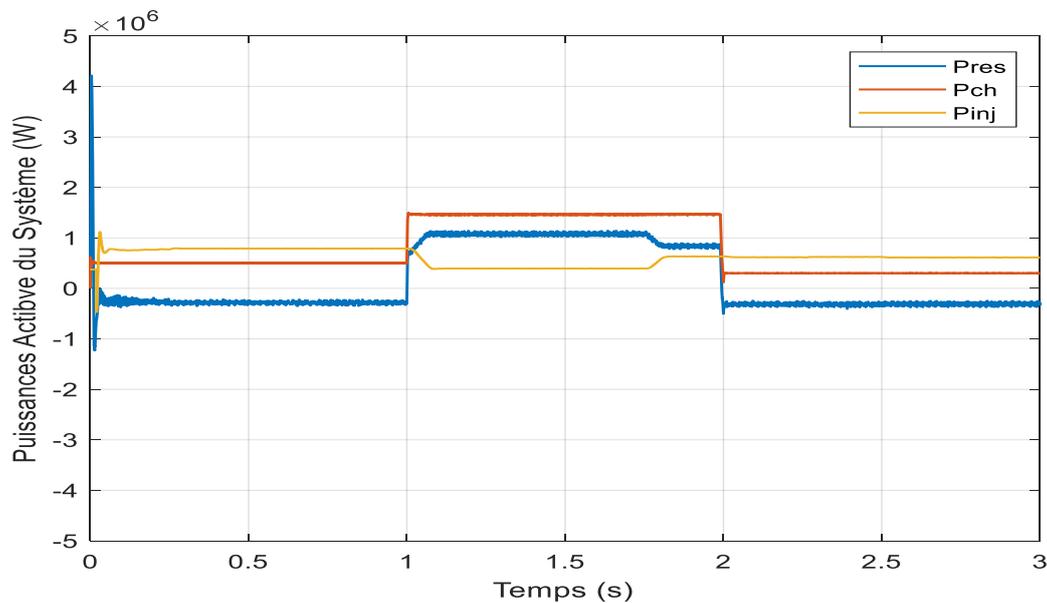
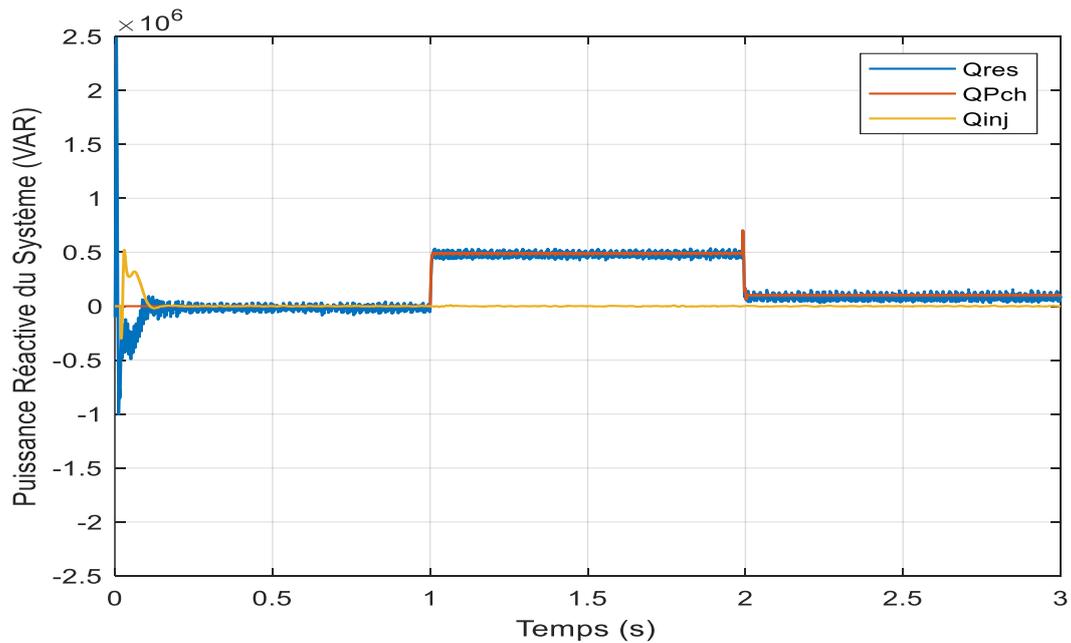


Figure (IV.38) : Flux des puissance réactive.



**Figure (IV.39) :** Flux des puissance active.

D'après la figure (IV.38), on constate bien nettement que la puissance consommée par la charge est égale à la somme des puissances produite par le champ PV et celle fournit par le réseau, autrement dit la charge est alimentée des deux côtés.

On constate également quand on a démuni la charge, le réseau absorbe le reste de la puissance active du PV. Le couplage d'une grande charge dans le réseau provoque une grande appelle de la puissance active. Toutefois, la puissance du champ PV reste constante et c'est le réseau qui va délivre le reste de cette demande de puissance.

D'après la figure (IV.39), on constate bien que la puissance réactive consommée par la charge et totalement délivré par le réseau électrique, car le PV ne fournier pas la puissance réactive et reste toujours nulle quelle que soit la charge.

D'après les résultats de simulation obtenus pour différentes irradiations on constate que chaque fois les réponses du système global suivent bien les références, le système reste toujours stable, ce qui confirme le bon choix des différents régulateurs et on peut dire que la commande du système PV est robuste.

### IV.7 Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'analyse d'une centrale photovoltaïque de 800KVA connecté à un réseau électrique de moyenne tension (25Kv). Après un bref passage sur l'état de l'art des différentes topologies des systèmes photovoltaïques (systèmes : autonome, hybride et totalement connecté au réseau électrique) les points suivants sont bien traités :

- La modélisation du système photovoltaïque : le générateur PV, le convertisseur DC/DC Boost et l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux du type NPC.
- Différentes techniques de MPPT sont présentées et spécialement la méthode P&O.
- Elaboration des différentes boucles de contrôle et synthèse des régulateurs à savoir : le contrôle du bus continu, la PLL pour le contrôle de la fréquence de sortie et le contrôle des courants (ou des puissances injectés) par l'onduleur.
- Présentation et interprétations des résultats de simulation du système PV connecté au réseau MT, avec une charge variable : à savoir les caractéristiques de sorties de chaque étage du système PV. On constate bien un bon maintien de la tension DC, malgré les variations de la charge et un très bon découplage entre les puissances active et réactive injectées dans le réseau électrique. Dans cette partie on fonctionne à facteur de puissance unitaire du système PV et donc la puissance réactive injectée est maintenue nulle par la commande de l'onduleur.

*« Pour réussir, il ne suffit pas de prévoir. Il faut aussi savoir improviser »*

*I.Asimov*

## *Chapitre V*

# **Systeme PV-STATCOM Connecté au Réseau Electrique**

## *Chapitre V :*

# *Système PV-STATCOM Connecté au Réseau Electrique*

### **V.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, on présentera une étude par simulation d'un système combiné : centrale PV-STATCOM, connecté au réseau électrique de moyenne tension (25Kv), figure (V.1). Le système PV-STATCOM est composé de :

- Une centrale PV de 800Kw, qui fournit de la puissance active au réseau électrique.
- Et un onduleur triphasé doté d'une commande adéquate fonctionne comme un STATCOM pour compenser l'énergie réactive dans les lignes électriques.

Ce type de système permet une utilisation optimale des équipements utilisés, le même onduleur utilisé pour injecté de l'énergie active du système PV, sur le réseau électrique est utilisé pour compenser l'énergie réactive de ce dernier et améliorer le facteur de puissance de la source, tout en restant dans les limites de puissance de poste de transformateur de 800 Kw.

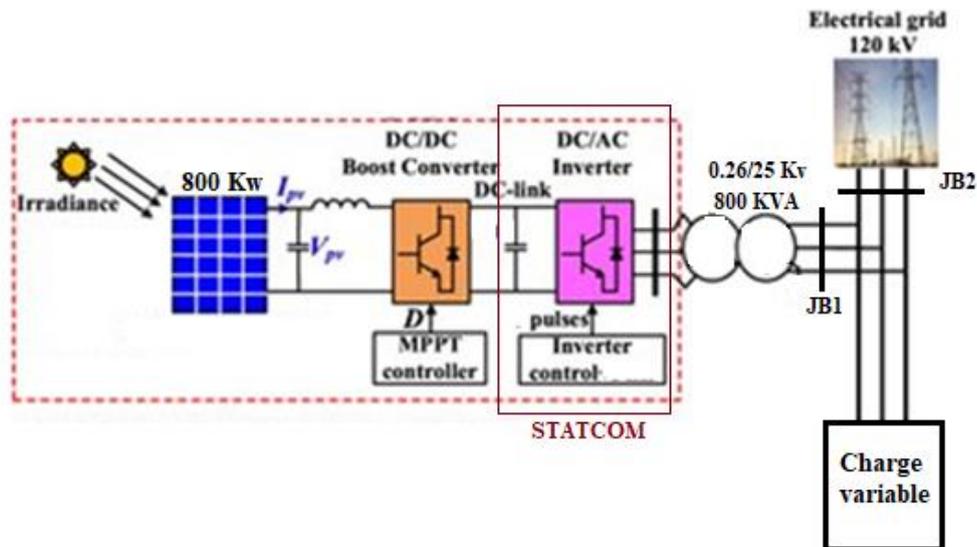


Figure (V.1) : Système PV-STATCOM.

## V.2. Les différents modes de fonctionnement du système PV-STATCOM

Le système PV-STATCOM est connecté au réseau électrique par l'intermédiaire d'un poste de transformateur de puissance nominale :  $S = 800\text{KVA}$  ; ce qui constitue une limite d'utilisation à ne pas dépasser quel que soit les cas de figures.

Donc on peut distinguer trois mode de fonctionnement.

- **Mode 1** : La centrale PV fournit la puissance maximale de 800 Kw, qui correspond à la limite du poste de transformateur (800Kw), dans ce cas de figure, la fonction STATCOM est bloquée et l'onduleur permet uniquement l'injection de la puissance active sur le réseau électrique :  $P_{inj} = 800\text{ Kw}, Q_{inj}=0$
- **Mode 2** : Si la centrale fournit une puissance inférieure à sa puissance nominale (800 Kw), dans ce cas, l'onduleur peut fonctionner comme un STATCOM, pour compenser une partie de la puissance réactive qui circule dans les lignes de transport du réseau électrique, tout en restant dans les limites du poste de transformateur.  $\sqrt{P_{inj}^2 + Q_{inj}^2} \leq 800\text{KVA}$
- **Mode 3** : Si l'irradiation est nul (la nuit), dont la centrale PV n'injecte plus de puissance active, dans ce cas l'onduleur peut fonctionner comme un STATCOM avec le maximum de sa capacité :  $P_{inj} = 800\text{ Kw}, Q_{inj}=0$

Pour la suite de notre étude on va analyser par simulation le comportement du dispositif de puissance pour une charge variable, une température constante de  $25^{\circ}$  et différentes valeurs d'irradiation :  $1000 \text{ w/m}^2$ ,  $500 \text{ w/m}^2$ , et  $0 \text{ w/m}^2$ .

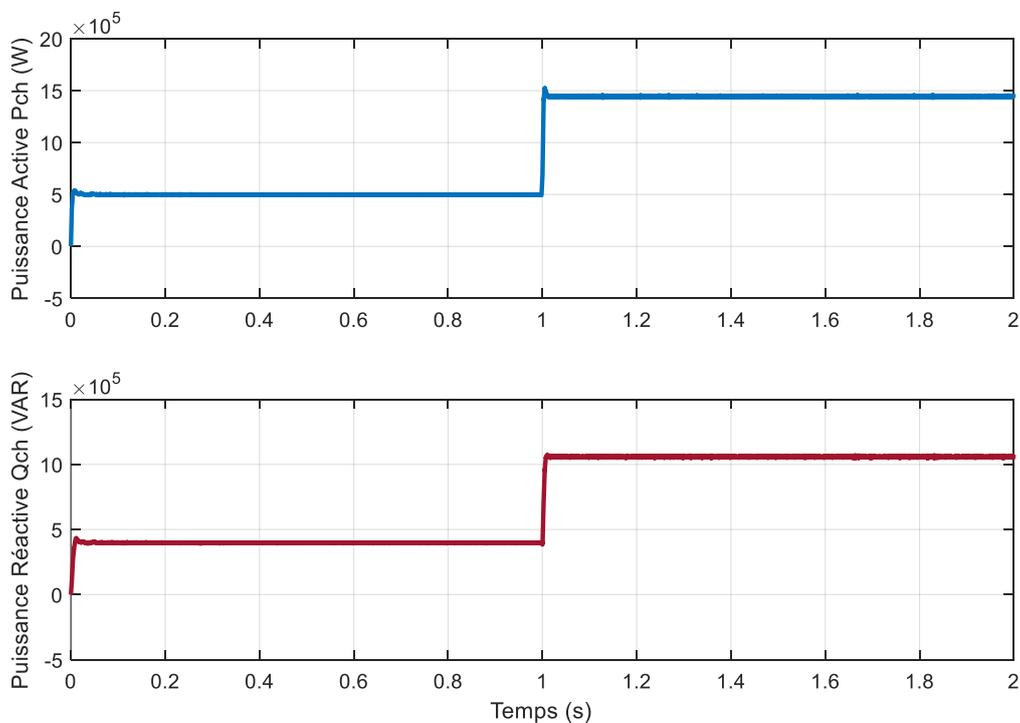
Pour chaque cas nous allons présenter :

- Les puissances injectées par le système PV-STATCOM.
- Les puissances injectées ou absorbées par le réseau électrique.
- Ainsi que le facteur de puissance au niveau du jeu de barre du réseau électrique.

### V.3. Analyse du mode 1 : $I_r = 1000 \text{ w/m}^2$

#### V.3.1. Profil de la charge variable

La figure (V.2) présente le profil d'une charge variable à caractère inductive.

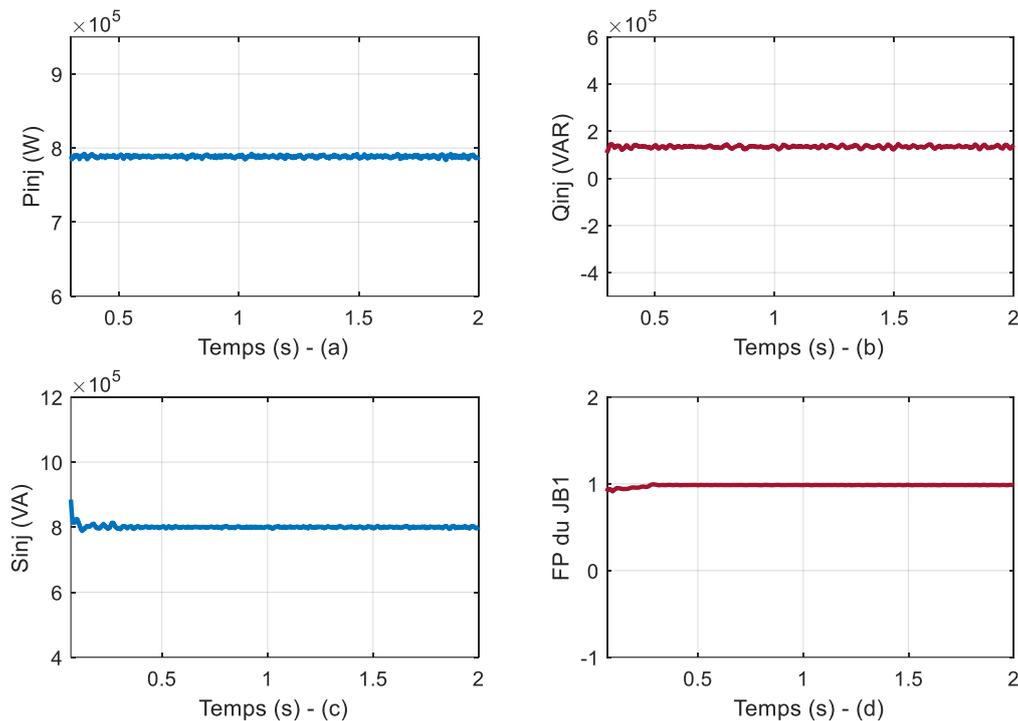


**Figure (V.2) :** Profil de la charge variable.

La charge présente deux paliers :

- Palier 1 :  $[0, 1\text{s}]$  ;  $P_c = 500 \text{ Kw}$ ,  $Q_c = 400 \text{ KVar}$ .
- Palier 2 :  $[1, 2\text{s}]$  ;  $P_c = 1500 \text{ Kw}$ ,  $Q_c = 1100 \text{ KVar}$ .

### V.3.2. Les puissances injectées par le système PV-STATCOM



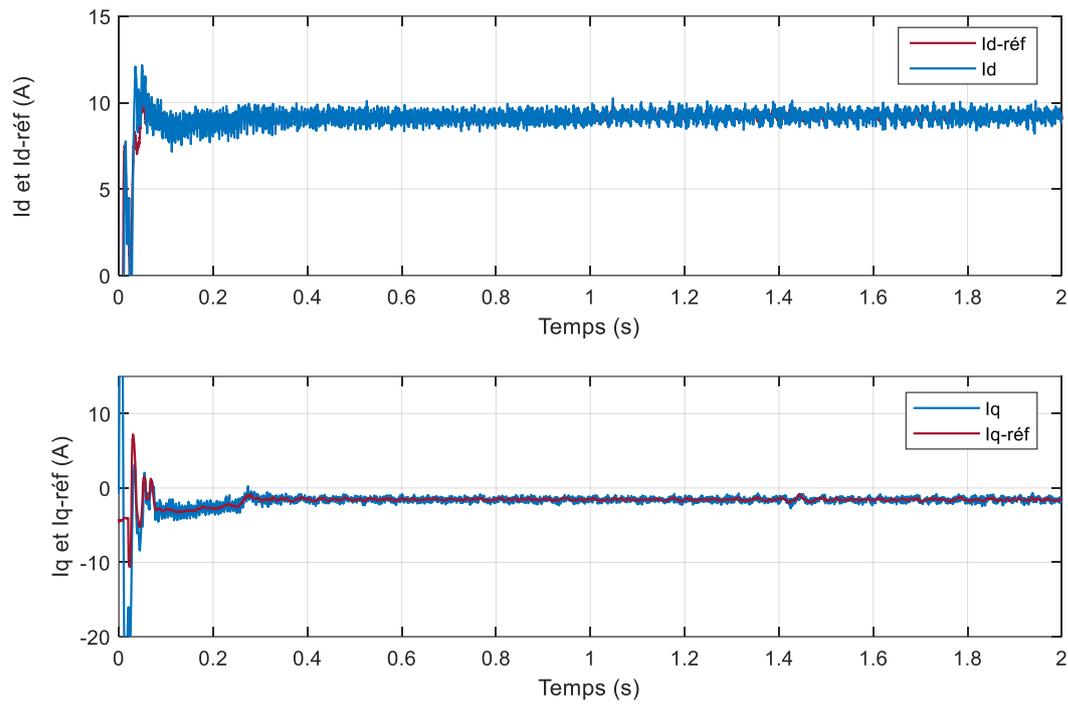
**Figure (V.3) :** Les puissances injectées par le PV-STATCOM, avec le facteur de puissance.

La figure (V.3.a), montre bien le générateur PV, fournit une puissance maximale pour une irradiation de  $1000\text{W/m}^2$ , par contre la puissance injectée sur le réseau électrique au jeu de barre (JB1) est légèrement inférieure à celle du générateur PV, à cause des pertes de puissance de la chaîne de conversion (hacheur boost, onduleur, câble de liaison et postes de transformateur).

La figure (V.3.b), présente la puissance réactive de caractère capacitif, injecté par le STATCOM sur le réseau électrique. On constate une faible valeur de puissance réactive injecté, parce que la puissance active injectée est proche de la puissance nominale du poste de transformateur (800 Kw).

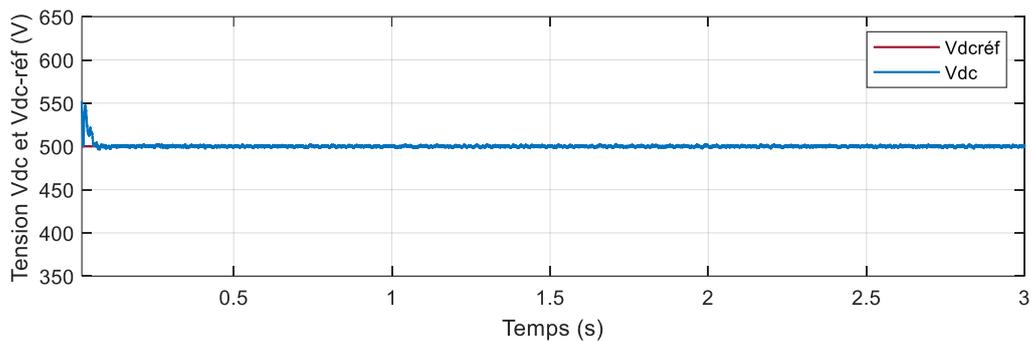
La figure (V.3.c), que la puissance apparente du transformateur reste constante (800 KVA), ce qui garantit le respect des limites thermiques du poste de transformateur.

La figure (V.3.d), montre que le facteur de puissance au jeu de barre (JB1), (point de jonction avec le réseau électrique), est proche de l'unité parce que la puissance réactive injectée est très faible ce qui montre une très bonne exploitation des équipements.



**Figure (V.4) :** Les courants injectés ( $I_d$  et  $I_q$ ) par le PV-STATCOM.

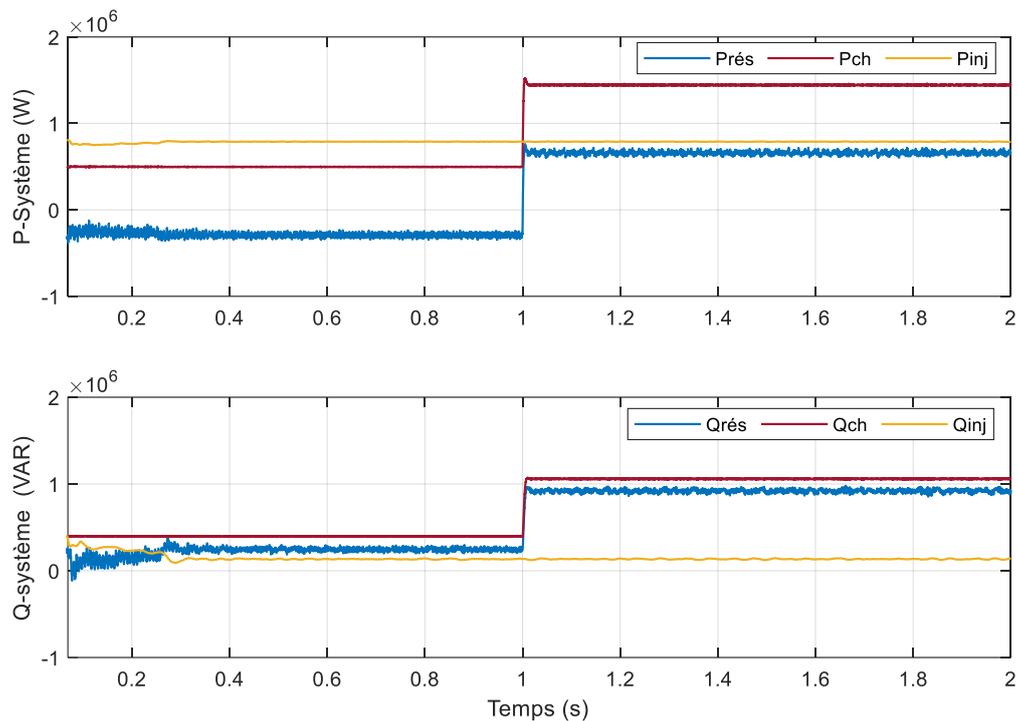
La figure (V.4), permet de constater un bon suivi entre les courants ( $I_d$ ) et ( $I_q$ ) et leurs références, ce qui confirme le bon choix des paramètres des régulateurs des courants. On remarque bien que les puissances injectées sont l'image des courants de contrôle.



**Figure (V.5) :** La tension  $V_{dc}$  et sa référence.

La figure (V.5), montre bien le bon maintien de la tension du bus continue (500 V), ce qui permet une connexion correcte sur le réseau électrique et confirme le comportement correct de la boucle de contrôle de la tension du bus continue.

## V.3.3. Flux des puissances



**Figure (V.6) :** Ecoulement des puissances active et réactive.

La figure (V.6), illustre bien l'évolution du flux des différents puissances (injectée par le système PV-STATCOM et puissances du réseau électrique), on distingue deux cas :

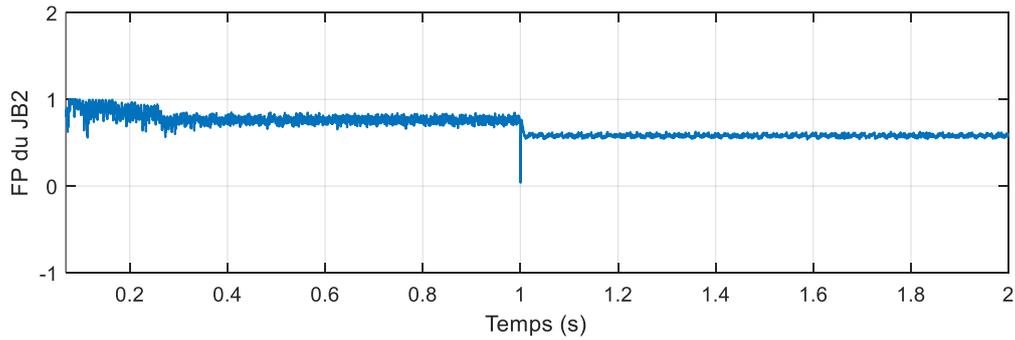
- **Sur le palier un, [0, 1s] :**

Le réseau électrique absorbe le surplus de la puissance active fournie par la centrale PV, le signe moins explique que la puissance est absorbée par le réseau et non injectée.

Pour ce qui est de la puissance réactive, on constate que le réseau fourni de la puissance réactive à la charge.

- **Sur le palier deux, [1, 2s] :**

La charge augmente de puissance (500 Kw – 1500 Kw), le réseau injecte de la puissance active pour compenser le manque de puissance générée par le GPV, de même pour la puissance réactive et fournie par le réseau électrique à la charge.

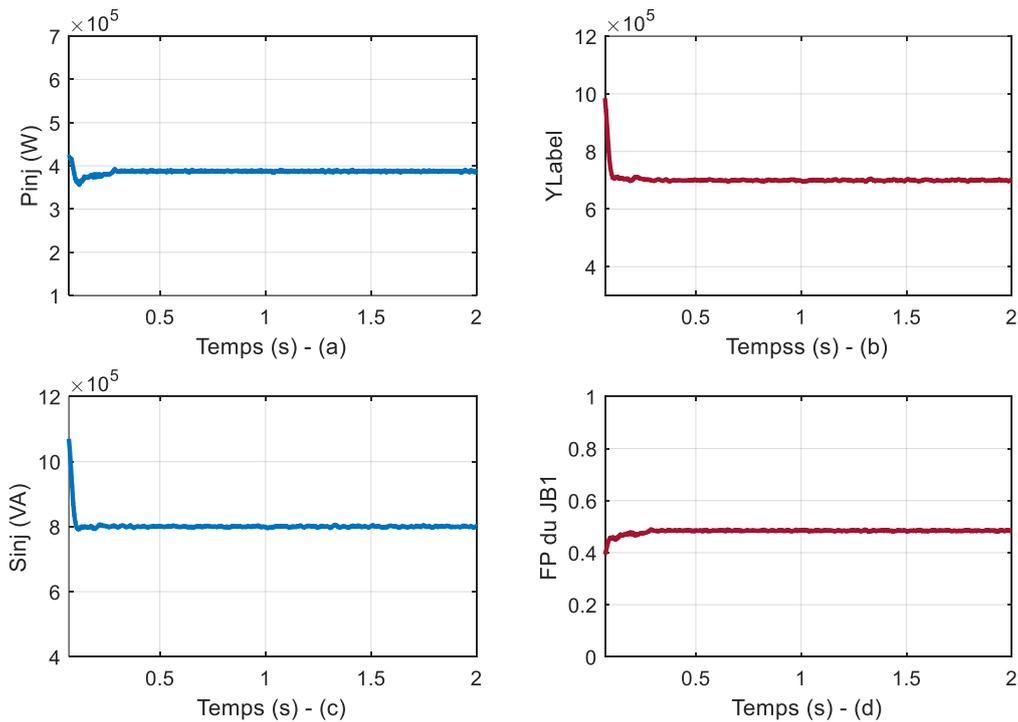


**Figure (V.7) :** Facteur de puissance du (JB2)

On constate que sur la figure (V.7), le facteur de puissance chute durant le second intervalle parce que le STATCOM fonctionnée à sa puissance minimale et le réseau fournie presque la totalité de la puissance réactive.

**V.4. Analyse du mode 2 :  $I_r = 500 \text{ w/m}^2$**

**V.4.1. Les puissances injectées par le système PV-STATCOM**



**Figure (V.8) :** Les puissances injectées par le PV-STATCOM, avec le facteur de puissance.

La figure (V.8.a), montre que la puissance active injectée est réduite de moitié (400Kw), parce que l'irradiation passe de 1000 W/m<sup>2</sup> à 500 W/m<sup>2</sup>.

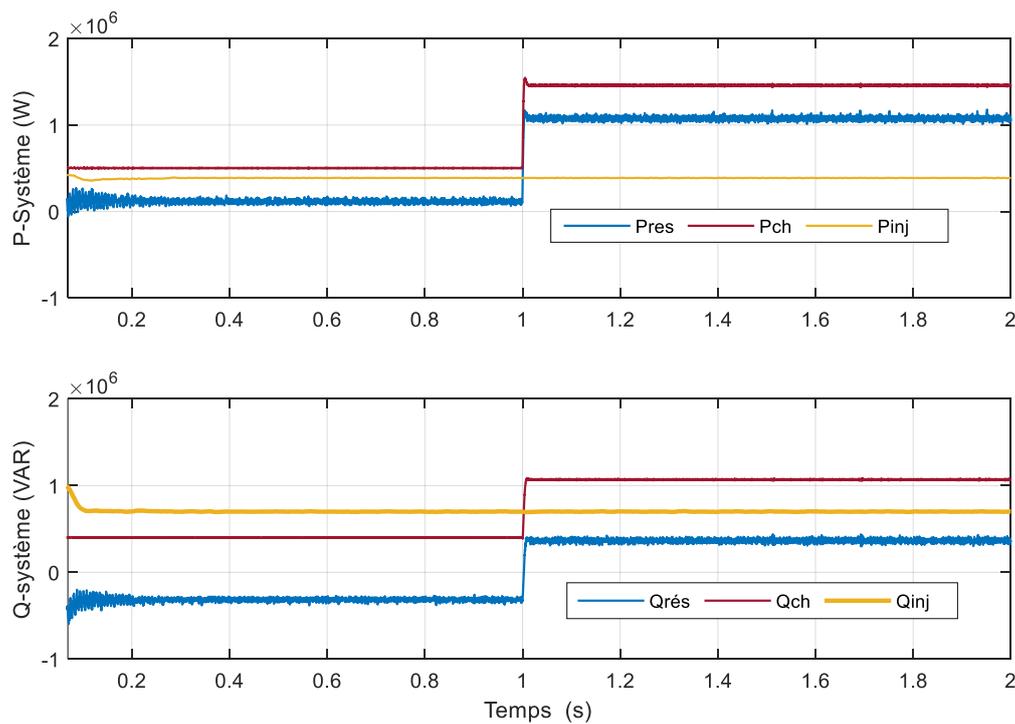
La figure (V.8.b), illustre bien l'augmentation de la puissance réactive fournie par le STATCOM, (700Kw) tout en respectent les limites du poste de transformateur :

$$\sqrt{P_{inj}^2 + Q_{inj}^2} \leq 800KVA.$$

La figure (V.8.c), montre bien que les limite de la puissance apparente du transformateur est toujours respectés (800KVA).

Par contre sur la figure (V.8.d), le facteur de puissance au niveau du jeu de barre du système PV-STATCOM (JB1) est réduit à 0.5, cette diminution s'explique par le réduit de moitié de la puissance active injectée  $(F.P = \frac{400 Kw}{800 KVA}) = 0.5$ .

#### V.4.2. Flux des puissances



**Figure (V.9) :** Ecoulement des puissances active et réactive.

La figure (V.9), illustre bien l'évolution des flux des différentes puissances (injectées par le système PV-STATCOM et le réseau électrique), on distingue deux cas de figure :

- **Sur le palier un [0, 1s] :**

Le réseau électrique compense le manque de puissance réactive à la charge de 500Kw, parce que la centrale PV ne peut fournir que 400Kw.

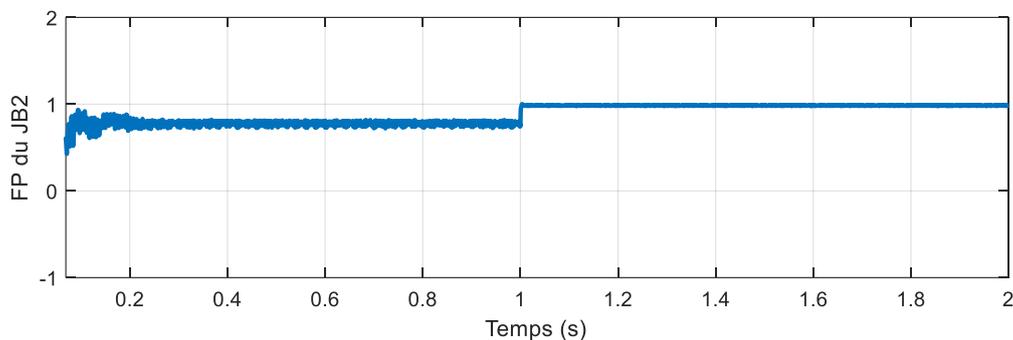
Par contre, le réseau électrique absorbe le surplus de la puissance réactive fournie par le STATCOM (100Kw).

- **Sur le palier un [1, 2s] :**

Le réseau électrique compense toujours le manque de puissance nécessaire à la charge de (1500Kw), parce que la centrale (PV) ne fournit que 400Kw.

De même, le réseau fourni de la puissance réactive :

$$Q_{res} = Q_{ch} - Q_{inj} = 1100 - 700 = 500 \text{ KVAR}$$

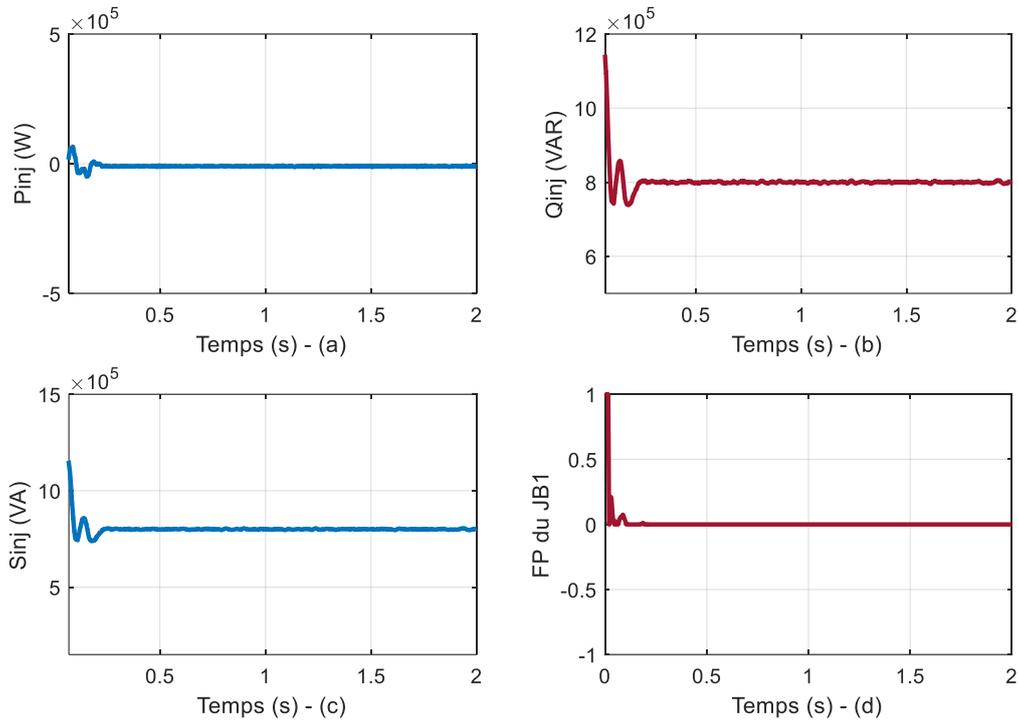


**Figure (V.10) :** Facteur de puissance du (JB2)

Pour ce qu'est du facteur de puissance au niveau du jeu de barre (JB2) on constate que sur la figure (V.10), le facteur de puissance devient unitaire sur le deuxième intervalle.

### V.5. Analyse du mode 3 : $I_r = 0 \text{ w/m}^2$

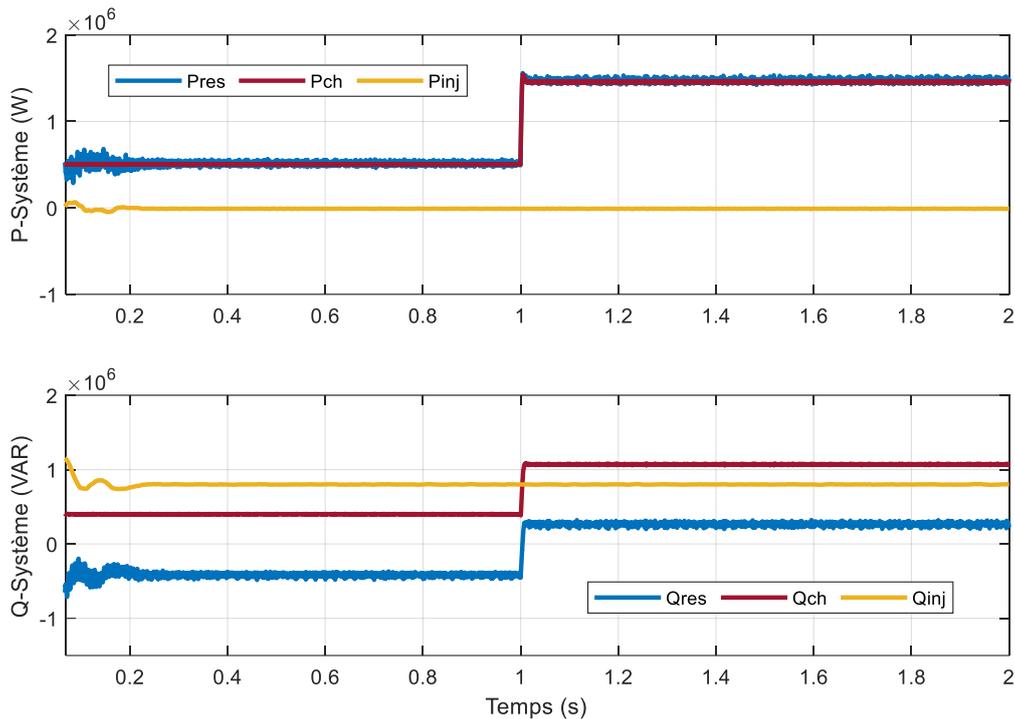
#### V.5.1. Les puissances injectées par le système PV-STATCOM



**Figure (V.11) :** Les puissances injectées par le PV-STATCOM, avec le facteur de puissance.

Naturellement, la centrale ne peut plus fournir de la puissance active ( $P_{inj} = 0$ ), figure (V.11.a), donc le système fonctionne comme un STATCOM, en utilisant toute la puissance apparente de transformateur ( $Q_{inj} = 800\text{KVAR}$ ) et fourni ainsi le maximum de puissance réactive au réseau électrique pour compenser la puissance réactive des lignes (figure V.11.b), et naturellement le transformateur toujours au point nominal ( $S_n = 800\text{KVA}$ ), figure (V.11c).

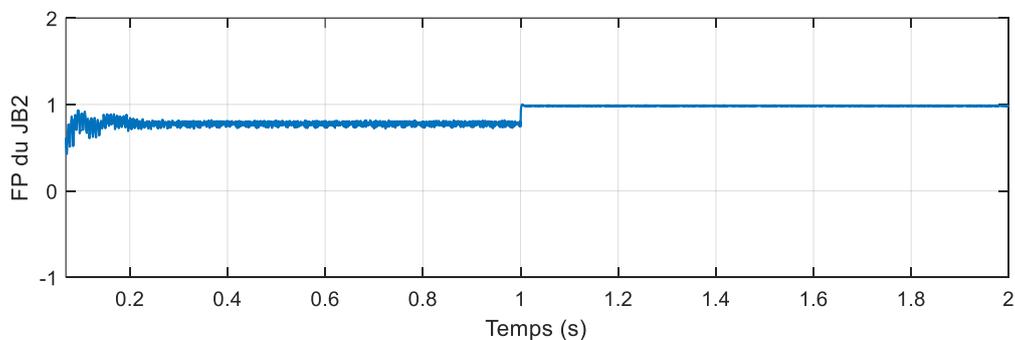
## V.5.2. Flux des puissances



**Figure (V.12) :** Ecoulement des puissances active et réactive.

La figure (V.12), illustre avec détail l'évolution du flux des puissance (injectée par le STATCOM et le réseau électrique) :

- Le réseau fournit la totalité de la puissance active à la charge, sachant que la centrale PV est à l'arrêt.
- Par contre le réseau électrique, absorbe le surplus de la puissance réactive injectée par le STATCOM et permet une très bonne compensation de l'énergie réactive des lignes et permet de fonctionner à facteur de puissance unitaire (figure V.13).

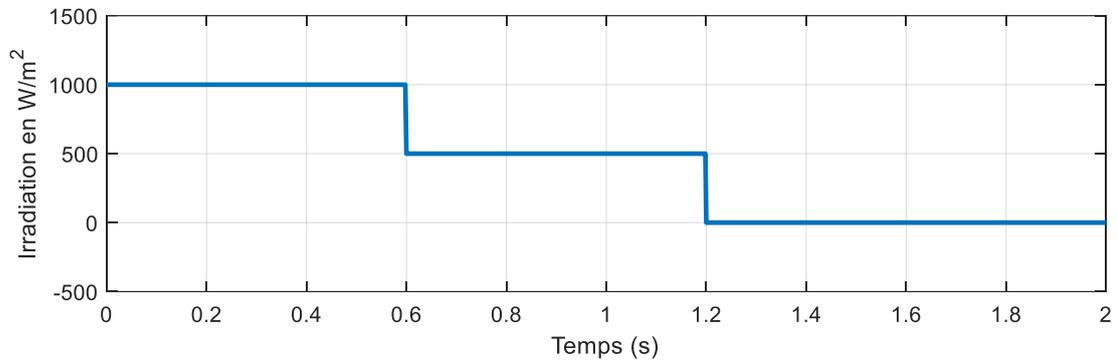


**Figure (V.13) :** Facteur de puissance du (JB2)

## V.6. Analyse du système pour une irradiation variable et une charge variable

### V.6.1. Profil d'irradiation

La figure (V.14) présente le profil d'une Irradiation variable.



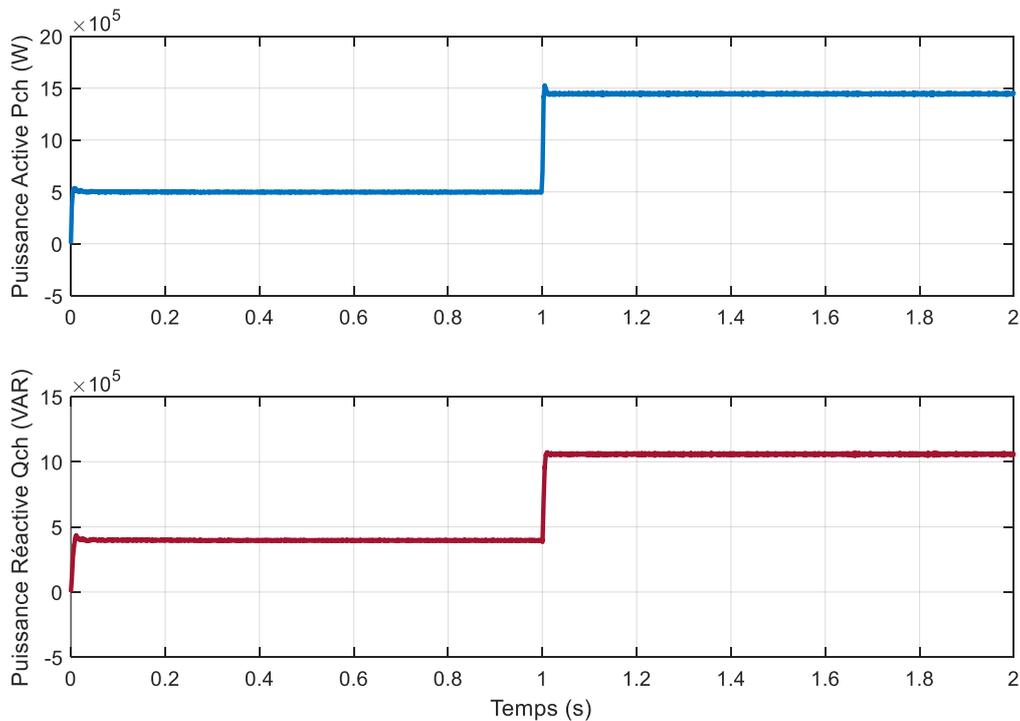
**Figure (V.14) :** Profil d'irradiation.

Le profil d'irradiation présente trois paliers :

- Palier 1 : [0, 0.6s] ;  $I_r = 1000 \text{ w/m}^2$ .
- Palier 2 : [0.6, 1.2s] ;  $I_r = 500 \text{ w/m}^2$ .
- Palier 3 : [1.2, 2s] ;  $I_r = 0 \text{ w/m}^2$ .

### V.6.2. Profil de la charge variable

La figure (V.15) présente le profil d'une charge variable à caractère inductive.



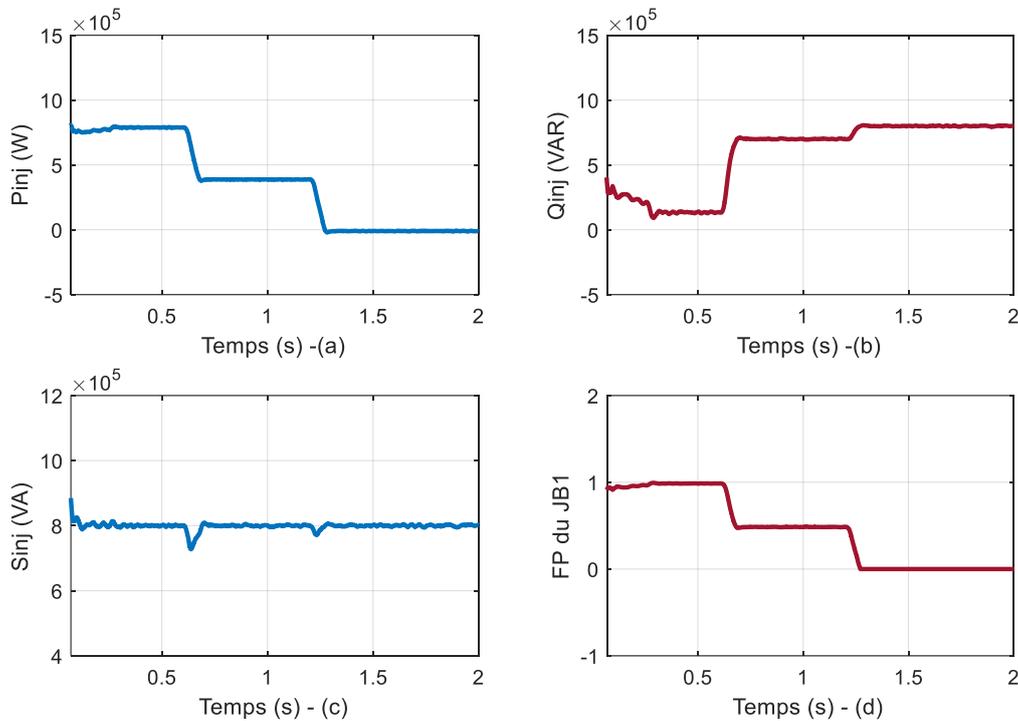
**Figure (V.15) :** Profil de la charge variable.

La charge présente deux paliers :

- Palier 1 : [0, 1s] ;  $P_c = 500 \text{ Kw}$ ,  $Q_c = 400 \text{ KVar}$ .

Palier 2 : [1, 2s] ;  $P_c = 1500 \text{ Kw}$ ,  $Q_c = 1100 \text{ KVar}$ .

### V.6.3. Les puissances injectées par le système PV-STATCOM

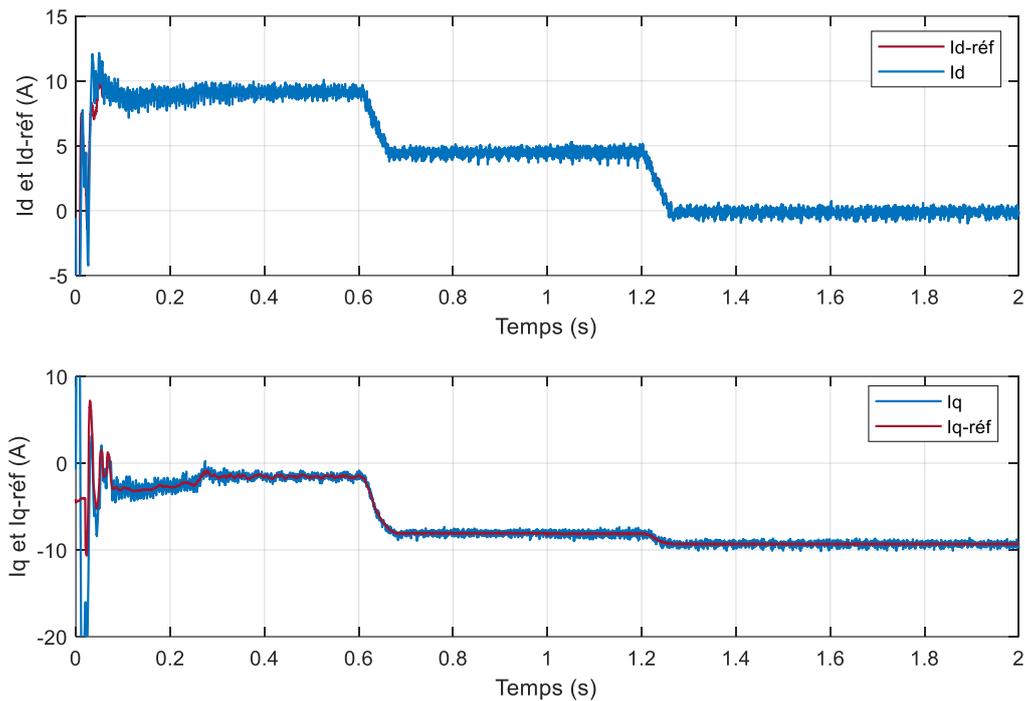


**Figure (V.16) :** Les puissances injectées par le PV-STATCOM, avec le facteur de puissance.

La figure (V.16.a), montre bien l'évolution décroissante de la puissance active injectée avec la diminution de l'irradiation.

La figure (V.16.b), montre une évolution croissante de la puissance réactive injectée, tout en restant dans les limites de la puissance apparente du transformateur (800KVA), figure (V.16.c).

La figure (V.16.d), montre l'évolution décroissante du facteur de puissance du système PV-STATCOM, qui est un résultat naturel de l'évolution décroissante de la puissance active injectée, avec la constance de la puissance apparente.



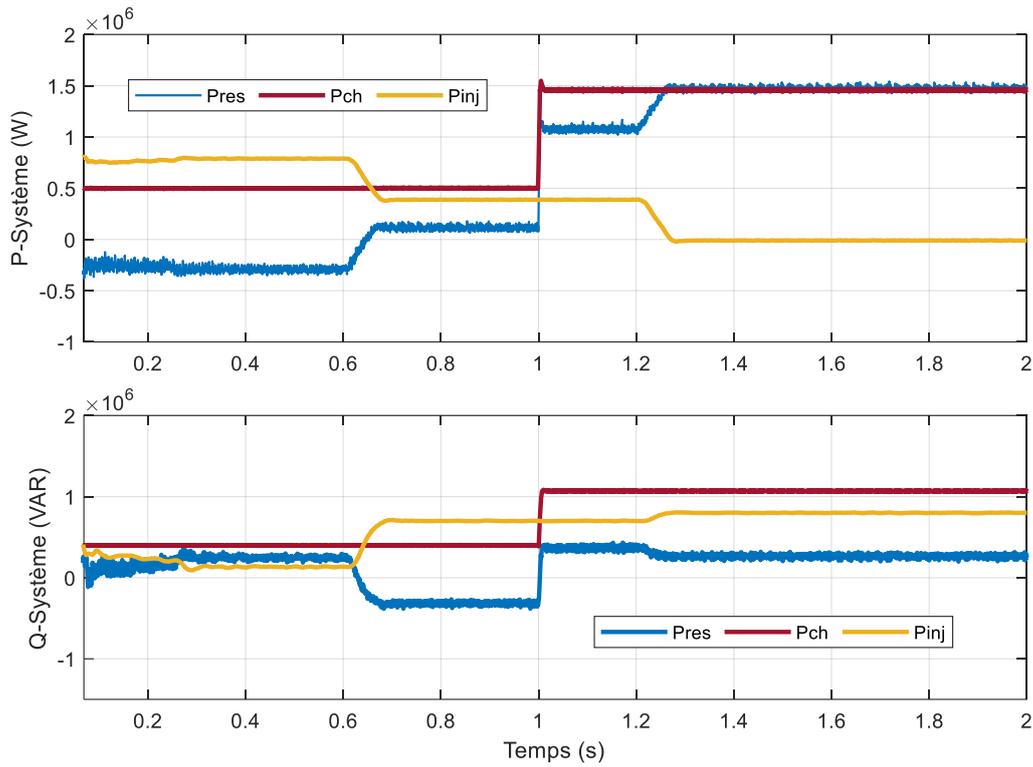
**Figure (V.17) :** Les courants injectés par le PV-STATCOM.

La figure (V.17), montre l'évaluation des courants de contrôle du système PV-STATCOM, le courant active ( $I_d$ ) permet de contrôler la puissance injectée et le courant réactive ( $I_q$ ) contrôle direct de la puissance réactive injectée.

On constate bien la simulation entre l'évaluation des courants et celle des puissances injectées.

De même, on peut voir le bien suivi entre ces courants et leurs références respectives, avec un bon rejet des perturbations (variations de l'irradiation et de la charge) ce qui confirme la robustesse des boucles de contrôles et le bon choix des régulateurs des courants.

## V.6.4. Flux des puissances



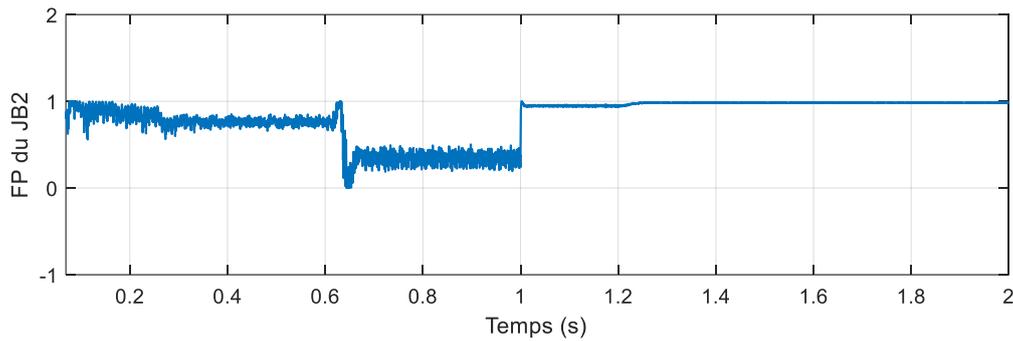
**Figure (V.18) :** Ecoulement des puissances active et réactive.

On peut constater sur la figure (V.18), l'échange des puissances active et réactive entre le système PV-STATCOM, la charge et le réseau électrique tout en respectant le bilan des puissances suivant :

$$\begin{cases} P_{inj} + P_{res} + P_{ch} = 0 \\ Q_{inj} + Q_{res} + Q_{ch} = 0 \end{cases} \quad (V.1)$$

Ainsi que le respect des limites thermique du transformateur du système PV-STATCOM :

$$\sqrt{P_{inj}^2 + Q_{inj}^2} \leq 800KVA \quad (V.2)$$



**Figure (V.19) :** Facteur de puissance du (JB2).

Pour ce qui de l'évolution du facteur de puissance, au niveau du jeu de barre (JB2) du réseau électrique on constate que :

- Pour l'intervalle  $[0, 0.6s]$ , le facteur de puissance est assez élevé de l'ordre de 0.85, ce qu'est très adaptable.
- Par contre durant l'intervalle  $[0.6, 1.25s]$ , la puissance injecter est réduite de 50% donc le facteur de puissance chute à 0.5.
- Et à partir de 1.25s, l'irradiation est nul est le facteur de puissance devient unitaire, donc une très bonne compensation de l'énergie réactive des lignes.

### V.7. Conclusion

Ce chapitre est dédié à l'analyse d'un système combiné : PV-STATCOM connecté au réseau électrique MT :

- La centrale PV fournit de la puissance active au réseau électrique.
- L'onduleur doté d'une commande adéquate fonctionne comme un STATCOM pour compenser l'énergie réactive dans les lignes électriques tout en restant dans les limites de la puissance apparente du transformateur (800KVA).
- Des résultats de simulations, pour différents niveaux d'éclairage et pour différentes charges ont permis de montrer l'efficacité du système PV-STATCOM, tout en observant deux situations intéressantes :
- Durant la journée le système fournit les deux puissances active et réactive, avec un facteur de puissance variable, tout en respectant les limites thermiques des postes de transformateurs (à ne pas dépasser les courants max des transformateurs), ce qui nous

oblige à prendre une marge de sécurité et définir un seuil supérieur pour la puissance réactive à compenser.

- Par contre durant la nuit, le système se transforme en un STATCOM pur (pas de puissance active injectée) et on peut exploiter au maximum les capacités du transformateur, pour compenser la puissance réactive des lignes du réseau électrique.

*« Le rire c'est comme les essuie-glaces, il permet d'avancer même s'il n'arrête pas la pluie »*

***G.Jugnot***

# **Conclusion Générale**

## CONCLUSION GENERALE

Le présent travail de recherche traite la problématique du contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS (Flexible AC Transmission System) avec l'intégration d'une source d'énergie renouvelable. Le contrôle du power system porte sur : la compensation de l'énergie réactive des lignes, maintien de la tension aux niveaux des jeux de barres, l'amélioration du transit des puissances dans les lignes de transport et l'injection de l'énergie photovoltaïque sur le réseau électrique. Plusieurs approches et techniques sont développées, traitées, testées et commentées. On peut distinguer cinq parties essentielles :

La première partie présente l'état de l'art des systèmes FACTS :

- Les problématiques des lignes de transports de l'énergie électrique (contrôle du flux des puissances actives et réactives, stabilité des réseaux électriques, chute des tensions dans les lignes, facteur de puissance des sources et rendement des lignes de transports...etc.).
- Présentation des compensateurs conventionnelles électromécaniques (circuits LC série, parallèle et transformateur déphaseur...etc.).
- Présentation des systèmes FACTS de première génération, à base de Thyristors : le SVC (Static VAR Compensator) le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), le TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)...etc.
- Présentation des systèmes FACTS de deuxième génération, à base d'interrupteurs de puissance rapides et bi-commandables (IGBT), comme solutions aux problèmes des réseaux électriques, je cite à titre d'exemples : le STATCOM (Static Compensator), comme compensateur shunt, le SSSC (Static Synchronous Series Compensator) comme compensateur série et l'UPFC (Unified Power Flow Controller) combine à la fois la compensation série et la compensation parallèle. C'est le système FACTS le plus puissant, dans la mesure où il permet de régler la puissance active et réactive ainsi que la tension du jeu de barre où il est inséré.
- Différentes structures de systèmes FACTS sont présentés et comparés.

---

La seconde partie est dédiée à la modélisation et la commande d'un compensateur série-parallèle UPFC, utilisé comme contrôleur universel du flux de puissance (Unified Power Flow Controller) :

- Présentation de la structure de puissance de l'UPFC et élaboration d'un schéma équivalent unifilaire.
- Modélisation du compensateur shunt : le STATCOM.
- Contrôle de la tension du bus continu par un régulateur PI classique.
- Contrôle des courants par la méthode watt-var découplé : élaboration de la référence et synthèse des régulateurs PI des courants, pour le maintien de la tension et le fonctionnement avec facteur de puissance unitaire des sources.
- Présentation de l'approche de la logique floue.
- Elaboration d'un contrôleur PI flou du type Mamdani.
- Modélisation du compensateur série : le SSSC.
- Elaboration de la commande du SSSC pour le contrôle du flux des puissances actives et réactives dans les lignes de transport et amélioration de la capacité de transit des lignes.
- Modélisation de l'onduleur de tension à trois niveaux du type NPC, commandé par MLI triangulo-sinusoidale à deux porteuses unipolaires.

La troisième partie est consacrée à l'analyse et l'interprétation des résultats de simulation d'une ligne de 400Kv avec une charge variable et contrôlé par l'UPFC présenté dans le chapitre précédent, sous l'environnement Matlab/Simulink :

- On commence par l'analyse du réseau électrique sans compensation : on constate la présence de la puissance réactive dans la ligne de transport avec un faible facteur de puissance de la source.
- Puis on va analyser l'impact du STATCOM sur la ligne étudiée :
  - On constate une parfaite compensation de l'énergie réactive de la ligne, un très bon maintien de la tension et un fonctionnement avec facteur de puissance unitaire de la source. Ce qui témoigne du bon choix des régulateurs.
  - De même la tension du bus continu est maintenue constante, par la boucle de contrôle, pour assurer un couplage correct sur le réseau électrique (20Kv/400Kv)
  - Une étude comparative entre le PI classique et le PI flou, pour le contrôle de l'UPFC, a permis de confirmer que le correcteur flou donne de meilleures

---

performances dynamiques du système et spécialement : les dépassements, temps de réponse et rejets des perturbations liées aux variations des charges.

- L'insertion du SSSC permet de modifier l'impédance de la ligne et par conséquent l'amélioration de la capacité de transit des puissances (Contrôle directe du flux des puissances), tout en respectant les limites thermiques des lignes électriques et des postes de transformateurs de puissance.

La quatrième partie est consacrée à l'analyse d'une centrale photovoltaïque de 800KVA connecté à un réseau électrique de moyenne tension (25Kv). Après un bref passage sur l'état de l'art des différentes topologies des systèmes photovoltaïques (systèmes : autonome, hybride et totalement connecté au réseau électrique) les points suivants sont bien traités :

- La modélisation du système photovoltaïque : le générateur PV, le convertisseur DC/DC Boost et l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux du type NPC.
- Différentes techniques de MPPT sont présentées et spécialement la méthode P&O.
- Elaboration des différentes boucles de contrôle et synthèse des régulateurs à savoir : le contrôle du bus continu, la PLL pour le contrôle de la fréquence de sortie et le contrôle des courants (ou des puissances injectés) par l'onduleur.
- Présentation et interprétations des résultats de simulation du système PV connecté au réseau MT, avec une charge variable : à savoir les caractéristiques de sorties de chaque étage du système PV. On constate bien un bon maintien de la tension DC, malgré les variations de la charge et un très bon découplage entre les puissances active et réactive injectées dans le réseau électrique. Dans cette partie on fonctionne à facteur de puissance unitaire du système PV et donc la puissance réactive injectée est maintenue nulle par la commande de l'onduleur.

La dernière partie est dédiée à l'analyse d'un système combiné : PV-STATCOM connecté au réseau électrique MT :

- La centrale PV fournit de la puissance active au réseau électrique.
- L'onduleur doté d'une commande adéquate fonctionne comme un STATCOM pour compenser l'énergie réactive dans les lignes électriques.
- Des résultats de simulations, pour différents niveaux d'éclairage et pour différentes charges ont permis de montrer l'efficacité du système PV-STATCOM, tout en observant deux situations intéressantes :

- Durant la journée le système fournit les deux puissances active et réactive, avec un facteur de puissance variable, tout en respectant les limites thermiques des postes de transformateurs (à ne pas dépasser les courants max des transformateurs), ce qui nous oblige à prendre une marge de sécurité et définir un seuil supérieur pour la puissance réactive à compenser.
- Par contre durant la nuit, le système se transforme en un STATCOM pur (pas de puissance active injectée) et on peut exploiter au maximum les capacités du transformateur, pour compenser la puissance réactive des lignes du réseau électrique.

# Perspectives

---

## PERSPECTIVES

Ce travail a permis de démontrer l'efficacité des systèmes FACTS, notamment l'UPFC, ainsi que l'intégration des sources d'énergie renouvelable telles que la production photovoltaïque, dans l'optimisation du fonctionnement des réseaux électriques. Plusieurs pistes peuvent être envisagées pour approfondir cette recherche et répondre aux besoins croissants de flexibilité, de stabilité et de durabilité des systèmes de transport d'énergie.

Parmi les perspectives envisageables :

- 1. Développement de stratégies de contrôle plus avancées [66]** basées sur l'intelligence artificielle (réseaux de neurones, algorithmes génétiques, apprentissage par renforcement), pour une gestion autonome, adaptative et prédictive des systèmes FACTS dans un environnement réseau dynamique et incertain.
- 2. Étude de l'impact de l'intégration massive d'énergies renouvelables** (solaire, éolien, etc.) sur la stabilité à long terme des réseaux électriques et le rôle des systèmes FACTS dans la régulation de ces sources intermittentes.
- 3. Extension des modèles de simulation [67]** à des réseaux multi-machines ou à des systèmes électriques interconnectés à grande échelle, pour évaluer les performances globales du système PV-STATCOM dans des scénarios plus réalistes.
- 4. Intégration du stockage d'énergie** (batteries, super condensateurs, volants d'inertie) au système PV-STATCOM afin de :
  - Lisser l'intermittence de la production photovoltaïque et d'augmenter la flexibilité des services auxiliaires offerts au réseau.
  - Gérer les **variations rapides de l'ensoleillement** (nuages, météo changeante).
  - Stabiliser la tension du bus DC même en cas de fortes fluctuations de charge.
  - Permettre une **injection différée de la puissance active**, contribuant à l'équilibrage du réseau.

L'intégration d'un système photovoltaïque connecté au réseau a démontré des résultats satisfaisants en matière d'injection de puissance active, de stabilité de tension et de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Néanmoins, plusieurs axes d'amélioration peuvent être explorés pour renforcer les performances, la flexibilité et la robustesse de ce type de système :

---

---

## 1. Optimisation des algorithmes MPPT [68]

- Développer des **algorithmes MPPT intelligents** (logique floue, réseaux de neurones, optimisation par essaim de particules) pour améliorer la rapidité et la précision du suivi du point de puissance maximale, notamment en conditions d'ensoleillement partiel.
- Tester la robustesse des algorithmes dans des environnements réels, avec ombrage partiel, poussière, variations de température, etc.

## 2. Commande adaptative de l'onduleur

- Mettre en œuvre des stratégies de commande adaptative ou prédictive (MPC) pour un **meilleur contrôle des courants injectés** et une adaptation dynamique aux conditions du réseau.
- Intégrer des fonctions supplémentaires dans l'onduleur (filtrage des harmoniques, régulation de fréquence locale, synchronisation multi-sources).

## 3. Extension à des micro-réseaux ou réseaux hybrides

- Étendre l'analyse du système PV à des **micro-réseaux autonomes** ou **hybrides** (PV + éolien + diesel), en y intégrant des mécanismes de gestion intelligente de l'énergie (EMS).
- Étudier le **mode de fonctionnement en îlotage** en cas de perte du réseau principal, avec maintien des charges prioritaires.

## 4. Validation expérimentale [69]

- Concevoir une maquette ou un **prototype en temps réel (HIL)** pour valider les résultats de simulation en conditions réelles.
- Tester les performances de l'ensemble des boucles de commande (MPPT, onduleur, régulation DC) sur une plateforme expérimentale.
- Une autre perspective importante réside dans la validation expérimentale via des plateformes de simulation temps réel ou de type Hardware-In-the-Loop, permettant de passer des résultats simulés à des applications concrètes.

## 5. Étude d'impact environnemental et économique

- Analyser l'**empreinte carbone évitée** grâce à la production d'énergie solaire injectée dans le réseau.

- Réaliser une **étude technico-économique** sur le dimensionnement optimal des systèmes PV en fonction du profil de charge et du taux d'ensoleillement local.

Enfin, une extension de l'étude à des réseaux plus complexes ou à des micro-réseaux hybrides intégrerait les problématiques de gestion énergétique globale, de fonctionnement en îlotage, et de coordination multi-sources renouvelables, renforçant ainsi l'autonomie et la stabilité des réseaux du futur.

**Annexe**

## ANNEXE A

### A- Réseau étudié

Le but de cette annexe est la représentation des différents éléments du réseau étudié et de définir le type d'outil de calcul qui permet son étude.

#### A-1-Modélisation

Nous avons également considéré qu'un UPFC avec une puissance de 160 MVA est installé au milieu de la ligne. Les caractéristiques du générateur, de la ligne et des transformateurs sont données dans les parties suivantes.

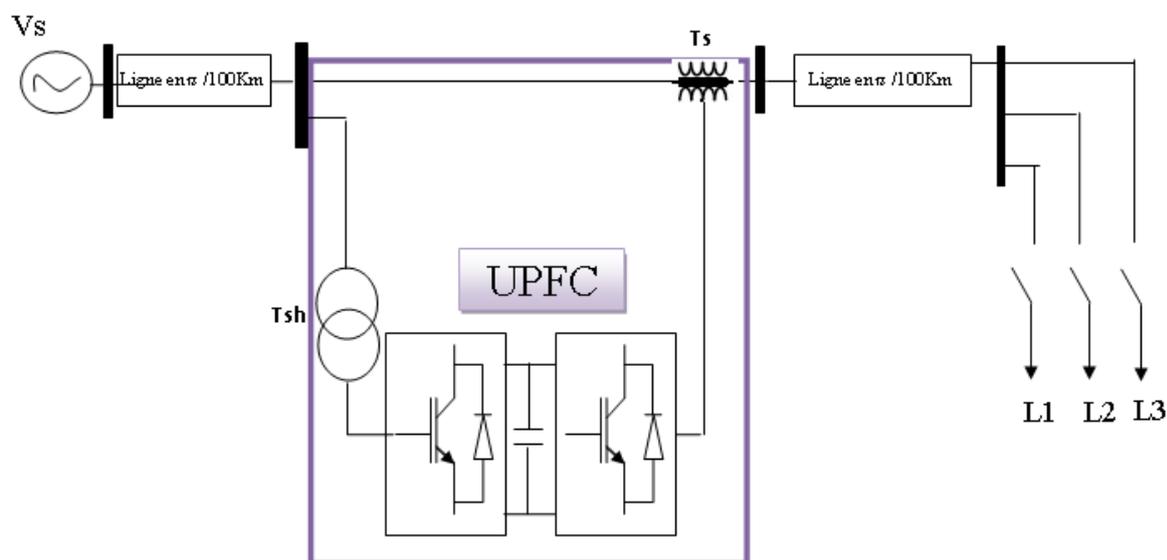


Figure (A-1) : Schéma global de réseau étudié.

#### A-1-1-Générateur G

Le générateur G représente 4 générateurs en parallèle. Ses paramètres sont donnés dans le tableau suivant.

Tension Nominal (KV)	Puissance Nominal (MVA)	Fréquence (Hz)
400	3000	50

Tableau (A-1) : Caractéristique du générateur

### A-1-2-Ligne de transmission

La ligne de transmission est de type "CURLEW". Afin de modéliser la ligne avec un modèle en  $\pi$ , nous sommes obligés de considérer la longueur de chaque partie de ligne entre 80 km et 240 km. Pour avoir de bons résultats, nous avons modélisé chaque 100 km de ligne comme suit :

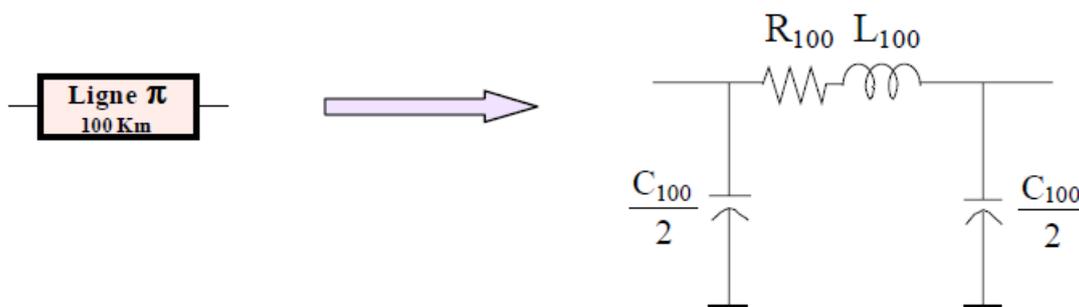


Figure (A-2) : Modèle de la ligne de transport

Ou :

- $R_{100} = 3.2\Omega$  ;
- $L_{100} = 103.5\text{mH}$  ;
- $C_{100} = 1.1\mu\text{F}$ .

### A-1-3-Transformateur Tsh

Nous avons choisi la puissance de Tsh égale à celle de Ts. Les caractéristiques générales de ce transformateur sont : 2 enroulements en étoile,

<b>Puissance apparente</b>	<b>(MVA)</b>	160
<b>Rapport de transformation</b>	<b>(KV)</b>	20/400
<b>Inductance de fuite</b>	<b>(Xcc)</b>	10%
<b>Pertes fer</b>	<b>(Pmag)</b>	0.1%Sn
<b>Pertes à courant nominal</b>	<b>(Pcu)</b>	0.4%Sn

Tableau (A-2) : Caractéristique du transformateur T<sub>sh</sub>

### A.1.4 Transformateur Ts

Nous avons choisi arbitrairement la puissance de Ts égale à 160 MVA. Les caractéristiques générales de ce transformateur sont : 2 enroulements en étoile,

<b>Puissance apparente</b>	<b>(MVA)</b>	160
<b>Rapport de transformation</b>	<b>(KV)</b>	20/63
<b>Inductance de fuite</b>	<b>(Xcc)</b>	2.5%
<b>Pertes fer</b>	<b>(Pmag)</b>	0.2%Sn
<b>Pertes à courant nominal</b>	<b>(Pcu)</b>	8%Sn

**Tableau (A-2) :** Caractéristique du transformateur Ts

### A-1-5-La charge

Les paramètres des charges RL du compensateur STATCOM donnés dans le tableau (A-3)

<b>La charge</b>	<b>P (MW)</b>	<b>QI (MVAR)</b>
<b>Charge 1 (Ch1)</b>	30	30
<b>Charge 2 (Ch2)</b>	70	50
<b>Charge 3 (Ch3)</b>	95	65

**Tableau (A-3) :** Les paramètres des charges.

Les paramètres des charges RL du compensateur SSSC donnés dans le tableau (A-4)

<b>La charge</b>	<b>P (MW)</b>	<b>QI (MVAR)</b>
<b>Charge 1 (Ch1)</b>	30	22.3
<b>Charge 2 (Ch2)</b>	6	4.46
<b>Charge 3 (Ch3)</b>	24	17.84

**Tableau (A-4) :** Les paramètres des charges.

## ANNEXE B

### B-Les onduleurs

#### B-1-Onduleur à trois niveaux

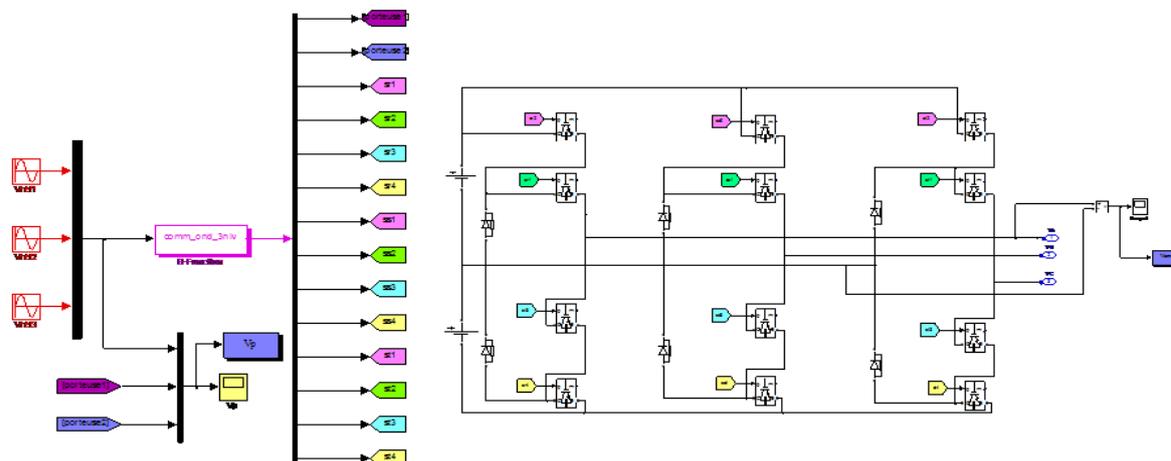


Figure (B-1) : Schéma de principe d'un onduleur à trois niveaux.

#### B-2- Stratégie de commande par MLI :

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs on fait appel à la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion) qui consiste à déterminer les instants d'intersections d'une tension de référence sinusoïdale et d'une tension de modulation triangulaire.

La commande MLI de l'onduleur est caractérisée par les deux paramètres suivants :

✓ **L'indice de modulation « m » :**

Egale au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence.

$$m = \frac{f_p}{f_m}$$

✓ **Le coefficient de réglage en tension « r » :**

Egale au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation.

$$r = \frac{V_m}{V_p}$$

### B-2-1-La technique triangulo-sinusoïdale à deux porteuses unipolaires triangulaires

Cette stratégie est très connue pour les onduleurs à multi-niveaux, Les signaux de commande d'un bras de l'onduleur sont déterminés par la comparaison de deux porteuses triangulaires et d'une référence sinusoïdale.

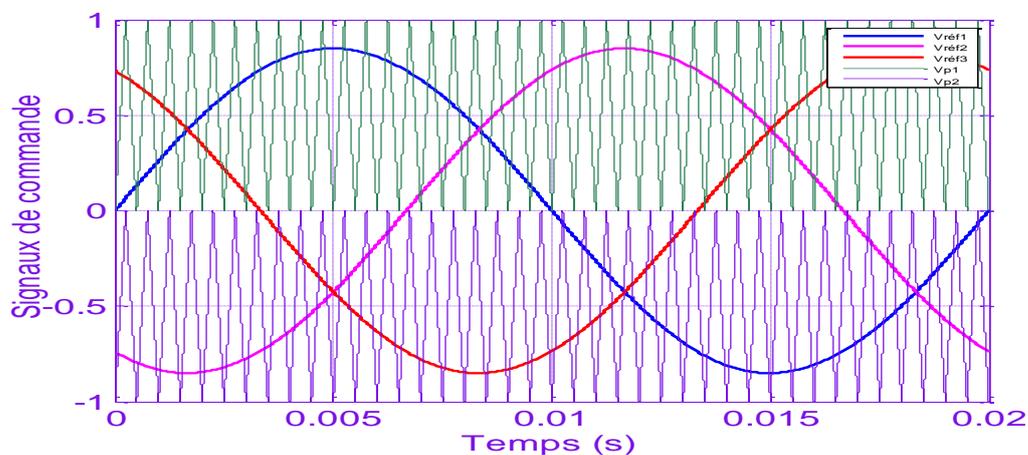


Figure (B-2) : Principe de la commande MLI avec deux porteuses unipolaires.

## ANNEXE C

### 3- Transformation de PARK

#### C-1-Transformation de CONCORDIA

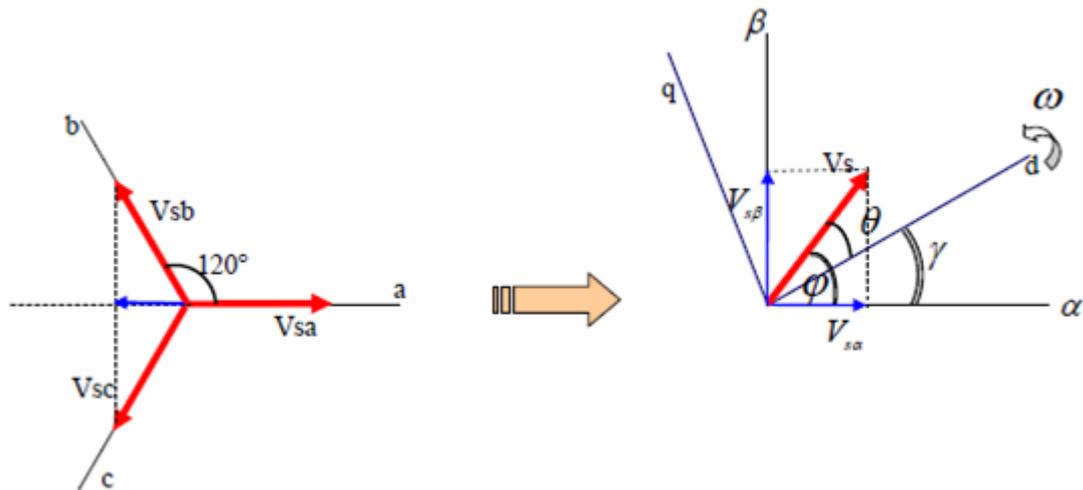
Cette transformation permet le passage d'un système triphasé équilibré à un système biphasé selon la figure suivante :

Soit les trois grandeurs d'un réseau électrique (tension par exemple  $V_s$ ) équilibrées :

$$\begin{cases} V_{sa} = V_s \sin(\omega t) \\ V_{sb} = V_s \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{sc} = V_s \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

Avec :

- $V_s$  : La tension efficace du système de tension.
- $\omega$  : La pulsation de ces tensions.



$$\begin{cases} V_{s\alpha} = K \left( 1V_{sa} - \frac{1}{2}V_{sb} - \frac{1}{2}V_{sc} \right) \\ V_{s\beta} = K \left( 0V_{sa} + \frac{\sqrt{3}}{2}V_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{sc} \right) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$$

Avec le coefficient de normalisation de Concordia  $K=2/3$

## ANNEXE D

### 4- PLL

#### D-1-Introduction

Etant donné que la tension du réseau est souvent perturbée et/ou déformée, et afin de généraliser l'application de la méthode d'identification à tout type de tension, un système à base de PLL (Phase Locked Loop ou Boucle à Verrouillage de Phase) est proposé.

Nous avons utilisé deux types de PLL :

- Méthode basée sur la tension.
- Méthode basée sur la puissance.

Dans ce mémoire on utilise la méthode basée sur la tension comme la figure suivant :

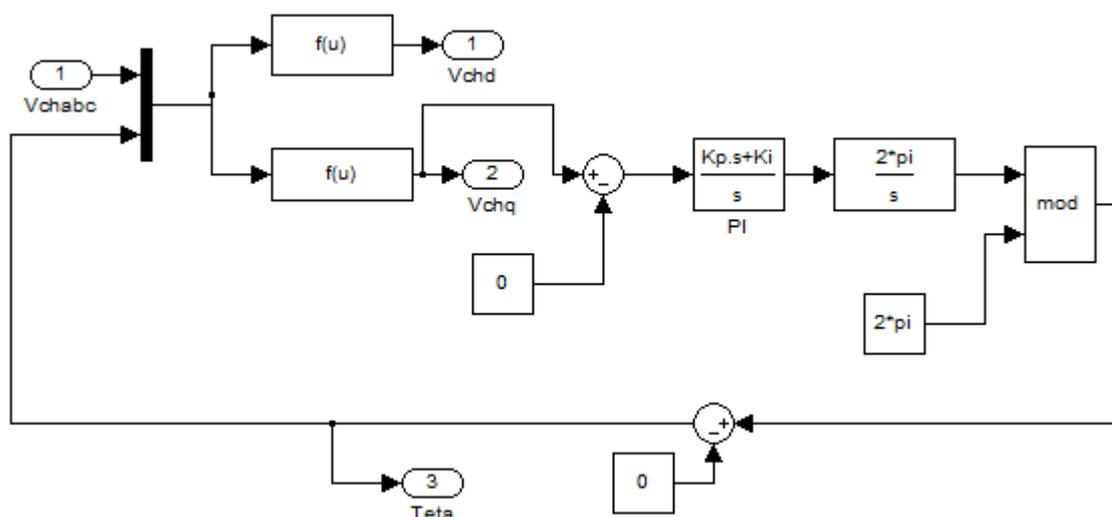


Figure (D-1) : Schéma de simulation du système PLL

## ANNEXE E

### 5- Générateur Photovoltaïque.

La fiche technique du générateur photovoltaïque sur internet :

[https://www.pvxchange.com/Solar-Modules/Sunpower/SPR-315E-WHT-D\\_1-2104303](https://www.pvxchange.com/Solar-Modules/Sunpower/SPR-315E-WHT-D_1-2104303)

Le data sheet de module (composé de 96 cellules) type SUNPOWER SPR-315E-WHT-D.

<b>Température (<math>T_{ref}</math>)</b>	25 °C
<b>Eclairement (<math>E_{ref}</math>)</b>	1000 W/m <sup>2</sup>
<b>Tension du circuit ouvert (<math>V_{co}</math>)</b>	64.6 V
<b>Courant du court-circuit (<math>I_{cs}</math>)</b>	6.14 A
<b>Tension du point de puissance maximale (<math>V_m</math>)</b>	54.7 V
<b>Courant du point de puissance maximale (<math>I_m</math>)</b>	5.76 A
<b>Puissance maximale (<math>P_m</math>)</b>	315 W

Tableau (E.1) : Spécifications du module solaire SUNPOWER SPR-315E-WHT-D

# **Références**

# **Bibliographes**

---

## Bibliographiques

- [1] S. H. Hosseini, M. G. Dehghani, and M. R. Haghifam, "Flexible AC Transmission System (FACTS): Concepts, Applications, and Future Directions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 48-55, Jan. 2005.
- [2] K. R. Padiyar, *FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution*, 1st ed. New Delhi, India: New Age International, 2007.
- [3] G. B. Shrestha and M. L. Hsieh, "Application of STATCOM in Power System Stability and Control," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 712-718, May 2009.
- [4] S. M. Islam and T. K. Saha, "Design of a PV System for Power Generation and Grid Integration," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 2, pp. 782-791, Feb. 2011.
- [5] P. S. L. L. A. V. A. L. A. S. R. Narasimhan, "Energy Storage for Grid-Connected Photovoltaic Systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 206-214, Jan. 2012.
- [6] P. Bornard and M. Pavard, *Réseaux d'interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement*, *Technique de l'ingénieur, traité génie électrique D 4090*.
- [7] E. Acha, V. G. Agelidis, O. Anaya-Lara, and T. J. E. Miller, *Power Electronic Control in Electrical Systems*. Oxford, UK: Newnes, 2002.
- [8] M. Grappe, *Commande et Régulation des Réseaux Electriques*. Paris, France: Lavoisier, 2003.
- [9] M. Thakur, "Unified power flow controller (UPFC) development of mathematical framework and design of a transient model," M.S. thesis, Univ. of Manitoba, Canada, Feb. 2003.
- [10] X. Jiang, "Operating Modes and Their Regulations of Voltage-sourced Converters Based FACTS Controllers," Ph.D. dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, Mar. 2007.
- [11] E. G. Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques," Ph.D. dissertation, Univ. Henri Poincaré Nancy-1, 2003.
- [12] A. Bouzidi and M. Bouchareb, "Commande par Mode Glissant Floue d'un D-Statcom Multi-niveaux," Univ. de M'Sila, 2011.
- [13] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS*. New York, NY, USA: IEEE Press, 2000.

- [14] X.-P. Zhang, C. Rehtanz, and B. Pal, *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*. Springer, 2005.
- [15] C. A. Enrique, R. Clodio, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, and C. Angeles Camacho, *Modelling and Simulation in Power Networks*. John Wiley & Sons, 2004.
- [16] S. Gerbex, “Métaheuristiques appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique,” Ph.D. dissertation no. 2742, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2003.
- [17] Université de Biskra, “Contribution à l’optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS),” Mémoire de Magister, 28 Jan. 2012.
- [18] A. Seifi, S. Gholami, and A. Shabanpour, “Power Flow Study and Comparison of FACTS: Series (SSSC), Shunt (STATCOM), and Shunt-Series (UPFC),” *The Pacific Journal of Science and Technology*, vol. 11, no. 1, May 2010.
- [19] X.-P. Zhang, E. Handschin, and M. Yao, “Multi-control functional static synchronous compensator (STATCOM) in power system steady-state operations,” *Electric Power Systems Research*, vol. 72, pp. 269–278, 2004.
- [20] L. Boukarana, “Contrôle du Flux de Puissance d’un Réseau Electrique 400 KV par l’UPFC,” Mémoire d’ingénieur, Université de Batna, Mai 2011.
- [21] L. Boumediene, M. Khiat, M. Rahli, and A. Chaker, “Harmonic Power Flow in Electric Power Systems Using Modified Newton Raphson Method,” *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 4, no. 3, pp. –, May–June 2009.
- [22] B. Bekki, “Contribution du SMES, Dispositif FACTS, à la Stabilisation d’un Réseau Electrique Haute Tension,” Mémoire de Magister, École Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Sept. 2006.
- [23] Z. Huang, Y. Ni, C. M. Shen, et al., “Application of Unified Power Flow Controller in Interconnected Power Systems - Modeling, Interface, Control Strategy, and Case Study,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 817–824, May 2000.
- [24] L. Liu, P. Zhu, Y. Kang, Y. Zhang, and J. Chen, “Control Scheme and Implementation of a Unified Power Flow Controller,” in *Proc. 8th Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, vol. 2, pp. 1170–1175, Sept. 2005.
- [25] A. Hassanovic and A. Feliachi, “Modelling and control of the Unified Power Flow Controller (UPFC),” M.S. thesis, Univ. of Morgantown, West Virginia, 2000.
- [26] K. Benrehal and A. Chaghi, “Unified Power Flow Controller in Power Flow Control,” in *Proc. 2008 Conf. on Electrical and Electronics Engineering (CEE’08)*, Apr. 21–23, 2008.

- [27] H. Bühler, Réglage de systèmes d'électronique de puissance, vol. 3. Lausanne, Suisse: Presses Polytechniques Romandes, 1999.
- [28] K. Benrehal, "Modélisation et simulation d'un système FACTS : UPFC," Mémoire de Magistère, Université de Batna, Jan. 2009.
- [29] N. Bruyant, "Étude et commande généralisées de filtres actifs shunt," Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 25 Nov. 1999.
- [30] B. Azzedine and A. A. Amine, "Introduction aux Systèmes Flexibles de Transmission en Courant Alternatif (FACTS)," Projet de fin d'études, Ingénieur d'État en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique, El-Harrach, Alger.
- [31] L. Liu, P. Zhu, Y. Kang, and J. Chen, "Design and dynamic performance analysis of unified power flow controller," in IEEE Proc. Electrical Machines and Systems, 2005.
- [32] T. Allaoui, "Réglage robuste de l'UPFC pour optimiser l'écoulement des puissances dans un réseau électrique," Mémoire de Magister, Université Mohamed Boudiaf, Oran, 2002.
- [33] N. Voraphonpiput and S. Chatratana, "STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation," in IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, 2005.
- [34] L. Liu, P. Zhu, Y. Kang, and J. Chen, "Design and dynamic performance analysis of unified power flow controller," IEEE Publication, 2005. (Identique à la réf. [28])
- [35] M. Birame, "Commande Floue d'un Convertisseur AC-DC à UPF en Cascade avec un Convertisseur DC-DC Double Étages Alimentant un Système de Biberonnage par Supercapacités d'un Véhicule Électrique," Mémoire de Magister, Université de Batna, 2003.
- [36] R. M. Schupbach and J. C. Balda, "Comparing DC-DC Converters for Power Management in Hybrid Electric Vehicles," in Proc. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf. (IEMDC), vol. 3, pp. 1369–1374, June 2003.
- [37] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," Information and Control, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [38] A. Bouafia, "Techniques de Commande Prédictive et Floue pour les Systèmes d'Électronique de Puissance : Application aux Redresseurs à MLI," Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, Oct. 2010.
- [39] B. Robyns, F. Berthereau, J. P. Hauter, and H. Buyse, "A Fuzzy-Logic-Based Multimodel Field Orientation in an Indirect FOC of Induction Motor," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 47, no. 2, pp. 380–388, Apr. 2000.

- [40] E. Mamdani and S. Assilian, “An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller,” *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, pp. 1–13, 1975.
- [41] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, “Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 3, pp. –, May/June 1984.
- [42] L. Liu, P. Zhu, Y. Kang, and J. Chen, “Design and dynamic performance analysis of unified power flow controller,” *IEEE Publication*, 2005. (Identique à [28] et [31])
- [43] I. Papić, “Mathematical analysis of FACTS devices based on a voltage source converter, Part 1: mathematical models,” *Electric Power Systems Research*, vol. 56, pp. 139–148, 2000.
- [44] A. Videt, “Variateur de Vitesse à Impact Électromagnétique Réduit : Onduleur Multi-niveaux et Nouvelles Stratégies de Modulation,” *Thèse de Doctorat, École Centrale de Lille*, Déc. 2008.
- [45] S. Bentouba, A. Slimani, and M. S. Boucherit, “Stratégies de Commande et Modélisation de l’Onduleur à Cinq Niveaux,” in *4e Conférence Internationale sur le Génie Électrique (CIGE’10)*, 3–4 Nov. 2010, Univ. de Béchar, Algérie.
- [46] O. Fadli, “Modélisation et Commande non Linéaire de l’Association : Machine Synchrones à Aimants Permanents - Onduleur de Tension à Trois Niveaux,” *Mémoire de Magister, Université de Batna*, Juin 2006.
- [47] P. Zhu, L. Liu, X. Liu, Y. Kang, and J. Chen, “A Novel Control Scheme for a Unified Power Flow Controller,” in *IEEE Conference*, 2006, pp. –.
- [48] M. S. Petibon, “Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques,” *Thèse de Doctorat, Université de Toulouse*, Jan. 2009.
- [49] E. Becquerel, *Des effets chimiques et électriques produits sous l’influence de la lumière solaire*. Paris, France: F. Didot Frères, 1840.
- [50] NREL (National Renewable Energy Laboratory), “The history of solar,” [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nrel.gov>.
- [51] J. Bellala, “Contribution à l’optimisation des systèmes de conversion d’énergie : Application aux systèmes photovoltaïques,” *Thèse de Doctorat en Sciences, Univ. de Batna*, 2008.
- [52] R. Chenni, “Étude Technico-économique d’un Système de Pompage Photovoltaïque dans un Village Solaire,” *Thèse de Doctorat en Physique Énergétique, Université Mentouri - Constantine*, 2007.
-

- [53] L. Zagheba, “Étude et Commande Adaptative par les Techniques Intelligentes des Systèmes Non Linéaires : Application aux Systèmes Photovoltaïques,” Thèse de Doctorat, Univ. de Biskra, 2017.
- [54] M. L. Louazene, “Contribution à l’optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l’irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla,” Thèse de Doctorat en Sciences, Univ. de Batna, 2015.
- [55] Y. Pankow, “Étude de l’intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension,” Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, déc. 2004.
- [56] F. L. Toffoli, J. C. Schönell, C. A. Gallo, and S. M. R. Sanhueza, “A low cost single-phase grid-connected photovoltaic system with reduced complexity,” in IEEE Power Electronics Conf., Brazil, 2009, pp. 1033–1038.
- [57] V. Salas, E. Olías, A. Barrado, and A. Lázaro, “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems,” Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 90, no. 11, pp. 1555–1578, July 2006.
- [58] T. Esmam and P. L. Chapman, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, June 2007.
- [59] O. Bouakaz, “Contribution à l’analyse des onduleurs multiniveaux, fonctionnement symétrique et asymétrique,” Mémoire de Magister, Univ. de Batna, 2005.
- [60] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions,” IEE Proc. Gener., Transm. Distrib., vol. 142, no. 1, pp. 59–64, Jan. 1995.
- [61] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, “A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-17, no. 5, pp. 518–523, Sept./Oct. 1981.
- [62] EurObserv’ER, “Twelfth Inventory of Worldwide Electricity Production from Renewable Energy Sources,” 2010.
- [63] T. M. C. Le, “Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau : aspects contrôle/commande et rejet de perturbations,” Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 25 Jan. 2012.
- [64] M. A. E. Alali, “Contribution à l’Étude des Compensateurs Actifs des Réseaux Électriques Basse Tension,” Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, 2002.
- [65] A. Oi, “Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System,” M.S. thesis, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, Sept. 2005.

- [66] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2000.
- [67] K. R. Padiyar, *FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution*, 1st ed. New Delhi, India: New Age International, 2007.
- [68] M. A. Abido, "Power system stability enhancement using FACTS controllers: A review," *The Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 34, no. 1B, pp. 153–172, Apr. 2009.
- [69] L. Gyugyi, "Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems," *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 139, no. 4, pp. 323–331, July 1992.

## **Résumé :**

Le présent travail de recherche traite la problématique du contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS (Flexible AC Transmission System) avec l'intégration d'une source d'énergie renouvelable. Le contrôle du power system porte sur : la compensation de l'énergie réactive des lignes, maintien de la tension au niveau des jeux de barres, l'amélioration du transit des puissances dans les lignes de transport et l'injection de l'énergie photovoltaïque sur le réseau électrique. Plusieurs approches et techniques sont analysées et évaluées à travers des simulations

**Mots clés :** FACTS, UPFC, Onduleur multi niveaux, Système PV, PI, FLC, MPPT.

## **Abstract:**

This research deals with the problem of power system control using FACTS (Flexible AC Transmission System) with the integration of a renewable energy source. The control of the power system concerns: the compensation of the reactive energy of the lines, the maintenance of the voltage at the level of the busbars, the improvement of the transit of the powers in the transmission lines and the injection of the photovoltaic energy in the electrical network. Several approaches and techniques are analysed and evaluated by means of simulations.

**Keywords:** FACTS, UPFC, PV System, MPPT, Multilevel inverter, PI, FLC.

## **ملخص**

يتناول هذا العمل البحثي مشكلة التحكم في الشبكات الكهربائية عن طريق أنظمة (نظام نقل التيار المتردد المرن) مع دمج مصدر الطاقة المتجددة. يتعلق التحكم في نظام الطاقة بما يلي: تعويض الطاقة التفاعلية للخطوط، والحفاظ على الجهد عند مستويات قضبان التوصيل، وتحسين نقل الطاقة في خطوط النقل، وحقن الطاقة الضوئية على الشبكة الكهربائية. يتم تطوير العديد من الأساليب والتقنيات ومعالجتها واختبارها والتعليق عليها.

**كلمات البحث:** نظام PV ، التشخيص ، MPPT ، العاكس متعددة المستويات، PI، FLC، UPFC، FACTS