

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

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'obtention du diplôme de Master
Domaine: Sciences et Technologie
Filière: Electrotechnique
Spécialité: Commande Electrique

THÈME

**Contrôle robuste des systèmes photovoltaïques
pour une intégration stable dans un réseau
électrique**

Préparée par :
BELGHOUF Kheira

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Mustafa BECHEIKH	MCA	Président
OUARED Rahal	MCB	Examineur
ALLAOUI Tayeb	Pr	Examineur
HASSAINE Said	Pr	Encadrant
TAHRI Ahmed	MCB	Co-Encadrant

PROMOTION 2024/2025

Remerciements

Avant tout, Je commence par des remerciements à *ALLAH*; le tout puissant de nous avoir appris ce que nous ignorons, de nous avoir donné la santé, le courage, la force, la patience nécessaire pour réaliser ce modeste travail.

Tout d`abord, je tiens à remercier l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret ainsi que le département de Génie électrique et tous nos enseignants pour leur accompagnement tout au long de notre formation.

Mes sincères remerciements vont à mon encadrant messieurs HASSAINE Saïd et Co Encadrant TAHRI Ahmed pour leur encadrement, leurs conseils précieux, leurs disponibilités et leur aide durant la période de préparation de notre mémoire, leur patience et diligence.

Je remercie également les membres du jury pour l'intérêt porté à ce mémoire.

Enfin, toute ma reconnaissance à ma famille et à mes amis pour leur soutien moral et leurs encouragements.

Dédicace

Ceux qui sont les plus chers au monde, mes parents

- Je dédie ce mémoire à mes parents, ma mère et mon père pour leur patience, leur amour et leur encouragement
 - A Mon mari.
 - A toute ma famille.
 - A tous mes collègues d'Etudes surtout ceux d'Electrotechnique
 - tous ceux qui ont contribué à ma réussite
- Je dédie cette thèse :
 - A vous tous, Je dis merci du fond du cœur

K. BELGHOUF.

Sommaire

sommaire :	5
Listes des figures :	7
Listes des tableau :	8
Nomenclatures	9
1. Introduction générale :	1
Chapitre I :	3
1. Introduction aux énergies renouvelables :	4
2. Production de l'énergie électrique :	4
3. Les centrales solaires ou photovoltaïques :	4
3.1. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque :	5
3.2. Cellules PV :	5
3.3. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque :	6
3.4. L'effet photovoltaïque :	7
3.5. Les caractéristiques des cellules photovoltaïques :	7
3.6. Influence de la température et de l'éclairement :	8
3.6.1. Variation de l'éclairement :	8
3.6.2. Variation de la température :	8
4. Composants d'un système PV :	9
4.1. Définition :	9
4.2. Module photovoltaïque :	10
4.3. Le régulateur (contrôleur de charge) :	10
4.4. Le convertisseur d'énergie (onduleur) :	11
4.4.1. 9	
4.4.2. Onduleur off grid :	11
4.4.3. Onduleur réseau hybride :	11
4.5. Batteries :	11
4.6. La charge :	12
5. Différents types de systèmes photovoltaïques :	12
5.1. Système photovoltaïque autonome :	12
5.2. Système PV raccordé au réseau :	12
5.3. Système hybride :	13
5.4. Problématiques de l'intégration des PV dans les réseaux :	13
5.4.1. Intermittence de la production :	13
5.4.2. Influence sur le plan de protection :	13
5.4.3. Problèmes de stabilité et de qualité de l'énergie :	14
5.4.3.1. Stabilité du réseau électrique :	14
5.4.3.2. Qualité de l'énergie injectée :	14
5.4.4. Influence sur la tension et la fréquence du réseau :	14
5.4.5. Problème de synchronisation (onduleur-réseau)	14
6. Conclusion :	14
Chapitre II :	16
1. Introduction :	17
2. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque :	17
2.1. Modélisation de la cellule photovoltaïque	17
2.2. Modélisation sous Simulink / Matlab d'une cellule photovoltaïque	20
2.2.1. Définition de Simulink :	20
2.2.2. Choix du panneau :	20

2.2.3.	Caractéristiques I(V) et P(V) du panneau	21
3.	Les convertisseurs DC-AC (onduleur) :	22
3.1.	Définition :	22
3.2.	Modélisation d'un Onduleur Triphasé :	22
3.2.1.	.Structure de l'onduleur :	22
3.3.	Commande de l'onduleur :	24
3.3.1.	Commande par hystérésis :	24
3.3.2.	La modulation sinus-triangle:	24
3.3.3.	la MLI vectorielle (SVM: space vector modulation).	26
4.	Algorithme MPPT	27
4.1.	Principe du MPPT	28
4.2.	Classification des commandes MPPT selon le type de recherche	28
4.2.1.	MPPT Indirect	28
4.2.2.	MPPT directs	28
5.	Modélisation de l'interconnexion aux réseau :	31
5.1.	Réseau électrique :	31
5.2.	Niveau de tension :	32
5.3.	Structure générale d'un système PV connecte au réseau	32
5.4.	Simulation du système photovoltaïque globale pv raccodé au réseau	33
5.5.	Résultat de simulation	34
	Chapitre 3 :	39
1.	Introduction au contrôle robuste :	39
2.	Besoin du contrôle robuste :	40
3.	Type de commandes robustes appliquées aux systèmes PV :	40
4.	Application du contrôle robuste à un système PV :	40
5.	Description de l'architecteur de la commande :	40
5.1.	Présentation de la méthode LQR :	41
5.2.	Etude de cas de simulation :	43
5.2.1.	Model du système PV avec perturbation :	44
5.3.	Résultat de simulation.....	47
5.4.	Comparaison avec une commande classique PI.....	47
5.5.	Avantages de la commande robuste LQR.....	48.
	Conclusion générale	49
	Références :	46

Listes des figures :

Chapitre

- 4 **FIGURE I. 2 : CELLULE PHOTOVOLTAIQUE**[4] **FIGURE I 1 : PHOTO D'UNE CELLULE SOLAIRE**
- 5 **FIGURE I. 3 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE**[3]
- 6 **FIGURE I. 4: CARACTÉRISTIQUES I(V) ET P(V) DU PANNEAU À 25°C OBTENUS POUR DIVERS**
- 7 **FIGURE I. 5 : CARACTÉRISTIQUES I(V) ET P(V) DU PANNEAU À** **VALEURS DE L'ÉCLAIREMENT**
- 8 **FIGURE I. 6: LES** **ÉCLAIREMENT FIXE $G=1000 \text{ W/M}^2$ POUR DIFFÉRENTES DE TEMPÉRATURES**
- 9 **FIGURE I. 7: RÉGULATEUR AUTONOME**[6] **CONSTITUANTS D'UN SYSTÈME PV**[8]
- 10 **FIGURE I. 8: SCHÉMA D'UN SYSTÈME PV AUTONOME AVEC BATTERIE**[3]
- 11 **FIGURE I. 9: STRUCTURE D'UN SYSTÈME PV RACCORDÉ AU RÉSEAU**[6]
- 12 **FIGURE I. 10 : SCHÉMA D'UN SYSTÈME PV HYBRIDE**[3]
- 12 **FIGURE I. 11: SCHÉMAS BLOCK DE SIMULATION**[12]
- 14

chapitre II

- 19 **FIGURE II. 3 : LA CARACTÉRISTIQUE COURANT –TENSION D'UNE CELLULE SOLAIRE**
- 20 **FIGURE II. 4 : SYMBOLE DE CARACTÉRISTIQUE PUISSANCE –TENSION D'UNE CELLULE SOLAIRE**
- 20 **FIGURE II. 5 : STRUCTURE D'UN CONVERTISSEUR DC-AC MONOPHASÉ ET TRIPHASÉ**[12]
- 21 **FIGURE II. 6 : CONTRÔLE DE COURANT PAR HYSTÉRÉSIS**[12] **ONDULEUR TRIPHASÉE**
- 22 **FIGURE II. 7 : SCHÉMA DE SIMULATION D'UNE COMMANDE MLI**
- 23 **FIGURE II. 8 : SIGNALE DE LA COMMANDE MLI ET LES IMPULSIONS DES INTERRUPTEURS**
- 24 **FIGURE II. 9: CARACTÉRISTIQUE $P_{pv}(V_{pv})$ D'UN PANNEAU SOLAIRE**[12]
- 27 **FIGURE II. 10 : ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME P&O.**[5]
- 28 **FIGURE II. 11 : ALGORITHME TYPE DE LA MÉTHODE INC**[12]
- Error! Bookmark not defined.** **FIGURE II. 12 : SCHÉMA D'UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE**[12]
- Error! Bookmark not defined.** **FIGURE II. 13: SYSTÈME PHOTOVOLTAIQUE CONNECTER**
- 30 **FIGURE II. 14 : SCHÉMA GLOBAL DE SIMULATION D'UN PANNEAU DIRECTEMENT AU RÉSEAU**
- 33 **FIGURE II. 15: SCHÉMA DE PHOTOVOLTAÏQUE RACCORDÉE AUX RÉSEAU ÉLECTRIQUE**
- 33 **FIGURE II 16 : LES TROIS TENSION TRIPHSÉE EN SIMULATION DE CONTRÔLE COURANT-TENSION**
- 34 **FIGURE II 23 : LES TROIS COURANT TRIPHSÉE COTÉ RÉSEAU EN FONCTION DE FONCTION DE TEMPS**
- Error! Bookmark not defined.** **FIGURE II 17: COURANT DE SORTIE DE PV TEMPS**
- Error! Bookmark not defined.** **FIGURE II 18 : PUISSANCE DE SORTIE DE PV**

Error! Bookmark not defined.FIGURE II 19 : LES CARACTERISTIQUE V_{PV} ET V_{DCREF}
Error! Bookmark not defined.FIGURE II 20 : RÉSULTATS DE CONTRÔLE DE COURANT ID
Error! Bookmark not defined.FIGURE II 21 :RÉSULTATS DE CONTRÔLE DE COURANT IQ
Error! Bookmark not defined.FIGURE II 22 : COURANT TRIPHASÉ DE SORTIE DE L'ONDULEUR
Error! Bookmark not defined.

chapitre III

Error! Bookmark not defined.FIGUREIII 1 :SHÉMA GLOBALE DU SYSTÈME PV RACCORDÉ AU RÉSEAU
Error! Bookmark not defined.FIGUREIII 2 : SCHÈMA DES BLOC DE CONTRÔLE COURANT -TENSION
Error! Bookmark not defined.FIGUREIII 3 : MODEL D'ÉTAT DE SYSTÈME PV
Error! Bookmark not defined.FIGUREIII 4 : TENSION TRIPHASÉ INJECTÉ DANS LE RÉSEAU
Error! Bookmark not defined.FIGUREIII 5 :COURANT TRIPHASÉ INJECTÉ DANS LE RÉSEAU
Error! Bookmark not defined.FIGUREIII 6 : COURANT DE SORTIE DE PV
Error! Bookmark not defined.FIGUREIII 7 : PUISSANCE DE SORTIE DE PV
Error! Bookmark not defined.FIGUREIII 8 : CARACTÉRISTIQUE DE V_{DCREF_VPV}
Error! Bookmark not defined. DE SORTIE DE L'ONDULEUR

Listes des tableau :

TABLEAU II.1 : CARACTÉRISTIQUE DU MODULE PV.	20
TABLEAU II .2 : TABLE DE VÉRITÉ DE L'ONDULEUR DE TENSION TRIPHASÉ À DEUX NIVEAU[13]	27

Nomenclatures

I: Courant de sortie [A];
 V: Tension de sortie [V];
 Vt: Tension thermique de diode [V];
 Gn : Ensoleillement nominal (1000w/m^2)
 Tn : Température nominale [K°] ou [C°]
 Iccn : Courant de court-circuit aux conditions nominales [A]
 Ki : Coefficient de température du courant au court-circuit [A/K] ou [A/C°]
 Eph: L'effet photovoltaïque (eV).
 Vco: La tension de circuit ouvert (V)
 Icc: Le courant de court-circuit (A).
 Id: Courant à travers la diode (A).
 Icell: Courant fournie par la cellule (A).
 Ich: Courant à travers la charge.
 Pmax :puissance électrique maximale(Watt)
 Pin : la puissance solaire incidente
 Is: Courant de saturation.
 Vch: Tension aux bornes de la charge (V).
 I0:Le courant de saturation inverse de la diode (A).
 Iph: Photo courant de la cellule [A];
 q: La charge d'électron ($q=1.6-19\text{ C}\times 10^{-19}\text{ C}$).
 K: Constant de Boltzmann ($K=1,3806503\times 10^{-23}\text{ J/K}$).
 n: Facteur d'idéalité de la diode (Coefficient dépendant du matériau de la cellule)
 T: La température de la cellule (K).
 Vcell: La tension aux bornes de la cellule (V).
 Ki: Coefficient de température de court-circuit.
 Top: Température de fonctionnement de cellule (K).Tref: Température de référence.
 G: Irradiation de la surface de la cellule (1000W/m^2)
 Eg: L'éclairage de référence.
 Vd: Tension aux bornes de la diode [V].
 FF: Le facteur de forme (%)
 η : Le rendement (%)
 Rs : une résistance série [Ω]
 Rsh : une résistance shunt [Ω]
 Rch: Résistance de charge en (Ω).
 S: Surface de cellule solaire.
 F: Flux incidente.
 VDC: La tension en dent de scie.
 P: Puissance (watt).Cdc: Capacité de condensateur (F).
 [T] : Matrice de transfert de l'onduleur
 SVM: space vector modulation
 MPPT :Maximum Power Point Tracking
 MPP : maximum power point
 DP : fonction dérivée de la puissance
 DV : fonction dérivée de la tension
 DI : fonction dérivée du courant
 P&O : méthode perturbation et observation
 MLI :modulation de largeur d'impulsion

PI :proportionnel intégrale

LQR :régulateur linéaire quadratique

ملخص

لضخ الطاقة الكهربائية التي تنتجها محطة الطاقة الكهروضوئية إلى الشبكة، من الضروري معرفة الشبكة الكهربائية. مع العلم أن الكهرباء التي تنتجها هذه المحطات هي تيار مباشر، ولضخها في الشبكة يجب تحويلها إلى تيار متردد. لذلك سوف نستخدم العاكسون. لم تعد العاكسات تقتصر على تحويل التيار المباشر (DC) إلى تيار متردد (AC)، ولكنها تستغل أيضًا الطاقة المقدمة. وهكذا ركزنا على تشغيل هذا المحول الذي يعتبر العنصر الأساسي في ربط النظام الكهروضوئي بالشبكة. الهدف من عملنا هو دراسة تركيب كهروضوئي متصل بالشبكة، ولهذا أخذنا بعين الاعتبار مراحل الدراسة المذكورة أعلاه. أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج Matlab/Simulink أداء التحكم في السلوك الديناميكي للأنظمة الكهروضوئية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة، الطاقة الشمسية الكهروضوئية، التحكم بطريقة MPPT، نظام التتبع PLL، التحكم الأمثل

Résumé

Pour injecter au réseau l'énergie électrique produite par une centrale photovoltaïque, il est primordial de connaître le réseau électrique. Sachant que l'électricité produite par ces centrales est en courant continu, pour injecter celle-ci au réseau, il faut la convertir en courant alternatif. Donc on fera appel à des onduleurs. Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer le courant continu (DC) en courant alternatif (AC), mais ils exploitent également la puissance délivrée. C'est ainsi que nous nous sommes focalisés sur le fonctionnement de ce convertisseur, qui est l'élément clé de la connexion au réseau d'un système photovoltaïque. L'objectif de notre travail consiste à étudier une installation photovoltaïque connectée au réseau, et pour cela nous avons pris en considération les étapes d'étude citées auparavant.

Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques

Mots clés : Energie Renouvelable, énergie solaire photovoltaïque, Commande MPPT, PLL, LQR,

Abstract

To inject the electrical energy produced by a photovoltaic plant into the network, it is essential to know the electrical network. Knowing that the electricity produced by these plants is direct current, to inject it into the network, it must be converted into alternating current. So we will use inverters. Inverters are no longer limited to transforming direct current (DC) into alternating current (AC), but they also exploit the power delivered. This is how we focused on the operation of this converter, which is the key element in connecting a photovoltaic system to the network. The objective of our work is to study a photovoltaic installation connected to the network, and for this we took into consideration the study stages mentioned above.

The simulation results obtained in **Matlab/Simulink** show the performance of the control in the dynamic behavior of photovoltaic systems.

Keywords: Renewable Energy, Photovoltaic Solar Energy, MPPT Control, PLL, LQR

Introduction générale

1. Introduction générale

Dans le cadre de développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis-à-vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles telles que le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire. Cependant ces formes de production engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs. Ainsi l'argument qui milite à l'avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité des ressources en énergie. En ce 21^{ème} siècle, le paysage énergétique change radicalement car plusieurs ressources fossiles sont en voie de disparition et de nouvelles ressources associées à des technologies plus performantes et fiables sont indispensables pour tenter de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables: l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle, la géothermie et la biomasse. Ces ressources sont pratiquement inépuisables et propres et s'opposent à cet effet aux énergies fossiles. Parmi les énergies renouvelables qui connaissent jour après jour des développements considérables, il y a l'énergie solaire qui est considérée depuis longtemps comme l'origine des majorités d'énergies. L'énergie solaire permet d'assurer des conditions de température favorables à la vie et anime les cycles de l'eau, des vents et du carbone dans la biosphère. En revanche, elle peut aussi être utilisée directement pour produire de la chaleur à différents niveaux de température pour divers usages: chauffage et climatisation de locaux, séchage de produits agricoles, production d'eau chaude et de vapeur, production d'électricité par le biais de cycles thermodynamiques.[1]

La production d'électricité peut être aussi obtenue directement par la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire au moyen de photopiles. Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts 2 aux mégawatts, reste à un stade anecdotique et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des capteurs mis en œuvre.

Le principe de cette énergie est basé sur la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière

la plus avancées sur le plan technologiques et industriel. Leur association en série/parallèle donne lieu à un module ou panneau photovoltaïque.

Notre recherche est basée sur l'étude des systèmes photovoltaïques et consiste essentiellement à la modélisation et le contrôle de ce système connecté à un réseau électrique. Il se structure en trois chapitres principaux:

Le premier chapitre présente un aperçu général des systèmes photovoltaïques, de leurs composants, et des défis liés à leur intégration dans le réseau.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la modélisation des cellules photovoltaïques et des onduleurs, ainsi qu'au contrôle classique et aux algorithmes MPPT.

Enfin, le troisième chapitre propose une approche de contrôle optimal de type LQR, en la comparant aux techniques classiques, et évalue sa performance via une étude de cas simulée.

Ce travail s'achèvera par une conclusion générale.

Chapitre I :

**Généralités sur les systèmes photovoltaïques
et leur intégration au réseau électrique**

1. Introduction aux énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie. Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre, de la biomasse humide ou sèche à une échelle de temps compatible avec l'histoire de l'humanité. Ce n'est pas le cas des combustibles fossiles et nucléaires.[1]

2. Production de l'énergie électrique

Une centrale (de production d'énergie) électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les centrales électriques transforment différentes sources d'énergie naturelles en énergie électrique afin d'alimenter en électricité les consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointains. Le réseau électrique permet de transporter puis de distribuer l'électricité jusqu'aux consommateurs. Il existe cinq principaux types de centrales électriques :[1]

Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques,

Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques,

Les centrales hydroélectriques,

Les centrales solaires ou photovoltaïques,

Les centrales éoliennes

3. Les centrales solaires ou photovoltaïques

Ces centrales produisent de l'électricité avec l'énergie solaire en utilisant les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux.[1]



Figure I 1: photo d'une centrale solaire.

3.1. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

Avantages: les avantages de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont :

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit, non polluante.
- Génère l'énergie requise
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- Entretien minimal.
- Aucun bruit.[2]

Inconvénients : malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résulté comme suite:

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.[2]

3.2. Cellules PV

Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en électricité via l'effet photoélectrique en utilisant des semi-conducteurs pour optimiser l'absorption de la lumière. La majorité des panneaux solaires sont en silicium cristallin, avec des électrodes métalliques pour collecter les électrons. La surface est traitée avec des couches anti-réfléctives et protectrices pour permettre la pénétration de la lumière [3].

La figure (I.2) présente la structure basique d'une cellule photovoltaïque, tel que:

- Electrode négative.
- Electrode positive
- Silicium dopé N.
- Silicium dopé P
- Couche limite.

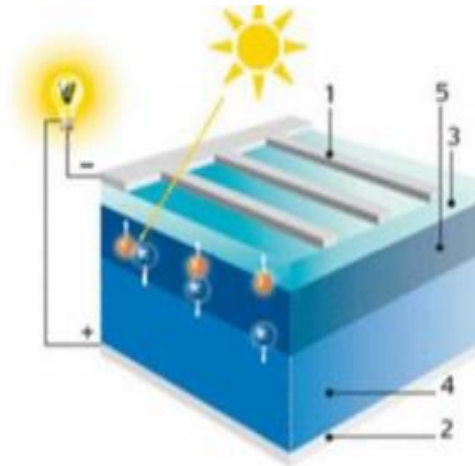


Figure I.2: Cellule photovoltaïque [4]

3.3. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque

Le phénomène photoélectrique permet aux cellules solaires de convertir directement le rayonnement solaire du soleil en énergie électrique en produisant et en transférant des charges électriques positives et négatives dans une substance semi-conductrice sous l'effet de la lumière. Le semi-conducteur se compose de deux éléments différents, l'un avec une surcharge d'électrons et l'autre avec une faible quantité d'électrons, respectivement le dopé de type «*n*» et le dopé de type «*p*». Quand ces deux éléments se rencontrent, les électrons du matériau «*n*» se propagent dans le matériau «*p*», ce qui entraîne la formation d'une charge positive dans la région dopée «*n*» et une charge négative dans la région dopée «*p*»[5].

3.4. L'effet photovoltaïque

Le mot photovoltaïque est composé de deux parties: le préfixe «photo », qui est un dérivé du mot grec désignant «lumière» ou «clarté», et le suffixe « volt », relatif au pionnier de l'électricité Alessandro VOLTA. L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie.[6]

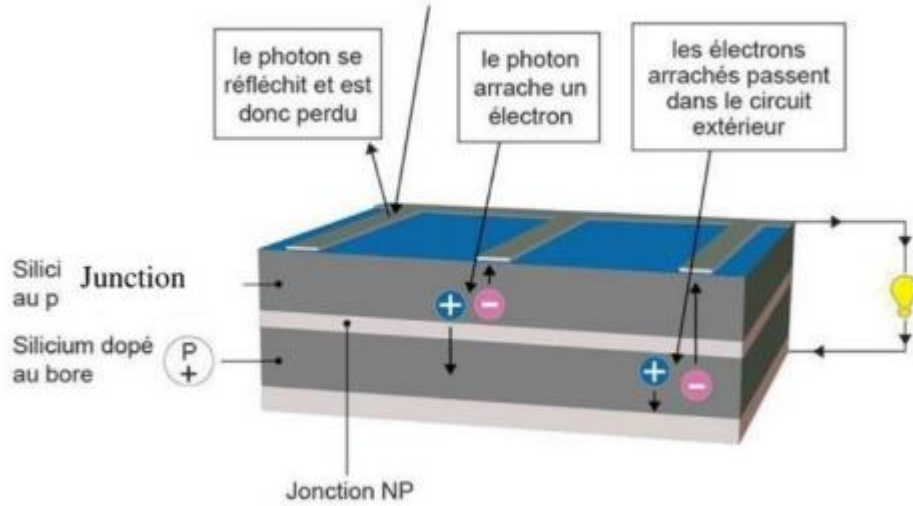


Figure I. 3: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [3]

3.5. Les caractéristiques des cellules photovoltaïques

Tension de circuit ouvert : si on place un panneau sous une source lumineuse constante sans aucune circulation de courant, on obtient à ses bornes une tension continue, dite tension à circuit ouvert V_{co} donne par :

$$V_{co} = V_t \times \log \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.1)$$

Courant de court-circuit: Lorsqu'on place la photo génératrice en court-circuit, il débite son courant maximal à tension nulle [7]. On appelle ce courant de court-circuit I_{cc} vaut :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_d \left[e^{\frac{(V+R_s I)}{nV_T}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.2)$$

La Puissance maximale P_{max} : pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale p_{max} , correspond à la tension et le courant, qui présenter par la relation :

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad (I.3)$$

Le facteur de forme FF : c'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) donne par :

$$FF = P_{max} / V_{co} * I_{cc} \quad (I.4)$$

Le rendement η : le rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente

$$\eta = P_m / P_{in} \quad (I.5)$$

$$\eta = FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co} / p_{in} \quad (I.6)$$

3.6. Influence de la température et de l'éclairement

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

3.6.1. Variation de l'éclairement

L'éclairement est un paramètre très important parce qu'il a un effet spécial sur le rendement électrique, la figure I.4 montre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ à une température constante 25°C.

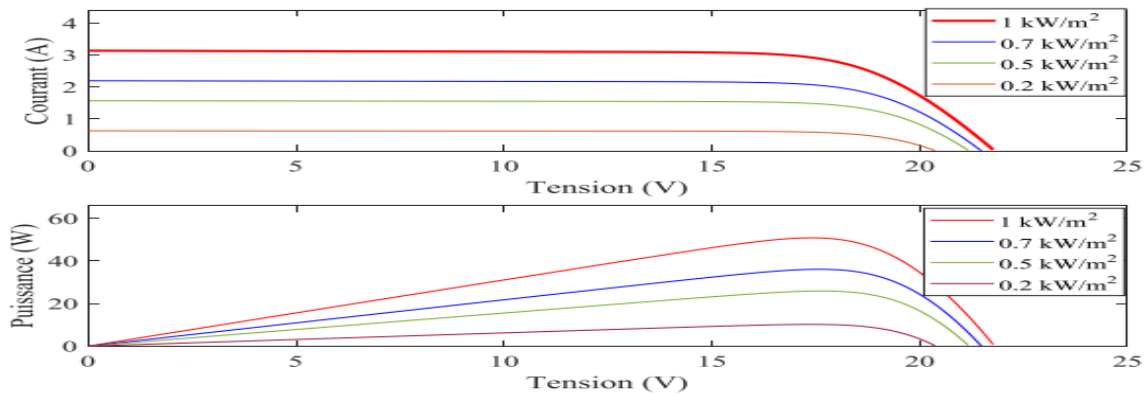


Figure I.4: Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du panneau à 25°C obtenus pour diverses valeurs de l'éclairement.

D'après la figure I.4, on observe que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement dans une plage très petite.

Ainsi, on remarque que, quand la courbe se translate vers le haut et vers le droit la puissance varie proportionnellement à l'éclairement, mais la tension se varie légèrement.

Enfin, on conclut que les cellules solaires fonctionnent bien dans un bon éclairage.

3.6.2. Variation de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire.

La figure I.5 montre l'influence de la température, sur les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$:

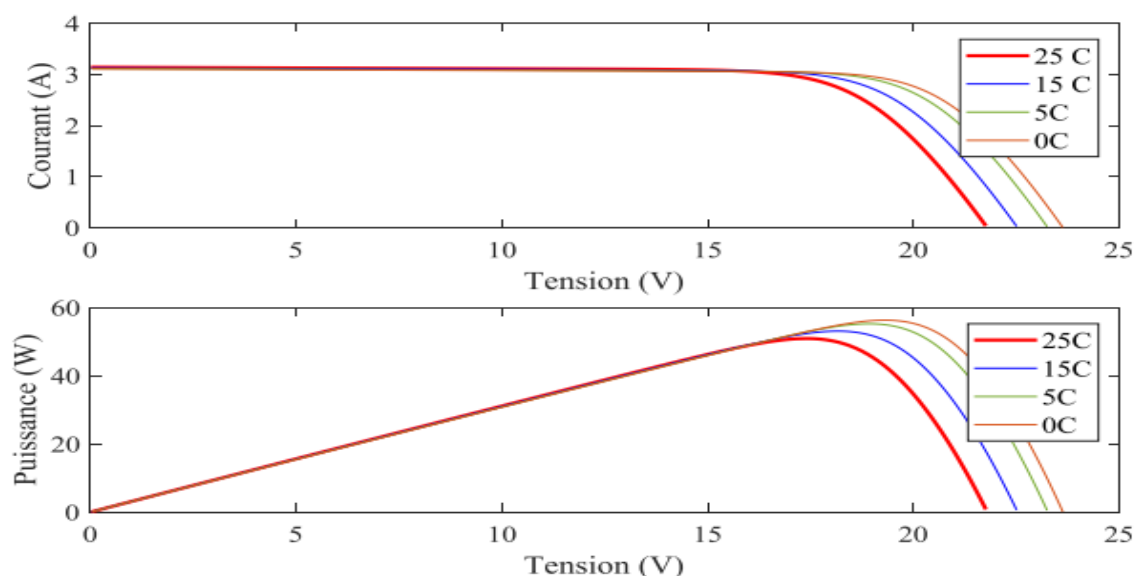


Figure I.5: Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du panneau à éclairement fixe $G=1000 \text{ w/m}^2$ pour différentes de Températures.

D'après la figure I.5, on observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation de la tension de circuit ouvert (V_{co}), on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue, par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente comme montre la figure. On conclut que la température affecte négativement sur l'intensité de la tension et la valeur de la puissance.

Enfin, on conclut que les cellules solaires fonctionnent bien dans un environnement froid.

4. Composants d'un système PV

Un système photovoltaïque est un ensemble intégré de différents composants qui permettent de convertir l'énergie du soleil en électricité utilisable. Il se compose principalement de modules photovoltaïques qui captent la lumière du soleil, d'un onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif, ainsi que de structures de montage, de câblages et de système de contrôle et de surveillance. Grâce à cette combinaison de technologies, le système photovoltaïque peut produire de l'électricité verte et renouvelable, que ce soit pour alimenter un bâtiment, un réseau électrique ou toute autre application nécessitant de l'énergie solaire. La configuration du système est adaptée en fonction des besoins et des contraintes de chaque installation.[5]

Ils se composent de plusieurs éléments sont :

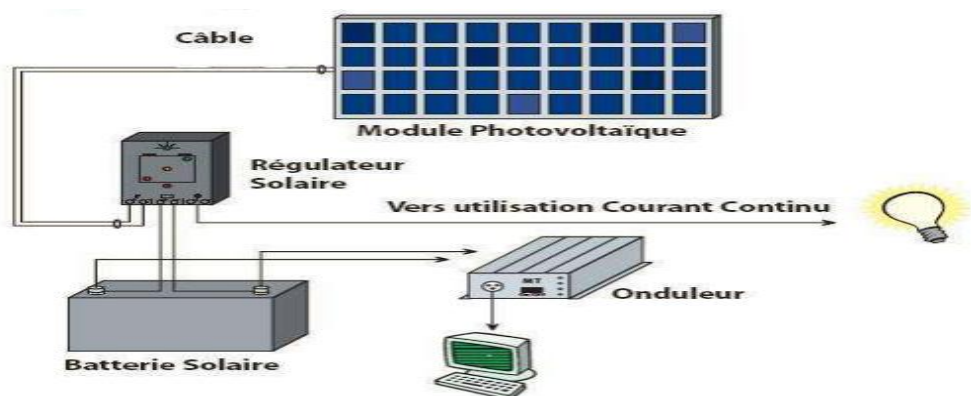


Figure I.6. Les constituants d'un système PV. [8]

4.1. Module photovoltaïque

Les modules photovoltaïques (appelés aussi panneaux *PV*) constitués par une association de certains nombres de cellules. Ces dernières sont connectées entre eux soit en séries. Cette connexion des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble. Il pourrait être utile de le mentionner que la plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin. [9]

Ce dernier est chargé de capter les rayons solaires et les convertir en électricité.

4.2. Le régulateur (contrôleur de charge)

Le régulateur est l'élément central d'un système photovoltaïque autonome il se place entre les panneaux et les batteries. Son objectif est de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes pour lui assurer une meilleure durée de vie, pour que l'application autonome le soit pendant longtemps. [6]

4.3. Le convertisseur d'énergie (onduleur)

Il est chargé de convertir le courant continue développé par le solaire, vers un courant alternatif, et de voltage de branchement (12V, 24V et 48V) vers 220V, il est défini par: le voltage de branchement en volt et la puissance nominale à développer en watt.il existe trois types d'onduleurs:

4.3.1. Onduleur On-Grid

Un système On-Grid est raccordé au réseau et est connecté au réseau électrique et interagit avec celui-ci, si nécessaire, en utilisant une combinaison d'énergie produite sur site et à partir du réseau électrique, avec la possibilité d'utiliser le réseau électrique pour le stockage d'énergie primaire.



Figure I.7, Régulateur autonome. [6]

4.3.2. Onduleur off grid

Un onduleur hors réseau est un convertisseur de puissance destiné à l'électrification de sites isolés qui ne sont pas couplés au réseau électrique local. Fournir une alimentation stable en énergie solaire à de tels sites est un défi car la complexité du système est beaucoup plus grande que dans le cas d'un système commun connecté au réseau. Les onduleurs solaires hors réseau sont utilisés non seulement pour alimenter des ménages autonomes en énergie, mais aussi pour électrifier des appareils et des outils dans des véhicules de loisirs ou sur des bateaux. [10]

4.3.3. Onduleur réseau hybride

Un onduleur hybride raccordé au réseau est un dispositif polyvalent qui convertit l'énergie solaire en courant alternatif utilisable et gère le stockage d'énergie dans des batteries. Il donne la priorité à l'énergie solaire pour réduire la dépendance au réseau électrique et les coûts associés, tout en permettant de stocker l'excédent d'énergie pour une utilisation ultérieure. En cas de faible production solaire ou de batteries déchargées, il peut puiser de l'électricité directement du réseau pour assurer une alimentation continue. De plus, il permet de gérer la réinjection ou non de l'excédent d'énergie dans le réseau public, offrant ainsi une compensation financière potentielle.[11]

Ces onduleurs assurent une alimentation stable, même en cas de coupure de courant (back-up), en utilisant l'énergie stockée dans les batteries. Ils sont équipés de systèmes de surveillance en temps réel et de logiciels de gestion intelligente pour optimiser la distribution de l'énergie entre l'autoconsommation, le stockage, le back-up et la réinjection dans le réseau. Utilisés dans les résidences, les sites isolés et les bâtiments commerciaux, les onduleurs hybrides améliorent l'autonomie énergétique et offrent une solution efficace pour maximiser l'utilisation des sources d'énergie renouvelable.

4.4. Batteries

Les batteries solaires sont utilisées pour le stockage d'énergie sont adaptées au cyclage quotidien et à la charge lente par panneaux solaires. Leur durée de vie est considérablement augmentée si la

profondeur de décharge quotidienne est inférieure à 30% de la capacité totale pour les batteries plomb et jusqu'à 70% pour les batteries lithium.[6]

4.5. La charge

Elle représente l'ensemble des fonctions assurées par divers appareils reliés au système photovoltaïque. Vu les contraintes sur le rendement énergétique des systèmes photovoltaïques, il est important de définir les critères sur lesquels s'appuiera un choix des charges à utiliser: charge continue ou alternative. [8]

5. Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau [Lab. 03]. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

5.1. Système photovoltaïque autonome

C'est un système complètement indépendant d'autre source d'énergie, qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. La présence des batteries de stockage d'énergie est obligatoire pour assurer la fourniture à l'utilisateur continuellement et même en cas d'absence potentielle de la production d'électricité [12]

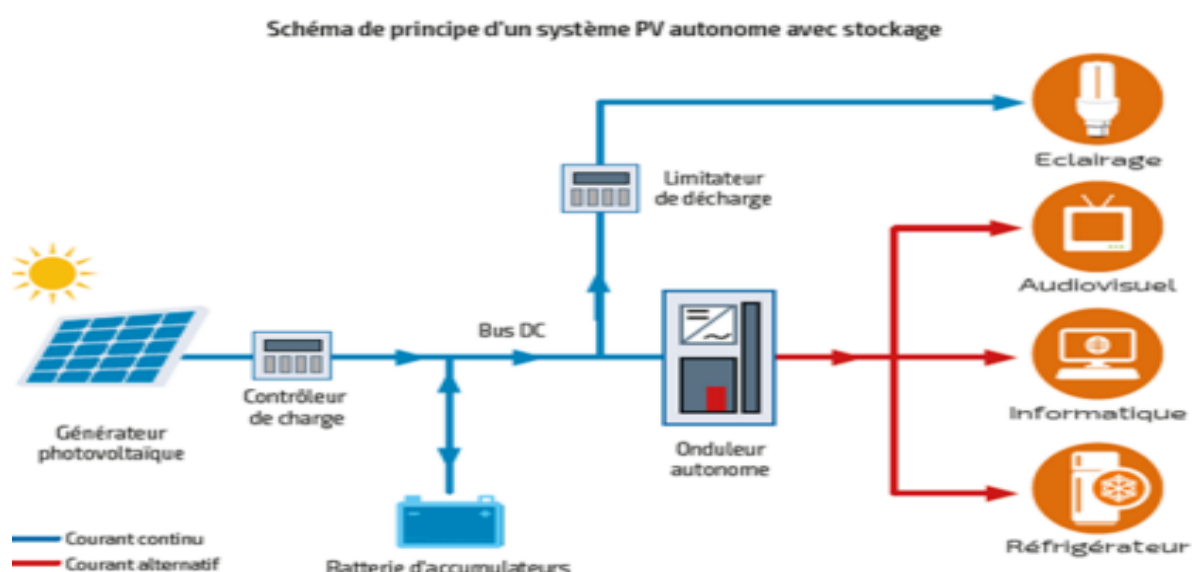


Figure I.8. Schéma d'un système PV autonome avec batterie [3].

5.2. Système PV raccordé au réseau

Un système *PV* raccordé au réseau est un système dont la charge est partiellement ou totalement est le réseau électrique, c'est à dire le générateur *PV* injecte sa puissance à travers un onduleur dans le réseau électrique

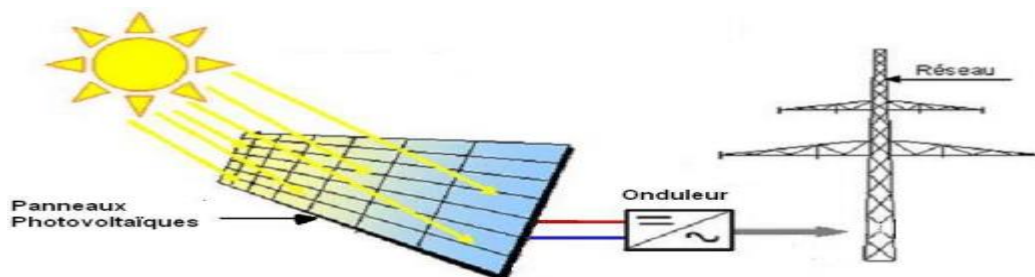


Figure I.9. Structure d'un système PV raccordé au réseau [6]

5.3. Système hybride

Les systèmes hybrides de production d'électricité combinent différentes sources d'énergie comme le solaire, l'éolien et parfois des générateurs diesel ou le réseau électrique conventionnel. Ils utilisent des dispositifs de stockage d'énergie pour réguler la fourniture d'électricité et maximiser l'efficacité. L'équilibre entre les différentes sources est crucial pour assurer une alimentation continue et fiable. Ces systèmes offrent une solution flexible pour répondre aux besoins énergétiques dans divers environnements [3]

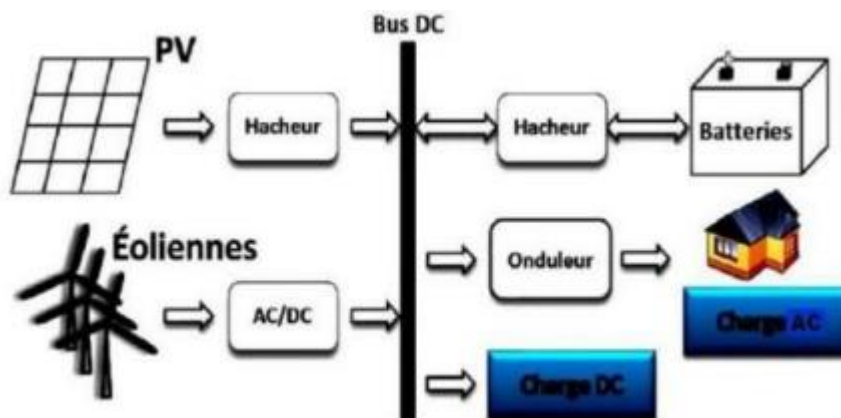


Figure I.10. Schéma d'un système PV hybride [3]

5.4. Problématiques de l'intégration des PV dans les réseaux

L'intégration massive des systèmes *PV* pose de défis complexes au niveau de la gestion du réseau :

5.4.1. Intermittence de la production

La production de l'électricité par les systèmes photovoltaïques dépend directement de l'ensoleillement disponible. Or l'irradiation solaire varie fortement au cours du temps.

5.4.2. Influence sur le plan de protection

La contribution des systèmes PV au courant de défaut dans le réseau de distribution a des conséquences faibles sur le plan de protection. Par ailleurs, la sélectivité et la sensibilité des protections du réseau peuvent être affectées et provoquent le déclenchement intempestif du départ sain ou l'aveuglement de la protection du départ en défaut.

5.4.3. Problèmes de stabilité et de qualité de l'énergie

a. Stabilité du réseau électrique

Le réseau devient plus vulnérable aux instabilités de fréquence et de tension, notamment en cas de variation rapides dues à l'intermittence de la production.

b. Qualité de l'énergie injectée

La qualité de l'énergie distribuée aux consommateurs peut être dégradée, ce qui nuit à la fiabilité du réseau et au bon fonctionnement des appareils électrique

5.4.4. Influence sur la tension et la fréquence du réseau

La présence de générateurs PV a une influence sur le plan de tension et sur les dispositifs de réglage du réseau. La tension varie en fonction des injections de puissances active et réactive sur le réseau. En particulier pendant une période de fort ensoleillement et de faible consommation, la tension de certains nœuds du réseau peut dépasser le seuil admissible. Une étude de l'université d'agriculture et technologie de Tokyo montre que, dans la localité d'Ota City qui concentre quelques 550 installations PV, l'injection d'énergie sur le réseau fait croître la tension jusqu'à un seuil provoquant le découplage de certains systèmes, notamment en fin de semaine lorsque la consommation est faible.

5.4.5. Problème de synchronisation (onduleur-réseau)

L'étude de la synchronisation de la commande par rapport à l'évolution des tensions du réseau est à base de la PLL triphasée, qui consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe générée par cette transformation est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park (θ est). En régime établi l'angle (ωt) est égal à l'angle du réseau.[12]

• Le schéma simplifié de régulation et de simulation de la PLL dans le domaine de Park est donné par la Figure

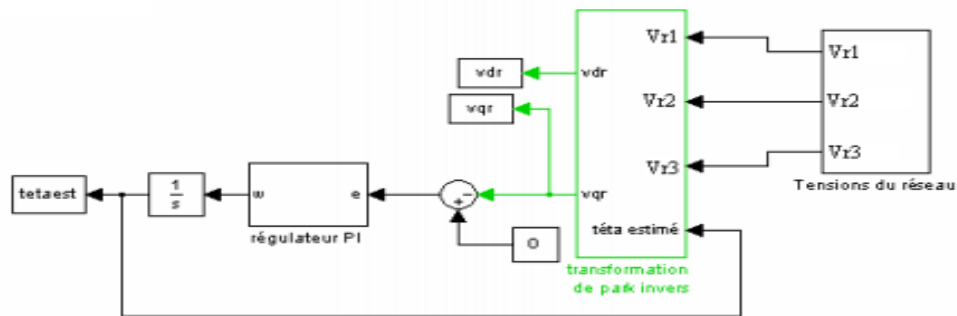


Figure I.11: Schémas block de simulation

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le monde de la conversion photovoltaïque donné un aperçu général sur les différentes notions importantes pour l'étude d'un système solaire photovoltaïque et les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire, le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et le module photovoltaïque.

Chapitre II :

Modélisation et contrôle du système PV

connecté au réseau

1. Introduction

La transition énergétique actuelle repose largement sur l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques. Parmi elles, l'énergie PV occupe une place de plus en plus importante grâce à sa flexibilité d'installation, son coût décroissant, et sa capacité à répondre à une demande énergétique décentralisée.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation et à la commande d'un système PV triphasé connecté au réseau, en adoptant une structure à un seul étage de conversion. Ce choix technique, consistant à relier directement le générateur PV à l'onduleur triphasé sans étage DC/DC intermédiaire, présente des avantages significatifs en termes de simplicité, de rendement énergétique, de compacité et de coût.

Le système est basé sur une commande en boucle fermée à structure en cascade, comprenant :

- une régulation de la tension du bus continu V_{dc} , avec consigne issue d'un algorithme *MPPT* pour assurer l'extraction de la puissance maximale du champ PV,
- une commande vectorielle du courant injecté au réseau dans le repère synchronisé dq, à l'aide de régulateurs *PI*, assurant un contrôle indépendant de la puissance active et réactive.

Le filtrage des courants harmoniques est assuré par un filtre de type *LCL*, dont les caractéristiques dynamiques influencent directement le dimensionnement des régulateurs et la stabilité du système.

Ce chapitre présente ainsi:

La modélisation complète du système (générateur, convertisseur, filtre, réseau),

- la stratégie de commande adoptée,
- le dimensionnement des régulateurs PI,
- et une analyse des performances dynamiques à travers des résultats de simulation.

Il constitue la base de référence avant d'envisager, dans le chapitre suivant, des techniques de commande avancées visant à améliorer la robustesse et la performance du système face aux perturbations et incertitudes.

2. Modélisation du module PV

2.1. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé est représenté sur la Figure II.1

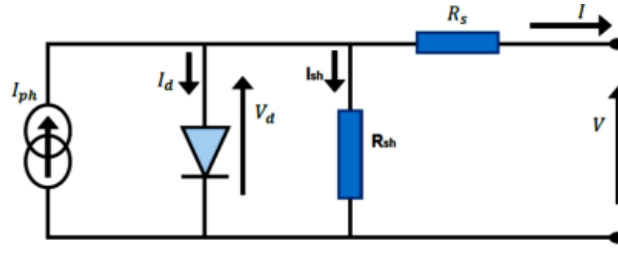


Figure II.1: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

La cellule solaire est décrite comme un générateur de courant égal à I_{ph} , shunté par des diodes possédant les caractéristiques de la cellule à l'obscurité. Comme montre la figure une cellule photovoltaïque comporte en réalité une résistance série R_s et une résistance shunt R_{sh} . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique 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

2.2. Modélisation de la cellule photovoltaïque

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par:

La loi de Kirchhoff donne :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.1)$$

Avec

$$I_d = I_0 \left[e^{\left(\frac{V_d}{nV_T} \right)} - 1 \right] \quad (II.2)$$

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (II.3)$$

$$V_d = V + R_s I \quad (II.4)$$

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (II.5)$$

$$I_0 = I_{on} \cdot \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left(\frac{E_{g_{ref}}}{K_1 T_n} - \frac{E_g}{K_1 T} \right)} \quad (II.6)$$

$$K_1 = \frac{K}{q} \quad (II.7)$$

$$E_g = E_{g_{ref}} \cdot \left(1 + \frac{T}{T_n} \cdot \text{deg dt} \right) \quad (II.8)$$

De l'équation (II.4), l'équation (II.3) devient :

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (II.9)$$

De (II.2) et (II.9), l'équation (II.2) peut être écrit comme suit:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V + R_s I}{n V_T}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (II.10)$$

Où :

I: est le courant de sortie [A];

V: est la tension de sortie [V];

V_t : représente la tension thermique de diode [V];

I_d : est le courant traversant la diode [A];

I_{ph} : est le photo courant de la cellule [A];

I_0 : est le courant de saturation inverse de la diode (courant d'obscurité) [A];

q: est la charge d'électron[C°];

K: est la constante de Boltzmann [J/K];

n : est le facteur d'idéalité de la diode (Coefficient dépendant du matériau de la cellule)

T : est la température de la cellule [K°].

R_s : est la résistance série [Ω] ;

R_{sh} : est la résistance parallèle [Ω].

On peut prendre en considération que la chute de tension due à la résistance R_s est négligeable ce qui donne $I_{ph} \approx I_{cc}$

Où I_{sc} : Le courant de court-circuit

Donc l'équation (II.12) devient :

$$I = I_{cc} - I_0 \left[e^{\frac{(V+R_s I)}{nV_T}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (II.11)$$

Le courant de court-circuit dépend linéairement de l'ensoleillement, et il est influencé par la température suivant les équations suivantes :

- A température constante:

$$I_{cc} = I_{ccn} \frac{G}{G_n} \quad (II.12)$$

A l'ensoleillement constant :

$$I_{cc} = I_{ccn} + K_i \Delta T \quad (II.13)$$

Avec:

$$\Delta T = T - T_n \quad (II.14)$$

D'après les équations (II.13) et (II.14) on peut écrire:

$$I_{cc} = \frac{G}{G_n} (I_{ccn} + K_i \Delta T) \quad (II.15)$$

Avec :

G : Ensoleillement de fonctionnement [W/m^2]

G_n : Ensoleillement nominal ($1000 \text{W}/\text{m}^2$)

T_n : Température nominale [K°] ou [C°]

I_{ccn} : Courant de court-circuit aux conditions nominales [A]

K_i : Coefficient de température du courant au court-circuit [A/K] ou [A/C°]

Donc on peut écrire à partir de l'équation (II.10) et (II.15) :

$$I_{ph} = (I_{ccn} + K_i(T - T_n)) \cdot \frac{G}{1000} \quad (\text{II.16})$$

2.3. Simulation d'un module photovoltaïque sous Simulink/Matlab

Le module photovoltaïque utilisé dans ce travail est un modèle STP050D-12MEA de la société SUNTECH. Ces caractéristiques électriques sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Caractéristique du module PV.

Grandeurs	Valeurs
Éclairement	1000 W/m ²
Température standard T	25 ° C
Puissance crête maximale P_m	50 W
Tension à P_m	17.4 v
Curant à P_m	2.93 A
Tension de circuit ouvert V_{oc}	21.8 v
Courant de court-circuit I_{sc}	3.13 A
Nombres des cellules	36

2.4. Caractéristiques I(V) et P(V) du panneau

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25 °C.

Les résultats obtenus par simulation (en utilisant le logiciel *MATLAB*) montrent les caractéristiques courant–tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ d'un module photovoltaïque dans les conditions standards ($T=25^\circ\text{C}$, $E=1000 \text{ W/m}^2$). Ces résultats sont représentés dans les figures (II.2) et (II.3) :

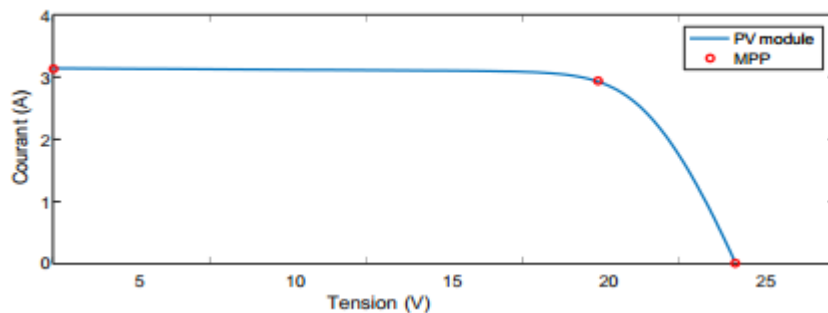


Figure II. 2. La caractéristique courant –tension d'une cellule solaire

La figure (II.2) représente la caractéristique courant–tension d'une cellule solaire dans les conditions de $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$. Le courant de court-circuit est égal à 3.13A tandis que la tension de circuit ouvert est de 21.8 v. On observe que la caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement.

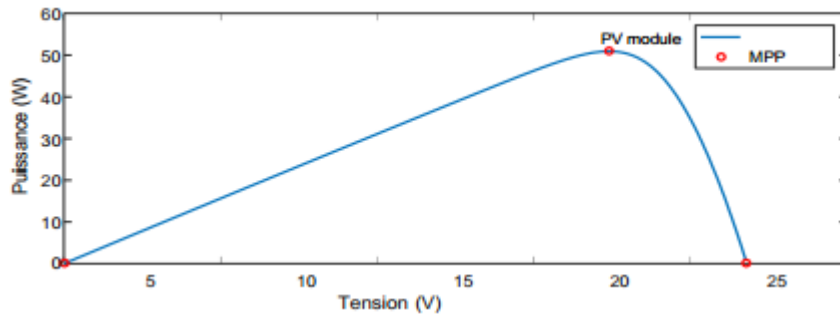


Figure II. 3 :La caractéristique puissance –tension d’une cellule solaire.

La figure (II.3) représente la caractéristique puissance–tension d'une cellule solaire dans les conditions de $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$. On remarque que, quand la tension augmente la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale (P_{max}) ensuite elle décroît.

On constate que la caractéristique de la cellule non linéaire et se comporte comme une source de courant constant dans la partie horizontale et comme un générateur de tension constant dans la partie verticale, on note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale il s'appelle MPP.

3. Les convertisseurs DC-AC (onduleur)

3.1. Définition

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. la forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée. [12]

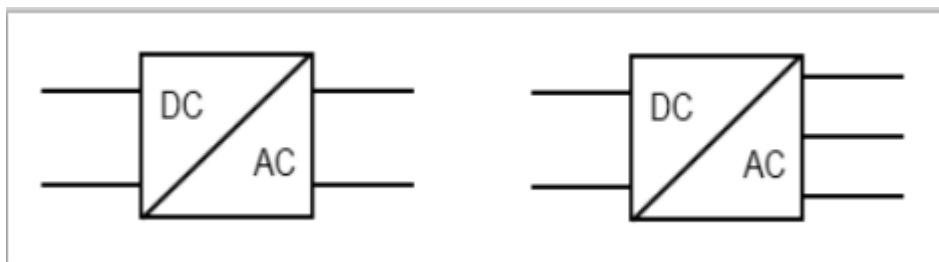


Figure II.4: Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé [12]

Les onduleurs sont basés sur une structure en pont en H, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les *IGBT*, transistors de puissance ou thyristors. Ces derniers sont commande par des commande (symétrique, décalée, *MLI*), généralement on utilise la *MLI* (modulation de largeur d'impulsion).

3.2. Modélisation d'un onduleur triphasé

3.2.1. Structure de l'onduleur

La Figure présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandable à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (*GTO* ou *IGBT*) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension U_{dc} , ou à deux condensateurs avec un point milieu (C_{dc1} , C_{dc2}). Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_r , R_r) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau.

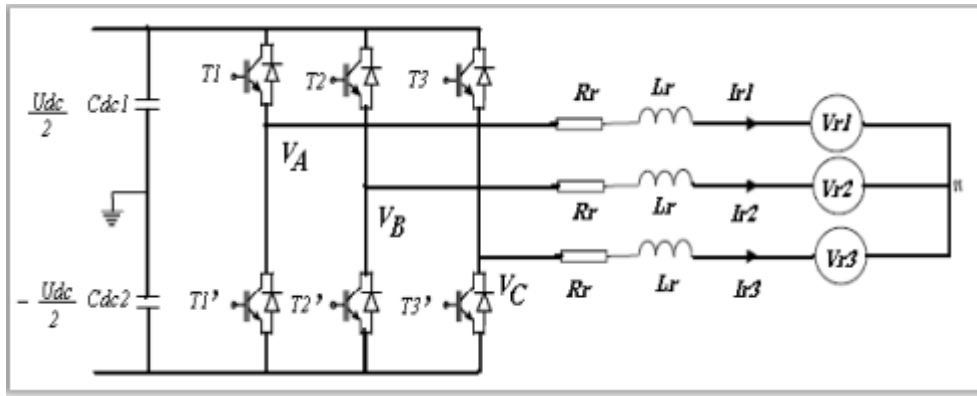


Figure II.5. Structure d'un onduleur triphasée.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre. L'onduleur peut être modélisé par une matrice $[T]$ assurant le passage continu-alternatif (*DC-AC*). [12]

On aura alors:

$$[V_{abc}] = [T][V_{DC}] \quad (II.17)$$

avec:

$$[V_{abc}] = [V_a \ V_b \ V_c]$$

$[V_{abc}]$: tension alternative équilibrée.

$[V_{DC}]$: tension continue.

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

$[T]$: Matrice de transfert de l'onduleur

3.3. Commande de l'onduleur

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

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

3.3.1. Commande par hystérésis

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation

En pratique c'est la technique schématisée sur la figure que l'on utilise .la différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur :

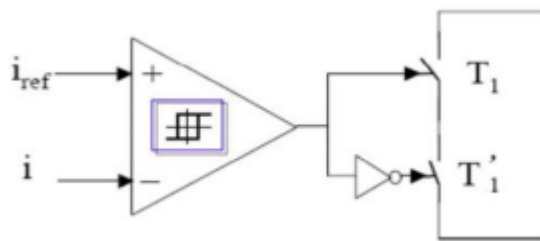


Figure II. 6. Contrôle de courant par hystérésis. [12]

La génération des signaux de commande de la modulation se fait le plus souvent en temps réel. Pour déterminer en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs on fait appel à l'électronique de commande analogique ou numérique ou les deux simultanément. La modulation de largeur d'impulsion nous permet cette détermination. Pour assurer la détermination en temps réel

des instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, on distingue plusieurs types de techniques de modulation de largeur d'impulsion peuvent être considérées, dont on peut citer: La modulation sinus-triangle, et la *MLI* vectorielle (*SVM*: Space Vector Modulation).

3.3.2. La *MLI* sinus-triangle

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (*MLI*) ou Pulse Width Modulation (*PWM*) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant.

La modulation *MLI* est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (issue d'un découpage à fréquence) par une onde modulante sinusoïdale (fréquence) à fréquence beaucoup plus basse [12]

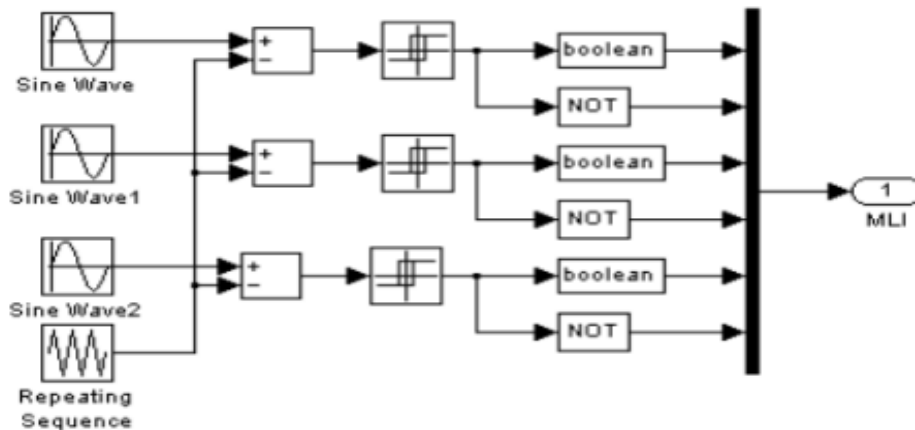


Figure II.7. Schéma de simulation d'une commande *MLI*.

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative. Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (*MLI*), cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude A_r et de fréquence F_r , avec un signal appelé porteuse d'amplitude A_p et de fréquence F_p très élevée.

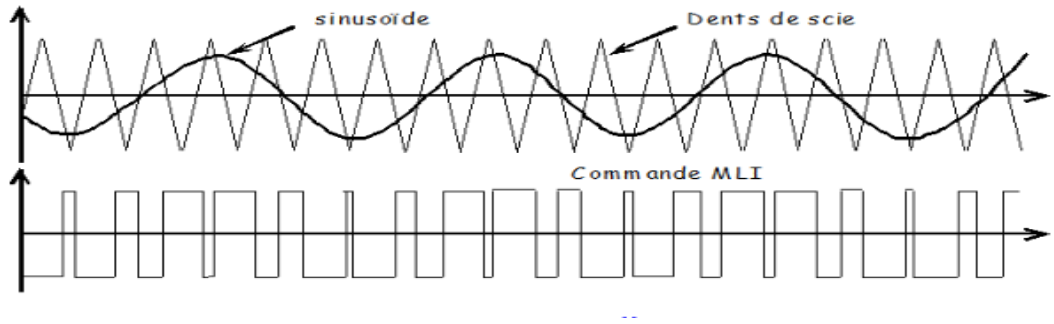


Figure II.8. Signal de la commande MLI et les impulsions des interrupteurs.

Paramètre de MLI : Cette commande est caractérisée par deux paramètres qui sont l'indice de modulation " m " qui représente le rapport de la fréquence de la porteuse à la fréquence de référence de référence :

$$m = \frac{F_p}{F_m} \quad (\text{II.18})$$

" r " étant le coefficient de réglage en tension (ou le taux de modulation) qui représente le rapport de l'amplitude de l'onde de référence à la valeur de crête de la porteuse :

$$r = \frac{U_m}{U_p} \quad (\text{II.19})$$

3.3.3. La MLI vectorielle (SVM: Space Vector Modulation).

Le principe de la modélisation vectorielle (SVM) consiste à reconstruire le vecteur tension V_{ref} à partir de huit vecteurs tension. Chacun de ces vecteurs correspond à une combinaison des états des interrupteurs d'un onduleur de tension triphasé, elle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations par chacun des bras de l'onduleur. Cette technique de MLI suit les principes suivants : V_{ref} vecteur de référence est calculé globalement et approximé sur une période de modulation T_m par un vecteur de tension moyen,

Pour chaque phase, réalisation d'une impulsion de largeur T centrée sur la période dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence à l'instant d'échantillonnage. Tous les interrupteurs d'un demi-pont ont un état identique aux centres et aux extrémités de la période. [13] Une analyse combinatoire de tous les états possibles des interrupteurs permet de calculer le vecteur de tension $[Vs\alpha \ Vs\beta]$. Nous pouvons donc dresser un tableau des différents états de l'onduleur.

Vecteur	Sa	Sb	Sc	Vsa	Vsb	Vsc	Vsα	Vsβ	VecteurVi
V0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V5	0	0	1	-E/3	-E/3	2E/3	$-\sqrt{\frac{1}{6}}E$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}E$	$\sqrt{\frac{2}{3}}Ee^{j\frac{4\pi}{3}}$
V3	0	1	0	-E/3	2E/3	-E/3	$-\sqrt{\frac{1}{6}}E$	$\sqrt{\frac{1}{2}}E$	$\sqrt{\frac{2}{3}}Ee^{j\frac{2\pi}{3}}$
V4	0	1	1	-2E/3	E/3	E/3	$-\sqrt{\frac{2}{3}}E$	0	$-\sqrt{\frac{2}{3}}E$
V1	1	0	0	2E/3	-E/3	-E/3	$\sqrt{\frac{2}{3}}E$	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}E$
V6	1	0	1	E/3	-2E/3	E/3	$\sqrt{\frac{1}{6}}E$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}E$	$\sqrt{\frac{2}{3}}Ee^{j\frac{5\pi}{3}}$
V2	1	1	0	E/3	E/3	-2E/3	$\sqrt{\frac{1}{6}}E$	$\sqrt{\frac{1}{2}}E$	$\sqrt{\frac{2}{3}}Ee^{j\frac{\pi}{3}}$
V7	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Tableau II .2. Table de vérité de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux. [13]

Avec :

$$V_{ref} = \sqrt{V_{ref}^2 + V_{ref}^2} \cdot e^{j(\alpha - \frac{\pi}{2})} \quad (II.20)$$

Le vecteur de référence V_{ref} est approximé sur la période de modulation, par la génération d'un vecteur moyen élaboré par l'application des vecteurs disponibles. Voir tableau. II-2. Elle consiste à considérer globalement le système triphasé et à lui appliquer une transformée de Concordia pour se ramener dans le plan (V_α, V_β) . Le système triphasé des tensions à générer pour la durée d'échantillonnage en cours peut alors être représenté comme un unique vecteur dans ce plan,

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

Ce vecteur n'est pas directement réalisable par les interrupteurs du variateur, mais on peut chercher les trois configurations les plus proches (situées sur les sommets et au centre de l'hexagone), et les appliquer successivement pendant une fraction adéquate de la période d'échantillonnage, de façon à obtenir en valeur moyenne le vecteur recherché. [13]

4. Algorithme MPPT

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes

MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens.

4.1. Principe du *MPPT*

Par définition, 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, quelles que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}).

4.2. Classification des commandes *MPPT* selon le type de recherche

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes *MPPT* selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent : direct et indirect et selon les paramètres d'entrée ou de sortie de la commande *MPPT*, comme il est plus intéressant de les classer selon les paramètres à régler.

4.2.1. *MPPT* Indirect

Ce type de commandes *MPPT* utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du *MPP*. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du *GPV* réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. [5]

4.2.2. *MPPT* directs

Ces méthodes utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux 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 des *GPV*. [5] Parmi ces méthodes, on retrouve les méthodes:

- la méthode « Perturbe & Observe »,
- l'incrément de conductance.

Nous rappelons brièvement les principes de ces méthodes.

4.2.2.1. Commande "Perturbation & Observe " (P&O)

La méthode de *P&O* est une approche largement répandue dans le domaine des techniques *MPPT*, car elle est simple. Elle exige seulement des mesures sur la tension aux bornes du panneau et son courant de sortie [5].

Le principe de la technique *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. Ainsi, comme l'illustre la figure II.9.

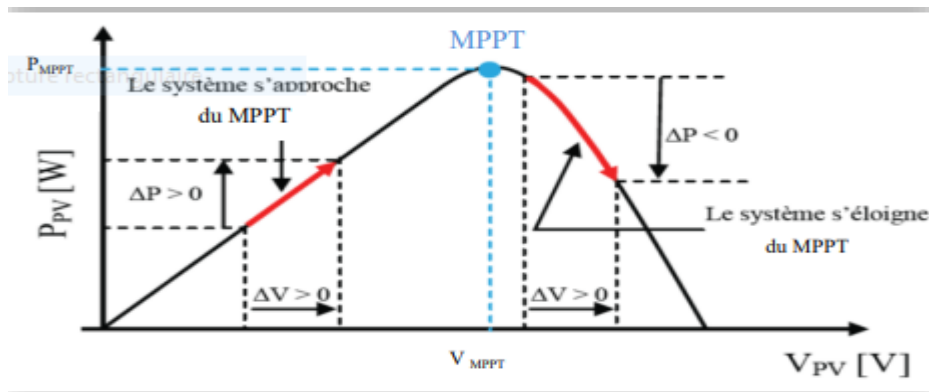


Figure II.9. Le principe de la technique P&O [12]

La figure II.10 représente l'algorithme classique associé à une commande *MPPT* de type (*P&O*), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

Deux capteurs (courant et tension du *GPV*) sont nécessaires pour ce type de commande afin de déterminer la puissance du *PV* à chaque instant.

Si la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière mesure, c'est-à-dire le point de puissance maximale n'est pas atteint, la perturbation de la tension continuera dans la même direction que celle qui a été prise au dernier cycle. Lorsque le point de puissance maximale est atteint, la tension du panneau oscille autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. Une fois la puissance de sortie a diminué depuis la dernière mesure, c'est-à-dire le point de puissance maximale est dépassé, la tension est perturbée dans la direction opposée de celle de l'itération précédent.[5]

Avantage de la méthode P&O

- Simplicité de mise en œuvre : ne nécessite pas de modélisation complexe du système *PV*.
- Faible coût de calcul : ne demande que quelques mesures (tension, courant) et des opérations simples (soustraction, multiplication).

- Efficace en conditions stables : donne de bons résultats lorsque l'irradiance solaire et la température sont relativement constantes.
- Très répandue : largement documentée, testée, et utilisée dans des applications industrielles et académiques.

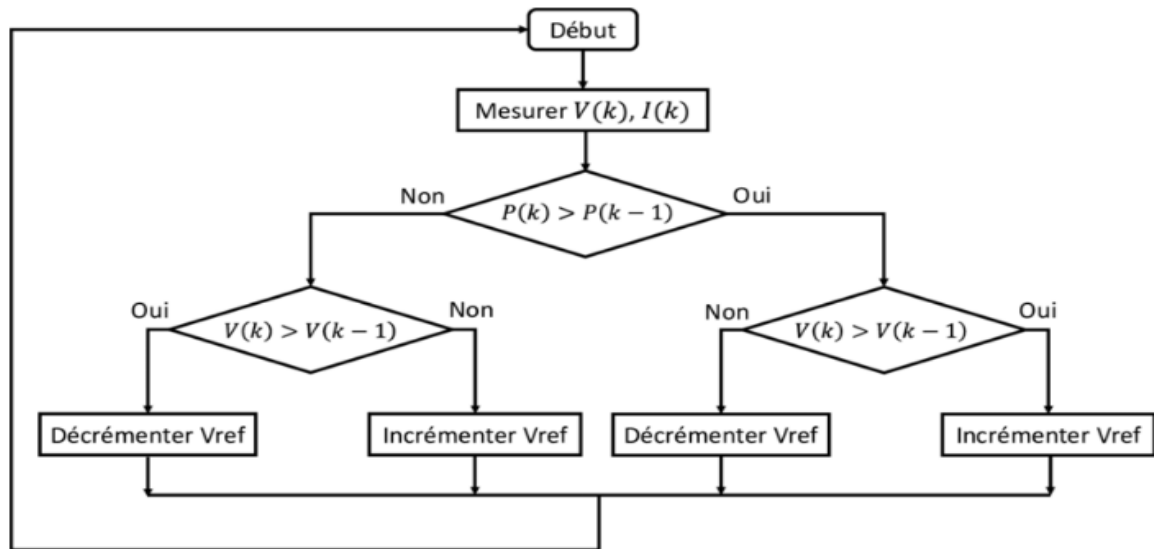


Figure II. 10. Organigramme de l'algorithme P&O. [5]

Inconvénients de la méthode P&O

Oscillations autour du point de puissance maximale (*MPP*) : Le système "perturbe" en permanence, ce qui crée des petites oscillations même une fois le *MPP* atteint. Cela peut entraîner une perte d'efficacité.

- Réponse lente aux changements rapides : En cas de variation soudaine d'ensoleillement ou de température, le système peut mettre du temps à retrouver le nouveau *MPP*,
- Risque de confusion entre changement environnemental et perturbation: En cas de changement rapide (ex. : nuage passant), le système peut mal interpréter la variation de puissance comme étant due à sa propre perturbation, et donc se tromper de direction,
- Sensibilité au pas de perturbation: **Un pas trop grand** peut entraîner une instabilité du point de fonctionnement, provoquant des **oscillations** importantes autour du point de puissance maximale (*MPP*). En revanche, **un pas trop petit** permet d'atténuer ces oscillations mais entraîne une convergence **lente** vers le *MPP*.

5. Structure générale d'un système PV connecte au réseau

Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur au réseau électrique. Parmi les objectifs de l'onduleur utiliser est le contrôle du courant

issu du champ des modules photovoltaïques et de la puissance injectée au réseau suivant les normes en vigueur.

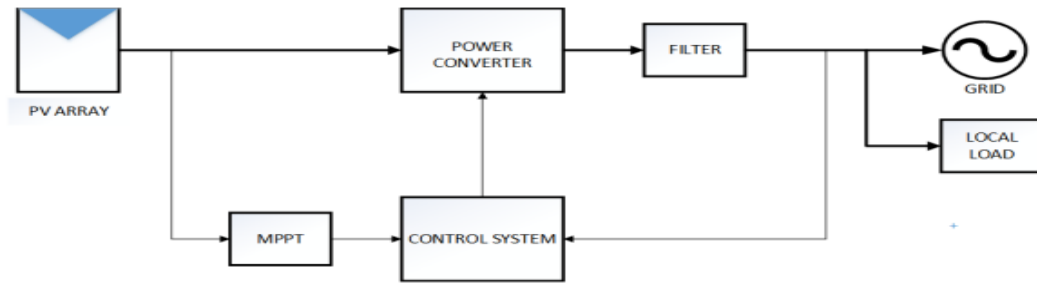


Figure II .13. Système photovoltaïque connecter directement au réseau.

5.1. Stratégie de contrôle de système PV connecté au réseau électrique via un seule étage de conversion (Single-Stage Inverter)

Pour les systèmes photovoltaïques triphasés raccordés au réseau, dans une plage de puissance de 1 à 5 kW, une architecture de plus en plus utilisée est celle de l'onduleur à un seul étage de conversion (Single-Stage Inverter). Contrairement aux structures à deux étages (DC/DC puis DC/AC), cette configuration convertit directement l'énergie DC du générateur PV en AC triphasé injecté au réseau, ce qui permet de réduire les pertes, le coût, et la complexité globale du système.

Dans ce cas, le convertisseur $CC-CA$ est un onduleur triphasé commandé en courant, fonctionnant avec une modulation de largeur d'impulsion (PWM). En sortie, un filtre passe-bas est utilisé pour limiter les harmoniques générés. Si les filtres L restent courants, les filtres LCL sont aujourd'hui privilégiés grâce à leur meilleure capacité de filtrage et leur compacité, bien qu'ils introduisent une fréquence de résonance pouvant affecter la stabilité, nécessitant alors une commande spécifique [7].

La structure de commande typique d'un tel onduleur single-stage triphasé comprend: cette structure de commande du système de conversion photovoltaïque triphasé est représentée dans la Figure II.14.

Elle comprend principalement :

- Un algorithme de synchronisation basé sur une boucle à verrouillage de phase (PLL) pour assurer la cohérence avec la fréquence et la phase du réseau,
- Un algorithme MPPT pour optimiser la puissance extraite du générateur PV ,
- Une commande de la puissance d'entrée pour réguler le transfert d'énergie,
- Un contrôleur du courant injecté dans le réseau triphasé, basé sur la PWM .

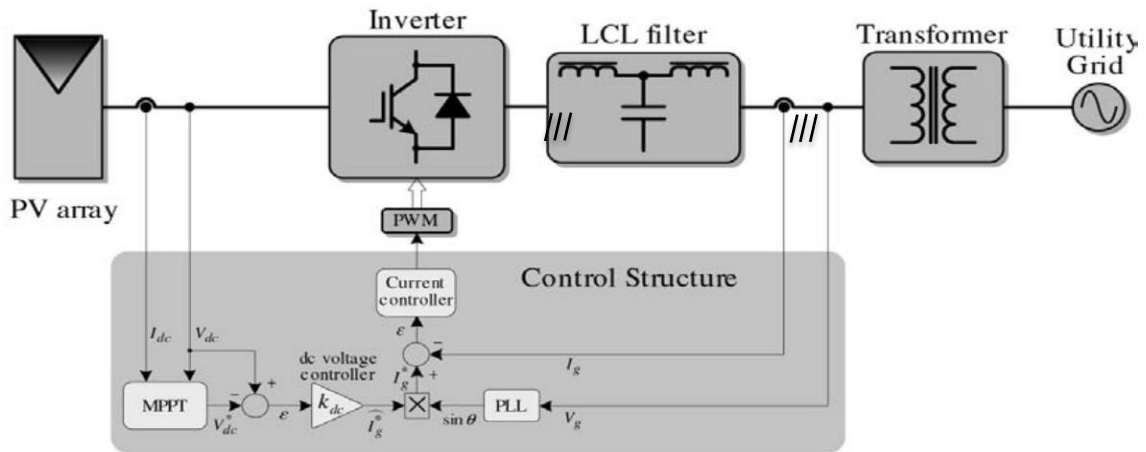


Figure II.14 Schéma de contrôle du système PV connecté au réseau.

5.1.1. Boucle de contrôle de la tension du bus continu

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, la tension du bus continu (*DC-Link*) joue un rôle essentiel dans le transfert de puissance entre la source *PV* et le réseau. Pour garantir la stabilité de cette tension, il est courant d'implémenter une boucle de régulation à l'aide d'un régulateur de type *PI* (Proportionnel-Intégral).

Le principe de commande repose sur la régulation de la puissance active injectée dans le réseau, en comparant la tension mesurée du bus continu V_{dc} avec une valeur de consigne V_{dc}^* . L'erreur résultante est traitée par le régulateur PI , qui ajuste la référence de courant actif (généralement i_d^* dans le repère dq) utilisée dans la boucle de courant rapide. La boucle de tension est ainsi plus lente que la boucle de courant, formant une structure en cascade.

Le modèle simplifié du bus continu peut être exprimé comme suit :

$$C. \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{pv} - i_{grid}$$

Où:

- C est la capacité du bus DC ,
- i_{pv} est le courant issu du générateur PV ,
- i_{grid} est le courant injecté dans le réseau via l'onduleur.

La fonction de transfert de la dynamique du bus peut alors être modélisée par un intégrateur:

$$G_{dc}(s) = \frac{K_{dc}}{s}$$

$$\text{Où : } K_{dc} = \frac{1}{C.V_{dc}}$$

Le régulateur PI appliqué à cette boucle est défini par :

$$PI(s) = \frac{(k_{pvdc} \cdot s + k_{ivdc})}{s}$$

Le dimensionnement des gains k_p et k_i dépend de la capacité C , de la tension V_{dc} , ainsi que de la bande passante souhaitée pour la régulation (généralement de l'ordre de 10 à 30 rad/s, pour respecter la séparation temporelle avec la boucle de courant).

5.1.2. Commande du courant injecté au réseau

Dans les systèmes photovoltaïques triphasés connectés au réseau, le contrôle du courant injecté est essentiel pour assurer une injection de puissance de qualité, conforme aux normes (faible THD, synchronisation au réseau, etc.). Ce contrôle est généralement réalisé dans le repère synchronisé dq à l'aide de régulateurs PI sur les composantes actives (i_d) et réactives (i_q) du courant. Le filtre LCL , utilisé pour améliorer les performances de filtrage, introduit une dynamique plus complexe qu'un simple filtre L . Ci-dessous, nous exposons la modélisation du filtre LCL et la démarche de dimensionnement des régulateurs PI pour i_d et i_q .

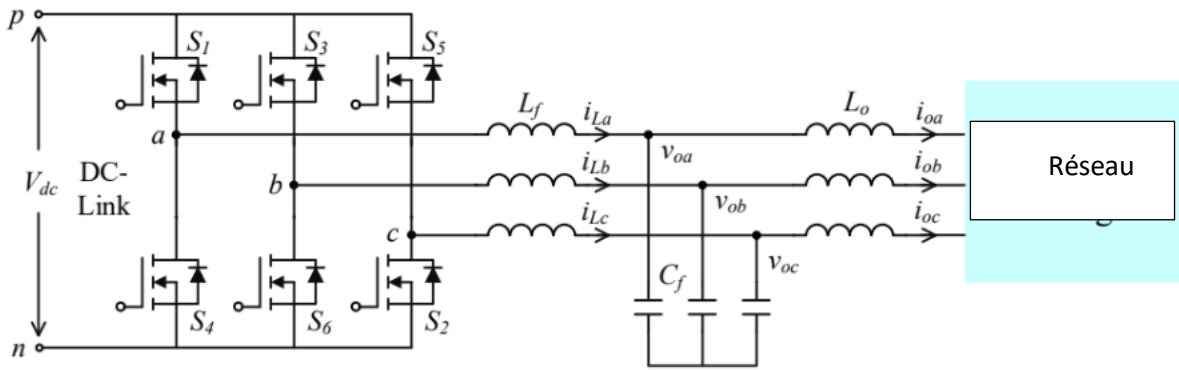


Figure II.15 Connexion au réseau par l'intermédiaire d'un filtre LCL.

Étant donné que le schéma de commande est de type en cascade et comprend quatre régulateurs PI , il est difficile de concevoir tous les paramètres des régulateurs simultanément.

Il est recommandé que la boucle de courant possède une bande passante nettement plus élevée que celle de la boucle de tension, de manière à éviter toute interaction ou interférence entre elles.

Généralement la bande passante de la boucle de courant est fixée autour de 1,6 kHz, tandis que celle de la boucle de tension se situe typiquement entre 300 et 400 Hz.

Ainsi, lors de la conception du régulateur de courant, la boucle de tension est négligée (considérée comme constante à l'échelle temporelle de la boucle de courant).

Enfin, au niveau de l'étage inductif du filtre, les relations dynamiques peuvent être exprimées dans le domaine de Laplace (s) comme suit :

$$\begin{cases} \frac{V_{dc}}{2} S_d(s) = (sL_f + r_f) i_{Ld}(s) - \omega L_f i_{Lq}(s) + v_{od}(s) \\ \frac{V_{dc}}{2} S_q(s) = (sL_f + r_f) i_{Lq}(s) + \omega L_f i_{Ld}(s) + v_{oq}(s) \end{cases}$$

Où

V_{dc} : est la tension du bus continu (DC link)

$S_d(s), S_q(s)$: signaux de commande de modulation (SPWM ou SVM) dans le repère dq,

L_f, r_f : inductance et résistance de filtre côté convertisseur,

$i_{Ld}(s), i_{Lq}(s)$: courants dans les inductances du filtre dans le repère dq,

$v_{od}(s), v_{oq}(s)$: tensions de sortie côté réseau dans le repère dq,

ω : est la pulsation réseau.

La régulation des courants i_d et i_q est assurée à l'aide de deux régulateurs *PI* indépendants, selon la loi de commande suivante :

$$vd = PI_d(id_{ref} - id);$$

$$vq = PI_q(iq_{ref} - iq)$$

Où :

i_{dref} et i_{qref} sont les consignes de courant (généralement : i_{dref} issu de la boucle de tension, $i_{qref}=0$ pour un facteur de puissance unitaire),

PI_d et PI_q sont les régulateurs proportionnel-intégral (*PI*) appliqués sur les erreurs de courant.

Compensation de la rotation du repère (termes croisées)

Les équations du modèle dynamique dans le repère dq comportent des termes de couplage croisé dus à la rotation du repère :

$$v_d^{comp} = \omega L i_q \quad ; \quad v_q^{comp} = -\omega L i_d$$

Ces termes sont compensés par anticipation (feed-forward) pour linéariser le système et découpler les axes.

Commande avec découplage

La tension de référence appliquée à l'onduleur est donc composée de :

$$v_d^{ref} = v_d^{PI} + \omega L i_q \quad ; \quad v_q^{ref} = v_q^{PI} - \omega L i_d$$

Cette stratégie permet un contrôle indépendant des composantes active et réactive du courant, améliore la stabilité, et permet un suivi précis des consignes sans interférence entre les deux axes.

6. Simulation du système photovoltaïque global raccordé au réseau

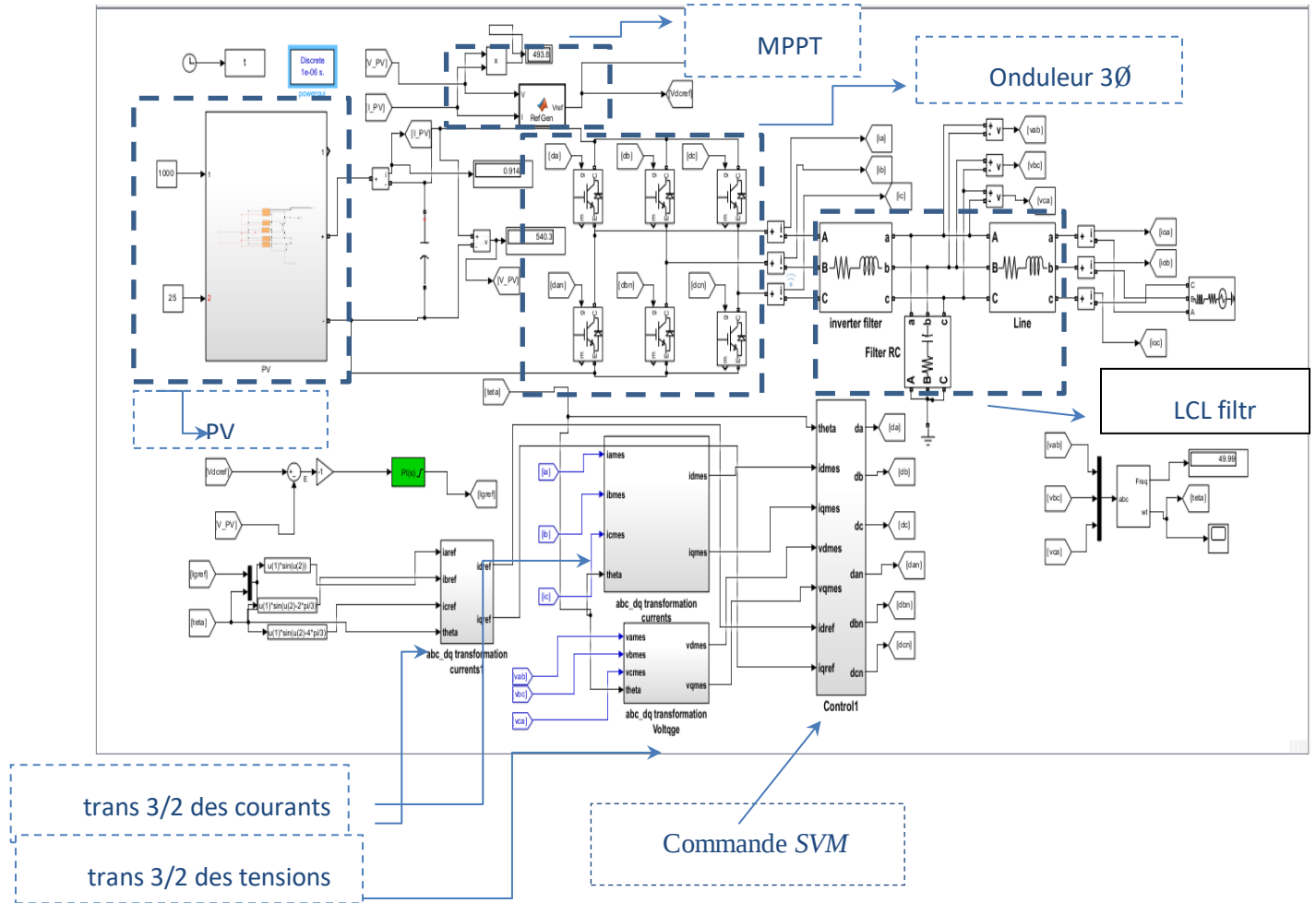


Figure II.16. Schéma global de simulation d'un panneau photovoltaïque raccordée aux réseaux électriques.

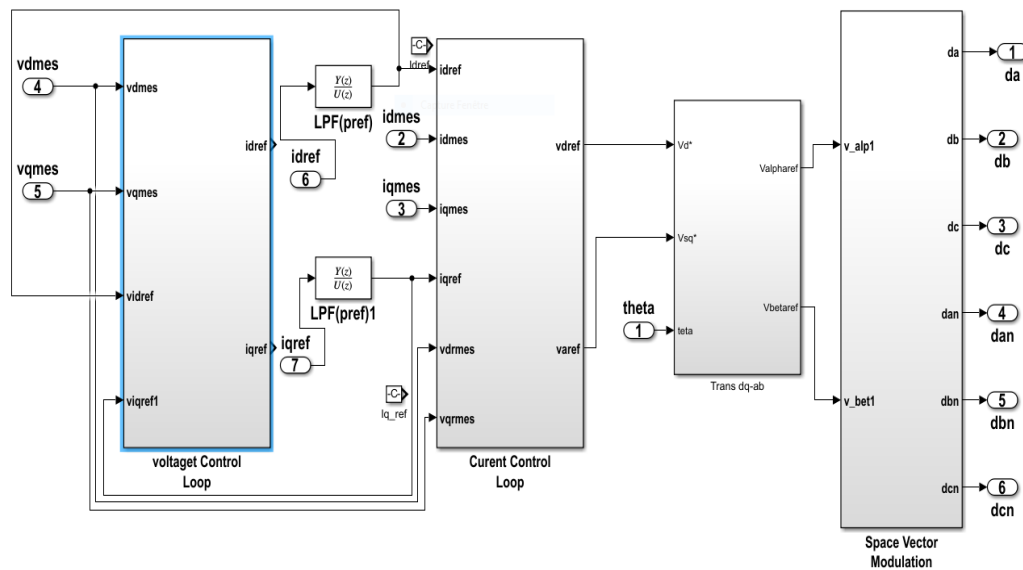


Figure II. 17 : schéma de simulation de contrôle courant-tension.

5.2. Résultats de simulation

Après l'implémentation du régulateur *PI* dans la boucle de régulation de la tension continue V_{dc} , une simulation a été menée pour analyser la réponse dynamique du système. La Figure II.18 montre l'évolution de V_{dc} en régime transitoire et permanent. Il est important de noter que la tension de référence $V_{dc,ref}$ n'est pas fixe: elle est générée dynamiquement par un algorithme *MPPT*, qui adapte continuellement le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque pour maximiser la puissance extraite.

Dans cette simulation, on observe que la tension V_{dc} suit efficacement la consigne issue du *MPPT*. La réponse transitoire est rapide, avec un temps de montée court et sans dépassement excessif. Cela est essentielle pour stabiliser le point de fonctionnement du système *PV*, permettre une conversion efficace vers le réseau et assurer le bon fonctionnement du contrôle de courant en aval.

La Figure II.19 présente la puissance générée par le champ photovoltaïque durant la simulation. Le générateur PV est constitué de 5 modules connectés en parallèle, chacun ayant une puissance optimale de 99 W, soit une puissance maximale théorique totale de:

$$P_{max} = 5 \times 99 = 495 \text{ W}$$

La courbe montre que la puissance produite se stabilise autour de 494 W, ce qui est très proche de la puissance maximale attendue. Cela traduit un fonctionnement efficace du système, avec une extraction optimale de l'énergie disponible, sous les conditions d'ensoleillement et de température simulées.

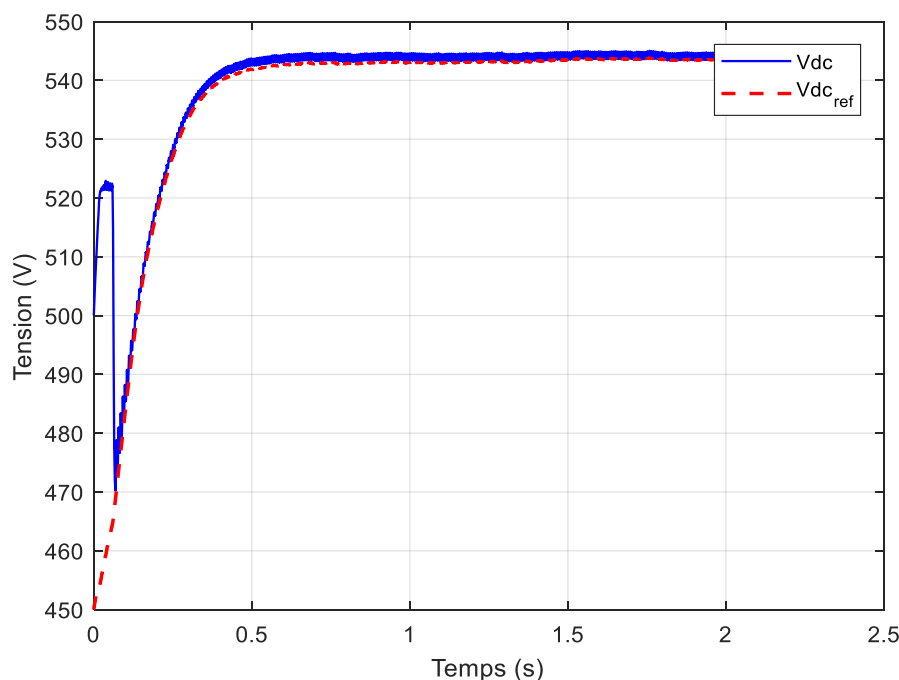


Figure II 18 : La réponse de la tension de sortie de PV

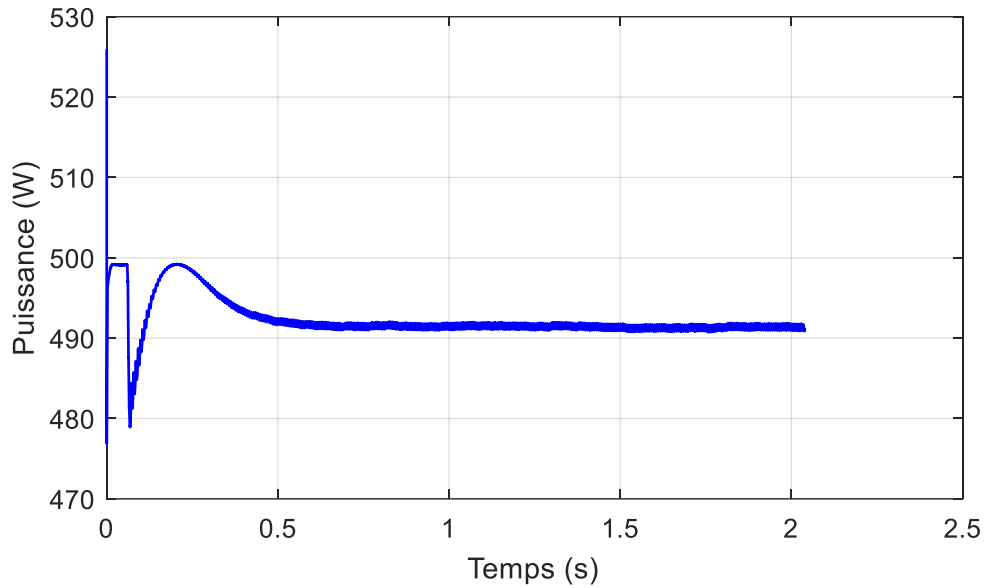


Figure II.19. La puissance générée par le PV.

La Figure II.20 représente les courants traversant l'inductance de filtrage L_f située en sortie de l'onduleur triphasé. Ces courants jouent un rôle essentiel dans la conversion d'énergie, car ils conditionnent la qualité de l'injection dans le réseau.

On remarque que les courants ne sont pas parfaitement sinusoïdaux, ce qui peut être attribué à plusieurs facteurs :

- le type de régulation utilisé (commande en boucle fermée avec régulateurs PI),
- la présence d'harmoniques de commutation liées à la modulation PWM,
- et la position du point de mesure (côté onduleur, avant filtrage complet par le filtre LCL).

Ces déformations sont atténuées après passage par le condensateur C_f et l'inductance L_o ce qui permet d'injecter un courant globalement sinusoïdal côté réseau. Cela met en évidence le rôle crucial du filtre LCL dans le lissage des courants et la conformité aux normes de qualité de l'énergie injectée.

La Figure II.21 montre les tensions mesurées au point de couplage entre les deux inductances L_f et L_o du filtre LCL , c'est-à-dire au nœud intermédiaire connecté au condensateur C_f . Ce point représente l'interface dynamique entre la sortie de l'onduleur et le filtre de puissance.

Les tensions observées à ce point sont globalement sinusoïdales, ce qui reflète le bon fonctionnement de la commande du convertisseur. Toutefois, on remarque la présence de phénomènes de chattering, principalement dû à la **modulation PWM** appliquée à l'onduleur (effet de commutation rapide), sous forme de petites oscillations à haute fréquence superposées au signal principal. Ces ondulations sont nommées **chattering**.

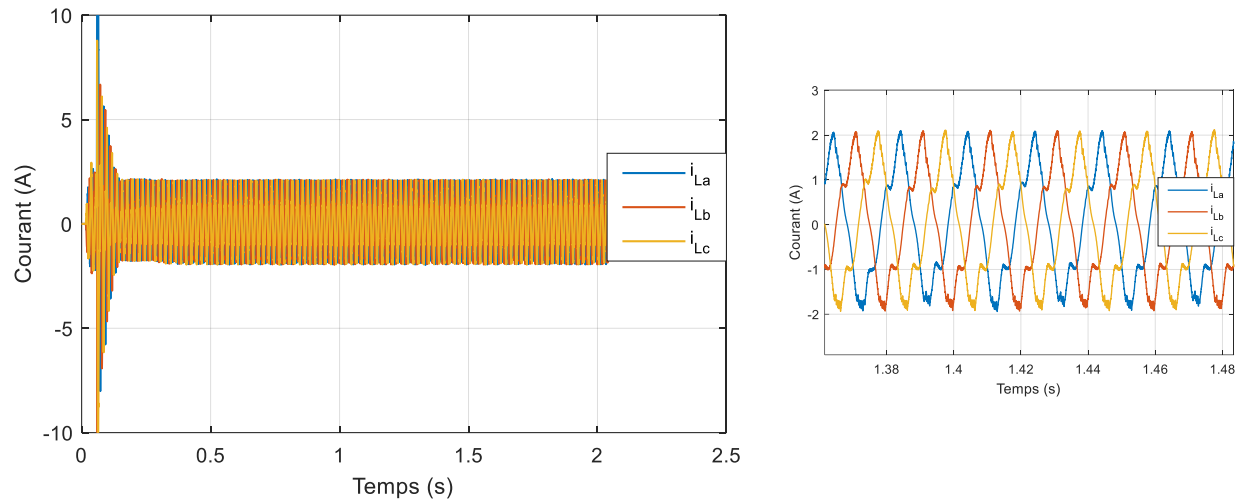


Figure II.20 Les courant de sortie de l'onduleur.

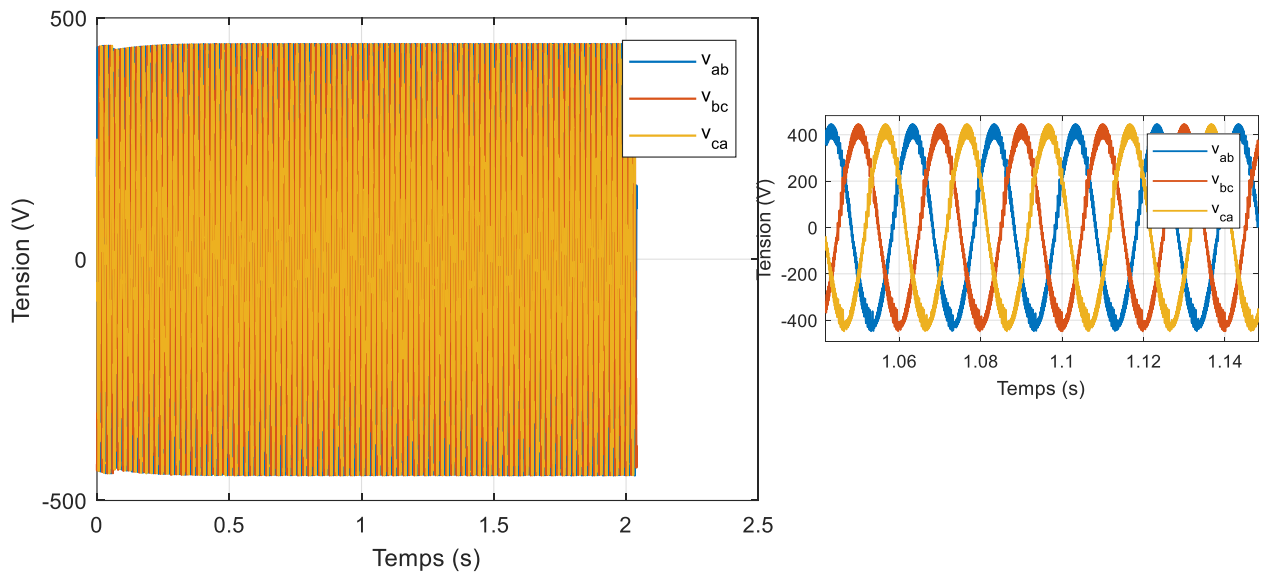


Figure II.21 Les tension aux bornes de filtre LC.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la commande d'un système photovoltaïque triphasé connecté au réseau, basé sur une structure à un seul étage de conversion DC/AC . Cette architecture, qui relie directement le générateur PV à l'onduleur sans passer par un étage DC/DC intermédiaire, présente plusieurs avantages majeurs : Une réduction des pertes grâce à l'absence d'un second étage de conversion. Une complexité matérielle réduite (moins de composants de puissance, pas de transformateur ou convertisseur élévateur) et un coût global plus faible et une meilleure compacité du système,

Dans cette configuration, le $MPPT$ est intégré dans la boucle de commande de la tension V_{dc} , et le suivi du point de puissance maximale est assuré via la régulation du bus continu.

La commande du courant injecté au réseau est assurée par des régulateurs PI dans le repère synchronisé dq , combinés à une stratégie de découplage permettant une régulation indépendante des composantes actives et réactives. Le filtre LCL permet un meilleur filtrage des harmoniques, bien que sa résonance impose un dimensionnement rigoureux des régulateurs.

Bien que les régulateurs PI aient permis d'atteindre des performances satisfaisantes dans la régulation du courant et de la tension, cette approche présente certaines limitations structurelles, en particulier face à : des variations importantes des conditions d'ensoleillement ou de charge, la présence d'incertitudes dans les paramètres du filtre (LCL), ou encore les perturbations réseau (déséquilibres, harmoniques, etc.).

Les régulateurs PI sont en effet conçus autour d'un modèle linéarisé, avec des performances fortement dépendantes du point de fonctionnement nominal. Ils offrent peu de robustesse face aux non-linéarités, aux modèles incertains, ou aux changements dynamiques rapides.

Pour surmonter ces limites, le chapitre suivant explore des stratégies de commande avancées, telles que la commande robuste, visant à améliorer la stabilité, accroître la précision en régime transitoire, et renforcer la tolérance aux perturbations.

Chapitre III :

La commande LQR pour la stabilisation robuste du système PV

1. Introduction

Dans le contexte actuel de la transition énergétique, les micro réseaux électriques jouent un rôle central dans l'intégration efficace des sources photovoltaïque. Ces systèmes énergétiques locaux, capables de fonctionner de manière autonome ou en interaction avec le réseau électrique principal, nécessitent des stratégies de commande avancées pour garantir leur stabilité, leur efficacité énergétique et la qualité de l'énergie fournie. Parmi les différentes problématiques rencontrées, le contrôle optimal du courant échangé entre le micro réseau et le réseau industriel revêt une importance particulière, notamment pour limiter les fluctuations, minimiser les pertes et assurer le respect des contraintes de qualité de service [1].

En effet, les commandes classiques telles que *PI /PID* offrent de bonnes performances dans des condition nominales, mais se révèlent limitées lorsque le système évolue dans un environnement perturbé ou incertain, c'est dans ce contexte que le contrôle robuste devient une nécessité

Pour répondre à ces exigences, l'approche de la commande optimale s'avère particulièrement pertinente. En particulier, le régulateur linéaire quadratique (*LQR*, *Linear Quadratic Regulator*) constitue une solution robuste permettant d'optimiser la réponse dynamique du système tout en minimisant un critère de performance défini par un compromis entre l'erreur d'état et l'effort de la commande. Le contrôleur *LQR* repose sur une formulation rigoureuse dans le cadre de la théorie du contrôle optimal, utilisant une représentation dans l'espace d'état du système et un critère quadratique pour définir l'optimalité de la réponse [2]. [3].

Ce chapitre est consacré à l'étude et au développement de la commande optimale *LQR* appliquée au contrôle du courant dans un micro réseau connecté au réseau industriel. Après un rappel des principes fondamentaux de la commande *LQR*, une modélisation appropriée du micro réseau, dégageant un modèle d'état, est proposée afin de concevoir le régulateur optimal. La performance de cette commande sera ensuite évaluée à travers des simulations comparatives avec celles obtenues dans le cadre de contrôle conventionnel, mettant en évidence les avantages et les limites de l'approche proposée.

2. Commande optimale LQR

2.1. Définition et principe général

La commande optimale est une approche méthodologique de la théorie du contrôle dont l'objectif est de déterminer une loi de commande permettant de minimiser un critère de performance défini à partir des caractéristiques du système et des exigences de fonctionnement. Dans le cadre de la commande optimale linéaire quadratique (*LQR*: *Linear Quadratic Regulator*), ce critère est une fonction quadratique associée aux états du système et aux signaux de commande.

Il est à noter que la commande optimale quadratique présente l'avantage, par rapport à la méthode de placement de pôles, de proposer une procédure rigoureuse et systématique pour le calcul de la matrice de gain associée au retour d'état.

2.2. Formulation mathématique du problème de commande optimale LQR

Dans le cadre de la commande optimale appliquée aux systèmes linéaires, le problème du régulateur linéaire quadratique (**LQR**, *Linear Quadratic Regulator*) consiste à déterminer une loi de commande par retour d'état permettant de stabiliser le système tout en optimisant une fonction coût quadratique. Cette approche offre une solution équilibrée entre performance dynamique et limitation de l'effort de commande.

Considérons un système linéaire continu représenté par le modèle d'état suivant :

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (\text{III.1})$$

Où:

- $x(t) \in R^n$ est le vecteur d'état du système,
- $u(t) \in R^m$ est le vecteur de commande,
- $A \in R^{n \times n}$ est la matrice dynamique du système,
- $B \in R^{n \times m}$ est la matrice de commande.

L'objectif est de déterminer une loi de commande de type retour d'état :

$$u(t) = -K \cdot x(t) + r(t) \quad (\text{III.2})$$

tel que le comportement dynamique du système soit optimisé au regard du critère de performance suivant :

$$J = \int_0^\infty (x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)) dt \quad (\text{III.3})$$

Où:

- $Q \in R^{n \times n}$ est une matrice hermitienne (ou symétrique réelle) définie positive (ou semi-définie positive), associée à la pondération des états,
- $R \in R^{m \times m}$ est une matrice symétrique définie positive, associée à la pondération de l'effort de commande.

Il est important de noter que le second terme du membre de droite de l'équation (III.3) représente la dépense énergétique liée aux signaux de commande. Les matrices Q et R déterminent l'importance relative accordée respectivement à l'erreur et à cette dépense d'énergie. Dans ce problème, on suppose que le vecteur de commande $u(t)$ est non contraint.

La loi de commande linéaire donnée par l'équation (III.2) constitue la commande optimale. Ainsi, si les éléments inconnus de la matrice K sont déterminés de manière à minimiser le critère de

performance, alors $u(t) = -Kx(t)$ est optimal pour tout état initial $x(0)$. Le schéma bloc représentant cette configuration optimale est illustré à la figure III.1

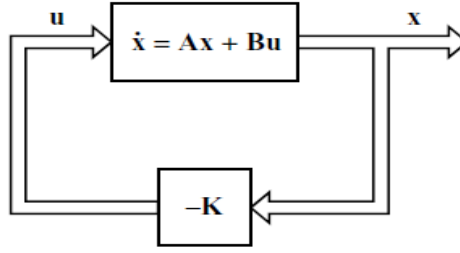


Figure (III.1): Régulation optimale quadratique des systèmes.

Résolvons à présent le problème d'optimisation. En substituant l'équation (III.2) dans l'équation (III.1), on obtient :

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) - BK \cdot x(t) = (A - BK) \cdot x(t) \quad (III.4)$$

Dans les développements qui suivent, nous supposons que la matrice $A - BK$ est stable, c'est-à-dire que les valeurs propres de $A - BK$ possèdent des parties réelles négatives. En substituant l'équation (III.2) dans l'équation (III.3), on obtient :

$$J = \int_0^\infty (x(t)^T Q x(t) + x(t)^T K^T R K x(t)) dt$$

$$J = \int_0^\infty x(t)^T (Q + K^T R K) x(t) dt$$

Posons

$$x(t)^T (Q + K^T R K) x(t) = -\frac{d}{dt} (x(t)^T P x(t))$$

Où P est une matrice hermitienne ou symétrique réelle définie positive. Nous obtenons alors :

$$x(t)^T (Q + K^T R K) x(t) = -\dot{x}^T P x - x^T P \dot{x} = -x(t)^T ((A - BK)^T P + P(A - BK)) x(t)$$

En comparant les deux membres de cette dernière équation et en notant que celle-ci doit être vérifiée pour tout x , il est nécessaire que :

$$(A - BK)^T P + P(A - BK) = -(Q + K^T R K) \quad (III.5)$$

Il peut être démontré que si la matrice $A - BK$ est stable, il existe une matrice définie positive P qui satisfait l'équation (III.5). La démarche consiste donc à déterminer les éléments de P à partir de l'équation (III.5) et à vérifier si cette matrice est bien définie positive. (Il est important de noter que plusieurs matrices P peuvent satisfaire cette équation. Si le système est stable, il existe toujours au moins une matrice définie positive P qui vérifie cette équation. Cela signifie que si l'on résout cette équation et que l'on trouve une matrice définie positive P , le système est stable. Les autres matrices P qui satisfont cette équation mais qui ne sont pas définies positives doivent être écartées).

Le critère de performance J peut être évalué comme suit:

$$J = \int_0^{\infty} x(t)^T (Q + K^T R K) x(t) dt = -x^T P x|_0^{\infty} = -x^T(\infty) P x(\infty) + x^T(0) P x(0)$$

Puisque toutes les valeurs propres de $A - BK$ sont supposées avoir des parties réelles négatives, nous avons: $x(\infty) \rightarrow 0$. Par conséquent, nous obtenons:

$$J = x^T(0) P x(0) \quad (\text{III.6})$$

Ainsi, le critère de performance J peut être exprimé en fonction de la condition initiale $x(0)$ et de la matrice P . Pour obtenir la solution du problème de commande optimale quadratique, nous procédons comme suit: Étant donné que R est supposée être une matrice hermitienne (ou symétrique réelle) définie positive, nous pouvons écrire:

$$R = T^T T$$

Où T est une matrice inversible. L'équation (III.5) peut alors s'écrire sous la forme suivante:

$$(A^T - K^T B^T)P + P(A - BK) + Q + K^T T^T T K = 0$$

Ce qui peut être réécrit sous la forme :

$$A^T P + PA + [TK - (T^T)^{-1} B^T P]^T [TK - (T^T)^{-1} B^T P] - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$$

La minimisation de J par rapport à K nécessite la minimisation de :

$$x^T [TK - (T^T)^{-1} B^T P]^T [TK - (T^T)^{-1} B^T P] x$$

par rapport à K . Étant donné que cette dernière expression est positive ou nulle, le minimum est atteint lorsqu'elle est nulle, c'est-à-dire lorsque :

$$K = T^{-1} (T^T)^{-1} B^T P = R^{-1} B^T P \quad (\text{III.7})$$

L'équation (III.7) fournit la matrice optimale K . Ainsi, la loi de commande optimale pour le problème de commande optimale quadratique, lorsque le critère de performance est donné par l'équation (III.3), est linéaire et s'exprime par:

$$u(t) = -Kx(t) = -R^{-1} B^T P x(t)$$

La matrice P de l'équation (III.7) doit satisfaire l'équation (III.5) ou l'équation réduite suivante:

$$A^T P + PA - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$$

L'équation (III.7) est appelée équation de **Riccati** réduite. Les étapes de conception peuvent être formulées comme suit :

1. Résoudre l'équation (III.7), l'équation de Riccati réduite, pour déterminer la matrice P . [Si une matrice définie positive P existe (certains systèmes peuvent ne pas admettre une telle matrice), alors le système est stable, c'est-à-dire que la matrice $A - BK$ est stable].

2. Substituer cette matrice $\mathbf{P}$ dans l'équation (III.6). La matrice $\mathbf{K}$ obtenue constitue alors la matrice optimale.

Il convient de noter, par ailleurs, que si le critère de performance est exprimé en fonction du vecteur de sortie plutôt que du vecteur d'état, c'est-à-dire :

$$J = \int_0^{\infty} (y^T Q y + u^T R u) dt$$

Alors le critère peut être modifié en utilisant l'équation de sortie :

$$y(t) = Cx(t)$$

sous la forme

$$J = \int_0^{\infty} (x^T C^T Q C x + u^T R u) dt \quad (\text{III.8})$$

et les étapes de conception présentées dans cette section peuvent être appliquées pour obtenir la matrice optimale $\mathbf{K}$.

La commande ainsi obtenue garantit la stabilité asymptotique du système en boucle fermée, tout en assurant un compromis optimal entre la rapidité de la réponse et l'effort de commande appliqué.

2.3. Intérêt de la commande optimale LQR

La loi de contrôle **LQR** présente plusieurs avantages dans le contexte des systèmes électriques, notamment:

- **Optimisation globale:** minimise simultanément l'erreur d'état et l'effort de commande,
- **Simplicité structurelle:** la loi de commande obtenue est linéaire par rapport aux états du système.
- **Stabilité garantie:** sous certaines conditions sur les matrices de pondération, le système en boucle fermée est asymptotiquement stable.
- **Flexibilité:** possibilité d'ajuster le comportement dynamique (rapidité, amortissement, consommation énergétique) par le choix approprié des pondérations.

Dans le cadre du contrôle du courant dans un micro-réseau, ces caractéristiques permettent d'assurer un échange stable et efficace d'énergie entre le micro-réseau et le réseau industriel, tout en limitant l'impact des perturbations externes et internes.

2.4. Démarche de mise en œuvre de la commande LQR

1. **Modélisation** du système sous forme d'espace d'état- : identification des matrices $\mathbf{A}$ et $\mathbf{B}$,
2. **Choix des matrices de pondération** :
 - $\mathbf{Q}$: pondère les états du système (priorité à certaines variables comme le courant injecté, la tension, etc.),

- **R**: pondère l'effort de commande (permet de limiter l'amplitude des signaux de commande),
- 3. **Résolution de l'équation de Riccati** pour obtenir la matrice **P**,
- 4. **Calcul du gain K**,
- 5. **Implémentation** de la commande dans le système réel ou simulé.
- 6. **Validation** par simulations ou expérimentations.

2.5. Choix des matrices de pondération Q et R

Le choix de **Q** et **R** est déterminant pour obtenir un comportement satisfaisant du système :

- **Matrice Q** :
 - Plus les coefficients associés aux états sont élevés, plus le système cherchera à minimiser ces états (par exemple, minimiser l'écart de courant injecté).
 - Si certaines variables d'état sont plus critiques (par exemple, courant au point de couplage), leurs coefficients dans **Q** doivent être plus élevés.
- **Matrice R** :
 - Plus **R** est grand, plus l'algorithme limitera l'intensité de la commande, au détriment d'une réponse plus lente.
 - Un petit **R** favorise une réponse rapide mais avec des efforts de commande plus élevés.

Le choix de ces matrices repose donc sur une analyse préalable des objectifs de commande et peut être affiné par une démarche itérative ou par des techniques d'optimisation numérique.

2.6. Limitations et extensions

Bien que la commande **LQR** présente de nombreux avantages, elle suppose une connaissance précise du modèle dynamique du système et reste sensible aux incertitudes et aux perturbations non modélisées. Pour pallier ces limites, il est possible d'envisager des extensions telles que :

- La **commande LQG** (Linéaire Quadratique Gaussienne) intégrant un observateur d'état (filtre de Kalman),
- **LQR** robuste face aux incertitudes paramétriques,
- La combinaison avec des techniques adaptatives ou prédictives.

3. Commande optimale LQR appliquée au contrôle du courant dans système PV connecté au réseau électrique

La commande optimale linéaire quadratique (**LQR**) est une stratégie de contrôle basée sur l'optimisation d'une fonction coût quadratique, permettant de garantir un compromis optimal entre la

performance dynamique du système et l'effort énergétique fourni par l'actionneur. Dans le cadre des systèmes électriques, le contrôle précis du courant injecté dans le réseau est essentiel pour assurer :

- la stabilité de l'ensemble PV-réseau,
- la qualité de l'énergie fournie (réduction des harmoniques, maintien de la tension au point de couplage),
- la minimisation des pertes énergétiques.

Le recours à une commande **LQR** permet ainsi de réguler efficacement le courant échangé entre le micro-réseau et le réseau industriel tout en limitant l'amplitude des signaux de commande appliqués aux convertisseurs (onduleurs ou redresseurs actifs).

3.1. Stratégies de contrôle en mode générateur (Grid-Forming)

De manière générale, un onduleur en mode générateur peut être représenté comme illustré à la Figure III.3. La boucle de commande, de l'onduleur en mode générateur, est utilisée pour générer des références de tension appropriées pour l'onduleur à partir des tensions et courants mesurés localement. Plusieurs stratégies de contrôle sont disponibles dans la littérature pour le contrôle des onduleurs connectés au réseau. Bien que ces stratégies offrent des performances similaires en matière de formation de réseau, elles diffèrent dans leur mise en œuvre au sein du système de commande de l'onduleur. Il est donc nécessaire d'avoir une compréhension complète de ces stratégies avant de pouvoir sélectionner la plus appropriée pour un onduleur donné dans des conditions de fonctionnement spécifiques.

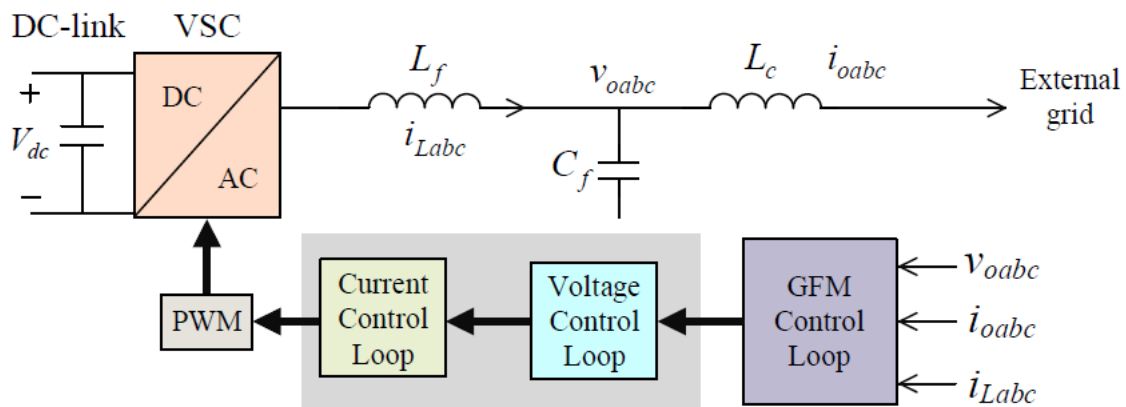


Figure III.3. Représentation générale d'un onduleur en mode générateur.

3.2. Modélisation dans l'espace d'état spécifique au micro-réseau

La modélisation du Filtre **LC** et de l'étage de ligne de connexion repose sur la considération de négliger les délais liés à la modulation **PWM** et à l'échantillonnage des signaux. Cependant, les tensions aux bornes de sortie de l'onduleur peuvent être représentées par v_{idref} et v_{iqref} . Supposons que cet

onduleur soit connecté au j^{ieme} nœud du réseau, dont les tensions sont notées v_{d_busj} et v_{q_busj} dans le repère local dq . L'étage constitué par le filtre LC et la ligne de connexion peut alors être décrit, dans le repère local dq , par les équations suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{Ld}}{dt} = \frac{-r_f}{L_f} i_{Ld} + \omega i_{Lq} + \frac{1}{L_f} v_{idref} - \frac{1}{L_f} v_{od} \\ \frac{di_{Lq}}{dt} = -\omega i_{Ld} + \frac{-r_f}{L_f} i_{Lq} + \frac{1}{L_f} v_{iqref} - \frac{1}{L_f} v_{oq} \\ \frac{dv_{od}}{dt} = \omega v_{oq} + \frac{1}{C_f} i_{Ld} - \frac{1}{C_f} i_{od} \\ \frac{dv_{oq}}{dt} = -\omega v_{od} + \frac{1}{C_f} i_{Lq} - \frac{1}{C_f} i_{oq} \\ \frac{di_{od}}{dt} = \frac{-r_c}{L_c} i_{od} + \omega i_{oq} + \frac{1}{L_c} v_{od} - \frac{1}{L_c} v_{dbus_i} \\ \frac{di_{oq}}{dt} = \omega i_{od} + \frac{-r_c}{L_c} i_{oq} + \frac{1}{L_c} v_{oq} - \frac{1}{L_c} v_{qbus_j} \end{array} \right. \quad (III.9)$$

3.3. Modèle linéaire et linéarisation

Considérons un processus régi par l'équation dynamique suivante :

$$\frac{d}{dt} x(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (III.10)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t), t) \quad (III.11)$$

Où $x \in R^n$ est le vecteur d'état, $u \in R^m$ est le vecteur de commande et $f \in R^n$ est le vecteur de fonction non-linéaire, $y \in R^p$ est le vecteur de sortie et $g \in R^n$ est le vecteur de fonction non-linéaire régissant les variables de sortie du système.

Comme Cela a déjà été mentionné, cette partie concerne une synthèse d'une loi de commande linéaire. Il est donc nécessaire de procéder à une étape de linéarisation de l'équation (III.10) autour du point d'opération (x^0, u^0) . Ainsi, l'équation (III.10) peut être réécrite:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} x_1(t) &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + b_{11}u_1 + \dots + b_{1m}u_m \\ &\vdots \\ \frac{d}{dt} x_n(t) &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n + b_{n1}u_1 + \dots + b_{nm}u_m \end{aligned} \quad (III.12)$$

Sous forme matricielle, on écrit:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (III.13)$$

Similairement, on écrit pour l'équation de sortie:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \dots + c_{1n}x_n + d_{11}u_1 + \dots + d_{1m}u_m \\ &\vdots \\ y_n(t) &= c_{p1}x_1 + c_{p2}x_2 + \dots + c_{pn}x_n + d_{p1}u_1 + \dots + d_{pm}u_m \end{aligned} \quad (III.14)$$

Soit encore:

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (\text{III.15})$$

Point d'équilibre. Dans certaines conditions, le modèle non-linéaire peut être approximé par un modèle linéaire, en particulier, autour d'un point d'équilibre.

Pour une valeur constante du vecteur d'entrée u^0 , un point d'équilibre du vecteur d'état x^0 est défini, solution de:

$$f(x^0, u^0) = 0 \quad (\text{III.16})$$

Linéarisation Si la fonction f du modèle non-linéaire est continue et dérivable en un point d'équilibre (x^0, u^0) , la linéarisation du modèle peut être attachée au processus au moyen d'un développement en série de Taylor de f . On écrit:

$$f(x, u) \cong f(x^0, u^0) + \frac{\partial}{\partial x} (f(x, u)) \Big|_{x=x^0, u=u^0} \cdot (x - x^0) + \dots + \frac{\partial}{\partial u} (f(x(t), u(t))) \Big|_{x=x^0, u=u^0} \cdot (u - u^0) \quad (\text{III.17})$$

Pour un point de fonctionnement donné, on peut écrire:

$$\bar{x} = \bar{x}^0 + \bar{\delta x} \quad (\text{III.18})$$

$$\bar{u} = \bar{u}^0 + \bar{\delta u} \quad (\text{III.19})$$

A partir de l'équation (III.18), nous pouvons écrire:

$$\bar{\dot{x}} = \bar{\dot{x}}^0 + \bar{\delta \dot{x}} \quad (\text{III.20})$$

Pour que le système soit en équilibre autour de ce point d'opération, il doit vérifier la condition suivante:

$$f(x^0, u^0) = 0 \quad (\text{III.21})$$

De cette façon, le système linéarisé s'exprime par:

$$\bar{\delta \dot{x}} = A \cdot \bar{\delta x} + B \cdot \bar{\delta u} \quad (\text{III.22})$$

Les éléments des matrices A et B correspondantes sont les composantes Jacobiennes des fonctions non linéaires [Alb 04]:

$$a_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} (x^0, u^0) \quad i, j = 1, \dots, n \quad (\text{III.23})$$

$$b_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial u_j} (x^0, u^0) \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m \quad (\text{III.24})$$

$$(\text{III.25})$$

$$d_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial u_j} (x^0, u^0) \quad i = 1, \dots, p \quad j = 1, \dots, m \quad (\text{III.26})$$

De cette manière, on écrit les matrices Jacobiennes:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{(x^0, u^0)} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_m} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_m} \end{bmatrix}_{(x^0, u^0)} \quad (III.27)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial g_p}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_p}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{(x^0, u^0)} \quad D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_m} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial g_p}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_p}{\partial u_m} \end{bmatrix}_{(x^0, u^0)} \quad (III.28)$$

3.4. Application au cas du micro-réseau

En raison des variations de fréquence, il existe des termes de couplage non linéaires entre les axes d et q . Après linéarisation autour du point d'équilibre, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{d\Delta i_{Ld}}{dt} = \frac{-r_f}{L_f} \Delta i_{Ld} + \omega_{nom} \Delta i_{Lq} + I_{Lq} \Delta \omega + \frac{1}{L_f} \Delta v_{idref} - \frac{1}{L_f} \Delta v_{od} \\ \frac{d\Delta i_{Lq}}{dt} = -\omega_{nom} \Delta i_{Ld} - I_{Ld} \Delta \omega + \frac{-r_f}{L_f} \Delta i_{Lq} + \frac{1}{L_f} \Delta v_{iqref} - \frac{1}{L_f} \Delta v_{oq} \\ \frac{d\Delta v_{od}}{dt} = \omega_{nom} \Delta v_{oq} + \Delta \omega v_{oq} + \frac{1}{C_f} \Delta i_{Ld} - \frac{1}{C_f} \Delta i_{od} \\ \frac{d\Delta v_{oq}}{dt} = -\omega_{nom} \Delta v_{od} - \Delta \omega v_{od} + \frac{1}{C_f} \Delta i_{Lq} - \frac{1}{C_f} \Delta i_{oq} \\ \frac{d\Delta i_{od}}{dt} = \frac{-r_c}{L_c} \Delta i_{od} + \omega_{nom} \Delta i_{oq} + \Delta \omega I_{oq} + \frac{1}{L_c} \Delta v_{od} - \frac{1}{L_c} \Delta v_{dbus_j} \\ \frac{d\Delta i_{oq}}{dt} = -\omega_{nom} \Delta i_{od} - \Delta \omega I_{od} + \frac{-r_c}{L_c} \Delta i_{oq} + \frac{1}{L_c} \Delta v_{oq} - \frac{1}{L_c} \Delta v_{qbus_j} \end{cases} \quad (III.29)$$

Les courants de ligne de connexion, Δi_{od} et Δi_{oq} , sont injectés dans le système par l'onduleur. Le modèle d'état devient:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_{Ld} \\ \Delta i_{Lq} \\ \Delta v_{od} \\ \Delta v_{oq} \\ \Delta i_{od} \\ \Delta i_{oq} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{-r_f}{L_f} & \omega_{nom} & \frac{-1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_{nom} & \frac{-r_f}{L_f} & 0 & \frac{-1}{L_f} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega_{nom} & -\frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega_{nom} & 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & 0 & \frac{-r_c}{L_c} & -\omega_{nom} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & -\omega_{nom} & \frac{-r_c}{L_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{Ld} \\ \Delta i_{Lq} \\ \Delta v_{od} \\ \Delta v_{oq} \\ \Delta i_{od} \\ \Delta i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} 0 \\ \frac{1}{L_f} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{odref} \\ \Delta v_{oqref} \end{bmatrix} + \\
 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{L_c} & -\frac{1}{L_c} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{dbus_j} \\ \Delta v_{qbus_j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{Lq} \\ -I_{Ld} \\ V_{od} \\ V_{oq} \\ I_{oq} \\ -I_{Ld} \end{bmatrix} \Delta \omega
 \end{aligned} \tag{III.30}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{Ld} \\ \Delta i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{Ld} \\ \Delta i_{Lq} \\ \Delta v_{od} \\ \Delta v_{oq} \\ \Delta i_{od} \\ \Delta i_{oq} \end{bmatrix} \tag{III.31}$$

3.5. Conception du contrôle LQR

Le régulateur *LQR* a été conçu et optimisé, avant d'être appliqué au système. Les matrices de pondération optimisées des états et des commandes (*Q* et *R*) pour le système en question sont présentées dans les équations ci-après, accompagnées des valeurs du gain d'état (*K*) conçu pour chaque variable d'état dans l'équation (III.30).

Les matrices définissant le modèle de système linéarisé sont donnés par:

$$\begin{aligned}
 A &= \\
 &1.0e+03 * \\
 &\begin{bmatrix} -0.0480 & 0.3142 & -0.2000 & 0 & 0 & 0 \\ -0.3142 & -0.0480 & 0 & -0.2000 & 0 & 0 \\ 9.0909 & 0 & 0 & 0.3142 & -9.0909 & 0 \\ 0 & 9.0909 & -0.3142 & 0 & 0 & -9.0909 \\ 0 & 0 & 0.2703 & 0 & -0.0135 & 0.3142 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2703 & -0.3142 & -0.0135 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

B =

200	0
0	200
0	0
0	0
0	0
0	0

Pour annuler les écarts en régime permanent; le contrôle intégral est adopté. Ainsi le modèle d'état global du système augmenté est défini par le triplet suivant:

Ag =

1.0e+03 *

-0.0480	0.3142	-0.2000	0	0	0	0	0
-0.3142	-0.0480	0	-0.2000	0	0	0	0
9.0909	0	0	0.3142	-9.0909	0	0	0
0	9.0909	-0.3142	0	0	-9.0909	0	0
0	0	0.2703	0	-0.0135	0.3142	0	0
0	0	0	0.2703	-0.3142	-0.0135	0	0
0	0	0	0	-0.0010	0	0	0
0	0	0	0	0	-0.0010	0	0

^^

Bg =

200	0
0	200
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

Cg =

0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Quant aux matrices de pondérations, nous choisissons:

Q =

1.0e+04 *

0.0000	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0.0000	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0.0000	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.0000	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0.0000	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0.0000	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.0000	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1.0551	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1.7001

R =

$$\begin{bmatrix} 0.3300 & 0 \\ 0 & 0.3300 \end{bmatrix}$$

Le correcteur optimal calculé K_{opt} est donné par le vecteur suivant:

$K_{gopt} =$

$$\begin{bmatrix} 1.3498 & -0.0437 & 0.0163 & 0.0089 & -0.1786 & -0.0305 & -82.0381 & 201.6773 \\ -0.0437 & 1.3166 & -0.0084 & 0.0128 & -0.0282 & -0.2077 & -158.8797 & -104.1368 \end{bmatrix}$$

3.6. Résultats de simulation

La plate numérique utilisée pour tester la validité de l'algorithme calculé est donnée par la Figure (III.4). La structure du contrôleur d'état destiné à piloter les courants injectés dans le réseau industriel est montrée dans Figure (III.5).

La Figure (III.6) montre les réponses de tensions photovoltaïques de référence et la tension photovoltaïque réellement appliquée au bus continu de l'onduleur de tension. L'algorithme *MPPT* basé sur l'approche *P&O* permet d'assurer le suivi du point max de puissance garantissant ainsi l'application d'une tension de 550 V environ.

Par contre, la Figure III.7 montre les formes d'onde de la tension et du courant de sortie de l'onduleur *VSI* injectés dans un réseau industriel 50Hz. Cette Figure illustre la réponse dynamique des boucles de courant dans le repère *dq* pour les deux axes.

Les courants d'axe d et q suivent parfaitement leurs références imposées par la boucle d'asservissement de tension photovoltaïque. Le temps de réponse étant performant, il est inférieur à 50 msec. Toutefois, il faut noter que les courants de phase suivent leurs références tout en présentant des harmoniques de hautes fréquences. On est donc très proche de la réalité.

Les tests montrés dans ces Figures montrent la supériorité du contrôle optimal comparativement à ceux obtenus par l'approche classique incluant des contrôleurs de type *PI*, ce qui renforce la fiabilité du système. »

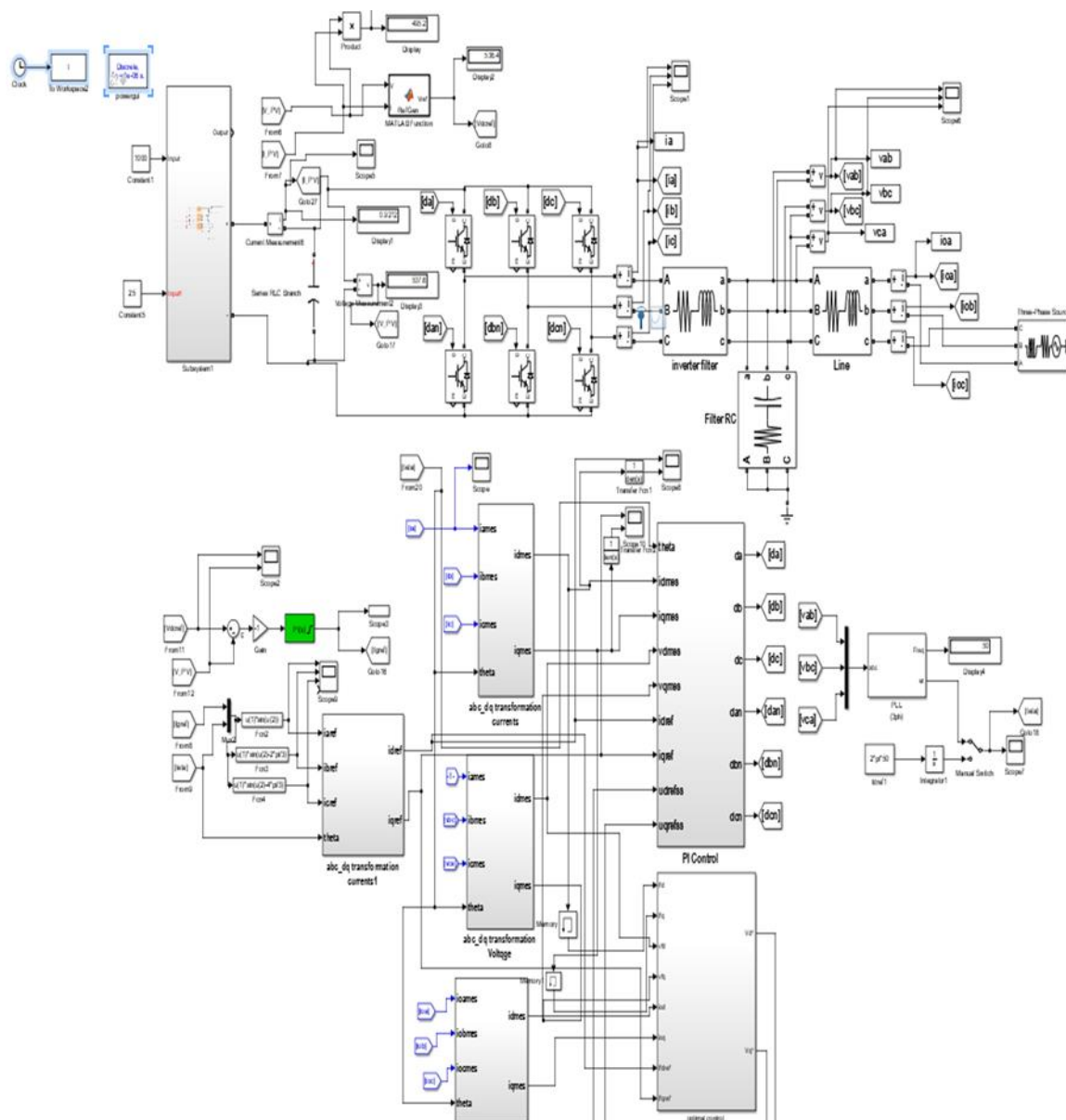


Figure (III.4). Configuration générale du schéma de contrôle: de la source photovoltaïque au réseau électrique.

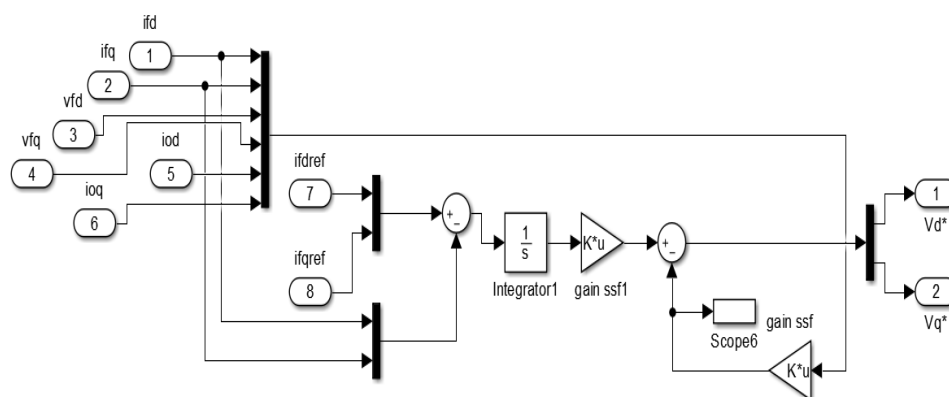


Figure (III.5). Structure du contrôleur d'état incluant le contrôle intégral.

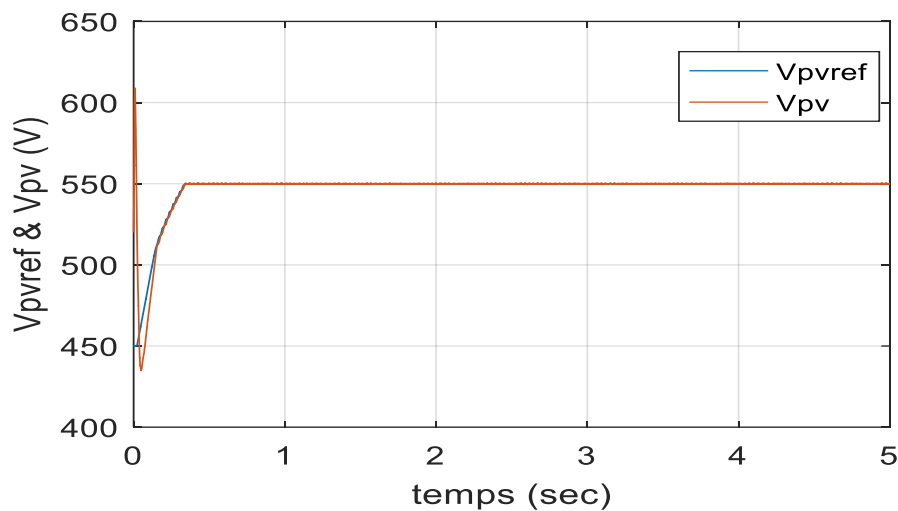
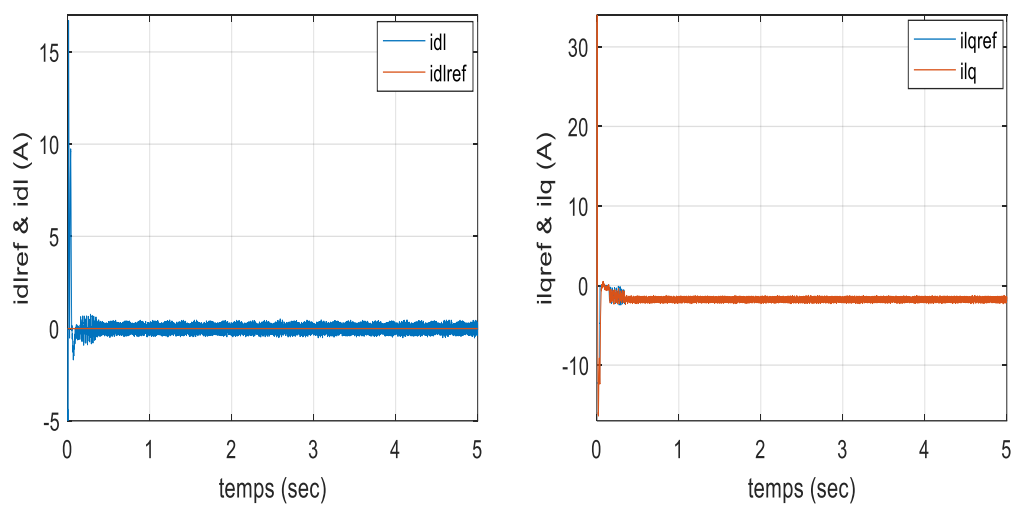
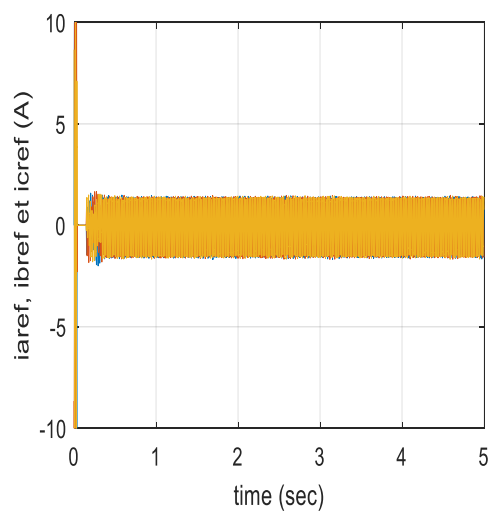


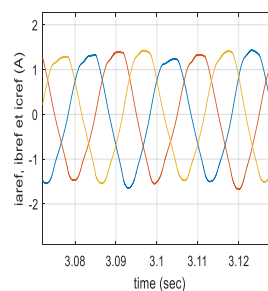
Figure (III.6). Tensions photovoltaïques obtenus par l'approche P&O.



(a)



(b)



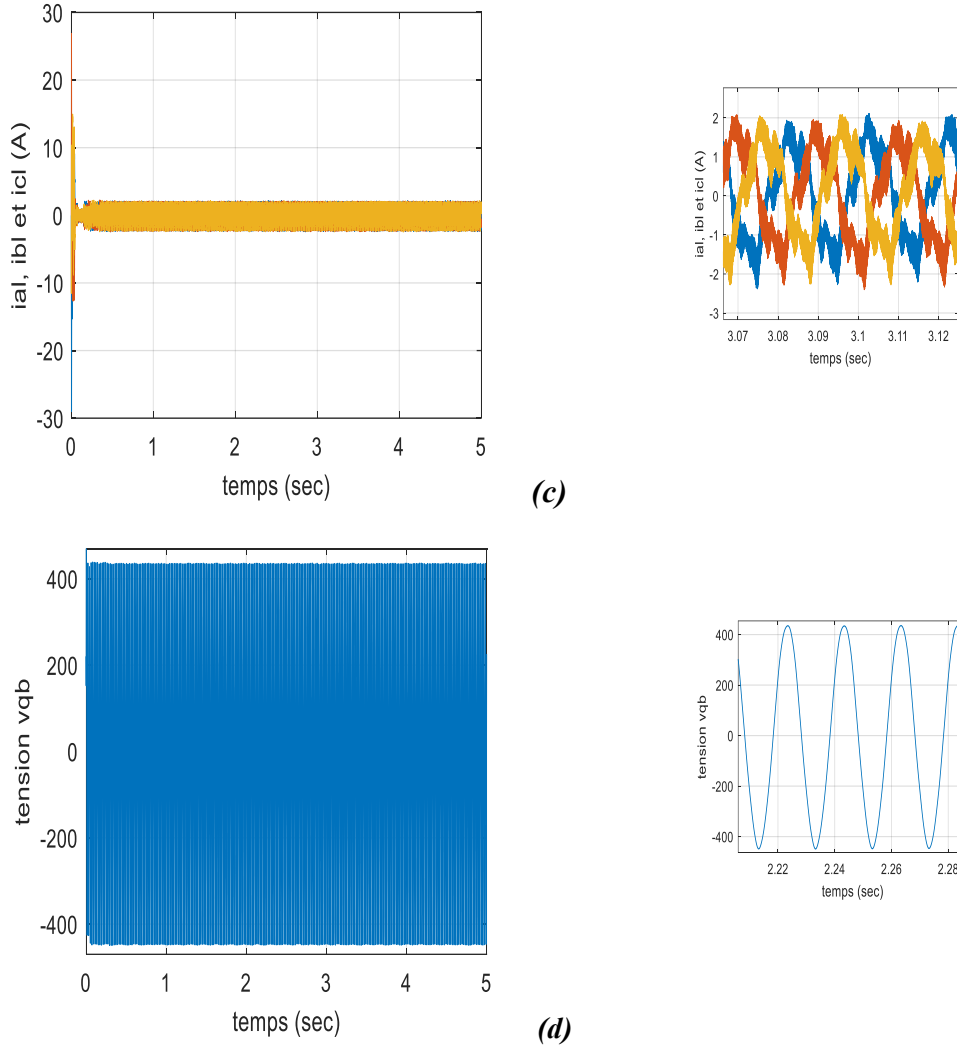


Figure (III.5). Formes d'onde de la tension de sortie filtrée et du courant de sortie d'un onduleur *VSI*.

III.4. Conclusion

Ce chapitre propose une méthode systématique pour la conception contrôleur optimal de type **LQR** pour la commande robuste d'un système **PV** connecté au réseau. Basée sur un repère synchronisé dq , la structure de commande a été conçue au contrôle des courants de sortie de l'onduleur **VSI**, injecté dans le réseau électrique 50 Hz . Le système d'alimentation est représenté par une source d'énergie renouvelable de type **PV**. L'algorithme utilisé pour la recherche de la puissance maximale est celui nommé **P&O**. Il se caractérise par sa simplicité et son efficacité et la tension photovoltaïque disponible est adéquate pour être appliquée à l'entrée de l'onduleur. Les résultats de simulation ont démontré les performances, du contrôle optimal, hautement fiables du système.

Conclusion générale

Le travail que nous présentons traite la commande robuste des systèmes photovoltaïques pour une intégration stable dans un réseau électrique. L'énergie produite est utilisée pour alimenter le réseau à courant alternatif à travers un convertisseur **AC/DC**. Ce convertisseur est appelé onduleur.

En premier lieu, des généralités ont été présentées sur les systèmes photovoltaïques, puis nous avons traité en détail la synthèse du modèle mathématique de chaque système photovoltaïque à savoir les onduleurs.

Notre intérêt est basé ensuite aux techniques de poursuite du point de puissance maximale **MPPT** qui permettent d'assurer le fonctionnement du système photovoltaïque au **PPM**. Une méthode conventionnelle a été introduite qui sert à perturber et observe (**P&O**). Le problème observé de la technique **P&O** est la dérivation de vrai point de puissance maximale lors d'un changement brusque de l'ensoleillement.

Ensuite on a étudié dans le chapitre suivant le comportement d'un système photovoltaïque connecter au réseau électrique, des stratégies de contrôle ont été développées et simulées pour maintenir la tension, réguler le courant injecté et composer les perturbations liées aux fluctuations d'ensoleillement ou aux variations de charge.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons essayé de présenter l'application de commande optimale **LQR** d'un système **PV** sur les systèmes photovoltaïques.

Les résultats de simulation ont démontré l'efficacité de la commande **LQR** dans l'amélioration de la performance dynamique du système. Elle permet une régulation rapide et précise, tout en assurant une robustesse face aux incertitudes du modèle et aux perturbations externes.

Cette approche contribue ainsi à renforcer la stabilité du réseau, à améliorer la qualité de l'énergie injectée, et à favoriser une meilleure intégration de la source renouvelable dans les réseaux électrique existant.

En effet, la commande optimale peut être robuste et en représentant une solution prometteuse pour surmonter les limitations techniques actuelles et accompagner l'évolution des réseaux vers des architectures plus intelligentes, flexibles et durables, des perspectives d'amélioration peuvent inclure l'optimisation adaptative des gains du contrôleur, l'intégration de techniques d'intelligence artificielle ou encore l'étude de la commande robuste dans des réseaux multi sources (**PV**, éolien, batterie).

Références :

- [1] TRAORE. Massitan, Gestions du système photovoltaïque d'une alimentation privée connecter au réseau, Université Badji Mokhtar Annaba, Juin 2017
- [2] HARAUBIA Mohammed, Etude Simulation d'un générateur de panneau photovoltaïque, Université Badji Mokhtar ANNABA ,2019
- [3] BRAKNI Abd Elghafour Bouznada Anouar, Intégration du PV au réseau électrique intelligents (on grid), Université 8mai 1954 Guelma, 2023/2024
- [4] Ghanem Meriem, Benhalilou Mayar, Simulation et modélisation d'une cellule photovoltaïque sous matlab, université de Mohammed el Bachir el Ibrahim –bordj Bou Arreridj, 2021/2022
- [5] Sebaa Abdelkader, Zid Elkhir Radhwane, "Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïques autonome", Université Badji Mokhtar Annaba, 2020/2021
- [6] TOUMI Nihed, Kouda, Energie solaire photovoltaïque et système photovoltaïque autonome, université Badji Mokhtar annaba,2020/2021
- [7] Barka. Houria , Mekkaoui Bouchra, Rahmani Asmaa, Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque connecter au réseau électrique, Université Ain t'émouchent Belhadj bouchaib,2021/2022
- [8] Berregui Abdelfettah, Absa Amjed, Etude technico-économique d'une installation photovoltaïque pour application dans la région de Ouergla, Université Kasdi Merbah ouergla,2019/2020
- [9] El Hamel l'ALLA, Ghodbane Selma, modélisation et simulation d'un système photovoltaïques optimisé par les algorithmes MPPT, Université Kasdi Merbah Ouergla,2019/2020
- [10] Imeon-energie.com/onduleur-off-grid/
- [11] Kitsolaire-discount.com/fr/106 –onduleurs réseau hybride
- [12] Bendali Braham Mounir, Khelif Mahdi, "Etude et simulation d'une chaîne de production photovoltaïques", Université Badji Mokhtar Annaba Juin 2018
- [13] Ben Zemamouche Houria, "Application de la MLI Vectorielle aux onduleurs multi niveaux à base de GTO et d'IGBT", Université Badji Mokhtar 2010
- [14] Issadi thinhinene,saad Malika, conception de la commande linéaire quadratique régulateur (LQR) robustifié en utilisant l'optimisation H_2/H_∞ ,université mouloud Mammeri de tizi ouzo 2014

-
- [15] Allaoui. T, support de cours sur, "Commande non linéaire et avancée", Université d'Ibn Khaldoun Tiaret 2024/2025.
- [16] U. Markovic, O. Stanojev, P. Aristidou, and G. Hug, "Partial grid forming concept for 100% inverter based transmission systems", in 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2018: IEEE, pp. 1-5.
- [17] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, "Control of power converters in AC microgrids,"IEEE transactions on power electronics, vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, 2012.
- [18] P. Unruh, M. Nuschke, P. Strauß, and F. Welck, "Overview on Grid-Forming Inverter Control Methods"Energies, vol. 13, no. 10, 2020.
- [19] F. Milano, F. Dörfler, G. Hug, D. J. Hill, and G. Verbič, "Foundations and challenges of low-inertia systems", in 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC), 2018: IEEE, pp. 1-25.
- [20] R. Rosso, X. Wang, M. Liserre, X. Lu, and S. Engelken, "Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends - A Review", IEEE Open Journal of Industry Applications, pp. 1-1, 2021.
- [21] R. H. Lasseter, Z. Chen, and D. Pattabiraman, "Grid-Forming Inverters: A Critical Asset for the Power Grid", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, no. 2, pp. 925-935, 2020.
- [22] K. Zeb et al., "A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 94, pp. 1120-1141, 2018.
- [23] J. Matevosyan et al., "Grid-forming inverters: Are they the key for high renewable penetration" IEEE Power and Energy magazine, vol. 17, no. 6, pp. 89-98, 2019.
- [24] M. Ndreko, S. Rüberg, and W. Winter, "Grid forming control scheme for power systems with up to 100% power electronic interfaced generation: a case study on Great Britain test system", IET Renewable Power Generation, vol. 14, no. 8, pp. 1268-1281, 2020.