



Journal of Renewable Energies

Revue des Energies Renouvelables

Journal home page : <https://revue.cder.dz/index.php/rer>

Research Paper

Contrôle Avancé des Onduleurs Photovoltaïques Connectés au Réseau

Linda Hassaine^{a, *}, Issam Abadlia^a, Antar Beddar^a, Fateh Abdoune^a and Mohamed Rida Bengourina^a

Centre de Développement des Energies Renouvelables, BP. 62 Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie.

ARTICLE INFO

Article history :

Received 08 February 2021

Accepted 27 December 2021

Mots clés :

Système photovoltaïque
Onduleur photovoltaïque
Contrôle avancé
Connexion au réseau

RESUME

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est parmi les énergies renouvelables la plus utilisée pour la production de l'énergie électrique. Le point le plus important en ce qui concerne l'intégration des systèmes photovoltaïques au réseau est le convertisseur de puissance, notamment les onduleurs qui ne sont pas tout à fait capables de fonctionner en mode avancé. Les nouvelles techniques en développement permettent d'améliorer les performances des onduleurs en assurant l'intégration correcte des systèmes photovoltaïques en tenant compte des caractéristiques du réseau. D'où, des exigences pour le contrôle avancé de l'onduleur connecté au réseau permettent le contrôle complet de l'énergie photovoltaïque fournie, tout en assurant une bonne qualité d'énergie, un faible Taux de Distorsion Harmonique (THD) des courants injectés dans le réseau et le contrôle de la puissance active et réactive. Ce papier présente, les configurations, la classification et les topologies des différents types d'onduleurs PV connectés au réseau. Un résumé concis des méthodes de contrôle pour les onduleurs monophasés et triphasés est également présenté. Un banc d'essai a été réalisé pour la validation expérimentale des techniques de contrôle proposées et développées.

ABSTRACT

Keywords :

Photovoltaic system
Photovoltaic inverter
Advanced control
Grid connection

Photovoltaic (PV) have the potential to become a major source of renewable energy and clean electricity to provide a significant share of electricity demand. However, there are several challenges that need to be addressed prior to the widespread adoption and utilization of PV technologies. The power converters commonly used between renewable energies and the grid. The inverter, which is the key for the PV integration, are still not capable of advanced control features that enable the full control of PV systems. New techniques under development make it possible to improve the performance of inverters by ensuring the correct integration of photovoltaic systems taking into account the characteristics of the grid. Hence, requirements for the advanced control of the inverter connected to the grid allow the complete control of the photovoltaic energy supplied, while ensuring a good quality of energy, a low Total Harmonic Distortion (THD) of the currents injected into the grid and the control of active and reactive power. This paper presents the configurations, the classifications and the topologies of the different PV inverters connected to the grid. A concise summary of the control methods for single-phase and three-phase inverters is also presented. An experimental test bench is carried out for the validation of the proposed and developed control techniques.

* Corresponding author, E-mail address: l.hassaine@cder.dz



1. Introduction

Afin de répondre à la demande énergétique, aujourd'hui l'objectif est d'augmenter encore le taux de pénétration des sources d'énergie renouvelables. Pour le raccordement des sources solaires photovoltaïques au réseau électrique, il est nécessaire d'utiliser les convertisseurs de puissances, qui permettent la conversion de puissance continue du générateur photovoltaïque PV à une puissance alternative AC injectée au réseau. Un convertisseur DC/AC est un onduleur de source de tension (VSI) ou un onduleur de source de courant (CSI). Généralement les onduleurs VSI sont les plus utilisés dans le système PV connecté au réseau.

Le rendement global d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique dépend pour une grande partie du rendement de l'onduleur de point de vue topologie et contrôle. Généralement les exigences des onduleurs connectés au réseau sont : le point de puissance maximal, rendement élevé, contrôle de la puissance injectée au réseau, un facteur de puissance réglable et une distorsion harmonique inférieur à 5%. Pour explorer les problèmes d'intégration du système photovoltaïque (PV) de nouvelle génération en considérant un niveau élevé de pénétration, où le réseau est de plus en plus décentralisé et vulnérable. Les systèmes PV doivent être plus contrôlables pour garantir un rendement élevé avec une grande fiabilité. Dans ce cas les onduleurs de nouvelle génération doivent répondre aux exigences de code du réseau.

Actuellement, il est nécessaire que les systèmes PV cessent d'alimenter des charges locales en présence des conditions anormales du réseau, tel que les défauts de creux de tension, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Des stratégies de contrôle avancées conformes aux exigences et aux normes du réseau, permettent d'assurer des services auxiliaires et intelligents considérables, tels que le contrôle de la puissance active à basse tension (LVRT : Low Voltage Ride Through) et la compensation de la puissance réactive qui sont fortement recommandées. Ces fonctionnalités essentielles peuvent faciliter l'intégration des systèmes PV au réseau, et offrir un coût de kilowattheure plus compétitif en comparaison avec les systèmes énergétiques conventionnels.

Les fonctionnalités avancées peuvent être accomplies en utilisant des onduleurs de différentes topologies et multifonctionnels. Avec les développements et les progrès modernes dans l'électronique de puissance et le contrôle avancé, les puissances active et réactive peuvent être contrôlées efficacement pour améliorer les performances globales du système PV connecté au réseau. L'objectif principal du système PV est la production de l'énergie électrique afin de répondre à la demande de la charge. Cependant, il peut également être utilisé pour réaliser les fonctionnalités avancées afin de participer au réglage du réseau, tel que les services de réglage de

fréquence et de tension, support de tension, la compensation de la puissance réactive, fonctionnement en ilotage et l'amélioration de la qualité de l'énergie.

Dans ce travail, la classification et la configuration des systèmes PV connectés au réseau et les techniques de contrôle avancé des onduleurs PV connectés au réseau monophasés et triphasés [1-14] sont bien examinés et comparés. Un banc d'essai a été réalisé pour la validation expérimentale des techniques de contrôle proposées et développées.

2. Configuration des onduleurs PVs connectés au réseau

Les onduleurs PVs connectés au réseau peuvent être classés en quatre types selon leurs configurations [15-19] :

- a) les onduleurs de module AC, c'est l'intégration de l'onduleur et le module photovoltaïque dans un seul circuit électrique. La puissance est de 50 -180 W.
- b) La technologie de l'onduleur décentralisé consiste en des onduleurs connectés en branches (string). C'est une version élargie de la configuration de l'onduleur centralisé, quand une seule branche des modules photovoltaïques est connectée à l'onduleur. La tension d'entrée peut être suffisamment élevée pour éviter l'adéquation du niveau de tension entre les panneaux photovoltaïques et le réseau.
- c) Les onduleurs multi-string, dans cette configuration plusieurs branches sont connectées à un onduleur DC-AC commun, à travers un convertisseur DC- DC spécifique à chaque branche. La puissance est de l'ordre de 3-10 kW.
- d) L'onduleur centralisé est utilisé comme interface entre un grand nombre de modules photovoltaïques (PV) et le réseau. Les modules photovoltaïques sont divisés en branches de connexion série (String). Chaque connexion série génère un niveau assez élevé de tension. Ces branches de connexion série des modules photovoltaïques (PV) sont connectés en parallèle pour atteindre des niveaux élevés du courant et des puissances qui peuvent être de 10kW- 750kW

Les quatre types sont illustrés par la figure 1.

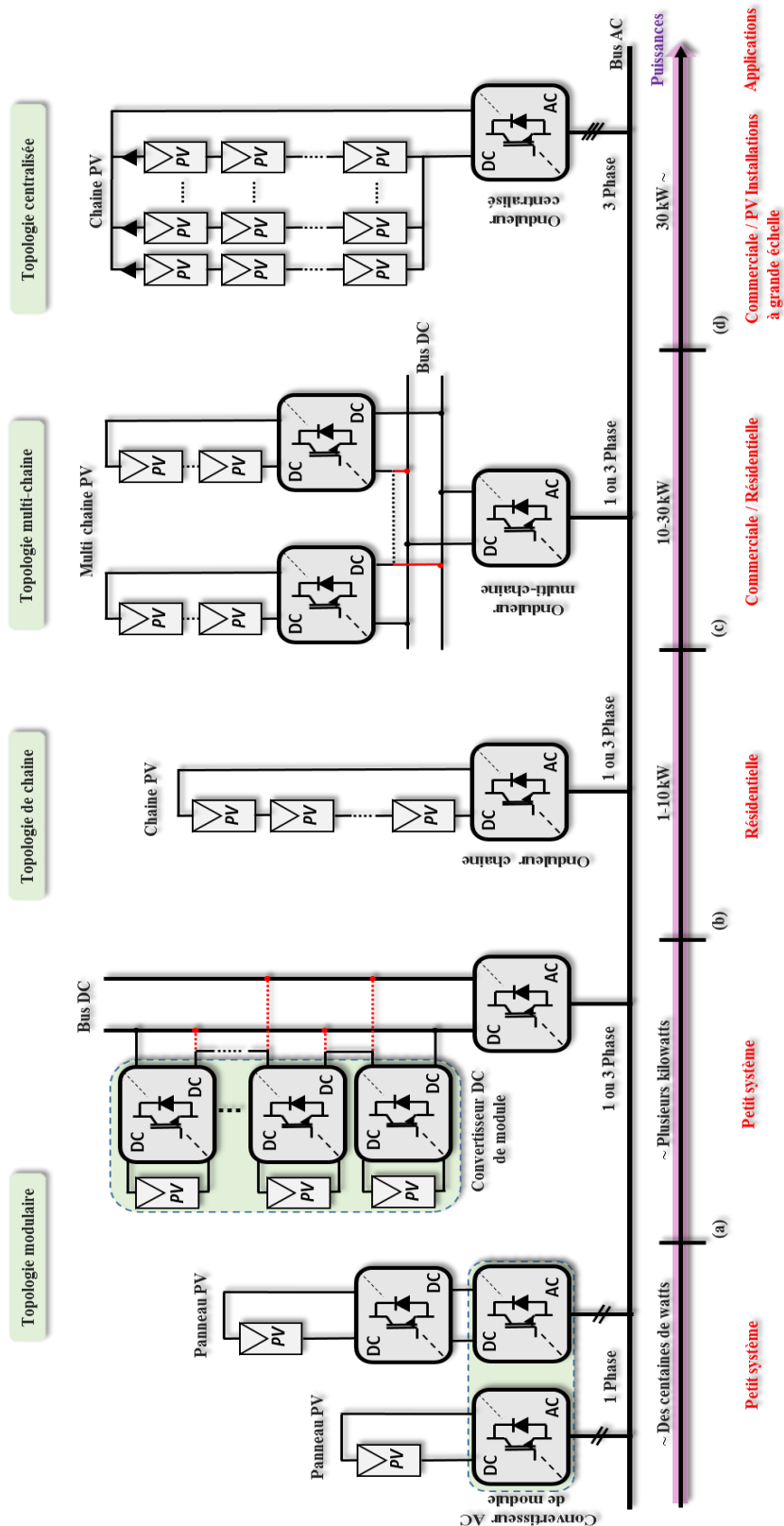


Fig 1. Différentes structures d'onduleurs photovoltaïques connectés au réseau (a) Topologie modulaire, (b) Topologie chaîne (String), (c) Topologie Multi-branch (Multi-String), (d) Topologie Centralisée.

3. Fonctionnalités des onduleurs PVs connectés au réseau

Les onduleurs photovoltaïques offrent de nombreuses fonctionnalités de gestion des pannes, de contrôlabilité flexible de la puissance et de fourniture intelligente des services auxiliaires, (voir Figure 2). Pour activer ces fonctionnalités, les normes de réseau existantes ou les exigences doivent être réexaminées et mis à jour en conséquence, et le contrôle des convertisseurs photovoltaïques doit assurer les fonctionnalités suivantes :

- a) Fonctionnement en mode MPPT et Contrôle de la puissance active ;
- b) Contrôle de la puissance réactive ;
- c) Compensation des harmoniques ;
- d) Prise en charge de la dynamique du réseau (capacité à traverser les pannes) ;
- e) Améliorer la fiabilité et l'efficacité.

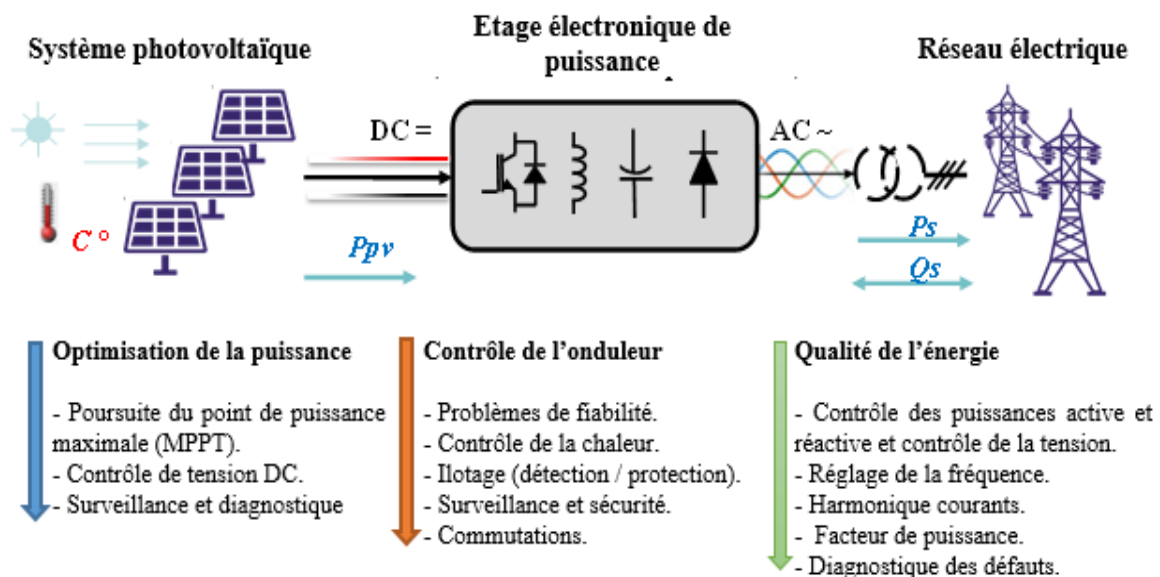


Fig 2. Système PV connecté au réseau.

4. Contrôle des onduleurs PVs connectés au réseau

La conception du contrôleur approprié pour contrôler la puissance PV fournie au réseau est très critique pour l'efficacité du système PV connecté au réseau. Généralement la puissance générée par le générateur photovoltaïque est intrinsèquement instable. Avec les progrès de l'électronique de puissance, les puissances active et réactive peuvent être contrôlées efficacement pour améliorer les performances globales du système connecté au réseau. En plus, le contrôle des convertisseurs doit garantir les performances suivantes [19-31] :

- a) Temps de réponse rapide ;

- b) Facteur de puissance doit être proche de l'unité ;
- c) Contrôle de fréquence adéquat et taux harmoniques faibles ;
- d) Synchronisation efficace avec le réseau ;
- e) Protection contre les sous/sur fréquences et les sous/surtensions.

La Figure 2, résume les fonctionnalités du contrôle d'un onduleur multifonction de nouvelle génération.

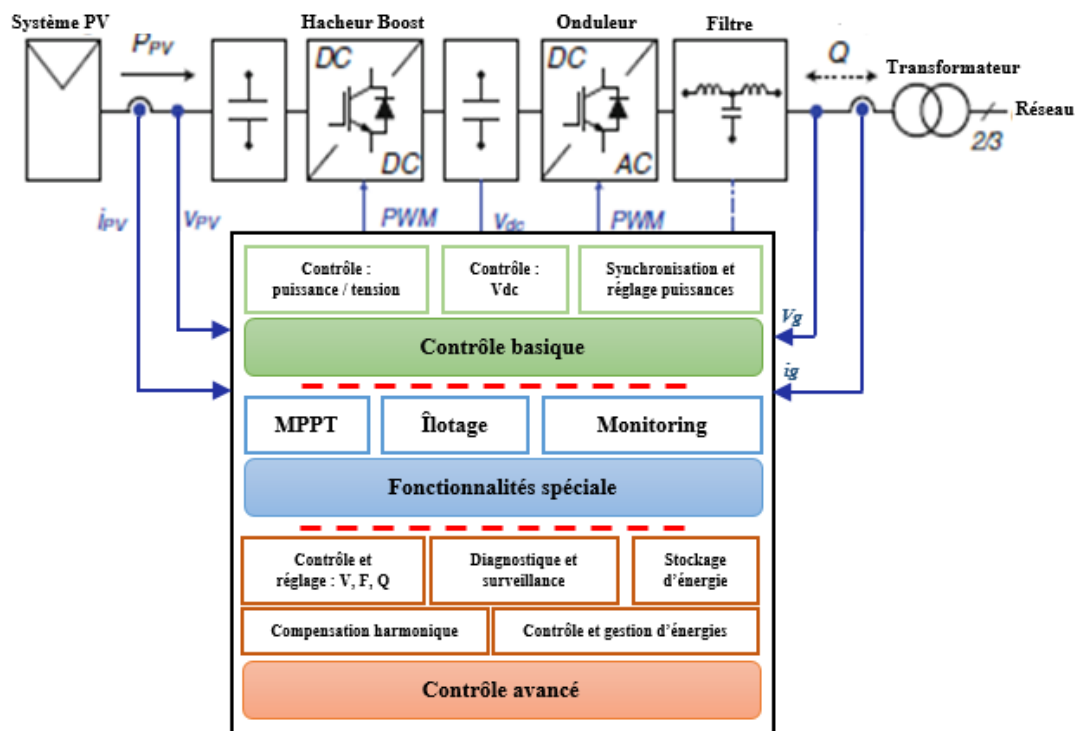


Fig 3. Fonctionnalités d'un contrôle avancé des onduleurs PVs.

Une configuration typique d'un système PV connecté au réseau est représentée par la figure 4, consistant en un système de générateur PV, un système de conditionnement de puissance composé d'un convertisseur DC/DC, d'un onduleur DC/AC, un filtre et un transformateur.

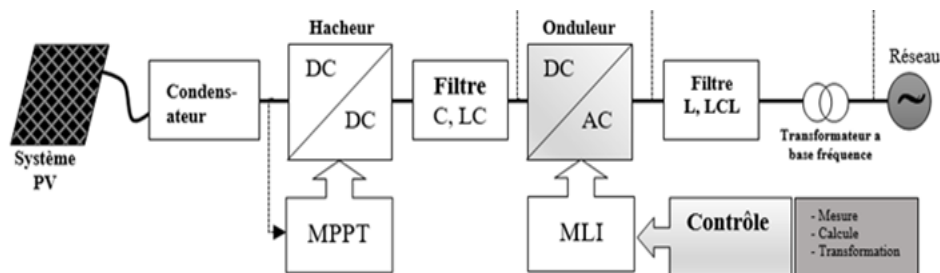


Fig 4. Structure typique d'un système PV connecté au réseau.

Dans un système PV connecté au réseau, l'onduleur contrôle les courants injectés et régule la puissance active et réactive fournies au réseau. Selon les conditions de fonctionnement et le comportement spécifiques du réseau électrique, les techniques de contrôles les plus utilisées dans la littérature sont décrites comme suit :

4.1 Contrôle linéaire

Ces contrôleurs sont conçus en fonction des caractéristiques et de la dynamique du système linéaire. Le tableau 2 montre les différents types du contrôle linéaire des onduleurs PV.

Tableau 2. Contrôle linéaire des onduleurs PVs.

Types de contrôle linéaire des onduleurs PVs		
Contrôleurs classiques [32]	Proportionnels Résonnants (PR) [33]	Gaussien quadratique linéaire (LQG) [34]
Cette famille comprend les contrôleurs proportionnel-intégral-dérivé (PID), proportionnel-intégral (PI), proportionnel-dérivé (PD) et proportionnel (P). Ces contrôleurs sont la base des systèmes linéaires classiques et de la technique du contrôle.	Les contrôleurs PI et PR fonctionnent de manière similaire. Cependant, Le régulateur PI permet un suivi efficace des signaux continus, tandis que le contrôleur PR suit un signal sinusoïdal avec la fréquence de la sinusoïde comme fréquence centrale.	La combinaison du régulateur linéaire-quadratique et du filtre de Kalman forme un contrôleur LQG. La conception de contrôleurs à rétroaction linéaire est fournie par l'application du contrôle LQG à des systèmes linéaires invariants dans le temps.

4.2 Contrôle non linéaire

Les contrôleurs non linéaires ont un fonctionnement extraordinaire par rapport aux contrôleurs de base. Le Tableau 3 montre les différents types de ce contrôle non linéaire.

Tableau 3. Contrôle non linéaire des onduleurs PVs.

Types de contrôle non-linéaire des onduleurs PVs		
Contrôleurs par mode glissant (SMC) [35]	Contrôleurs de linéarisation à rétroaction partielle (PFL) [36]	Contrôleurs à hystérésis [37]
Pour la régulation de la tension de sortie des onduleurs, la technique de control par mode glissant (SMC) a été largement utilisée en raison de ses robustes. Les principaux avantages sont l'insensibilité aux variations de paramètres et aux perturbations de charge.	Lorsque le système non linéaire est converti en un système linéaire à mi-chemin, est connu sous le nom de linéarisation à rétroaction partielle (PFL), s'il est converti en un système complètement linéaire, est appelé linéarisation à rétroaction exacte (EFL).	Dans ce type de contrôle, une bande adaptative doit être créée afin d'atteindre une fréquence de commutation stable, ce qui est une étape importante pour la mise en œuvre du contrôleur d'hystérésis. Par conséquent, la sortie de ce contrôleur est l'état des commutateurs.

4.3 Contrôle robuste

Une théorie d'un contrôle robuste est utilisée afin de concevoir un contrôleur en tenant compte des incertitudes. Le but de ces méthodes est d'acquérir une stabilité dans l'occurrence d'erreurs partielles de modélisation ainsi que des performances robustes. Les deux types les plus utilisés du contrôle robuste sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Contrôles robustes des onduleurs PVs.

Types de contrôle robuste des onduleurs PVs	
Contrôleurs H_{∞} (H_{∞}) [38]	Contrôleurs à synthèse μ [39]
Pour utiliser les méthodes H_{∞} , le problème de contrôle est représenté comme un problème d'optimisation par le concepteur de contrôle, puis le résout. Les problèmes de système multi variables sont résolus par des techniques H_{∞} . Mais, il a besoin d'un bon modèle du système à contrôler et a une complexité de calcul élevée. De plus, les contraintes non linéaires ne sont pas bien gérées.	L'effet des incertitudes non structurées et structurées sur les performances du système est considéré par l'approche de synthèse ' μ '. La conception du contrôleur est basée, dans cette méthode, sur la notion de valeur singulière organisée.

4.4 Contrôle adaptatif

Dans les méthodes de contrôle adaptatif, en fonction des conditions de fonctionnement du système, l'action de contrôle est automatiquement ajustée avec des performances élevées et les paramètres système précis ne sont pas nécessaires. Ce contrôle a une complexité de calcul élevée [40-47].

4.5 Contrôle prédictif

Dans les contrôleurs prédictifs, le comportement futur des paramètres contrôlés est prédit en utilisant le modèle du système. Le contrôleur utilise ces informations sous la base d'un critère d'optimisation prédéfini, pour obtenir l'actionnement optimal. Les deux principales méthodes prédictives sont montrées par le Tableau 5. Cependant, il existe plusieurs autres techniques prédictives pour le contrôle des onduleurs de puissance.

Tableau 5. Contrôle prédictif des onduleurs PVs.

Types de contrôle prédictif des onduleurs PVs	
Contrôleurs Deadbeat [48]	Contrôleur prédictif à modèle (MPC) [49]
La réponse dynamique du système qui est contrôlé par l'équation différentielle est discrétisée et dérivée. Dans cette théorie du contrôle, des temps morts centrés sur ces équations, à la fin de la période d'échantillonnage pour que les variables d'état atteignent les valeurs de référence, le signal de commande est calculé, au début de la période d'échantillonnage individuelle.	Dans le MPC, une fonction coût est définie à partir de critères flexibles, pour sélectionner les actions optimales à minimiser. Dans cette stratégie, un modèle du système est utilisé pour prédire la réponse des variables jusqu'à un moment précis. Lors de la phase de conception du contrôleur, le MPC inclut simplement les contraintes système et les non-linéarités.

4.6 Contrôle à base de l'intelligence artificielle

Les contrôleurs basés sur l'intelligence artificielle sont inspirés par l'intelligence biologique (algorithme génétique, réseaux de neurones, essaim particules, etc.). En outre, la manière dont les systèmes biologiques résolvent les problèmes est empruntée à l'idée. Ensuite, cela est utilisé pour résoudre le problème de contrôle. Les techniques de contrôle les plus utilisés sont montrées par le Tableau 6.

Tableau 6. Contrôle à base de l'intelligence artificielle des onduleurs PVs.

Types de contrôle intelligent des onduleurs PVs		
Contrôle par réseaux de neurones (ANN) [50]	Contrôle par logique floue [51]	Contrôle en utilisant les algorithmes heuristiques [52]
ANN est une connexion d'un système cérébral biologique qui est stimulé par un certain nombre de neurones artificiels inspiré du système nerveux humain. Lorsque NN est utilisé dans le système de contrôle, il peut s'entraîner hors ligne ou en ligne.	Dans les FLCs, la connaissance de l'être humain intelligent est définie et mise en œuvre pour contrôler la dynamique d'un système. L'architecture de la méthode FLC consiste en Fuzzification, Base de règles, Mécanisme d'inférence, et Dé-Fuzzification.	Les métaheuristiques sont des algorithmes génériques, souvent inspirés de la nature, conçues pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Parmi les métaheuristiques les plus récentes, nous retenons celle GAs, PSO, DE, GWO, FFY...

5. Méthodes et matériels

Pour l'étude d'un contrôle des onduleurs PVs connectés au réseau, l'étape analyse et description des systèmes consiste à analyser et à décomposer le système en sous-systèmes indépendants, à savoir la source, le réseau, l'onduleur et les espaces de contrôle et définir les contraintes d'emploi de l'association convertisseur-réseau. La conception du contrôle de l'onduleur doit déterminer la configuration adéquate du point de vue fonctionnel. Une bonne connaissance des techniques d'optimisation et de contrôle est indispensable en vue d'un dimensionnement rigoureux pour optimiser les performances souhaitées. En outre, les analyses et les interprétations des résultats de simulation offrant une grande facilité pour le passage à l'implémentation sous cartes DSP, FPGA et dsPACE où d'autres cartes à fin d'assurer la conversion analogique/numérique (CAN) et la conversion numérique/analogique (CNA), donc c'est l'implantation matérielle. Les progrès des systèmes électroniques de puissance y compris des caractéristiques de commutation d'appareils améliorées et une capacité de puissance élevée ont facilité l'intégration rapide avec le réseau électrique. Par conséquent, la mise en œuvre de tâches de contrôle complexes et d'algorithmes sophistiqués pour des systèmes d'intégration de réseau fiables, n'est plus considérée comme un obstacle crucial qui restreindrait ou limiterait l'utilisation de ces systèmes sur une large gamme, grâce aux puissants processeurs de signaux numériques disponibles, cartes d'acquisition de données à grande vitesse et cartes de contrôle.

La figure 5 montre un organigramme de démarches à suivre pour l'implémentation d'un contrôle avancé des onduleurs PVs connectés au réseau.

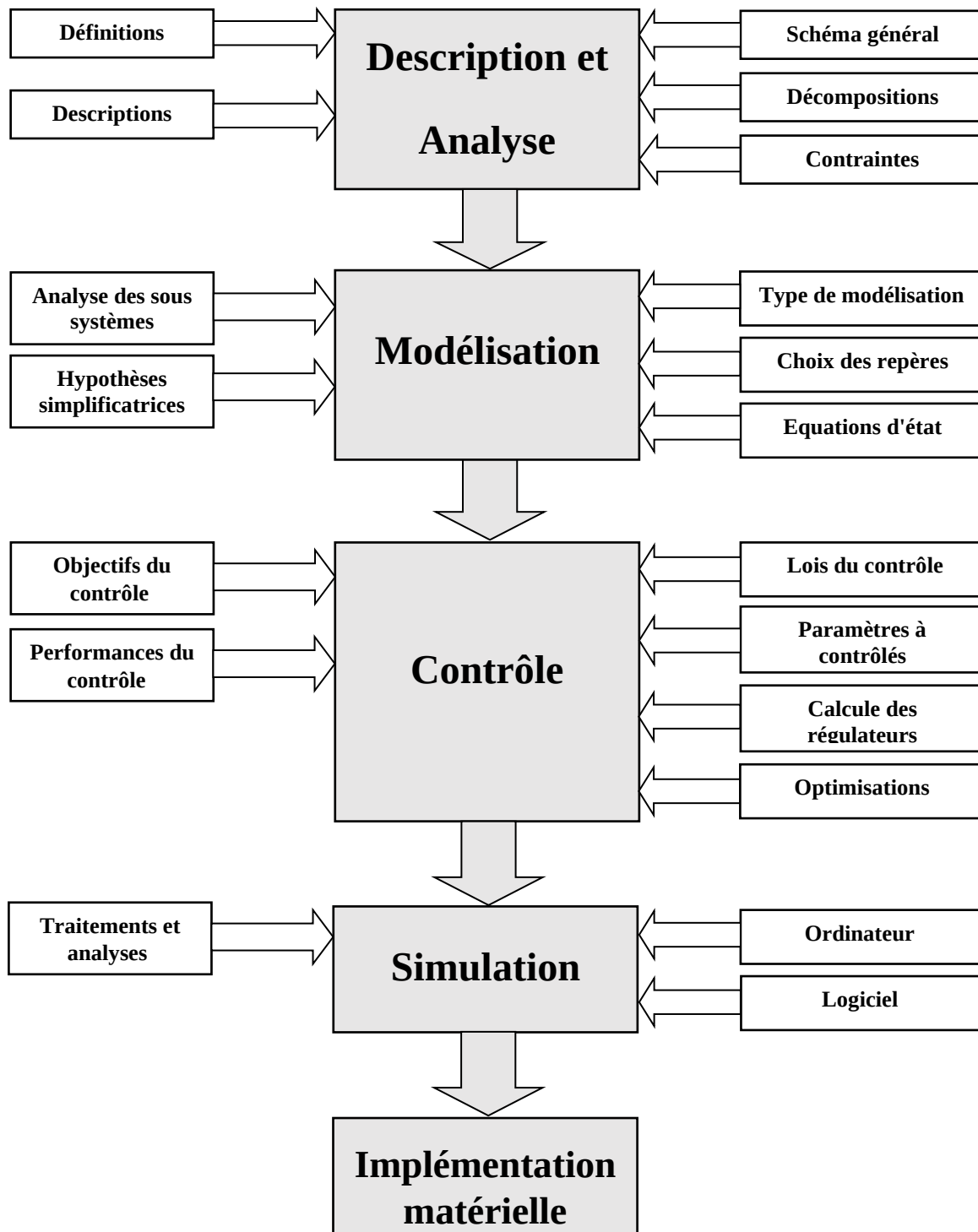


Fig 5. Organigramme de démarches d'un contrôle avancé des onduleurs PVs.

Heureusement, la disponibilité des systèmes Hardware-in-the-Loop (HIL) et des simulateurs en temps réel tronque considérablement le temps de prototypage et permet d'élaborer et d'optimiser

des algorithmes de contrôle sophistiqués pour les onduleurs PVs connectés au réseau qui ont des caractéristiques différentes suivant les normes des codes de réseau.

Le Tableau 7 présente quelques exemples de topologies des contrôles avancés des onduleurs PVs cités dans la littérature.

Tableau 7. Caractéristiques des contrôleurs d'onduleurs PV proposés dans la littérature.

Réf. / Topologie	Caractéristique		
	Filtre	Type de contrôleur	Implémentation
[57], Triphasé, $\alpha\beta$	LCL	Classique	Analogique, Digitale
[58], Triphasé, $\alpha\beta$	LC	Classique	Analogique, Digitale
[59], Triphasé, $\alpha\beta$	L	Classique	Analogique
[60], Triphasé, $\alpha\beta$	LCL	PR	Analogique
[61], Triphasé, $\alpha\beta$	L	Classique, PR	Analogique
[62], Triphasé, $\alpha\beta$	LCL	Hystérésis, MPC	Digitale
[63], Triphasé, $\alpha\beta$	LC	H^∞	Digitale
[64], Triphasé, $\alpha\beta$	L	Adaptatif	Digitale
[65], Triphasé, dq	LCL	Classique, PR	Analogique
[66], Triphasé, dq	LC	Classique	Analogique, Digitale
[67], Triphasé, dq	L	PR	Analogique
[68], Triphasé, dq	LCL	LQG	Digitale
[69], Triphasé, dq	LC	Adaptatif	Digitale
[70], Triphasé, dq	LC	MPC	Digitale
[71], Triphasé, dq	L	FLC, NN	Digitale
[72], Monophasé	L	Classique	Analogique
[73], Monophasé	LCL	Classique, PR	Analogique, Digitale
[74], Monophasé	LCL	PR	Analogique, Digitale
[75], Monophasé	L	PR, LQG	Digitale
[76], Monophasé	LC	Hystérésis	Digitale
[77], Monophasé	L	Adaptatif	Digitale
[78], Monophasé	LC	MPC	Digitale

6. Réalisations du contrôle avancé de l'onduleur photovoltaïque connecté au réseau

Cette section examine les travaux réalisés par l'équipe "Conversion et Qualité de l'Énergie" – Division Energie Solaire Photovoltaïque / Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER)'' pour la réalisation d'un banc d'essai d'un onduleur PV connecté au réseau avec les implémentations et les tests des contrôleurs avancés qui permettent de tester les performances de la conversion et de la qualité d'énergie de la chaîne proposée. Pour la réalisation de ce contrôle avancé de l'onduleur PV, les étapes suivantes ont été effectuées :

- Une étude approfondie sur les nouveaux modes opératoires qui permettent une intégration fiable des systèmes PV dans le réseau électrique.
- Développement et réalisation des cartes de mesure (Figure 6) pour les courants et la tension et carte d'adaptation des signaux entre la dsPACE et l'onduleur (Figure 7).
- Modélisation et simulation de l'ensemble de la chaîne d'énergie et développement des techniques de contrôle qui permettent d'améliorer les performances tout en assurant une connexion correcte de l'onduleur PV au réseau électrique.



Fig 6. Carte de mesure triphasée.

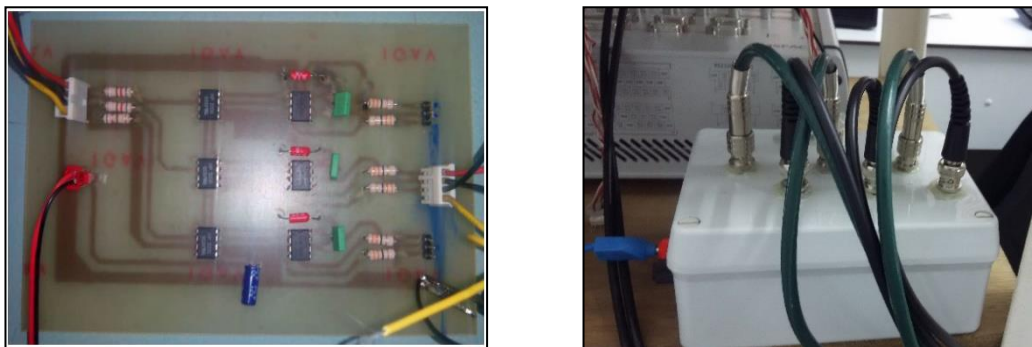


Fig 7. Carte d'adaptation des signaux

6.1. Test et implémentation des contrôles avancés de l'onduleur PV

Un exemple d'application composé d'une source de puissance raccordée au réseau monophasé, doté d'un filtre LCL. Les objectifs à atteindre du contrôle proposé sont :

- Le contrôle souple des puissances active et réactive avec découplage.
- La compensation de la puissance réactive.
- La possibilité de réglage de la tension et de compensation des chutes de tension.
- un facteur de puissance proche de l'unité et un THD adéquat aux recommandations du grid-code local.
- Assurer le fonctionnement du système en sécurité.

La figure 8 montre la configuration de la topologie avec le contrôle proposé.

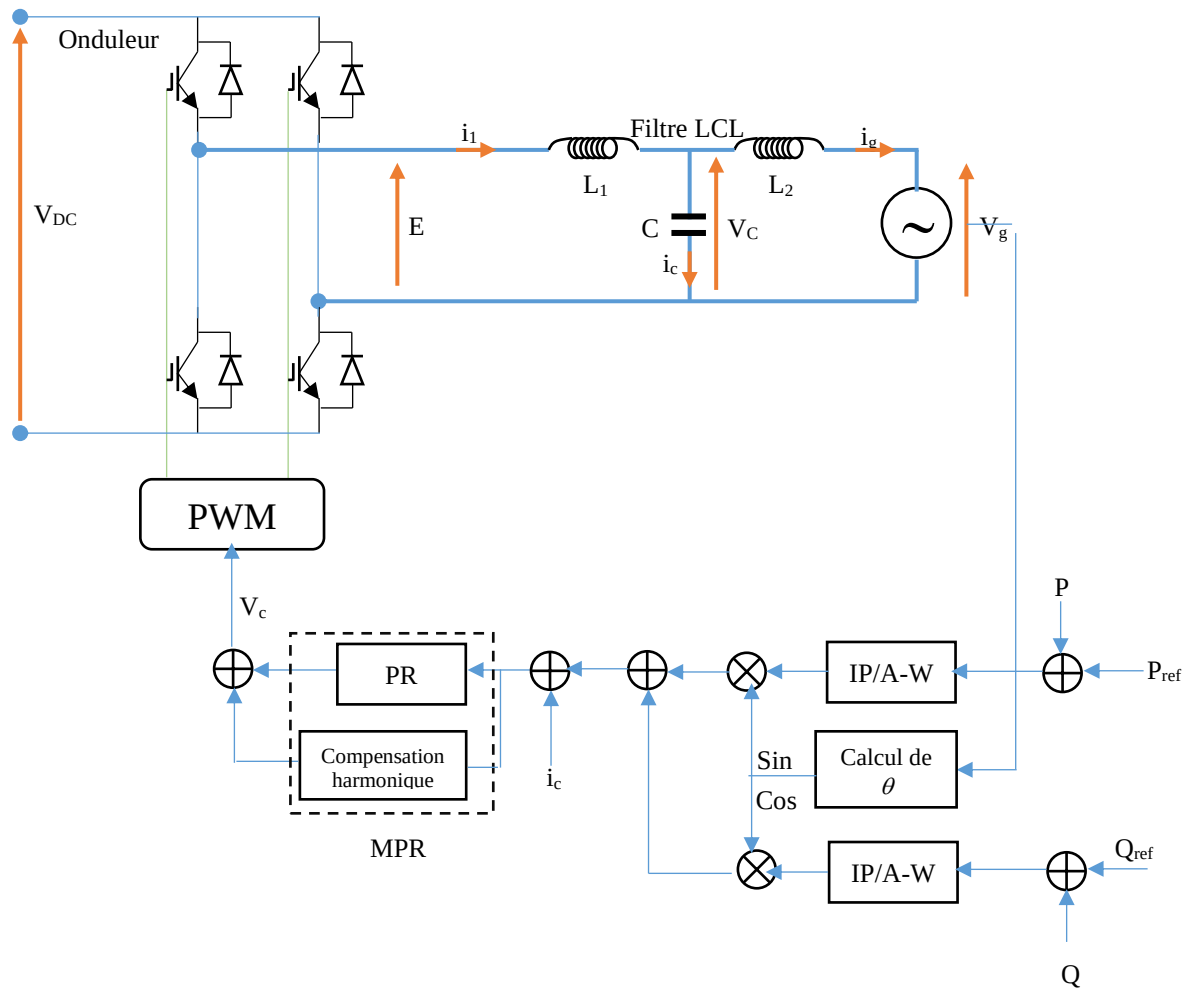


Fig 8. Topologie et bloc de contrôle de l'onduleur connecté au réseau avec filtre LCL.

Afin d'assurer un contrôle robuste et fiable de l'onduleur, une modélisation mathématique du système est aboutie pour faire face au phénomène de résonance due à l'utilisation des filtres LCL en considérant la qualité de l'énergie convertie. Deux techniques de control ont été implémentées. La première est basée sur un contrôleur proportionnel résonnant (PR) utilisé pour suivre le courant de référence alternatif, et le réglage des puissances active et réactive est assuré par un régulateur Intégrateur Proportionnel (IP). La deuxième est basée sur un contrôleur proportionnel multi-résonnant (MPR) utilisé pour suivre le courant de référence alternatif, et le réglage des puissances active et réactive est assuré par un régulateur non linéaire Intégrateur Proportionnel avec une action d'Anti Windup (IP/AW). Pour déterminer les performances du système et l'efficacité de control, des tests expérimentaux pour plusieurs cas de fonctionnement sous plusieurs conditions et contraintes ont été présentés.

6.2. Résultats expérimentaux

Le banc d'essai présenté par la figure 9 permet l'implémentation matérielle du contrôle proposé pour l'onduleur monophasé connecté au réseau avec le filtre LCL et ce, en utilisant la carte dsSPACE 1202, le control desk comme interface de contrôle et un oscilloscope pour la visualisation des signaux.

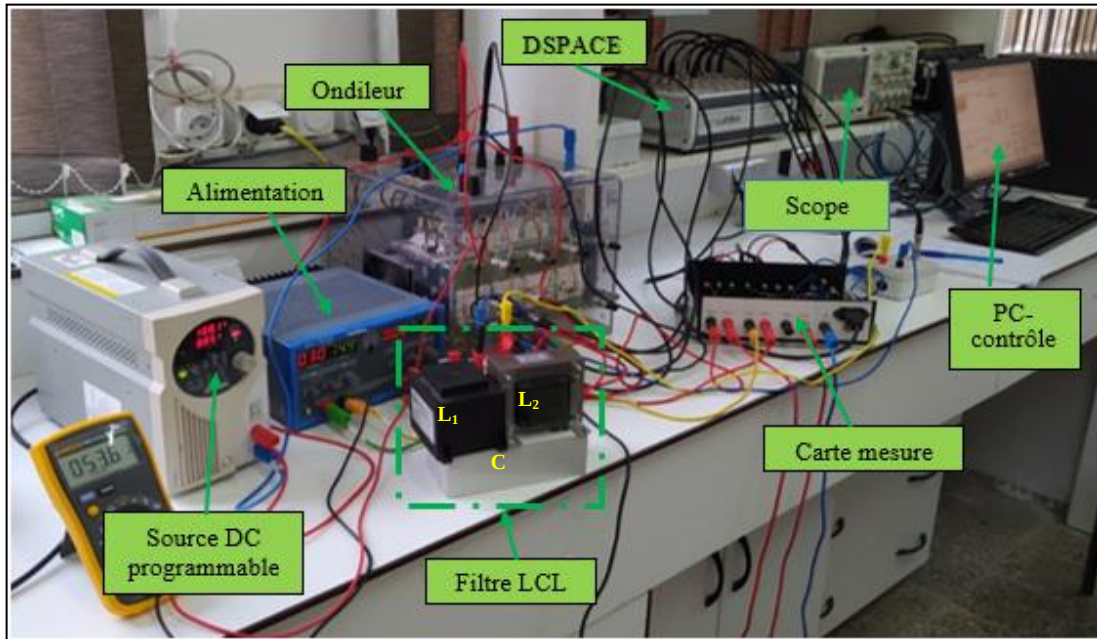


Fig 9. Banc d'essai de l'onduleur connecté au réseau.

Les figures 10-12 présentent les résultats expérimentaux obtenus :

- Figure 10 : une bonne dynamique de contrôle à l'instant du couplage, la tension à la borne du condensateur du filtre est en superposition avec celle du réseau.
- Figure 11 : un découplage souple des puissances active et réactive avec une bonne compensation de la puissance réactive en plus, de bonnes formes des signaux du courant que la tension réseau.
- Figure 12 : la technique de contrôle avancé proposée (utilisation des régulateurs MPR et IP Anti-Windup) montre un THD minimale par rapport à la technique conventionnelle (utilisation des régulateurs PR et PI).

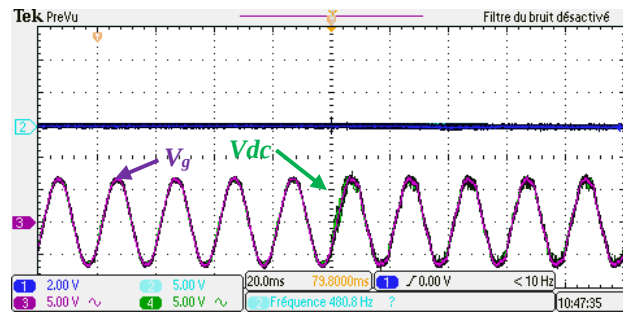


Fig 10. Réglage de tensions à l'instant du couplage au réseau.

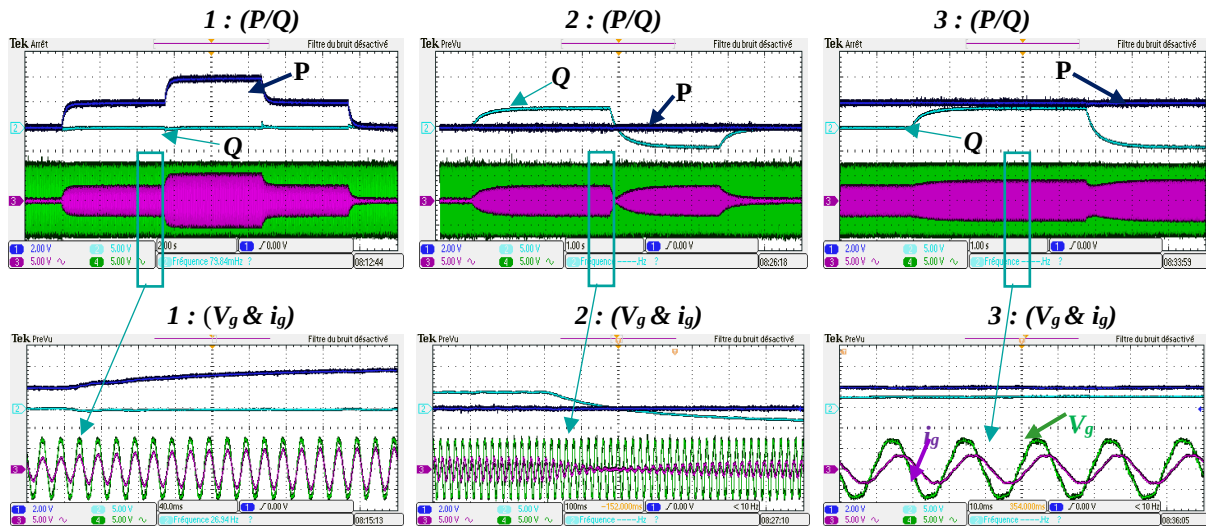


Fig 11. Résultats expérimentaux ; a : variation de P avec Q=0 ; b : variation de Q avec P=0 ; c : variation de Q avec P>0

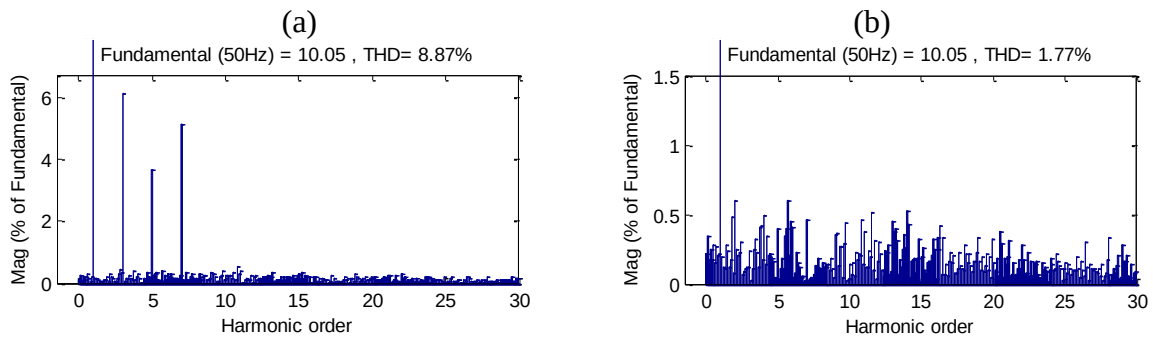


Figure 12. THD du courant de réseau, a : utilisation des régulateurs PR et PI ; b : utilisation des régulateurs MPR et IP Anti-Windup.

La technique de contrôle proposée est comparée, sous contraintes judicieuses du type d'implémentation, de la dynamique, des paramètres à contrôlés et de la stabilité, avec d'autre techniques de contrôle avancé, montrés par le tableau 8. La technique proposée présente des bonnes performances par rapport aux autres techniques de contrôles.

Tableau 8. Comparaison des techniques de contrôle des onduleurs PV connectés au réseau

Contrôle	Technique de contrôle	Implémentation	Dynamique	Paramètres de contrôle	Stabilité
Contrôle proposé	MPR, IP-AW	Analogique, Digitale	+++	Puissance, courants.	+++
Ref. [73]	Classique, PR	Analogique, Digitale	+++	Courants, tension	++
Ref. [74]	PR	Analogique, Digitale	+	Courants	++
Ref. [12]	PR, FLC	Analogique, Digitale	+++	Puissance, courants.	+
Ref. [23]	MPR, PI	Analogique, Digitale	+	courants.	+++
Ref. [44]	SMC	Analogique, Digitale	++	courants.	+++
Ref. [53]	PR, ANN	Analogique, Digitale	++	Puissance, courants.	++

7. Conclusion

Dans ce travail, les classifications des onduleurs PVs connectés au réseau et leurs modes de contrôle ont été scrupuleusement examinées. En outre, diverses structures et topologies de contrôle avancé d'onduleurs PVs, ont été présentées. Pour les applications d'onduleurs photovoltaïques, deux techniques de control basées respectivement sur des contrôleurs (IP, PR) et (IP/AW, MRP) ont été développées et implémentées sur la carte dSPACE 1202. Un banc d'essai a été réalisé au niveau du laboratoire pour valider expérimentalement les techniques développées, le contrôle de la tension et des puissances active et réactive, la compensation de la puissance réactive, le réglage de facteur de puissance et l'amélioration de la qualité d'énergie.

Cette étude aidera à sélectionner les techniques de contrôle et les topologies d'onduleurs les plus appropriées et sera d'un apport important pour les chercheurs, les fabricants et les utilisateurs œuvrant dans le domaine de l'énergie solaire et ce, en vue d'améliorer son exploitation et facilitera son intégration au réseau.

8. Acknowledgement

Ce travail de recherche est soutenu par la Direction générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique (DGRSDT)/Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique-Algérie dans le cadre du projet « Contrôle avancé des onduleurs photovoltaïques connectés au réseau et amélioration de la qualité d'énergie électrique » (Projet n ° 180).

9. References

- [1] SOOD, Vijay K. et ABDELGAWAD, Haytham. Power converter solutions and controls for green energy. Distributed Energy Resources in Microgrids, 2019, p. 357-387. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817774-7.00014-4>
- [2] HASSAINE, Linda, OLÍAS, Emilio, QUINTERO, Jesús, et al. Power control for grid connected applications based on the phase shifting of the inverter output voltage with respect to the grid voltage. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, vol. 57, p. 250-260. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.12.009>
- [3] SANGWONGWANICH, Ariya, YANG, Yongheng, et BLAABJERG, Frede. High-performance constant power generation in grid-connected PV systems. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, vol. 31, no 3, p. 1822-1825. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2465151
- [4] BAE, Youngsang, VU, Trung-Kien, et KIM, Rae-Young. Implemental control strategy for grid stabilization of grid-connected PV system based on German grid code in symmetrical low-to-medium voltage network. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, vol. 28, no 3, p. 619-631. DOI: 10.1109/TEC.2013.2263885
- [5] LI, Hua, WEN, Che, CHAO, Kuei-Hsiang, et al. Research on inverter integrated reactive power control strategy in the grid-connected PV systems. Energies, 2017, vol. 10, no 7, p. 912. <https://doi.org/10.3390/en10070912>
- [6] HASSAINE, Linda et BENGOURINA, Mohamed Rida. Control technique for single phase inverter photovoltaic system connected to the grid. Energy Reports, 2020, vol. 6, p. 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.038>
- [7] I. Abadlia, I. Hassaine, F. Abdoune, A. Beddar 'DC-Link voltage adaptation by using the fuzzy logic controllers for grid-connected photovoltaic inverters' □Artificial Intelligence and Heuristics for Smart Energy Efficiency in Smart Cities, pp, 295:302, Springer chapter Book Non, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-92038-8_30
- [8] CRĂCIUN, Bogdan-Ionuț, KERÉKES, Tamás, SÉRA, Dezső, et al. Overview of recent grid codes for PV power integration. In : 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). IEEE, 2012. p. 959-965. DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231767
- [9] JAHN, Ulrike et NASSE, Wolfgang. Operational performance of grid-connected PV systems on buildings in Germany. Progress in Photovoltaics: Research and applications, 2004, vol. 12, no 6, p. 441-448. <https://doi.org/10.1002/pip.550>
- [10] MARION, Bill, ADELSTEIN, J., BOYLE, K. ea, et al. Performance parameters for grid-connected PV systems. In : Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005. IEEE, 2005. p. 1601-1606. DOI: 10.1109/PVSC.2005.1488451
- [11] KAZEM, Hussein A., CHAICHAN, Miqdam T., AL-WAELI, Ali HA, et al. Evaluation of aging and performance of grid-connected photovoltaic system northern Oman: Seven years' experimental study. Solar Energy, 2020, vol. 207, p. 1247-1258. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.061>
- [12] SIDRACH-DE-CARDONA, M. et LOPEZ, Ll Mora. Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system. Energy, 1999, vol. 24, no 2, p. 93-102. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00084-X](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00084-X)

- [13] MONDOL, Jayanta Deb, YOHANIS, Yigzaw G., et NORTON, Brian. Comparison of measured and predicted long term performance of grid a connected photovoltaic system. *Energy conversion and management*, 2007, vol. 48, no 4, p. 1065-1080. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.10.021>
- [14] ISAAM, Abadlia. Développement durable, optimisation et renforcement d'une chaîne de production d'énergie d'origine renouvelable. Thèse de Doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA, 2018. <https://scholar.google.com/citations?user=GfRosEYAAAAJ&hl=fr&oi=ao>
- [15] ÖZTÜRK, Serkan, POŞPOŞ, Polat, UTALAY, Volkan, et al. Operating principles and practical designaspects of all SiC DC/AC/DC converter for MPPT in grid-connected PV supplies. *Solar Energy*, 2018, vol. 176, p. 380-394. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.049>
- [16] KOURO, Samir, LEON, Jose I., VINNIKOV, Dimitri, et al. Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging PV converter technology. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2015, vol. 9, no 1, p. 47-61. DOI : 10.1109/MIE.2014.2376976
- [17] CHOUDER, Aissa, SILVESTRE, Santiago, SADAoui, Nawel, et al. Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, vol. 20, no 1, p. 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.08.011>
- [18] FARHOODNEA, Masoud, MOHAMED, Azah, SHAREEF, Hussain, et al. Power quality analysis of grid-connected photovoltaic systems in distribution networks. *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2013, vol. 2013, p. 208-213. <http://pe.org.pl/articles/2013/2a/45.pdf>
- [19] HASSAINE, L., OLIAS, E., QUINTERO, J., et al. Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 30, p. 796-807. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.005>
- [20] KJAER, Soeren Baekhoej, PEDERSEN, John K., et BLAABJERG, Frede. Power inverter topologies for photovoltaic modules-a review. In : *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No. 02CH37344)*. IEEE, 2002. p. 782-788. DOI: 10.1109/IAS.2002.1042648
- [21] LI, Wuhua, GU, Yunjie, LUO, Haoze, et al. Topology review and derivation methodology of single-phase transformerless photovoltaic inverters for leakage current suppression. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, vol. 62, no 7, p. 4537-4551. DOI: 10.1109/TIE.2015.2399278
- [22] PATRAO, Iván, FIGUERES, Emilio, GONZÁLEZ-ESPÍN, Fran, et al. Transformerless topologies for grid-connected single-phase photovoltaic inverters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no 7, p. 3423-3431. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.034>
- [23] PHARNE, I. D. et BHOSALE, Y. N. A review on multilevel inverter topology. In : *2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*. IEEE, 2013. p. 700-703. DOI: 10.1109/ICPEC.2013.6527746
- [24] MYRZIK, Johanna MA et CALAIS, Martina. String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems-a review. In : *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*., IEEE, 2003. p. 8 pp. Vol. 2. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304589
- [25] OBEIDAT, Firas. A comprehensive review of future photovoltaic systems. *Solar Energy*, 2018, vol. 163, p. 545-551. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.050>

- [26] HU, Haibing, HARB, Souhib, KUTKUT, Nasser, et al. Power decoupling techniques for micro-inverters in PV systems-a review. In : 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, 2010. p. 3235-3240. DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618285
- [27] KAVYA SANTHOSHI, B., MOHANA SUNDARAM, K., PADMANABAN, Sanjeevikumar, et al. Critical review of PV grid-tied inverters. *Energies*, 2019, vol. 12, no 10, p. 1921. <https://doi.org/10.3390/en12101921>
- [28] KHAN, Md Noman H., FOROUZESH, Mojtaba, SIWAKOTI, Yam P., et al. Transformerless inverter topologies for single-phase photovoltaic systems: A comparative review. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019, vol. 8, no 1, p. 805-835. DOI: 10.1109/JESTPE.2019.2908672
- [29] MECHOUMA, R., AZOUI, B., et CHAABANE, M. Three-phase grid connected inverter for photovoltaic systems, a review. In : 2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology. IEEE, 2012. p. 37-42. DOI: 10.1109/REVET.2012.6195245
- [30] XIAO, Weidong, EL MOURSI, Mohamed S., KHAN, Omair, et al. Review of grid-tied converter topologies used in photovoltaic systems. *IET Renewable Power Generation*, 2016, vol. 10, no 10, p. 1543-1551. DOI: 10.1049/iet-rpg.2015.0521
- [31] DOGGA, Raveendhra et PATHAK, M. K. Recent trends in solar PV inverter topologies. *Solar Energy*, 2019, vol. 183, p. 57-73. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.065>
- [32] HAMROUNI, Nejib, JRAIDI, Moncef, DHOUIB, Ahmed, et al. Design of a command scheme for grid connected PV systems using classical controllers. *Electric Power Systems Research*, 2017, vol. 143, p. 503-512. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.064>
- [33] ZHANG, Ningyun, TANG, Houjun, et YAO, Chen. A systematic method for designing a PR controller and active damping of the LCL filter for single-phase grid-connected PV inverters. *Energies*, 2014, vol. 7, no 6, p. 3934-3954. <https://doi.org/10.3390/en7063934>
- [34] HUERTA, Francisco, PIZARRO, Daniel, COBRECES, Santiago, et al. LQG servo controller for the current control of $\$$ LCL $\$$ grid-connected voltage-source converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 59, no 11, p. 4272-4284. DOI: 10.1109/TIE.2011.2179273
- [35] ABADLIA, Issam, ADJABI, Mohamed, et BOUZERIA, Hamza. Sliding mode based power control of grid-connected photovoltaic-hydrogen hybrid system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, no 47, p. 28171-28182. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.215>
- [36] ANZALCHI, Arash et SARWAT, Arif. Overview of technical specifications for grid-connected photovoltaic systems. *Energy conversion and management*, 2017, vol. 152, p. 312-327. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.049>
- [37] ABD RAHIM, Nasrudin, SELVARAJ, Jeyraj, et al. Hysteresis current control and sensorless MPPT for grid-connected photovoltaic systems. In : 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 2007. p. 572-577. DOI: 10.1109/ISIE.2007.4374659
- [38] YILDIRAN, Nezihe et TACER, Emin. A new approach to H-infinity control for grid-connected inverters in photovoltaic generation systems. *Electric Power Components and Systems*, 2019, vol. 47, no 14-15, p. 1413-1422. <https://doi.org/10.1080/15325008.2019.1689445>
- [39] YANG, Shuitao, LEI, Qin, PENG, Fang Z., et al. A robust control scheme for grid-connected voltage-source inverters. *IEEE transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 58, no 1, p. 202-212. DOI: 10.1109/TIE.2010.2045998

- [40] ALHEJJI, Ayman et MOSAAD, Mohamed I. Performance enhancement of grid-connected PV systems using adaptive reference PI controller. *Ain Shams Engineering Journal*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.006>
- [41] ROY, Tushar Kanti et MAHMUD, Md Apel. Active power control of three-phase grid-connected solar PV systems using a robust nonlinear adaptive backstepping approach. *Solar energy*, 2017, vol. 153, p. 64-76. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.044>
- [42] MEZA, Carlos, BIEL, Domingo, JELTSEMA, Dimitri, et al. Lyapunov-based control scheme for single-phase grid-connected PV central inverters. *IEEE Transactions on control systems technology*, 2011, vol. 20, no 2, p. 520-529. DOI: 10.1109/TCST.2011.2114348
- [43] ROY, Tushar Kanti, MAHMUD, Md Apel, ISLAM, S. N., et al. Power quality improvements in single-phase grid-connected photovoltaic systems using a nonlinear adaptive controller. In : 2018 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). IEEE, 2018. p. 1-6. DOI: 10.1109/AUPEC.2018.8757961
- [44] ALTHOBAITI, A., ARMSTRONG, M., et ELGENDY, M. A. Current control of three-phase grid-connected PV inverters using adaptive PR controller. In : 2016 7th International Renewable Energy Congress (IREC). IEEE, 2016. p. 1-6. DOI: 10.1109/IREC.2016.7507628
- [45] MADHUMITHA, R. et VINOTHKUMAR, R. Voltage regulation in microgrid using adaptive controller. In : 2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE). IEEE, 2014. p. 1-5. DOI: 10.1109/ICGCCEE.2014.6922363
- [46] MAYOSKY, Miguel Angel et CANCELO, I. E. Direct adaptive control of wind energy conversion systems using Gaussian networks. *IEEE Transactions on neural networks*, 1999, vol. 10, no 4, p. 898-906. DOI: 10.1109/72.774245
- [47] ROY, T. K., PERVEJ, M. F., et TUMPA, F. K. Adaptive controller Design for grid current regulation of a CSI based PV system. In : 2016 2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE). IEEE, 2016. p. 1-4. DOI: 10.1109/ICECTE.2016.7879622
- [48] JAHANBAKHSI, Mohammad-Hassan, ASAEI, Behzad, et FARHANGI, Babak. A novel deadbeat controller for single phase PV grid connected inverters. In : 2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering. IEEE, 2015. p. 1613-1617. DOI: 10.1109/IranianCEE.2015.7146477
- [49] PODDER, Amit Kumer et HABIBULLAH, Md. Model predictive based energy efficient control of grid-connected PV systems. In : 2018 10th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE). IEEE, 2018. p. 413-416. DOI: 10.1109/ICECE.2018.8636807
- [50] ABADLIA, I., BAHY, T., LEKHCHINE, S., et al. Active and reactive power neurocontroller for grid-connected photovoltaic generation system. *Journal of electrical Systems*, 2016, vol. 12, no 1. <https://journal.esrgroups.org/jes/edition-2016.php>
- [51] ABADLIA, Issam, HASSAINE, Linda, BEDDAR, Antar, et al. Adaptive fuzzy control with an optimization by using genetic algorithms for grid connected a hybrid photovoltaic–hydrogen generation system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, no 43, p. 22589-22599. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.168>
- [52] MEDDOUR, Sami, RAHEM, Djamel, CHERIF, Ali Yahia, *et al.* A novel approach for PV system based on metaheuristic algorithm connected to the grid using FS-MPC controller. *Energy Procedia*, 2019, vol. 162, p. 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.007>

- [53] Annual report, photovoltaic industry association, EPIA; 2008.http://www.pvaustria.at/wp-content/uploads/2013/07/1723_EPIA2008_Annual_Report.pdf
- [54] VERHOEVEN, Bas, et al. Utility aspects of grid connected photovoltaic power systems. International Energy Agency, 1998. http://www.hme.ca/gridconnect/IEA_PVPS_Task_5-01_Utility_aspects_of_PV_grid-connection.pdf
- [55] CALAIS, Martina et AGELIDIS, Vassilios G. Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview. In : IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Proceedings. ISIE'98 (Cat. No. 98TH8357). IEEE, 1998. p. 224-229. DOI : 10.1109/ISIE.1998.707781
- [56] VERHOEVEN, Bas, et al. Utility aspects of grid connected photovoltaic power systems. International Energy Agency, 1998. http://www.hme.ca/gridconnect/IEA_PVPS_Task_5-01_Utility_aspects_of_PV_grid-connection.pdf
- [57] MIRET, Jaume, CAMACHO, Antonio, CASTILLA, Miguel, et al. Control scheme with voltage support capability for distributed generation inverters under voltage sags. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, vol. 28, no 11, p. 5252-5262. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2246190
- [58] LI, Yuan, JIANG, Shuai, CINTRON-RIVERA, Jorge G., et al. Modeling and control of quasi-Z-source inverter for distributed generation applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 60, no 4, p. 1532-1541. DOI: 10.1109/TIE.2012.2213551
- [59] CHILIPI, Rajasekhareddy, AL SAYARI, Naji, AL HOSANI, Khalifa, et al. Control scheme for grid-tied distributed generation inverter under unbalanced and distorted utility conditions with power quality ancillary services. IET Renewable Power Generation, 2016, vol. 10, no 2, p. 140-149. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0095>
- [60] CAMACHO, Antonio, CASTILLA, Miguel, MIRET, Jaume, et al. Flexible voltage support control for three-phase distributed generation inverters under grid fault. IEEE transactions on industrial electronics, 2012, vol. 60, no 4, p. 1429-1441. DOI: 10.1109/TIE.2012.2185016
- [61] CAMACHO, Antonio, CASTILLA, Miguel, MIRET, Jaume, et al. Flexible voltage support control for three-phase distributed generation inverters under grid fault. IEEE transactions on industrial electronics, 2012, vol. 60, no 4, p. 1429-1441. DOI: 10.1109/TIE.2012.2185016
- [62] ZHANG, Xing, WANG, Yangjun, YU, Changzhou, et al. Hysteresis model predictive control for high-power grid-connected inverters with output LCL filter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, vol. 63, no 1, p. 246-256. DOI: 10.1109/TIE.2015.2477060
- [63] YANG, Shuitao, LEI, Qin, PENG, Fang Z., et al. A robust control scheme for grid-connected voltage-source inverters. IEEE transactions on Industrial Electronics, 2010, vol. 58, no 1, p. 202-212. DOI: 10.1109/TIE.2010.2045998
- [64] JORGE, Sebastián Gómez, BUSADA, Claudio A., et SOLSONA, Jorge A. Frequency-adaptive current controller for three-phase grid-connected converters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 60, no 10, p. 4169-4177. DOI: 10.1109/TIE.2012.2209617
- [65] LEE, Tzung-Lin et HU, Shang-Hung. Resonant current compensator with enhancement of harmonic impedance for LCL-filter based active rectifiers. In : 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2011. p. 1538-1543. DOI: 10.1109/APEC.2011.5744798

- [66] LIU, Zeng, LIU, Jinjun, et ZHAO, Yalin. A unified control strategy for three-phase inverter in distributed generation. *IEEE Transactions on power electronics*, 2013, vol. 29, no 3, p. 1176-1191. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2262078
- [67] EBADI, Mazdak, JOORABIAN, Mahmood, et MOGHANI, Javad Shokrollahi. Voltage look-up table method to control multilevel cascaded transformerless inverters with unequal DC rail voltages. *IET power electronics*, 2014, vol. 7, no 9, p. 2300-2309. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0490>
- [68] HUERTA, Francisco, PIZARRO, Daniel, COBRECES, Santiago, et al. LQG servo controller for the current control of Δ LCL Δ grid-connected voltage-source converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 59, no 11, p. 4272-4284. DOI: 10.1109/TIE.2011.2179273
- [69] DO, Ton Duc, LEU, Viet Quoc, CHOI, Young-Sik, et al. An adaptive voltage control strategy of three-phase inverter for stand-alone distributed generation systems. *IEEE Transactions on industrial Electronics*, 2012, vol. 60, no 12, p. 5660-5672. DOI: 10.1109/TIE.2012.2230603
- [70] LEE, Kui-Jun, PARK, Byoung-Gun, KIM, Rae-Young, et al. Robust predictive current controller based on a disturbance estimator in a three-phase grid-connected inverter. *IEEE transactions on power electronics*, 2011, vol. 27, no 1, p. 276-283. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2157706
- [71] LIN, Faa-Jeng, LU, Kuang-Chin, et KE, Ting-Han. Probabilistic Wavelet Fuzzy Neural Network based reactive power control for grid-connected three-phase PV system during grid faults. *Renewable energy*, 2016, vol. 92, p. 437-449. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.036>
- [72] HASSAINE, Linda et BENGOURINA, Mohamed Rida. Design and control technique for single phase bipolar H-bridge inverter connected to the grid. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020, vol. 10, no 3, p. 3057. DOI: 10.11591/ijece.v10i3.pp3057-3065
- [73] MIRET, Jaume, CASTILLA, Miguel, MATAS, José, et al. Selective harmonic-compensation control for single-phase active power filter with high harmonic rejection. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2009, vol. 56, no 8, p. 3117-3127. DOI: 10.1109/TIE.2009.2024662
- [74] HUERTA, Francisco, PIZARRO, Daniel, COBRECES, Santiago, et al. LQG servo controller for the current control of Δ LCL Δ grid-connected voltage-source converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 59, no 11, p. 4272-4284. DOI: 10.1109/TIE.2011.2179273
- [75] BUSADA, Claudio, JORGE, S. Gómez, LEON, A. E., et al. Phase-locked loop-less current controller for grid-connected photovoltaic systems. *IET Renewable Power Generation*, 2012, vol. 6, no 6, p. 400-407. DOI: 10.1049/iet-rpg.2011.0333
- [76] YAO, Zhilei et XIAO, Lan. Control of single-phase grid-connected inverters with nonlinear loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 60, no 4, p. 1384-1389. DOI: 10.1109/TIE.2011.2174535
- [77] GUO, Qian, WANG, Jun, et MA, Hao. Frequency adaptive repetitive controller for grid-connected inverter with an all-pass infinite impulse response (IIR) filter. In : 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). IEEE, 2014. p. 491-496. DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864662
- [78] LIU, Tianqi et WANG, Danwei. Parallel structure fractional repetitive control for PWM inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, vol. 62, no 8, p. 5045-5054. DOI: 10.1109/TIE.2015.2402117