

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



جامعة العربي بن مهيدي أم البواقي

Université Larbi Ben M'Hidi

Oum El Bouaghi

Faculté des Sciences et Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique

Laboratoire de Génie Electrique et Automatique LGEA



Thèse de doctorat

**Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat troisième cycle
LMD**

En Electrotechnique

Option : Génie Electrique et Automatique

Présenté Par

Kaddour Hassen

THÈME

**Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie produite
par les onduleurs à injection réseau**

Soutenue le 19 /03 /2023

Devant le jury :

<i>Dr .Mouetsi Souheil</i>	Professeur	<i>Président</i>	<i>Université de Oum El Bouaghi</i>
<i>Dr .Abderrahmane DIB</i>	Professeur	<i>Directeur de thèse</i>	<i>Université de Oum El Bouaghi</i>
<i>Dr .Boudjerda Nacer Eddine</i>	Professeur	<i>Examineur</i>	<i>Université de Djijel</i>
<i>Dr .Betka Achour</i>	Professeur	<i>Examineur</i>	<i>Université de Biskra</i>
<i>Dr .Charrouf Omar</i>	MCA	<i>Examineur</i>	<i>Université de Biskra</i>

DEDICACE

Je dédie ce travail en témoignage de mon grand respect et de mon estime envers mon très cher père, Ammar, ainsi qu'à ma très chère mère et à mes frères. Je leur suis reconnaissant pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études. Que Dieu vous préserve en santé et vous accorde une longue vie.

Remerciement

Je remercie ALLAH pour toutes les bénédictions qu'il nous a accordées pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements particuliers à mon conseiller académique, le professeur Dib Abderrahmane, qui m'a soutenu à travers la liberté intellectuelle, m'a aidé à assister à diverses conférences, ce qui m'a permis de m'engager avec de nouvelles conceptions.

Je dois dire que je suis très reconnaissant envers les membres de mon comité de jury et les remercie vivement pour l'intérêt qu'ils portent à mon travail.

Je remercie aussi, mes parents pour tous leurs sacrifices pour mon éducation, et mes amis pour leur soutien, qui m'a aidé à travailler dans de meilleures conditions.

Je suis également redevable à tout le personnel du laboratoire LGEA pour leurs aides, leur disponibilité et leur gentillesse.

Kaddour Hassen

Résumé :

Cette thèse porte sur la recherche de moyens modernes pour la dépollution harmonique du réseau de distribution d'énergie électrique, basés sur l'électronique de puissance. Cette pollution est un problème majeur dans l'industrie, principalement causée par des charges non linéaires qui perturbent le réseau. Les convertisseurs statiques, notamment les redresseurs à diodes et à thyristors, sont la principale source de courants harmoniques injectés dans le réseau, et nécessitent une attention particulière pour réduire leurs niveaux d'harmoniques de courant. Ce travail présente une nouvelle table de commutation pour le filtrage actif, développée à partir de la topologie APF et de l'analyse de son circuit électrique. Les variations instantanées de puissance active et réactive du réseau sont obtenues. La table de commutation est utilisée dans chaque secteur pour déterminer les moments spécifiques de commutation afin d'assurer un contrôle optimal en fonction des signaux d'entrée numériques. En outre, les commandes directes de puissance (DPC) et de puissance avec modulation vectorielle (DPC-SVM) ont été étudiées, mettant en évidence leurs avantages et inconvénients respectifs. La commande DPC-SVM a démontré une grande efficacité dans le contrôle du système. De plus, l'utilisation d'une puissance réactive étendue plutôt que la puissance réactive habituellement utilisée dans la DPC-SVM conventionnelle permet à la puissance de suivre précisément sa référence. Les résultats de la simulation ont confirmé que la DPC-SVM avec le convertisseur DC-DC permettait de réduire les pertes, d'augmenter la tension de sortie avec une meilleure stabilité et une tension bien supérieure à celle du convertisseur élévateur conventionnel, tout en présentant de meilleures caractéristiques d'ondulation en entrée et en sortie. De plus, le THD, la puissance réactive et la puissance active ont été améliorés grâce à l'utilisation de la puissance réactive étendue. Le système a été simulé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

ملخص:

تتناول هذه الرسالة البحث عن وسائل حديثة لإزالة التلوث التوافقي لشبكة توزيع الطاقة الكهربائية، بالاعتماد على إلكترونيات الطاقة. يعد هذا التلوث مشكلة رئيسية في الصناعة، ناتجة بشكل رئيسي عن الأحمال غير الخطية التي تزجج الشبكة. المحولات الثابتة، وخاصة مقومات الصمام الثنائي والتايرستور، هي المصدر الرئيسي للتيارات التوافقية المحقونة في الشبكة، وتتطلب اهتمامًا خاصًا لتقليل مستوياتها التوافقية الحالية. يقدم هذا العمل جدول تبديل جديد للترشيح النشط، تم تطويره من طوبولوجيا APF وتحليل دائرته الكهربائية. يتم الحصول على الاختلافات الفورية للقوة النشطة والمتفاعلة للشبكة. يتم استخدام جدول التبديل في كل قطاع لتحديد أوقات التحويل المحددة لضمان التحكم الأمثل بناءً على إشارات الإدخال الرقمية. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة التحكم المباشر في القدرة (DPC) والتحكم المباشر في القدرة مع تعديل المتجه (DPC-SVM)، مع إبراز مزايا وعيوب كل منهما. أظهر الأمر DPC-SVM كفاءة كبيرة في التحكم في النظام. بالإضافة إلى ذلك، فإن استخدام الطاقة التفاعلية الممتدة بدلاً من الطاقة التفاعلية المستخدمة عادةً في DPC-SVM التقليدي يسمح للقوة بإتباع مرجعها بدقة. أكدت نتائج المحاكاة أن DPC-SVM مع محول DC-DC يمكن أن يقلل الخسائر، ويزيد جهد الخرج بثبات أفضل وجهد أعلى بكثير من محول التعزيز التقليدي، مع إظهار خصائص تموج الإدخال والإخراج أفضل. بالإضافة إلى ذلك، تم تحسين THD والإستطاعة التفاعلية والإستطاعة النشطة من خلال استخدام الطاقة التفاعلية الممتدة. تمت محاكاة النظام باستخدام برنامج لمحاكاة Matlab/Simulink.

Abstract:

This thesis deals with the search for modern means for the harmonic depollution of the electrical energy distribution network, based on power electronics. This pollution is a major problem in industry, mainly caused by non-linear loads that disturb the network. Static converters, in particular diode and thyristor rectifiers, are the main source of harmonic currents injected into the network, and require special attention to reduce their current harmonic levels. This work presents a new switching table for active filtering, developed from the APF topology and the analysis of its electrical circuit. The instantaneous variations of active and reactive power of the network are obtained. The switching table is used in each sector to determine specific switching times to ensure optimum control based on digital input signals. In addition, direct power control (DPC) and direct power control with space vector modulation (DPC-SVM) have been studied, highlighting their respective advantages and disadvantages. The DPC-SVM command has demonstrated great efficiency in controlling the system. Additionally, the use of extended reactive power rather than the reactive power usually used in conventional DPC-SVM allows the power to precisely follow its reference. The simulation results confirmed that the DPC-SVM with the DC-DC converter can reduce losses, increase the output voltage with better stability and much higher voltage than the conventional boost converter, while exhibiting better input and output ripple characteristics. In addition, the THD, reactive power and active power have been improved through the use of extended reactive power. The system was simulated using Matlab/Simulink software.

Liste des Acronymes

MPPT	Maximum Power Point Tracking
MPP	Maximum Power Point
PI	Proportional-Integral
PLL	Phase-Locked Loop
PWM	Pulse-Width Modulation
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
THD	Le Taux de Distorsion Harmonique
FAP	Filtre Actif Parallèle
VSI	Voltage-Source Inverter
FAS	Filtre Actif Série
DPC-SVM	Direct power control with Space Vector Modulation
FAH	Filtre Actif Hybride
SVM	Space Vector Modulation
DPC	Direct power control
P&O	Perturb and Observe
PV	Photovoltaïque

Liste des Symboles

i_d, i_q	Composantes des courants dans le repère tournant dq (A)
C_{dc}	Condensateur de filtrage (F)
R_L	Charge résistive (ohms)
T_s	Temps d'échantillonnage (s)
U	Valeur efficace de la tension composée du réseau (V)
d, q	Repère tournant de Park
$\Delta P, \Delta q$	Variation de la puissance active (W) et réactive (Var)
L_s, R_s	Inductance (H) et résistance(ohms) de la source
V_{dc}	Tension du bus continu (V)
$V_{dc_réf}$	Tension de référence du bus continu (V)
P_{ref}, Q_{ref}	Référence de la puissance active(W) et réactive (Var)
H_p, H_q	Largeurs de la bande d'hystérésis
I_{PVs}	Courant à la sortie du hacheur parallèle(A)
V_{mpp}	Tension du point de puissance maximale (V)
$S1$	Commutation
ΔI_{1N}	Courant d'ondulation (A)
V_{C1} et V_{C2}	Tension du condensateur (V)
I_o	Courant de sortie (A)
V_o	Tension de sortie (V)
QEE	La qualité de l'énergie électrique
V_{PV}	Tension du générateur photovoltaïque (V)
I_{PV}	Courant du générateur photovoltaïque (A)
S_a, S_b, S_c	Eat de commutation
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants de source (A)
e_{sa}, e_{sb}, e_{sc}	Tensions de source (V)
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Tensions au point de connexion commun (PCC)
i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}	Courants à la sortie du filtre(A)
$i_{cha}, i_{chb}, i_{chc}$	Courants de charge(A)

K_p	Gain proportional
K_i	Gain integral
P_{ref}	Puissance active de référence(W)
Q_{ref}	Puissance réactive de référence (VAR)
V_{dc}, V_{dcref}	V_{dc} réel et référence V_{dc} (V)
ω_n	Fréquence naturelle (rad/s)

Table des Matières

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	<i>1</i>
------------------------------	----------

CHAPITRE I: QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

I.1. Introduction	4
I.2. Problématique des harmoniques.....	5
I.2.1. Origine des harmoniques.....	5
I.3. Les causes de la pollution harmonique.....	6
I.4. Les critères de qualité d'un réseau.....	7
I.5. Inconvénients de l'aménagement des installations électriques.....	8
I.5.1 Détérioration de la valeur du facteur de puissance	8
I.5.2 Valeur de courant neutre élevée.....	9
I.6. Type des harmoniques.....	9
I.6.1. Caractérisations des harmoniques.....	10
I.7. Perturbations électromagnétiques et leurs origines.....	17
I.7.1. Creux et coupures de tension.....	19
I.7.2. Fluctuations de tension.....	20
I.7.3. Déséquilibre du système triphasé de tension.....	20
I.7.4. Variation de fréquence.....	21
I.7.5. Interruption courte ou coupure brève.....	22
I.8. Solutions de dépollution des réseaux électriques.....	22
I.9. Les onduleurs	30
I.10. Les différents types d'onduleurs réseau	31
I.11. Application sur système photovoltaïque.....	33
I.11.1 Techniques de commande MPPT.....	33
I.12. Conclusion.....	37

CHAPITRE II

LA COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE (DPC)

II.1. Introduction.....	38
II.2. La technique DPC.....	38
II.3. Principe de la commande DPC	39
II.4. Calcul des puissances instantanées.....	39
II.4.1. Contrôleur à hystérésis.....	40
II.4.2. La position angulaire θ_n	41
II.4.3. La table de commutation.....	41
II.4.4. Régulation de la tension continue.....	43
II.5. Résultats de simulation sous Matlab-Simulink.....	44
II.6. DPC avec de nouvelles tables de commutation.....	47

II.6.1. Étude des variations des puissances instantanées	48
II.6.2. Développement de la nouvelle table de commutation.....	49
II.6.3. Les Résultats de la simulation.....	51
II. 7. Conclusion.....	54

CHAPITRE III :

la Commande Directe de Puissance (DPC) et DPC-SVM

III.1. Introduction.....	55
III.2. Etat de l'art de la technique DPC.....	56
III.3. La Commande directe de puissance.....	56
III.4. Résultats de simulation sous Matlab-Simulink.....	58
III.5. Commande direct de puissance avec modulation vectorielle DPC-SVM.....	62
III.6. Principe de la commande DPC-SVM.....	62
III.7. Résultats de simulation.....	65
III.8. Etude comparative	68
III.9. Conclusion.....	70

CHAPITRE IV: APPROCHES D'AMELIORATION DE LA COMMANDE DPC

IV.1. Introduction.....	72
IV.2. Principe du système.....	73
IV.2.1 Conception du circuit.....	75
IV.2.1.1. Ondulation du courant d'entrée.....	77
IV.2.1.2. Ondulation de la tension de sortie.....	78
IV.3. Stratégie de la commande DPC-SVM	79
IV.4. Résultats de la simulation.....	82
IV.5. Le système avec une variation d'éclairement solaire.....	84
IV.6. Conclusion.....	88
IV.7. Conclusion générale.....	91

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

94

Listes des figures
Chapitre I : Qualité d’Energie Electrique

Figure (I.1)	Fondamentale et harmoniques d'un signal déformé.....	06
Figure (I.2)	Caractéristiques certains générateurs d’harmoniques.....	07
Figure (I.3)	Spectre de courant des charges.	07
Figure (I.4)	La figure (a) le courant absorbé par une ampoule et (b) le courant neutre de trois ampoules couplées en étoile.....	09
Figure (I.5)	Diagramme de Fresnel des puissances.....	12
Figure (I.6)	Les différents niveaux de perturbations.....	12
Figure (I.7)	Creux et coupures de tension.....	19
Figure (I.8)	Fluctuations de tension.....	20
Figure (I.9)	Déséquilibre du système triphasé de tension.....	20
Figure (I.10)	(a) Variation de fréquence et (b) les harmoniques.....	22
Figure (I.11)	Filtre actif parallèle.....	25
Figure (I.12)	Courant pollué, courant harmonique et courant filtré.....	26
Figure (I.13)	Filtre actif série.....	28
Figure (I.14)	Filtre combiné parallèle – série actifs	29
Figure (I.15)	Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.....	29
Figure (I.16)	Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.	30
Figure (I.17)	Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	30
Figure (I.18)	Algorithme de recherche du PPM.....	33
Figure (I.19)	Caractéristique puissance-tension du panneau PV.....	34
Figure (I.20)	Organigramme de la technique P&O.....	35
Figure (I.21)	Les effets de la température sur I(V) et P(V) à (G = 1000 W/m ²)	36
Figure (I.22)	Les effets de l'éclairement sur I(V) et P(V) à (T=25°C).T=25°C.	36

Chapitre II : la Commande Directe de Puissance (DPC)

Figure (II.1)	Etude de simulation du (DPC).....	39
----------------------	-----------------------------------	----

Figure (II.2)	principe de la commande d'hystérésis à deux niveaux.....	40
Figure (II.3)	Représentation du polygone de commutation et de vecteur tension de référence	41
Figure (II.4)	Principe de DPC.....	42
Figure (II.5)	Régulation de la tension continue avec un régulateur PI.....	43
Figure (II.6)	Tension de source (a), courant de charge (b), courant de source (c) et courant de filtre avant et après l'application du filtre a t=1.5s	45
Figure (II.7)	Tension V_{dc} (e) la puissance P (f), q (g) avant et après l'application du filtre à t=1.5s.....	45
Figure (II.8)	Courant de source avant (a) et après (b) l'application du filtre	46
Figure (II.9)	Secteur (a) et position angulaire (b).....	46
Figure (II.10)	Régulateur PI avec une compensation anti-windup.....	48
Figure (II.11)	Schéma électrique équivalent du SAPF connecté à une charge non linéaire alimentée par une source alternative.....	48
Figure (II.12)	Changements de comportement des variations de puissances actives et réactives en fonction des vecteurs VSI pour différents secteurs.....	50
Figure (II.13)	Courant de charge I_c	51
Figure (II.14)	Courant de source I_s	52
Figure (II.15)	Courant du filtre I_f	52
Figure (II.16)	La tension du bus continu V_{dc} avant et après l'application du filtre à t=1.5s	53
Figure (II.17)	La Puissance active P.....	53
Figure (II.18)	La Puissance réactive q avant et après l'application du filtre à t=1.5s	53
Figure (II.19)	Analyse spectacle avant (a) et après (b) nouvelle table de commutation.	54

Chapitre III : la Commande Directe de Puissance (DPC) et Commande direct de puissance avec modulation vectorielle DPC-SVM

Figure (III.1)	Etude de simulation du DPC.....	57
Figure (III.2)	Tension et courant de ligne.....	60
Figure (III.3)	Puissance active.....	60

Figure (III.4)	Puissance réactive.....	60
Figure (III.5)	Puissance active et réactive.	60
Figure (III.6)	Analyse spectacle du courant de source.....	61
Figure (III.7)	Secteur (a) et position angulaire (b).....	61
Figure (III.8)	Tension du bus continu.....	61
Figure (III.9)	Contrôle direct de puissance avec modulation vectorielle (DPC-SVM).....	62
Figure (III.10)	Diagramme vectoriel de la tension réseau	63
Figure (III.11)	Schéma synoptique des boucles de p et	64
Figure (III.12)	Schéma synoptique des boucles de p et q.....	64
Figure (III.13)	Tension et courant de line.....	66
Figure (III.14)	Résultats de simulation de la Puissance active.....	66
Figure (III.15)	Résultats de simulation de la Puissance réactive.....	66
Figure (III.16)	La Puissance active et réactive.....	66
Figure (III.17)	Analyse spectacle du courant de source.....	67
Figure (III.18)	Secteur (a) et la position angulaire (b).....	67
Figure (III.19)	Résultant des commandes DPC (a), DPC-SVM (b).....	69
Figure (III.20)	Analyse spectacle pour les commandes DPC (a), DPC-SVM (b).....	69

Chapitre IV : Amélioration de la Commande DPC

Figure (IV.1)	Schéma de principe d'un réseau triphasé.....	74
Figure (IV.2)	DC-DC converter circuit.....	74
Figure (IV.3)	Circuit dans le cas "1".....	75
Figure (IV.4)	Circuit dans le cas "0".....	76
Figure (IV.5)	Schéma de la nouvelle tension du circuit.....	78
Figure (IV.6)	DPC avec modulation vectorielle spatiale (DPC-SVM).....	79
Figure (IV.7)	Schéma fonctionnel des boucles de p et q	81
Figure (IV.8)	Régulateur de puissance active.....	81
Figure (IV.9)	Courant et tension du réseau	83
Figure (IV.10)	Puissance active et réactive	83

Figure (IV.11)	Spectre harmonique du courant de ligne (THD = 1,7%).....	83
Figure (IV.12)	Spectre harmonique du courant de ligne (THD = (1,02%).....	84
Figure (IV.13)	Profil d'éclairement solaire.....	85
Figure (IV.14)	Caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire sous un changement d'éclairement.....	85
Figure (IV.15)	La tension et le courant de source.....	86
Figure (IV.16)	Résultats de simulation de la Puissance active.....	86
Figure (IV.17)	Résultats de simulation de la Puissance réactive instantanée.....	86
Figure (IV.18)	Résultats de simulation de la Puissance active et réactive	86
Figure (IV.19)	Spectre harmonique du courant de ligne (THD)	87

Liste des tableaux

Tableau (I.1)	Les normes à compatibilité électromagnétique (CEM).....	12
Tableau (I.2)	Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).....	14
Tableau (I.3)	Caractéristiques des différentes perturbations (origines et formes d'ondes).....	18
Tableau (I.4)	Caractéristiques électriques typiques du module EP156P-72-320W...	35
Tableau (II.1)	Table de commutation.....	42
Tableau (II.2)	Paramètres du système DPC classique	44
Tableau (II.3)	Table de commutation proposée.....	50
Tableau (III.1)	Table de commutation (DPC).....	57
Tableau (III.2)	Paramètres du système (DPC).....	58
Tableau (III.3)	Paramètres du système (DPC/SVM)	65
Tableau (IV.1)	Paramètres du système	82

Introduction Générale

Introduction générale

L'exploitation des énergies renouvelables est de plus en plus utilisée. Cependant cela nécessite des onduleurs pour convertir l'énergie produite en énergie électrique conforme aux normes des réseaux électriques [1], néanmoins les onduleurs réseaux injectent des harmoniques, réduisent le facteur de puissance, provoquent des variations aléatoires de l'amplitude et de la fréquence [2]. Ces défauts ont un effet indésirable sur les équipements sensibles, tels que les ordinateurs, et autres appareils électroniques [3]. De nombreuses techniques ont été développées pour améliorer la qualité de l'énergie délivrée par les onduleurs réseaux. A savoir les filtres passifs, les filtres actifs, DPC, DPC-SVM, etc.

Ces études montrent que les filtres actifs et les filtres passifs sont peu efficaces contre les harmoniques et le facteur de puissance.

L'objectif de la thèse est de développer une stratégie basée sur le principe de commande directe de puissance (DPC) et (DPC-SVM) pour améliorer la qualité de l'énergie délivrée par les onduleurs réseaux [4]. Cela inclut la réduction du taux d'harmoniques (THD) au niveau requis par la norme et l'amélioration du facteur de puissance. Les résultats attendus sont principalement un taux THD inférieur ou égal à 5% et un facteur de puissance supérieur ou égal à 0,95 [5].

Pour limiter l'ampleur des harmoniques dans le système électrique, des normes internationales telles que l'IEEE-519 et l'IEC-61000 ont été introduites [4]. Ces normes proposent des recommandations afin de minimiser les distorsions de courant et de tension à un niveau tolérable.

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la qualité de l'énergie électrique délivrée par les onduleurs à injection réseau, notamment la réduction du taux d'harmonique (THD) à un niveau requis par les normes d'une part et d'améliorer le facteur de puissance de l'énergie injectée dans le réseau.

La méthodologie consiste à appliquer les stratégies du DPC et DPC-SVM pour améliorer la qualité de l'énergie délivrée par les onduleurs réseaux de manière de la mettre en conformité avec les normes NF. A savoir atteindre un taux de distorsion d'harmonique (THD) de 0,5% et un facteur de puissance de 0,9.

Cette approche est une contribution qui vise à remplacer les méthodes classiques basées sur les filtres actifs et passifs par des nouvelles techniques basées sur les DPC et leurs variantes.

L'impact scientifique de cette thèse réside dans l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement et la conception des onduleurs de nouvelle génération pour les réseaux électriques. Cette recherche contribue à l'avancement des connaissances dans ce domaine spécifique.

L'impact technologique est également significatif, car elle ouvre la voie à la conception et à la mise en œuvre de nouveaux onduleurs pour les réseaux électriques, permettant ainsi des avancées technologiques et des améliorations dans la performance et l'efficacité des systèmes de conversion d'énergie.

La démarche à suivre pour atteindre l'objectif comprend les étapes suivantes :

Chapitre 1: Etude des différentes techniques de filtrage des harmoniques et l'amélioration du facteur de puissance des onduleurs réseaux.

Chapitre 2: Modélisation de la stratégie de la commande directe de puissance (DPC)

Chapitre 3 : Modélisation de la stratégie de la commande directe de puissance avec modulation vectorielle (DPC-SVM) appliquée pour la réduction des harmoniques et l'amélioration du facteur de puissance.

Chapitre 4 : Elaboration d'une nouvelle approche pour l'amélioration de la stratégie (DPC-SVM). Une comparaison des résultats est faite avec la stratégie basée sur les filtres actifs et passifs.

Finalement, ce travail sera clôturé par une conclusion générale qui résumera l'ensemble des résultats obtenus et proposera les perspectives pour la continuité dans les travaux du futur.

CHAPITRE I :

Qualité d'Énergie Électrique

I.1. Introduction

L'énergie électrique est devenue une source d'attention et de demande dans tous les domaines, en particulier en raison de l'épuisement des ressources naturelles. De ce fait, les sources d'énergie renouvelable comme le soleil sont de plus en plus utilisées pour produire de l'énergie propre [6].

Plusieurs phénomènes peuvent influencer la tension électrique, notamment les variations lentes telles que les coupures, les surtensions, les creux de tension et les déséquilibres.

La qualité des courants joue un rôle crucial dans l'efficacité du système de puissance. Si le courant ne présente pas d'harmonique, le système de puissance fonctionne proprement et sans défaillance, ce qui contribue à améliorer son efficacité. En revanche, si des harmoniques sont présents dans le courant, cela peut entraîner des perturbations dans le système de puissance, réduisant ainsi son efficacité. Par conséquent, la qualité des courants est un aspect important à prendre en compte dans la conception et l'exploitation des systèmes de puissance [7].

Les paramètres d'un système de tension sinusoïdale triphasée sont : l'amplitude, la forme d'onde et la fréquence.

La détérioration d'un des paramètres entraîne la présence d'une pollution dans le réseau électrique [8].

Ces perturbations sont classées en fonction de la durée du phénomène comme suit :

- Les changements dans l'onde de tension durent de quelques minutes à quelques jours ou sont permanents.
- Les surtensions transitoires durent généralement de la moitié à une période [9].
- Coupures brèves et creux de tension cela dure quelques secondes.

Dans ce chapitre, les facteurs qui affectent négativement la qualité de l'énergie dans le réseau sont étudiés.

- Des solutions sont également à l'étude pour se débarrasser des problèmes du réseau à l'aide d'un filtre.
- Les types de filtres et les avantages et inconvénients de chaque filtre sont étudiés.

I.2. Problématique des harmoniques :

Le problème des harmoniques est un phénomène ancien, principalement dû à l'augmentation considérable du nombre de charges non linéaires connectées au réseau. Cela entraîne des distorsions dans le courant ainsi que des distorsions dans la tension, provoquées par l'augmentation des harmoniques. Ce problème est devenu l'un des défis majeurs pour les chercheurs, malgré le développement des connaissances. Il nuit aux appareils connectés au réseau, c'est pourquoi il est essentiel de minimiser ou d'éliminer ces harmoniques [10].

Le réseau électrique est une source d'alimentation qui fournit de l'électricité aux charges connectées. Cependant, lorsque ces charges absorbent des courants non sinusoïdaux, cela peut entraîner un déséquilibre de la tension du réseau, ce qui peut perturber le fonctionnement de certains équipements électriques [11].

Les harmoniques de courant sont créées par les charges non linéaires. Les harmoniques ont un effet sur le réseau électrique en altérant la forme de l'onde électrique à différents points du réseau et en modifiant les impédances du réseau. Lorsqu'un déséquilibre de tension se produit dans le réseau, cela peut être le signe de la présence d'harmoniques de courant [12].

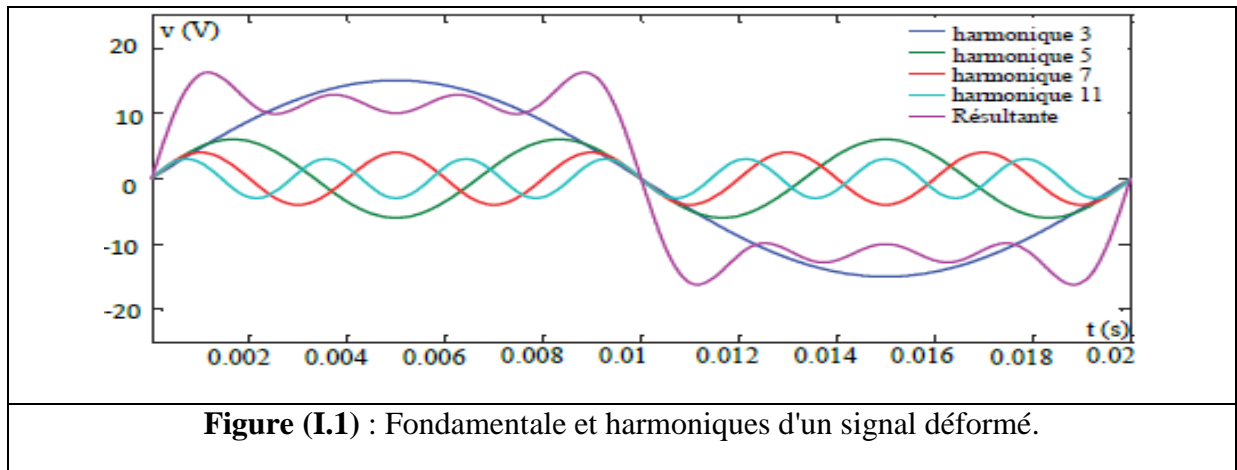
I.2.1. Origine des harmoniques :

Les charges non linéaires sont responsables de la création des harmoniques en absorbant des courants non sinusoïdaux.

Une harmonique est un signal ou une onde dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence d'un signal ou d'une onde de référence. Le terme peut également désigner le rapport entre la fréquence d'un tel signal ou onde et la fréquence du signal ou de l'onde de référence.

Les tensions harmoniques sont des signaux exprimés sous forme de série de Fourier. Les harmoniques sont à l'origine de perturbations dans le réseau de distribution, ce qui peut affecter d'autres clients.

Les harmoniques sont un ensemble d'ondes périodiques qui sont des multiples entiers de l'onde fondamentale, mais avec des fréquences et des amplitudes différentes. Lorsque ces ondes périodiques sont additionnées, elles génèrent une onde déformée. La figure (I.1) montre les harmoniques d'ordre impair, résultant de l'addition des composantes basiques à la fréquence de 50 Hz [13].



I.3. Les causes de la pollution harmonique

Dans le cas d'une installation raccordée au réseau de distribution électrique, une tension d'alimentation sinusoïdale est généralement présente. La principale cause de la création de pollution harmonique réside dans les charges qui absorbent des courants non sinusoïdaux, ce qui entraîne des distorsions de la forme d'onde.

Dans le cas d'une installation connectée à une source d'alimentation autonome, les charges non linéaires sont responsables de la création de pollution harmonique [14]. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser des techniques de décontamination harmonique pour maintenir l'intégrité du réseau [15].

Les appareils équipés d'éléments de commutation sont la principale source de création de pollution harmonique (voir figure (I.2)).

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur / chargeur			28 %
Charge informatique			115 %

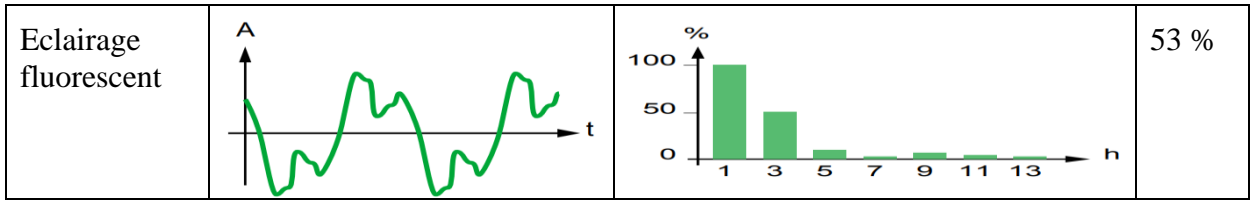


Figure (I.2) : Caractéristiques certains générateurs d'harmoniques [16].

I.4. Les critères de qualité d'un réseau

I.4.1 Indicateur de qualité d'un générateur

La tension de phase purement sinusoïdale est supposée lorsque l'installation est raccordée au réseau électrique : $v(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(2\pi f_1 t)$ avec $V_1 = 230 \text{ V}$; $f_1 = 50 \text{ Hz}$, qui est prise comme référence de phase.

Le courant de ligne, représenté par $i(t)$, est analysé en série de Fourier lorsque celui-ci n'est pas sinusoïdal.

$$i(t) = I_1 \sqrt{2} \sin(2\pi f_1 t - \varphi_1) + \dots + I_n \sqrt{2} \sin(2\pi f_n t - \varphi_n) + \dots \tag{I.1}$$

Le courant $i(t)$ s'écrit comme une somme dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale f_1 . Ils sont appelés composants harmoniques.

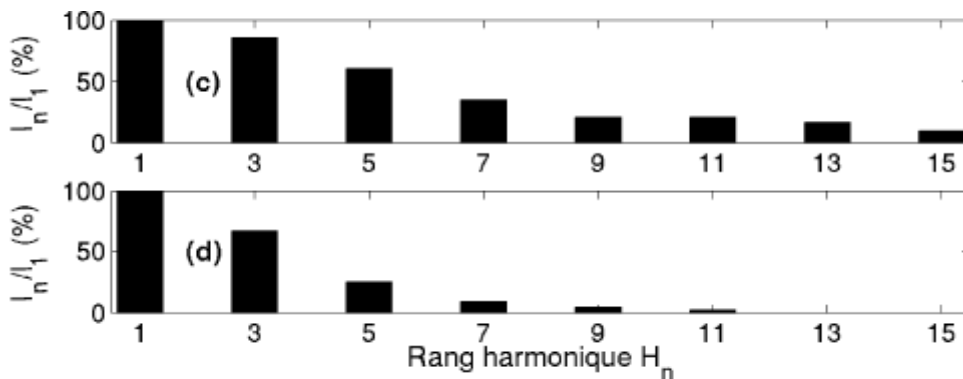


Figure (I.3): Spectre de courant des charges.

La figure (I.3 (c)) montre les harmoniques d'ordre (H3 à H5).

La figure (I.3 (d)) montre que chaque charge non linéaire a sa propre forme d'harmonique.

I.4.2 Valeur efficace d'une grandeur non sinusoïdale

La valeur efficace I de $i(t)$ est :

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_n^2 + \dots} \tag{I.2}$$

I_H : courant harmonique.

La valeur efficace de I_H inclut toutes les harmoniques autres que la fondamentale (H_1) et se calcule comme suit :

$$I_H = \sqrt{I^2 - I_1^2} \quad (I.3)$$

I.4.3 Les caractéristiques de qualité de l'énergie électrique

Le taux de distorsion harmonique actuel THDI% est une indication de la qualité de la forme d'onde.

$$THD I(\%) = 100 \times \frac{I_H}{I_1} \quad (I.4)$$

CEI 61000-3-2 est une norme sur l'émission basse tension pour les appareils avec une consommation de courant de 16A et une puissance supérieure à 75W et la norme CEI 61000-3-4 pour les appareils avec un courant supérieur à 75A [18].

Le THD V%, est une indication de la qualité de la forme d'onde de tension.

$$THD V(\%) = 100 \times \frac{V_H}{V_1} \quad (I.5)$$

Normes CEI 61000-2-2 et EN 50160 pour les réseaux publics BT qui fixent une limite supérieure pour les harmoniques.

Le taux d'utilisation du réseau est calculé par la relation suivante :

$$k = \frac{P}{S}$$

k : Facteur de puissance.

I.5. Inconvénients de l'aménagement des installations électriques

Parmi les conséquences des dommages aux installations électriques on cite :

I.5.1 Détérioration de la valeur du facteur de puissance

Parmi les facteurs affectant le facteur de puissance F_p , il y a l'énergie déformée qui provoque une augmentation de THDI% et cela est prouvé par l'équation suivante :

$$F_p = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD I\%}{100}\right)^2}} \quad (I.6)$$

Cette détérioration entraîne une augmentation de la section de phase et des conducteurs neutres.

I.5.2 Valeur de courant neutre élevée

Si les phases sont équilibrées avec des charges non linéaires, il existe alors un courant neutre important (Fig. I. 4-b) dont la valeur efficace est bien supérieure à celle du courant de phase (Fig. I.4-a). La cause de ce phénomène réside dans l'addition des harmoniques de multiples de 3 (H3, H9, H15, etc.) dans le conducteur neutre.

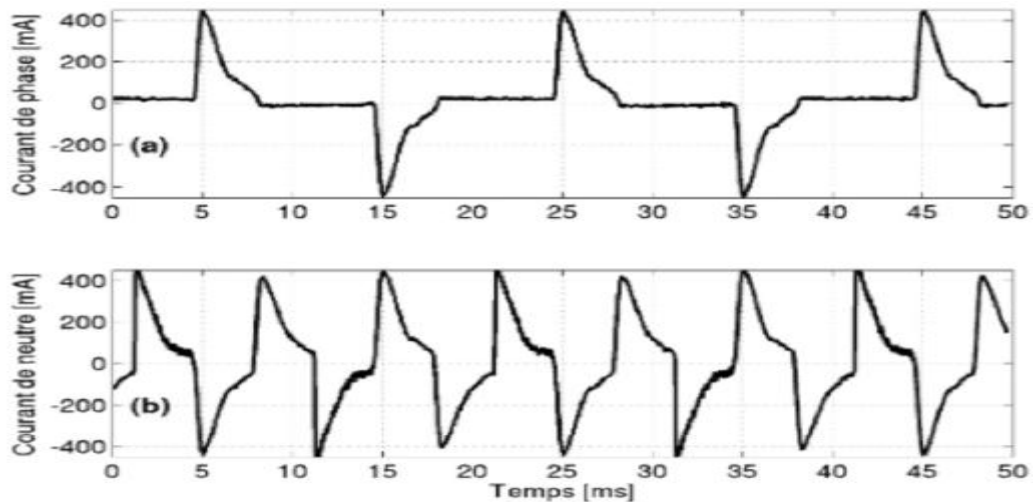


Figure (I.4): La figure (a) le courant absorbé par une ampoule et (b) le courant neutre de trois ampoules couplées en étoile [17].

I.6. Types des harmoniques :

Les tensions harmoniques sont responsables de perturbations dans le réseau de distribution. Ce sont des courants ou des tensions dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, mais avec des amplitudes différentes. Ces multiples correspondent aux multiples entiers de la fréquence fondamentale de 50 Hz [19].

La somme de la fréquence fondamentale et de l'harmonique peut être utilisée pour générer n'importe quelle forme d'onde périodique.

En plus des harmoniques impairs et pairs, il existe de nombreux autres types d'harmoniques.

- **Infra-harmoniques :**

Dans ce cas, les fréquences sont inférieures à la fréquence fondamentale. Les infra-harmoniques se situent donc avant la fréquence fondamentale dans le spectre harmonique. Par exemple, si la fréquence fondamentale est de 50 Hz, un infra-

harmonique pourrait être de 10 Hz ou 20 Hz, correspondant à des fréquences inférieures à la fréquence fondamentale.

▪ **Inter-harmoniques :**

Dans ce cas, les composantes sinusoïdales ont des fréquences qui ne sont pas des multiples exacts de la fréquence fondamentale, mais sont plus grandes que la fréquence fondamentale [20].

I.6.1. Caractérisations des harmoniques :

1. La distorsion harmonique totale (THD) :

Le THD du signal de courant est une mesure de la distorsion harmonique du courant. Il est défini comme le rapport de la puissance totale de toutes les composantes harmoniques à la puissance du courant à la fréquence fondamentale [21].

Le THD décrit la qualité du courant circulant dans le système étudié et l'énergie électrique associée. La distorsion harmonique totale peut être définie comme le rapport entre la racine carrée de la somme des carrés des harmoniques après l'harmonique fondamentale et la valeur efficace de cette dernière, comme indiqué ci-dessous [22] :

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} v_h^2}}{v_1} 100 \quad (I.7)$$

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2}}{i_1} 100 \quad (I.8)$$

2. La distorsion harmonique totale (THD) :

Le facteur de distorsion (F_d). L'expression de facteur de distorsion Comme suit [23].

$$F_d = \frac{i_1}{i_{eff}} \quad (I.9)$$

La valeur du courant est affectée par la distorsion harmonique. Lorsque le taux de distorsion harmonique est faible, le courant est proche d'une forme sinusoïdale. En revanche, lorsque le taux de distorsion harmonique est élevé, le courant présente une déformation importante.

3. Facteur de crête :

F_c Défini par ainsi :

$$F_c = \frac{\text{Valeur crete}}{\text{Valeur efficace}} \quad (\text{I.10})$$

Le rapport entre la valeur de crête du courant ou de la tension et ses valeurs efficaces est le facteur de crête [24].

Le facteur de crête est de 1,41 dans le cas du signe sinusoïdal.

Le facteur de crête est supérieur ou inférieur à 1,41 dans le cas d'un signe non sinusoïdal.

4. Facteur de Puissance :

Est égal à la puissance active P sur la puissance apparente S comme suit :

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (\text{I.11})$$

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (\text{I.12})$$

S : puissance apparente donné par la relation suivante :

$$S = V_{eff} \times I_{eff} \quad (\text{I.13})$$

$$S = V_{eff} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (\text{I.14})$$

Les puissances réactive et active données par :

$$P = 3 \cdot V \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (\text{I.15})$$

$$Q = 3 \cdot V \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (\text{I.16})$$

I_1 : Courant de phase.

L'énergie déformée (D) est calculée lorsqu'il y a des harmoniques. Elle est donnée par la relation suivante :

$$D = V_{eff} \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{\alpha} I_{In}^2} \quad (\text{I.17})$$

La puissance apparente S :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.18})$$

Le facteur (F_p) est exprimé par :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.19})$$

La présence d'harmoniques est l'un des facteurs qui contribuent à la diminution du facteur de puissance et à la consommation de puissance réactive, comme illustré dans l'équation (I.19). La Figure (I.5) présente le diagramme de Fresnel des puissances [25] :

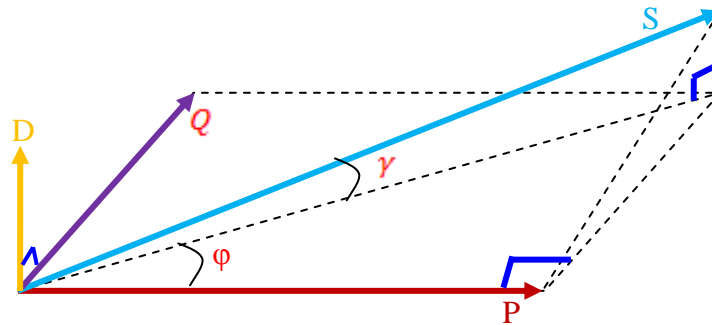


Figure (I.5): Diagramme de Fresnel des puissances [25].

5. Normes et recommandations :

En raison de l'utilisation croissante des appareils électriques et de l'augmentation du nombre d'usines, ceux-ci contribuent de manière significative à la création d'harmoniques. Cela entraîne des dommages aux appareils électroménagers et des perturbations dans le réseau. Afin d'assurer la qualité du réseau de distribution, la Commission électrotechnique internationale a établi des niveaux de courants harmoniques à ne pas dépasser. Cela nécessite la détermination des pourcentages de base des harmoniques. Par conséquent, il est de la responsabilité de tous les utilisateurs et distributeurs de respecter les normes et règles de compatibilité électromagnétique (CEM) [26, 27, 28].

Au niveau des pays	Les normes
Internationalement	IEC
Européen	CENELEC
Français	UTE et CEF.
nord-américain	IEEE 519

Tableau (I.1) : Les normes à compatibilité électromagnétique (CEM).

Afin de prévenir les perturbations électromagnétiques, il est essentiel de respecter les normes de compatibilité électromagnétique (CEM) en fonction de la capacité des équipements et des appareils. Les directives CEM s'appliquent à tous les appareils électriques et électroniques susceptibles d'être affectés par ces perturbations (CEI 60050-161).

Le graphique de la Figure (I.6) [29] présente l'emplacement des différentes définitions en fonction du niveau de perturbation.



Figure (I.6) : Les différents niveaux de perturbations [20].

6. Normes standards pour limiter les harmoniques :

Afin de minimiser les effets des perturbations harmoniques et d'assurer une bonne qualité de l'énergie électrique, il est essentiel que tous les consommateurs et distributeurs d'électricité se conforment aux normes harmoniques établies par les institutions internationales. Cela permet de réduire les niveaux actuels d'harmoniques et de garantir une meilleure qualité d'énergie. Les institutions internationales établissent des règles visant à limiter la propagation des niveaux harmoniques, qui constituent l'un des principaux critères de qualité de l'énergie [30] :

- **EN50 006 :** Normes européennes pour la réduction des perturbations du réseau (CENELEC) [31].
- **Norme IEC555-3**
- **Norme IEEE :** La norme IEEE spécifie les harmoniques dans les systèmes d'alimentation électrique.
- **La norme IEEE 519-1992 :** Cette norme stipule que la distorsion harmonique individuelle de tension doit être inférieure à 3%, et plus le rapport harmonique est bas, mieux c'est. De plus, la distorsion harmonique totale de tension doit être inférieure à 5%.
- **BSI-5406(UK) :** C'est une norme qui spécifie une valeur maximale de 5% pour la distorsion harmonique totale du courant (THD).
- **Norme internationale CEI 61000 :** La norme internationale IEC 61000 est une norme de compatibilité électromagnétique (CEM) qui vise à limiter les perturbations causées par les charges non linéaires et une utilisation incorrecte du réseau

électrique. Elle définit des critères et des limites pour réduire les niveaux d'harmoniques, qui peuvent avoir un impact négatif sur le réseau et les équipements électriques.

En raison de l'utilisation généralisée des appareils électriques dans tous les domaines, il existe un pourcentage élevé d'harmoniques, ce qui entraîne des problèmes tels que des dommages aux appareils électriques et des dysfonctionnements du réseau. Pour remédier à cela, la Commission électrotechnique internationale (CEI) a établi des normes concernant les tensions et les courants harmoniques.

Nous pouvons citer à titre d'exemple :

- **La norme CEI 61000-2-2** : La norme CEI 61000-2-2 a été établie dans le but de protéger les équipements connectés à un réseau basse tension déformé. Son objectif principal est de préserver ces équipements en définissant des critères pour les zones où la tension harmonique est déformée dans les réseaux basse tension.
- **La norme CEI 61000-3-2** : La norme est destinée aux appareils électroménagers dont le courant ne dépasse pas 10 A. Elle vise à réduire le nombre de courants injectés dans le réseau conformément à ses spécifications.

La tension harmonique est spécifiée par EDF (Électricité de France) pour les utilisateurs raccordés au réseau. Tous les clients d'EDF sont tenus de se conformer à ces spécifications. Cependant, malgré les normes existantes, il peut encore y avoir des imperfections et des limitations qui rendent difficile d'atteindre une pleine compatibilité électromagnétique sur les réseaux publics.

Parmi les recommandations identifiées par le EDF :

- Pour un ordre pair le THD_v à 0,6%.
- Pour un seul rang le THD_v à 1%.
- spécifiée le THD à 1 : 6%.

EDF a établi des conditions et des réglementations qui doivent être respectées par les deux parties impliquées (le fournisseur et le récepteur) dans ce qui est appelé un contrat EMERAUDE. Il est également de la responsabilité d'EDF de veiller à ce respect des normes.

Tableau (I.2) Norme CEI 61000-3-2 pour la limite de courant harmonique.

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
	Harmoniques impaires

3	2.3
5	1.14
7	0.77
9	0.4
11	0.33
13	0.21
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 * 15/h$
Harmoniques paires	
2	1.08
4	0.43
6	0.3
$8 \leq h \leq 40$	$0.23 * 8/h$

Tableau (I.2) : Norme CEI 61000-3-2 pour la limite de courant harmonique [32].

7. Conséquences néfastes des harmoniques :

Il existe deux types d'effets qui affectent les appareils électriques connectés à un réseau :

- **les effets quasi-instantanés :** sont causés par des changements rapides dans l'onde du réseau en raison de sa valeur de crête et du déplacement du point de passage par zéro. Ces perturbations sont principalement dues à la présence d'harmoniques dans le réseau. Certains types d'équipements sont connus pour provoquer ce type de perturbation.
- **les effets à terme :** La présence de ce type de perturbation peut entraîner la destruction d'équipements électriques, en particulier les appareils électroménagers, en raison d'une surcharge thermique excessive. Cela se manifeste principalement dans les machines à haute pression, où l'augmentation du niveau sonore est également observée, tels que les transformateurs et les condensateurs [33].

Effet des harmoniques sur certains équipements tels que :

- **Alternateurs :** Cela entraîne des pertes significatives sous forme d'une augmentation du courant absorbé, ce qui réduit la durée de vie et l'efficacité des machines et

équipements industriels. De plus, cela provoque une augmentation de la température de l'équipement.

- **Câbles électriques** : Les pertes Joule se produisent principalement dans les câbles de retour neutre en raison de la circulation de courant harmonique unipolaire, ce qui entraîne une augmentation de la température et une réduction de l'efficacité énergétique. De plus, la circulation de courant harmonique paire associée à la composante continue peut entraîner la corrosion des câbles en aluminium. En outre, la présence d'harmoniques dans le réseau limite la capacité de transmission des lignes actives [34].

La présence des harmoniques dans le réseau diminue aussi la capacité de transport en puissance active des lignes.

- **Transformateurs** : Cet équipement est sensible aux courants harmoniques, ce qui entraîne des pertes supplémentaires dans les enroulements. Ces pertes sont principalement causées par les composantes à haute fréquence du champ de fuite, qui perturbent le fonctionnement normal de l'équipement [35].
- **Moteurs à courant alternatif** : Lors du fonctionnement des machines électriques alternatives, des courants harmoniques se produisent, lesquels interagissent avec l'impédance du réseau, entraînant ainsi une distorsion de la forme d'onde de la tension du réseau [36].
- **Condensateurs** : Cet équipement est sensible aux courants harmoniques. Une des raisons de la détérioration des condensateurs est leur exposition à une tension excessive, ainsi que la mise en parallèle de condensateurs sur les réseaux, ce qui entraîne une réduction significative de leur durée de vie ou des problèmes d'isolement [37].
- **Equipements à base d'électronique de puissance** : Parmi les causes de perte de synchronisation et de présence d'harmoniques, on retrouve les défauts liés à la distorsion de tension.
- **Ordinateurs** : Dysfonctionnements de la tension du réseau dus à des perturbations de la tension.
- **Réseaux de télécommunication** : Un défaut se produit entre les lignes électriques et les circuits de communication électromagnétiques, ce qui rend une grande partie des réseaux de communication inutilisables [38].

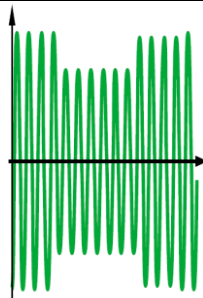
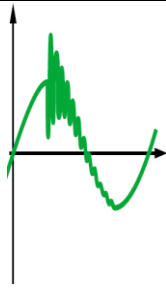
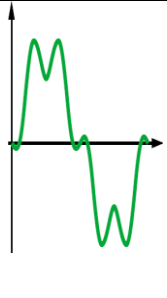
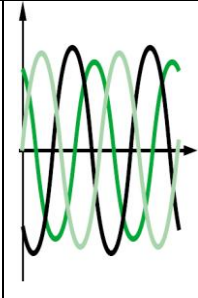
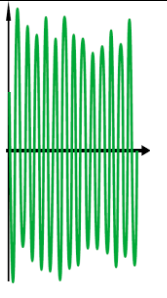
I.7. Perturbations électromagnétiques et leurs origines :

La qualité de l'énergie électrique est prise en compte lors de la mesure des perturbations électromagnétiques sur le réseau :

- Déséquilibres de tension.
- Surtensions temporaires
- Fluctuations de tension.
- Tension continue dans les réseaux alternatifs.
- Creux de tension et coupures
- Variations de la fréquence d'alimentation.
- Surtensions transitoires.
- Tensions de signalisation.
- Surtensions.
- Harmoniques, inter harmoniques.

Il n'est en général pas nécessaire de mesurer l'ensemble de ces perturbations.

Classification des perturbations en fonction de leur effet sur la fréquence, la forme d'onde, la symétrie de tension et l'amplitude. Ces caractéristiques peuvent également être modifiées individuellement, et il n'est pas nécessaire que toutes ces caractéristiques soient modifiées simultanément. Les perturbations peuvent également être classées en fonction de leur caractère aléatoire, comme indiqué dans le tableau (I.3) [39].

Perturbations	Creux de tension	Surtensions	Harmoniques	Déséquilibres	Fluctuations de tension
Formes d'onde Caractéristiques					
Origine de la perturbation					

Réseau					
Défaut d'isolement, rupture du conducteur de neutre...					
Manœuvres et Ferro résonance					
Foudre					
Equipements					
Moteur asynchrone					
Moteur synchrone					
Machine à souder					
Four à arc					
Convertisseur					
Charges informatiques					
Eclairage					
Onduleur					
Batterie de condensateurs					

: Phénomène occasionnel
 : Phénomène fréquent

Tableau (I.3) : Les différentes perturbations [16].

I.7.1. Creux et coupures de tension :

Parmi les causes d'une chute brutale de tension, on trouve l'utilisation de machines à haute fréquence et des phénomènes naturels tels que la foudre et les orages.

Le creux de tension se réfère à une chute de tension à une valeur comprise entre 10% et 90% de la tension nominale. Cela se produit généralement sur une courte période allant de 10

millisecondes à quelques secondes. Bien que la chute de tension puisse sembler de petite ampleur sur une courte durée, elle est néanmoins significative dans le contexte de l'électricité, et des calculs sont effectués pour en tenir compte [39].

Les coupures de tension se produisent lorsque la tension chute à 90% de sa valeur nominale (selon la norme IEEE) ou à 99% de sa valeur nominale (selon les normes IEC-CENELEC). Cela signifie qu'il y a une interruption totale de l'alimentation électrique pendant ces événements.

Parmi les causes de coupures brutales de tension, on trouve les intempéries telles que la foudre, les accidents de la circulation et les structures vieillissantes. Environ 98% de ces incidents surviennent sur les réseaux à haute tension (HT). Étant donné que la plupart des réseaux sont situés en milieu rural, ils sont plus vulnérables à de telles interruptions.

La tension de coupure correspond à une diminution de la tension nominale pouvant aller jusqu'à 90%. Contrairement aux creux de tension, qui durent entre 10 millisecondes et quelques secondes, Les coupures peuvent être de courte durée ou de longue durée (supérieure à une minute) par rapport à la tension nominale. Vous pouvez vous référer à la Figure (I.7) pour un exemple illustrant une chute de tension et une interruption [40].

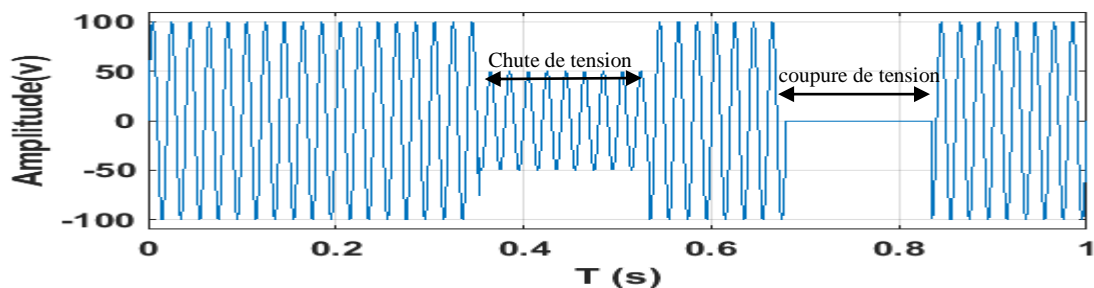


Figure (I.7) : Creux et coupures de tension.

I.7.2. Fluctuations de tension :

La principale raison de ce phénomène est l'utilisation d'appareils à haute puissance où la consommation d'énergie fluctue rapidement.

Les fluctuations de tension se produisent lorsque l'amplitude de la tension actuelle varie rapidement, généralement de l'ordre de 10 %, sur une période de quelques centièmes de seconde. Ces variations sont sporadiques et de courte durée, telles que le scintillement des lumières, où l'intensité lumineuse diminue ou les lampes s'éteignent brièvement. Ces variations de tension peuvent entraîner une chute de tension d'environ 1 %. Ceci est illustré dans la figure (I.8).

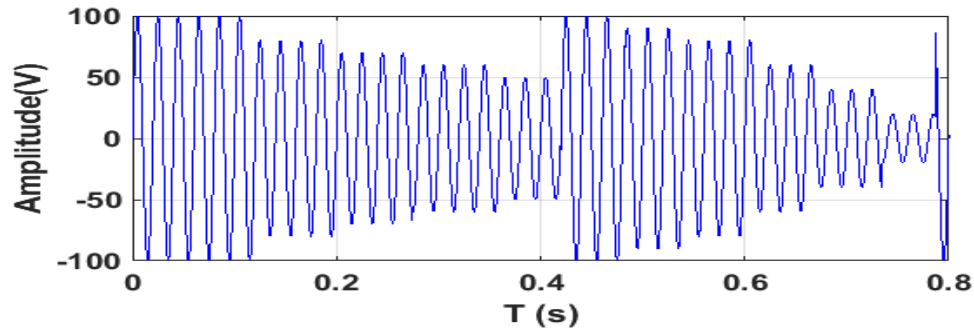


Figure (I.8) : Fluctuations de tension.

I.7.3. Déséquilibre du système triphasé de tension :

Un système déséquilibré a un impact sur les performances des moteurs triphasés et réduit leur durée de vie. L'équilibre des tensions est l'un des critères de qualité de l'énergie électrique. L'équilibre d'un système triphasé implique que deux conditions préalables soient remplies : les tensions triphasées doivent avoir la même amplitude et un déphasage de 120° les unes par rapport aux autres. Si aucune de ces conditions n'est satisfaite, le système est considéré comme déséquilibré, comme illustré dans la Figure (I.9) [41].

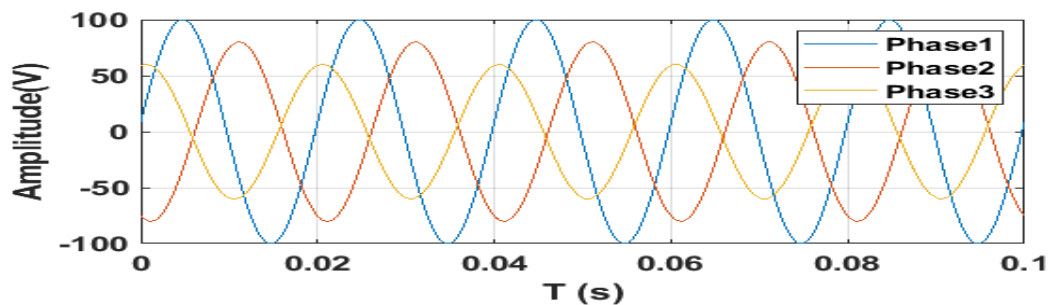


Figure (I.9) : Déséquilibre du système triphasé de tension.

Le degré de déséquilibre de courant d'un système triphasé est déterminé en utilisant la méthode des composants de Fortescue, qui compare la composante inverse (U_{1i}) de la composante primaire à la composante directe (U_{1d}) de la composante primaire.

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|} \text{ et } \Delta U_0 = \frac{|U_{10}|}{|U_{1d}|} \quad (\text{I.20})$$

L'approximation suivante peut également être utilisée :

$$\Delta U_i = \max_i \frac{V_i - V_{moy}}{V_{moy}} \quad (\text{I.21})$$

Avec V_i = tension de la phase i et

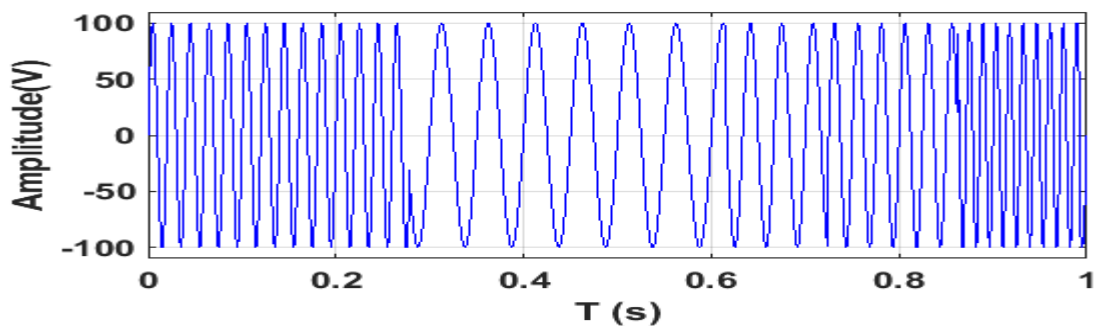
$$V_{\text{moy}} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \quad (\text{I.22})$$

Lorsque la tension chute le long des impédances du réseau, cela entraîne un courant inverse en raison des charges déséquilibrées, ce qui provoque des courants différents dans les trois phases.

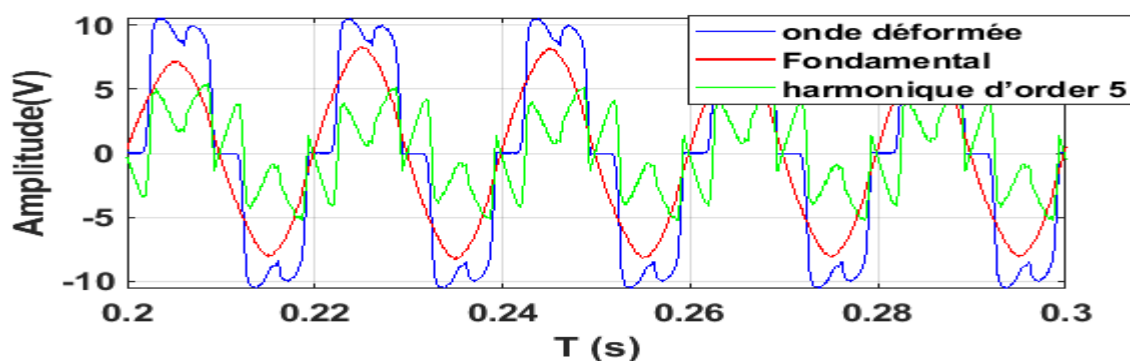
Les perturbations surviennent en raison de défauts monophasés ou biphasés jusqu'à ce que le système de protection entre en action.

I.7.4. Variation de fréquence :

Cet écart est très rare, sauf dans des circonstances exceptionnelles. Une différence significative de fréquence du réseau peut survenir, notamment en cas de source de chaleur indépendante. Il est nécessaire que la fréquence fondamentale dans le domaine temporel reste de $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$ dans des conditions de fonctionnement normales.



(a) Variation de fréquence.



(b) les harmoniques.

Figure (I.10) : (a) Variation de fréquence et (b) les harmoniques.

I.7.5. Interruption courte ou coupure brève :

Une courte interruption se produit lorsque la tension ou le courant de charge chute brusquement, et cette diminution se produit dans un laps de temps n'excédant pas 1 min [42].

Une coupure est la disparition de la tension d'alimentation pendant une durée allant de 0,5 cycle jusqu'à 3 secondes, parfois jusqu'à une perte totale. Une chute de tension de 100% de l'amplitude de tension est également appelée "séparation complète" ou "coupure totale"[43].

L'une des principales causes responsables des interruptions est une utilisation excessive ou incorrecte des dispositifs de protection [44].

En raison d'une protection inadéquate, des coupures de courant et des baisses de tension peuvent se produire. Les courts-circuits peuvent également causer des problèmes sur le réseau. L'augmentation de la charge sur le réseau peut entraîner une augmentation de la demande d'énergie électrique [42], ce qui peut accroître le nombre de courts-circuits, d'interruptions et de baisses de tension.

I.8. Solutions de dépollution des réseaux électriques [44]:

Il y a deux solutions traditionnelles et modernes qui sont :

I.8.1. Solutions traditionnelles de dépollution :

Pour éliminer la propagation des harmoniques dans le réseau, différentes solutions ont été proposées, notamment :

- Utilisation de dispositifs de filtrage : Pour réduire ou éliminer la propagation des harmoniques causées par des charges non linéaires, il est recommandé d'utiliser des dispositifs de filtrage. Ces dispositifs sont conçus pour atténuer les composantes harmoniques indésirables et maintenir la qualité de l'alimentation électrique.
- Utilisation de transformateurs spécifiques : Certains transformateurs sont conçus pour minimiser la pollution harmonique et réduire ainsi la distorsion harmonique. L'utilisation de ces transformateurs peut contribuer à réduire la propagation des harmoniques dans le réseau.
- Renforcement du réseau pour résoudre les problèmes de court-circuit : Une augmentation de la capacité du réseau peut aider à résoudre les problèmes de court-circuit. Cela implique de renforcer les éléments du réseau tels que les câbles, les

transformateurs et les disjoncteurs pour qu'ils puissent supporter des courants plus élevés sans provoquer de court-circuit.

Parmi ses inconvénients, on trouve le fait que le grand nombre de semi-conducteurs utilisés dans le système affecte négativement le réseau électrique. En ce qui concerne les filtres passifs, ils consistent à placer une impédance en parallèle avec le courant électrique, de sorte que la valeur de l'impédance soit élevée pour les fréquences du réseau.

Il existe plusieurs types de filtres couramment utilisés, tels que le filtre passif résonant et le filtre passif amorti ou passe-haut.

Cependant, malgré leur utilisation répandue, ces filtres présentent certains inconvénients, tels que le problème de résonance avec le réseau et la nécessité d'utiliser des équipements volumineux.

I.8.2. Solutions modernes de la dépollution :

Le but des filtres est de compenser les perturbations qui peuvent endommager les équipements électriques en réduisant les courants ou tensions indésirables. Les filtres agissent en filtrant les harmoniques, les fluctuations de tension ou les interférences présentes dans le réseau électrique, afin de maintenir des courants ou des tensions plus constants et de protéger les équipements électriques des effets néfastes.

La principale raison de la conception du filtre actif est due à l'émergence des composants semi-conducteurs et aux limites des solutions de dépollution conventionnelles.

Il existe trois topologies pour les filtres actifs :

- a) **Le filtre actif parallèle (FAP) :** Ce filtre vise principalement à compenser le déséquilibre, la puissance réactive et les harmoniques.
- b) **Le filtre actif série (FAS) :** Ce filtre est conçu pour compenser les perturbations de tension, notamment les déséquilibres et les harmoniques.
- c) **La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) :** Ce type de filtre est conçu pour compenser les perturbations à la fois de tension et de courant.
- d) **Combinaison hybride active et passive :** En combinant des filtres actifs de faible puissance et des filtres passifs, deux objectifs importants sont atteints. Le premier objectif est de réduire le coût des filtres actifs de sorte que leur prix soit plus

compétitif que lorsqu'ils sont utilisés individuellement. Le deuxième objectif est de réduire la taille des filtres actifs.

I.8.3. Filtres actifs :

Les équipements et installations électriques sont souvent sujets à des perturbations causées par des charges non linéaires et des harmoniques. Afin de compenser ces perturbations, l'utilisation de filtres est courante. Ces filtres permettent de générer des courants constants pour neutraliser les effets indésirables des perturbations.

La principale raison de la conception des filtres actifs réside dans l'émergence des composants semi-conducteurs ainsi que dans les limitations des solutions conventionnelles de dépollution.

Lorsqu'on compare les filtres passifs et les filtres actifs, on peut mettre en évidence certains avantages importants des filtres actifs. Parmi ces avantages, on peut citer :

- Les filtres actifs ont une plus grande capacité de filtrage.
- Rapidité, flexibilité, capacité à travailler dans des circonstances difficiles et à s'y adapter
- La taille des filtres actifs est également plus petite

Malgré tous ces avantages, les filtres actifs présentent également certains inconvénients qu'il convient de souligner. Parmi ces inconvénients, on peut citer le coût élevé de ces filtres, ce qui a limité leur disponibilité sur le marché. De plus, les filtres actifs peuvent entraîner des pertes d'énergie.

I.8.3.1 Filtre actif parallèle :

L'un des éléments clés du fonctionnement d'un filtre actif est l'inductance présente en sortie de l'onduleur [45]. Les filtres actifs sont utilisés pour compenser les charges polluantes dans le réseau, ainsi que dans les cas où les charges elles-mêmes génèrent des perturbations importantes. Dans ces situations, l'installation d'un filtre actif par charge est nécessaire pour éliminer les déséquilibres. Cependant, il convient de noter que le coût élevé de ces filtres peut limiter leur utilisation, et malgré cela, des problèmes peuvent survenir si des défauts se produisent dans le filtre actif, entraînant des perturbations sur le réseau.

Lorsqu'un filtre actif est connecté en parallèle au réseau électrique, il a la capacité d'absorber les courants polluants générés par les charges non linéaires et les harmoniques.

Ensuite, le filtre injecte des courants correcteurs dans le réseau, de manière à annuler les courants polluants. L'objectif est d'obtenir des courants sinusoïdaux de même amplitude et phase que le courant du réseau, ce qui contribue à améliorer la qualité de l'énergie électrique et à réduire les perturbations [46]. L'efficacité d'un filtre actif connecté au réseau pour contrer ces phénomènes indésirables est illustrée dans la figure (I.11).

Afin d'obtenir des courants sinusoïdaux du côté du réseau, équivalents aux courants absorbés par les charges polluées, un filtre actif parallèle (F.A.P) est utilisé. Cette configuration est illustrée dans la Figure (I.12). Le filtre actif parallèle a pour fonction de neutraliser les harmoniques et les déséquilibres générés par les charges polluantes, préservant ainsi le réseau et les équipements contre ces perturbations indésirables. Son utilisation permet d'améliorer la qualité de l'énergie électrique et de garantir un fonctionnement plus stable et fiable du système électrique.

La figure (I.11) présente le filtre actif parallèle, en deux parties : la partie contrôle-commande et la partie de puissance.

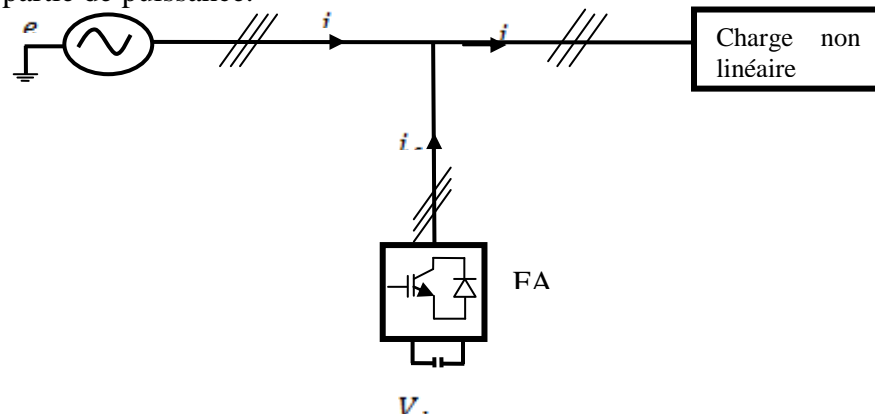


Figure (I.11) : Filtre actif parallèle.

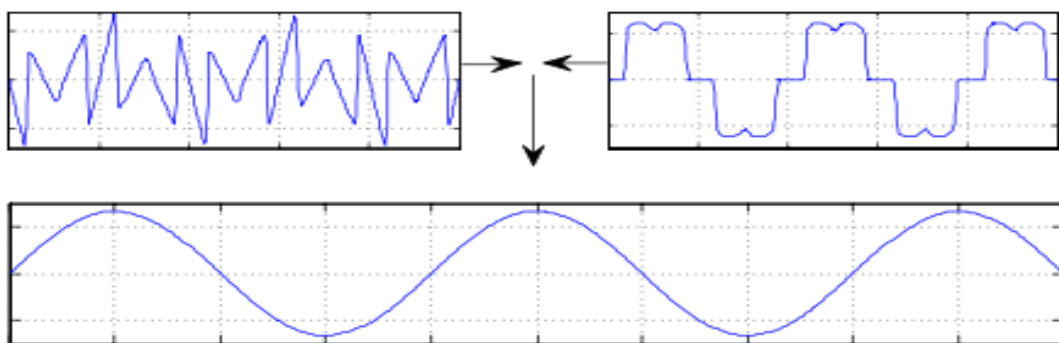


Figure (I.12): Courant pollué, courant harmonique et courant filtré.

La partie puissance se compose de :

- Le composant principal d'un onduleur de tension qui est chargé de contrôler les interrupteurs de puissance de sortie de l'onduleur
- Circuit d'entreposage d'énergie.
- Filtre de couplage.

Comprend une pièce de commande et de contrôle :

- Savoir trouver des courants harmoniques.
- Contrôle la tension actuelle que le système applique aux éléments de stockage d'énergie.
- Contrôle des courants injectés par l'onduleur tension dans le réseau
- Contrôle l'onduleur de tension.

❖ Applications des filtres actifs parallèles

La présence croissante de problèmes liés aux harmoniques dans les systèmes d'alimentation des services publics, industriels et de réseau a suscité un intérêt considérable pour les filtres de puissance active. Depuis les années 1970[47], de nombreux chercheurs se sont penchés sur les filtres actifs parallèles, et ces derniers ont été largement utilisés dans des applications pratiques. Ils se sont révélés particulièrement efficaces dans les réseaux présentant des charges polluantes répandues à grande échelle. Parmi les charges les plus significatives figurent les redresseurs à thyristors et les diodes, qui agissent comme des interfaces entre le réseau et la conversion du courant continu ou alternatif. Cette utilisation des filtres actifs parallèles permet de réduire les harmoniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique dans ces systèmes [48].

Les filtres actifs sont largement utilisés dans les réseaux à courant continu haute tension et dans diverses applications industrielles. Leur utilisation est particulièrement pertinente dans les zones où il y a une présence importante de charges non linéaires, qui peuvent générer des harmoniques et perturber la qualité de l'énergie électrique. Les filtres actifs jouent un rôle essentiel pour atténuer ces perturbations et garantir un fonctionnement optimal du réseau et des équipements électriques. Enfin, le filtrage actif est utilisé dans les applications tertiaires notamment dans les bâtiments universitaires, les hôpitaux, etc. Là où il y a beaucoup de charges polluantes [49].

Parmi les fonctions des filtres actifs figurent :

- Compensation de courant harmonique
- Compensation des courants réactifs.
- Compenser les déséquilibres des charges.

Les filtres actifs améliorent le F_p , éliminent les harmoniques de courants et équilibrent les charges triphasées.

L'un des avantages des filtres actifs est qu'ils entretiennent les équipements, ce qui augmente leur durée de vie et réduit les coûts d'exploitation.

❖ Classement des filtres actifs parallèles

Les filtres parallèles actifs classés par la topologie, nombre de phases et technologie d'onduleur :

- Les filtres actifs dépendent de l'onduleur de tension ou du commutateur de courant.
- Filtres actifs triphasés ou monophasés.
- Filtres actifs avec connexion neutre ou sans lui.

Les filtres actifs triphasés sont les filtres les plus utilisés dans tous les domaines industriels. Bien que les filtres actifs monophasés aient été étudiés par de nombreux chercheurs, les filtres actifs triphasés restent les plus populaires [50].

Les filtres monophasés sont basés sur des applications à faible puissance.

La deuxième classification est basée sur la topologie utilisé avec ou sans neutre connecté.

Pour injecter et compenser des composants homopolaires, des filtres actifs à neutre raccordé doivent être développés.

Il existe une grande proportion de filtres sans neutre raccordé.

Cependant, il existe de nombreux filtres neutres raccordés :

- Filtres avec onduleur à trois bras
- Filtres avec onduleur à quatre bras

Les filtres actifs sont soit basés sur l'onduleur de tension avec un condensateur du côté continu et un filtre de raccordement inductif du côté réseau, soit sur un commutateur de courant avec une inductance du côté continu et un filtre de raccordement capacitif du côté réseau.

I.8.3.2 Filtre actif série :

Pour créer une impédance série qui se comporte comme une impédance nulle pour la composante fondamentale et élevée pour les harmoniques, un filtre actif séquentiel doit être connecté au réseau. Son rôle principal est de protéger les appareils sensibles des perturbations. Le filtre actif séquentiel bloque la circulation des courants harmoniques dans la source [51, 52], assurant ainsi une tension de charge sinusoïdale parfaite [53, 54]. Cependant, il est important de noter que ce type de filtre nécessite une protection rigoureuse contre les courts-circuits du réseau, car il doit supporter tout courant de court-circuit en cas de court-circuit

côté secteur. De plus, le filtre actif séquentiel ne peut pas compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

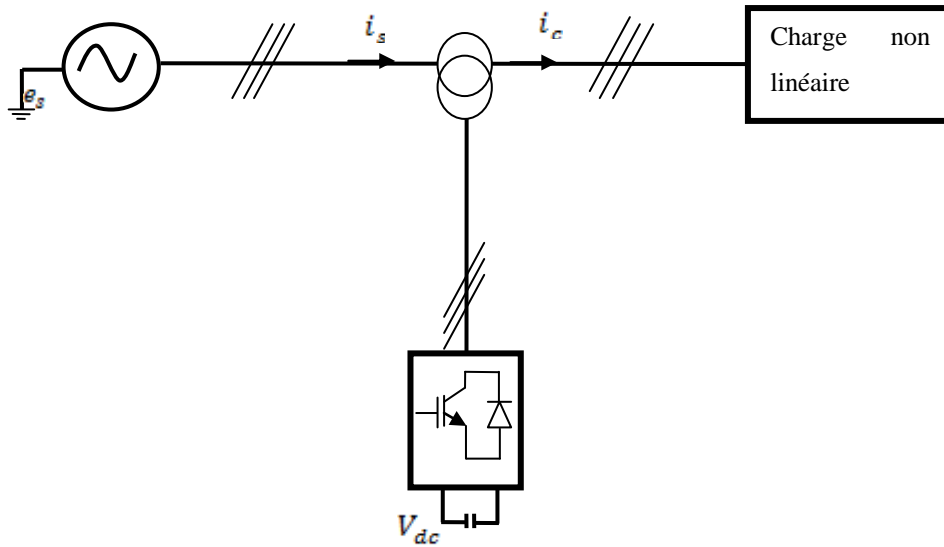


Figure (I.13) : Filtre actif série.

I.8.3.3 Filtre combiné parallèle-série (UPQC) :

Le couplage en parallèle et en série de deux filtres actifs permet de tirer parti des avantages de chaque configuration et conduit à la création d'un UPQC (Compensateur de Puissance Réactive et Active). Ce dispositif est capable de générer des courants et des tensions sinusoïdaux stables à partir de courants et de tensions perturbés présents sur le réseau électrique [55]. Cependant, son coût élevé et la complexité des contrôles associés limitent son utilisation dans des applications critiques telles que les équipements médicaux [56].

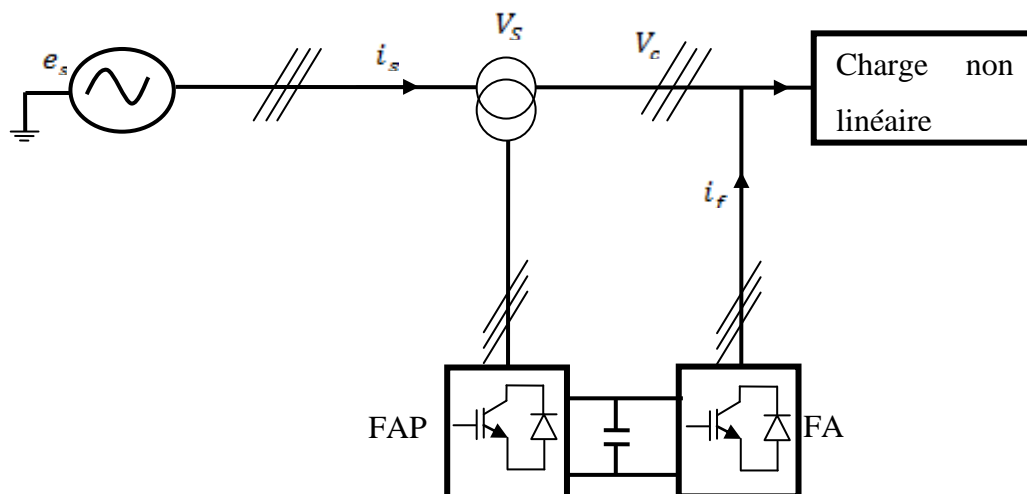


Figure (I.14) : Filtre combiné parallèle – série actifs (UPQC).

I.8.3.4 Filtre hybride active et passive :

Depuis 1990 [57], les chercheurs se sont intéressés aux filtres actifs hybrides en raison de leur coût plus faible. De nombreuses études ont été menées sur ces filtres [58].

L'avantage de filtre actif hybride figure :

- Réduire le coût du filtre actif.
- Faisabilité pour des applications haute puissance.

Le filtre hybride est créé en combinant des filtres actifs et passifs, et il permet de compenser une grande partie des harmoniques. Les filtres actifs assurent des performances de filtrage adaptées à la charge et à son évolution, tandis que la combinaison avec un filtre passif permet de réduire considérablement la taille du filtre actif. Plusieurs configurations de filtres hybrides ont été étudiées dans la littérature [59].

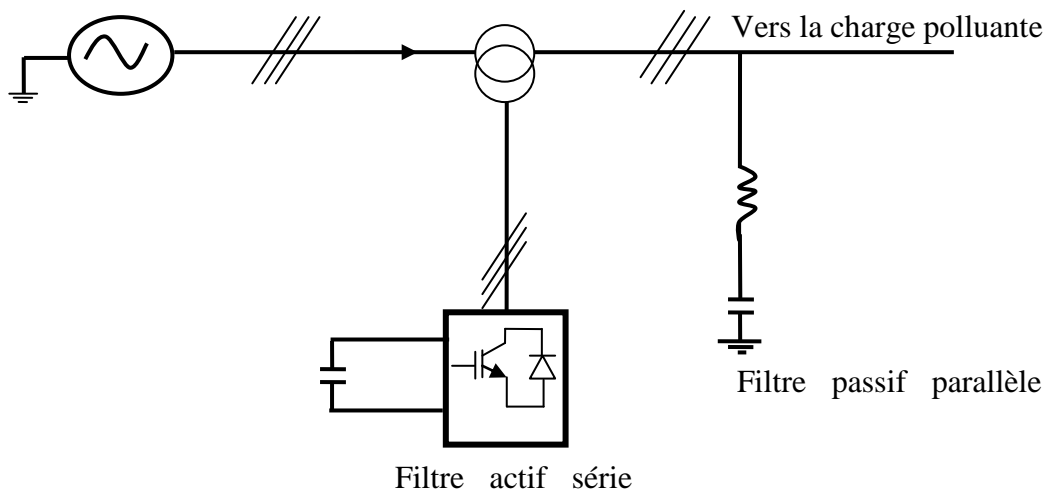


Figure (I.15) : Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.

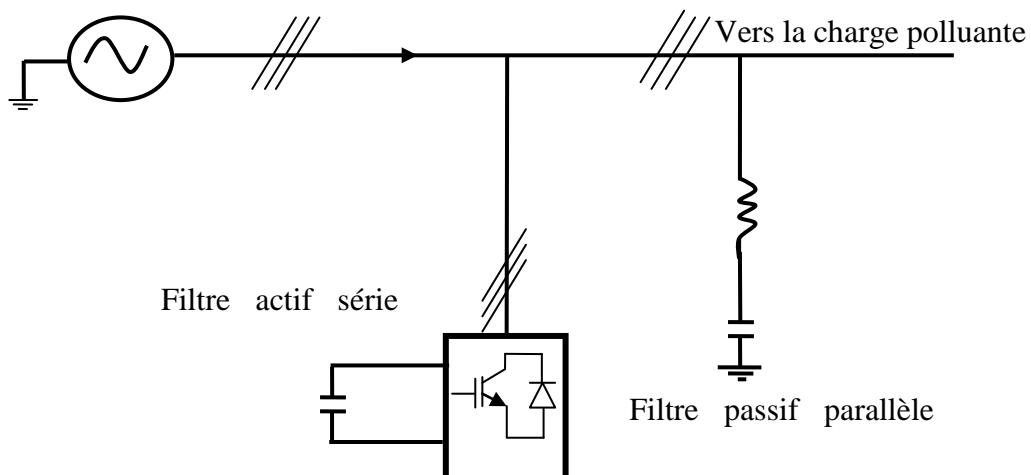


Figure (I.16) : Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

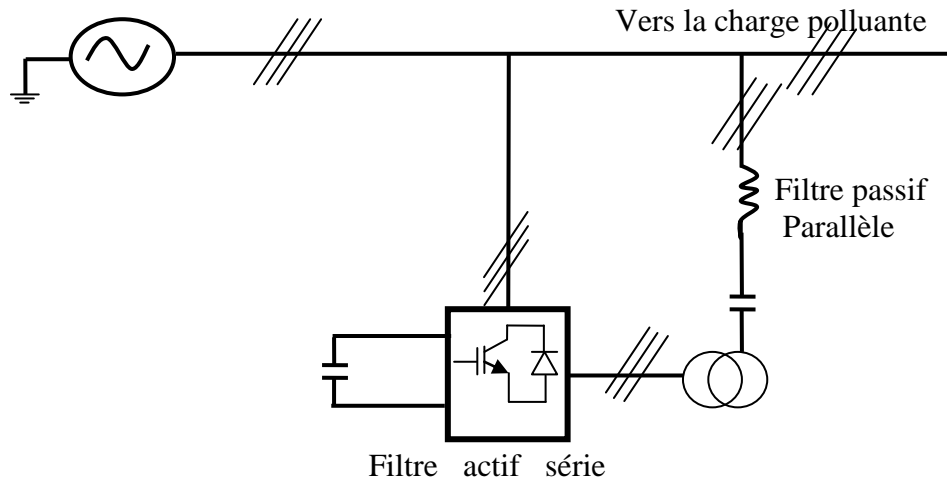


Figure (I.17) : Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

I.9. Les onduleurs :

L'onduleur photovoltaïque connecté au réseau a pour fonction de convertir la tension continue en tension alternative, en respectant la valeur et la fréquence du réseau électrique. L'onde produite doit être sinusoïdale, et cette tension alternative injectée dans le réseau doit être en phase avec ce dernier et répondre à un ensemble d'exigences de sécurité strictes [60].

Deux techniques sont utilisées pour générer le signal de courant alternatif de l'onduleur connecté au réseau :

- Le réseau est utilisé comme source de signal et de synchronisation, ou un onduleur est utilisé pour produire la sinusoïde.

L'onduleur est arrêté pour protéger les panneaux solaires photovoltaïques de tout court-circuit entre l'onduleur et le réseau électrique, car il utilise des transformateurs élévateurs pour isoler les panneaux solaires du réseau. Les onduleurs PV connectés au réseau peuvent ajuster le point de puissance maximale du générateur en fonction de la tension ouverte grâce à la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking). L'onduleur n'a pas de sortie fixe. Sa performance est généralement élevée à haute puissance et vice versa à faible puissance [61]. Chaque onduleur transfère une certaine quantité d'énergie du réseau ou des panneaux solaires, ce qui entraîne des pertes significatives.

I.10. Les différents types d'onduleurs réseau :

L'onduleur connecté au réseau est utilisé dans les installations photovoltaïques pour convertir le courant continu généré par les panneaux solaires en courant alternatif correspondant aux spécifications du réseau électrique. Il s'ajuste à la fréquence et à la tension du réseau. L'électricité produite par les panneaux solaires est utilisée pour alimenter la maison, et tout excédent est injecté dans le réseau. L'onduleur connecté au réseau doit surveiller en permanence ces fluctuations et interrompre l'injection en cas de dysfonctionnement ou de problème de sécurité [62].

Il Ya quatre type d'onduleurs réseau :

I.10.3 Onduleurs modulaires :

Ce type d'onduleur est installé à l'arrière de chaque panneau solaire, ce qui signifie que chaque unité solaire dispose de son propre onduleur dédié. Cependant, dans les grandes installations photovoltaïques, les onduleurs sont connectés en parallèle. Les modèles d'onduleurs les plus courants pour les installations de petite taille sont de faible puissance, généralement de l'ordre de 100 à 200 W [63].

I.10.2 Onduleurs centralisés :

L'onduleur a pour fonction de convertir le courant continu produit par les cellules solaires en courant alternatif. Il est conçu avec une séparation claire entre la partie courant continu (DC) et la partie courant alternatif (AC). Généralement, les onduleurs solaires sont monophasés. Cependant, un inconvénient majeur de ces onduleurs est la complexité du câblage, en particulier lorsque le nombre d'unités à connecter en série est élevé, afin d'assurer un rendement élevé et une protection adéquate des câbles. Dans ce contexte, il est courant d'utiliser des onduleurs de taille moyenne, avec une puissance comprise entre 1 et 5 kW [63].

I.10.3 Onduleurs String ou de rangée :

Dans ce type d'onduleurs, les modules solaires sont généralement connectés en série pour former une chaîne. C'est le mode de connexion le plus couramment utilisé dans les installations solaires. Cependant, un inconvénient de cette configuration est que si un ou plusieurs panneaux sont partiellement ombragés, cela peut affecter la puissance globale de la chaîne. En effet, l'ensemble de la chaîne est aussi performant que son maillon le plus faible.

Par conséquent, si une partie de la chaîne est ombragée, cela peut entraîner une réduction de la puissance de sortie jusqu'à 3 kW, car la chaîne entière est interconnectée [63].

I.10.4 Onduleurs "Multi-String" ou plusieurs rangés :

Ce type de configuration utilise une combinaison d'onduleurs centraux et d'onduleurs string. Les onduleurs string sont connectés en parallèle pour augmenter la puissance de sortie globale. Au niveau de la connexion au réseau, il y a un onduleur central qui regroupe les onduleurs string où se trouvent les générateurs solaires. Cette configuration permet une optimisation de la production d'énergie et entraîne une réduction des coûts de production [64]. En général il est utilisé deux types d'onduleurs :

- L'onduleur autonome et L'onduleur non autonome
- L'onduleur autonome : Ce type fournit une tension de fréquence fixe ou réglable et n'a pas besoin d'un réseau pour fonctionner.

L'onduleur non autonome :

Ce type d'onduleur est conçu pour contrôler le courant provenant des unités photovoltaïques et réguler la puissance injectée dans le réseau conformément aux normes établies. Ainsi, lors de la conception d'un onduleur connecté au réseau, il est nécessaire de prendre en compte des spécifications telles que la puissance nominale, la tension du réseau et la tension continue maximale du vecteur [65].

I.11. Application sur système photovoltaïque :

L'énergie solaire est largement considérée comme la source d'énergie alternative la plus avantageuse. Cependant, elle présente quelques inconvénients, notamment une inefficacité de conversion d'énergie liée à la variation des charges. C'est pourquoi l'utilisation de la technologie MPPT est recommandée. Une simulation est effectuée pour évaluer les performances d'un convertisseur DC-DC entre le panneau solaire et la charge.

La figure (I.18) illustre le principe d'un tel fonctionnement.

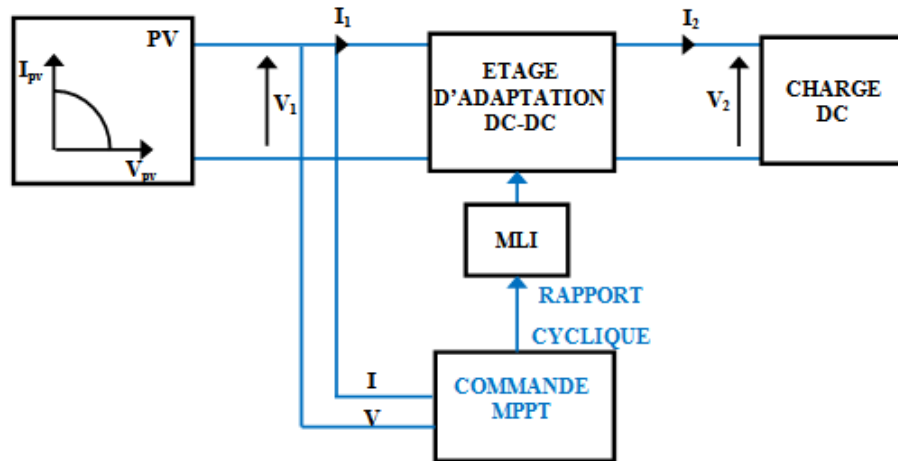


Figure (I.18) : Algorithme de recherche du PPM.

La technologie de contrôle MPPT est appliquée au convertisseur DC-DC et l'efficacité de la technologie considérée est vérifiée pour assurer un fonctionnement optimal du PV. Quelles que soient les différences soudaines de charge [66].

La technologie de contrôle MPPT est appliquée au convertisseur DC-DC afin d'optimiser l'efficacité de la conversion d'énergie du système photovoltaïque (GPV). Cette technologie permet de suivre en temps réel le point de puissance maximale du panneau solaire, même en présence de variations rapides de charge. Son efficacité est vérifiée pour garantir un fonctionnement optimal du GPV, indépendamment des fluctuations de charge imprévues [66].

I.11.1. Techniques de commande MPPT

Plusieurs algorithmes ont été exposés pour la recherche du PPM, comme la méthode

Il y a plusieurs algorithmes du PPM :

«Incrémentement de Conductance», l'algorithme «Perturbe et Observe P&O», l'algorithme de la logique flou et Optimisation des Gains de PI par la Technique PSO « Particle Swarm Optimization » [67].

- **Méthode de perturbation et d'observation (P&O)**

La méthode P&O est une méthode simple et couramment utilisée en raison de son mode de fonctionnement : elle perturbe le système et surveille les variations de puissance en sortie du GPV [68].

Dans la figure (I.19), on observe que si la puissance augmente ($dP/dV > 0$), l'algorithme P&O continue à perturber la tension dans la même direction. De même, si la puissance diminue

($dP/dV < 0$), l'algorithme suit la turbulence. À partir de là, nous avons les cas suivants [69], [70]:

$$\left(\frac{dP}{dV} = 0\right) \text{ au MPP}$$

$$\left(\frac{dP}{dV} > 0\right) \text{ à gauche de MPP}$$

(I.23)

$$\left(\frac{dP}{dV} < 0\right) \text{ à droit de MPP}$$

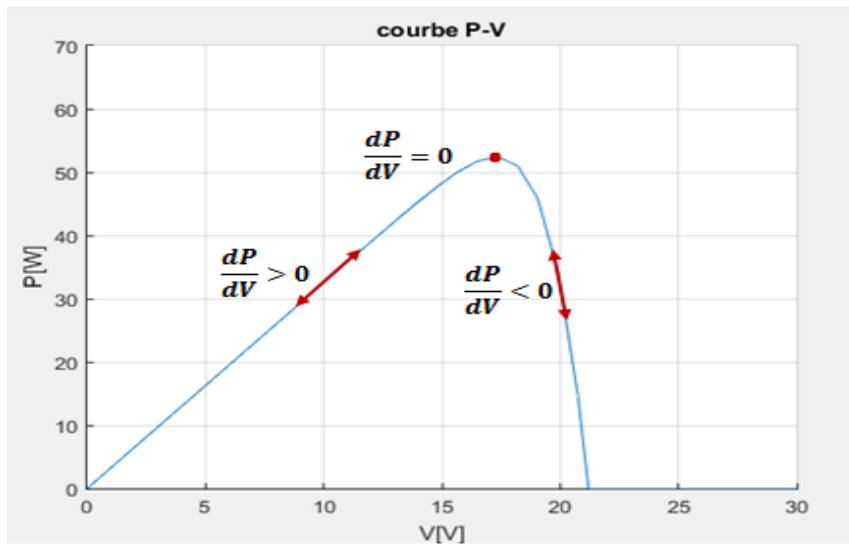


Figure (I.19) : Caractéristique puissance-tension du panneau PV.

On peut résumer le fonctionnement de l'algorithme P&O par l'organigramme suivant [71] [72].

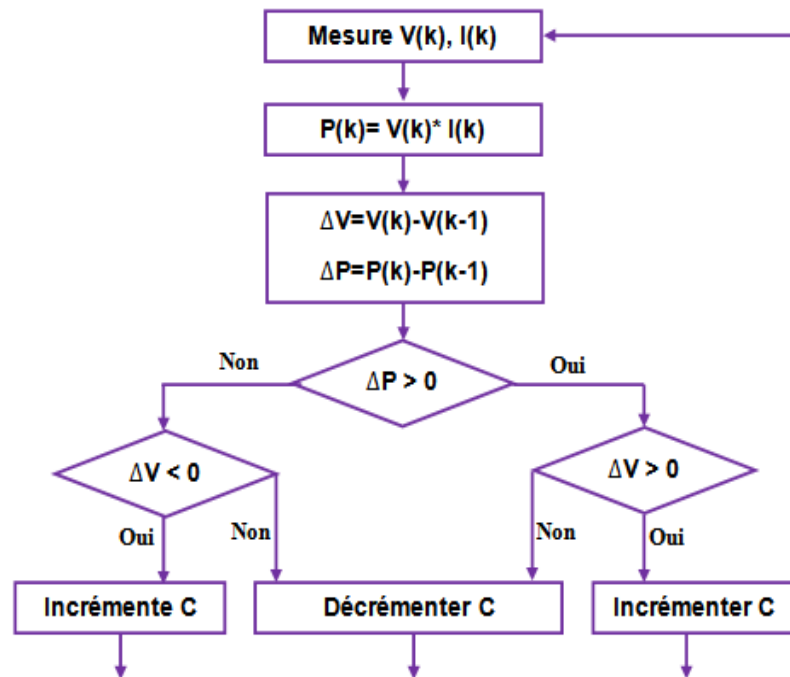


Figure (I.20) : Organigramme de la technique P&O.

I.11.2 Caractéristiques électriques typiques du module EP156P

Le tableau I.4 résume les caractéristiques électriques du module PV « Eoply new energy technology EP156P-72-320W ».

Tableau (I.4) : Caractéristiques électriques typiques du module EP156P-72-320W.

Paramètre	Value
Puissance maximale (P_{mpp})	320W
Tension à puissance maximale (V_{mp})	38.35 V
Courant à puissance maximale (I_{mp})	8.36 A

I.11.3 Effets des variations atmosphériques sur le module photovoltaïque

a. Variation de la température :

La figure I.21. Illustre les allures des caractéristiques électriques $I-V$ et $P-V$ respectivement, du générateur PV pour différentes températures avec un éclairement constant de 1 kW/m^2 . Nous pouvons remarquer une légère variation du courant de court-circuit, par contre une influence considérable sur la tension en circuit ouvert qui augmente avec la température décroissante, ce qui engendre une réduction de l'énergie générée.

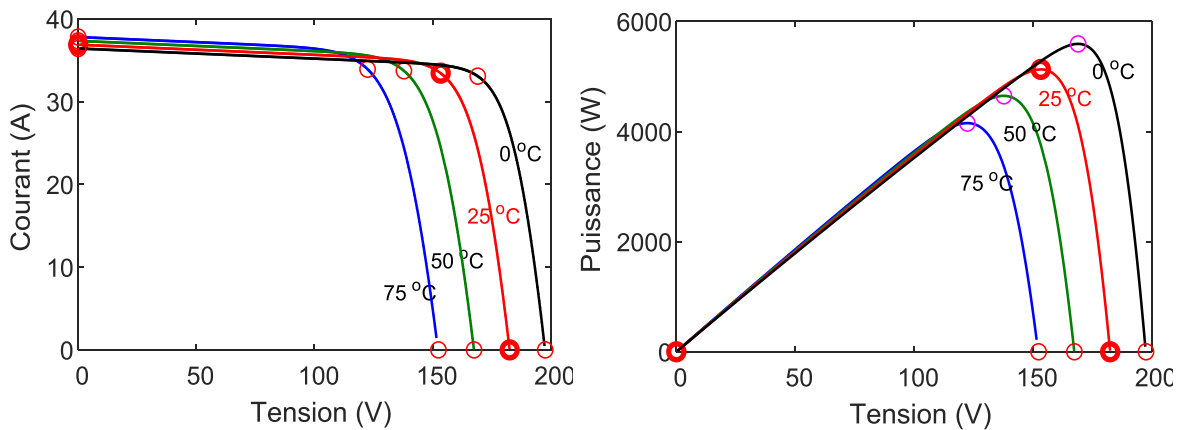


Figure (I.21) : Les effets de la température sur I(V) et P(V) à ($G = 1000 \text{ W/m}^2$).

b. Variation de l'éclairement :

Les caractéristiques $I-V$ et $P-V$ du générateur PV obtenues pour différentes valeurs de l'éclairage à température et vitesse de circulation d'air constantes sont affichées dans la figure I.22. Ces allures montrent que la puissance de sortie des panneaux solaires est directement proportionnelle à l'éclairement énergétique ; une irradiation plus faible se traduit par une puissance de sortie réduite du générateur PV. Cependant, seul le courant de sortie est considérablement affecté par l'irradiation tandis que la tension V_{oc} ne varie que très peu et le changement est considéré comme négligeable, car en vertu du principe de fonctionnement de la cellule solaire, le courant est proportionnel au flux de photons.

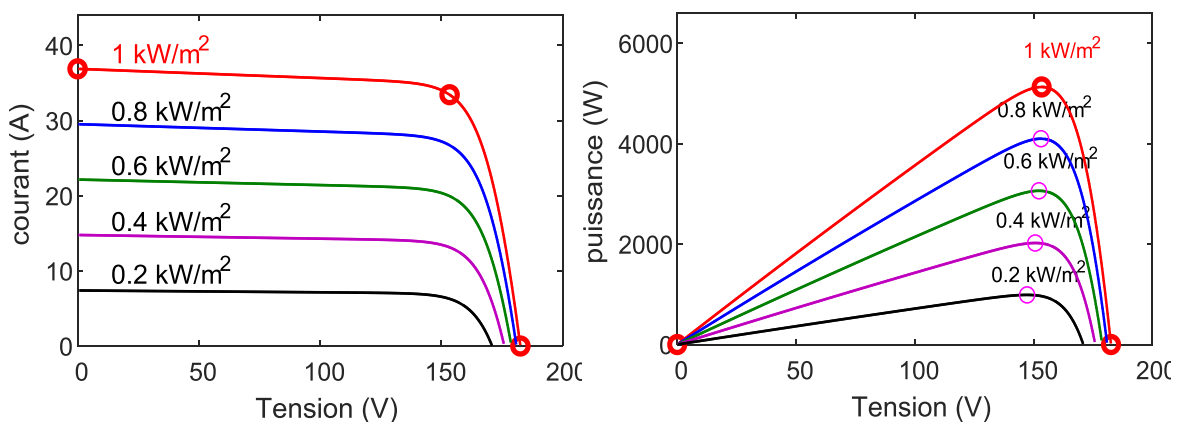


Figure (I.22) : Influence de l'éclairement sur I(V) et P(V) à ($T=25^\circ\text{C}$).

I.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différentes perturbations qui affectent le réseau électrique, parmi lesquelles les harmoniques qui jouent un rôle prépondérant. Ces harmoniques ont des effets néfastes sur le réseau et les équipements électriques. Nous avons également examiné les causes des harmoniques, qui sont principalement liées aux charges non linéaires et à d'autres facteurs. Nous avons présenté de nombreuses solutions pour éliminer ces perturbations, en mettant en avant à la fois des méthodes traditionnelles et des approches modernes de contrôle de la pollution, de suppression des harmoniques et de protection des équipements électriques. De plus, nous avons exploré différents types de filtres en détaillant les avantages et les inconvénients de chacun d'entre eux. Enfin, nous avons abordé les différents types d'onduleurs connectés au réseau électrique. Ces onduleurs jouent un rôle essentiel dans la conversion et l'injection d'énergie solaire ou d'autres sources renouvelables dans le réseau. Nous avons fourni des explications détaillées sur leur fonctionnement et leurs caractéristiques.

Ce chapitre a examiné de manière approfondie les perturbations du réseau électrique, les solutions pour les atténuer et les différents types d'onduleurs connectés au réseau.

CHAPITRE II :

La Commande Directe de Puissance (DPC)

II. 1. Introduction :

Le paramètre le plus crucial dans un réseau électrique est la qualité de l'énergie, qui doit être préservée. Cela implique de réduire les charges non linéaires et de mettre en place des solutions adaptées pour atténuer les harmoniques. Il est également essentiel d'étudier l'impact des appareils électriques connectés au réseau sur la qualité de la tension.

Parmi les stratégies de commande, une des plus remarquables est la commande Direct de Puissance (DPC) (Direct Power Control). Le DPC est une stratégie performante basée sur la théorie de la puissance instantanée [73]. Une de ses caractéristiques principales est la sélection du vecteur de tension de commande à partir d'une table de commutation, qui est constituée des défauts de puissance active et réactive, ainsi que de la position angulaire du vecteur de tension source. Cela permet de déterminer l'état de commutation optimal pour améliorer les performances [74].

Dans ce chapitre, nous étudions le filtre actif parallèle (PAF) en appliquant la commande DPC basée sur l'ancienne table de commutation et la nouvelle table de commutation. Nous réalisons des simulations de la commande DPC en utilisant les deux tables de commutation afin d'expliquer leurs avantages respectifs. Enfin, nous présentons les résultats de simulation obtenus.

II. 2. la technique DPC :

La DPC (Direct Power Control) a été proposée pour la première fois en 1991 par Ohnishi, qui a utilisé des valeurs de puissance active et réactive comme variables de contrôle au lieu de courants triphasés instantanés. Par la suite, en 1998, Noguchi et Takahashi ont développé une version améliorée de la DPC. C'est Noguchi qui a utilisé pour la première fois le terme "contrôle direct de l'énergie" pour décrire cette technique.

La DPC dépend de la sélection du vecteur de tension de commande à partir de la table de commutation, qui est déterminée en fonction des défauts de puissance active et réactive ainsi que de la position angulaire du vecteur de tension source. Cela permet de déterminer l'état de commutation optimal afin d'améliorer les performances du système. Dans la DPC, la valeur de la puissance réactive est fixée à zéro ($q_{ref} = 0$) pour assurer un facteur de puissance unitaire.

Pour améliorer les performances, l'espace vectoriel est segmenté pour le positionnement en douze secteurs.

II. 3. Principe de la commande DPC :

Le principe de la commande DPC repose sur le calcul des puissances actives et réactive à partir des mesures de courant et de tension à l'entrée du convertisseur MLI, et sur la commande instantanée de la puissance en utilisant des comparateurs d'hystérésis et une table de commutation. Le vecteur de tension de commande est sélectionné à partir de cette table de commutation, qui est déterminée en fonction des erreurs de puissance active et réactive ainsi que de la position angulaire du vecteur tension source.

La Figure (II.1) présente une étude de simulation de la DPC, qui est l'une des stratégies les plus couramment utilisées. La valeur de référence est comparée aux puissances active et réactive instantanées, et la référence de puissance réactive est mise à zéro pour garantir un facteur de puissance unitaire. La puissance de référence active est calculée à partir de la sortie du régulateur de tension du bus continu V_{dc} [75].

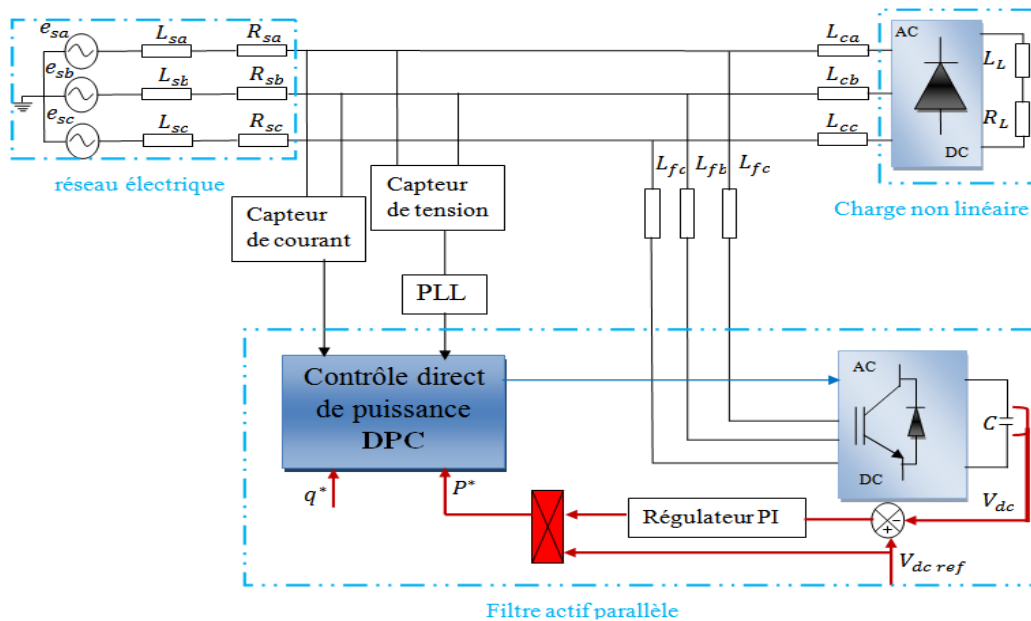


Figure (II.1) : Schéma du FAP pour la commande DPC.

II. 4. Calcul des puissances instantanées :

Le calcul de la puissance active et réactive par l'équation suivante :

$$\begin{cases} P = e_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + e_{\beta} \cdot i_{\beta} \\ q = e_{\alpha} \cdot i_{\beta} - e_{\beta} \cdot i_{\alpha} \end{cases} \quad (II.1)$$

e_a, e_b, e_c et i_a, i_b, i_c si les valeurs instantanées des tensions et des courants, Après la transformation de Clark, Le courant et la tension deviennent comme suit : i_{α}, i_{β} et e_{α}, e_{β} , sous le système biphasés $\alpha\beta$.

L'erreur de la puissance active ΔP_s est égale à la puissance active désirée P_{ref} moins la puissance active P_s réelle et la puissance réactive Δq_s est égale à la puissance réactive désirée q_{ref} moins la puissance réactive réelle q_s [76].

$$\begin{cases} \Delta P_s = P_{ref} - P_s \\ \Delta q_s = q_{ref} - q_s \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

II.4.1. Contrôleur à hystérésis :

Le contrôle par hystérésis est utilisé pour maintenir les puissances active et réactive dans une plage désirée. Il repose sur l'utilisation de deux comparateurs à hystérésis qui comparent les valeurs de référence P_{ref} et q_{ref} avec les valeurs estimées de P et q.

Si l'erreur de puissance se situe en dessous de la bande inférieure, la sortie du contrôleur est convertie en "zéro". Si l'erreur de puissance dépasse la valeur maximale de la bande, la sortie du contrôleur est modifiée en "1". Cette relation est exprimée par l'équation (II.3):

$$\begin{cases} P_{ref} - P \geq hp \rightarrow = 1 \\ P_{ref} - P \leq hp \rightarrow = 0 \\ q_{ref} - q \geq hq \rightarrow = 1 \\ q_{ref} - q \leq hq \rightarrow = 0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Cela permet de réguler la puissance en maintenant les valeurs de P et q à l'intérieur de la plage désirée.

hp Et hq sont les changements des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.

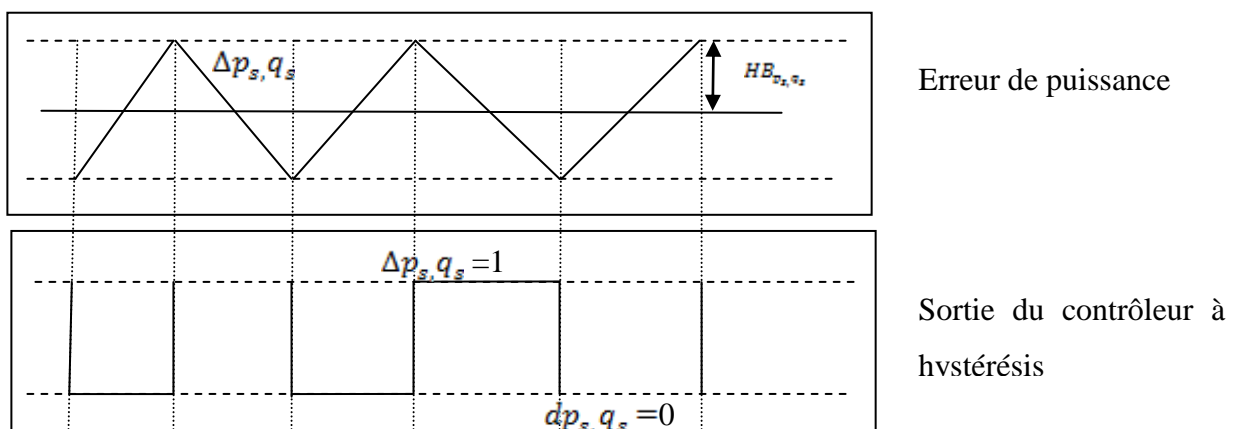


Figure (II.2) : Principe de commande d'hystérésis à deux niveaux.

II.4.2. La position angulaire θ_n :

Calcule la position angulaire θ_n en transformant le plan abc triphasé en plan constant α - β :

$$\theta_n = \arctan\left(\frac{e_\alpha}{e_\beta}\right) \quad (\text{II.4})$$

Les coordonnées statiques sont divisées en 12 secteurs afin d'augmenter la précision et d'éviter les problèmes, comme indiqué sur la figure (II.3), Les secteurs sont exprimés numériquement comme suit [78] :

$$(n-2)\frac{\pi}{6} \leq \theta_n \leq (n-1)\frac{\pi}{6} \quad (\text{II.5})$$

Avec : $n = 1, 2, \dots, 12$

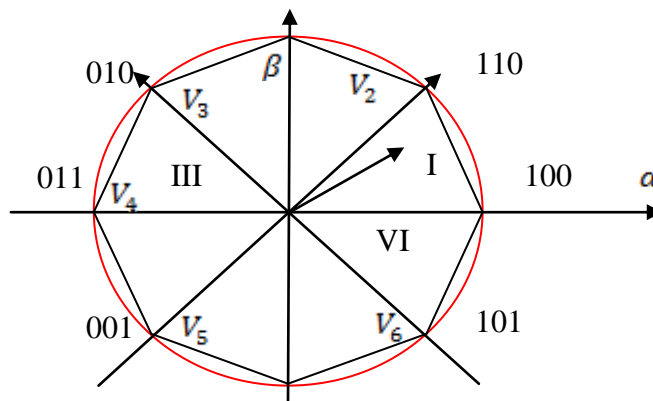


Figure (II.3) : Représentation du polygone de commutation et du vecteur tension de référence [79].

II.4.3. La table de commutation :

Les variables sont inscrites dans la table de commutation en entrant la position angulaire et les signaux d'erreur numériques, et ces deux derniers sont responsables des états de commutation de l'interrupteur de sorte que tous les états (d_p et d_q) qui prennent l'état "1" ou "0" sont mémorisés pour augmenter ou diminuer la grandeur contrôlée (P ou q).

La largeur de la bande d'hystérésis affecte l'ensemble du système de sorte qu'elle affecte les performances du filtre actif, $THDi$ et la fréquence de commutation moyenne.

Alors qu'à la sortie nous obtenons les commandes pour contrôler l'ouverture et la fermeture de l'IGBT de l'onduleur Par les états des commutateurs Sa, Sb et Sc comme indiqué sur la Figure (II.4), En utilisant la table de commutation, qui repose sur deux signes : les dérivées des puissances (P et q) [80].

La table de commutation est utilisée dans chaque secteur. Il s'agit d'identifier les cas de commutation à des moments délibérés et spécifiques pour assurer le meilleur contrôle en fonction de l'ensemble des signaux d'entrée numériques, comme indiqué dans le Tableau (II.1) [81] :

d_q	d_p	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
1	0	V_6	V_7	V_1	V_0	V_2	V_7	V_3	V_0	V_4	V_7	V_5	V_0
1	1	V_7	V_7	V_0	V_0	V_7	V_7	V_0	V_0	V_7	V_7	V_0	V_0
0	0	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
0	1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1

$V_1(100)$, $V_2(110)$, $V_3(110)$, $V_4(011)$, $V_5(001)$, $V_6(101)$, $V_7(111)$.

Tableau (II.1) : Table de commutation.

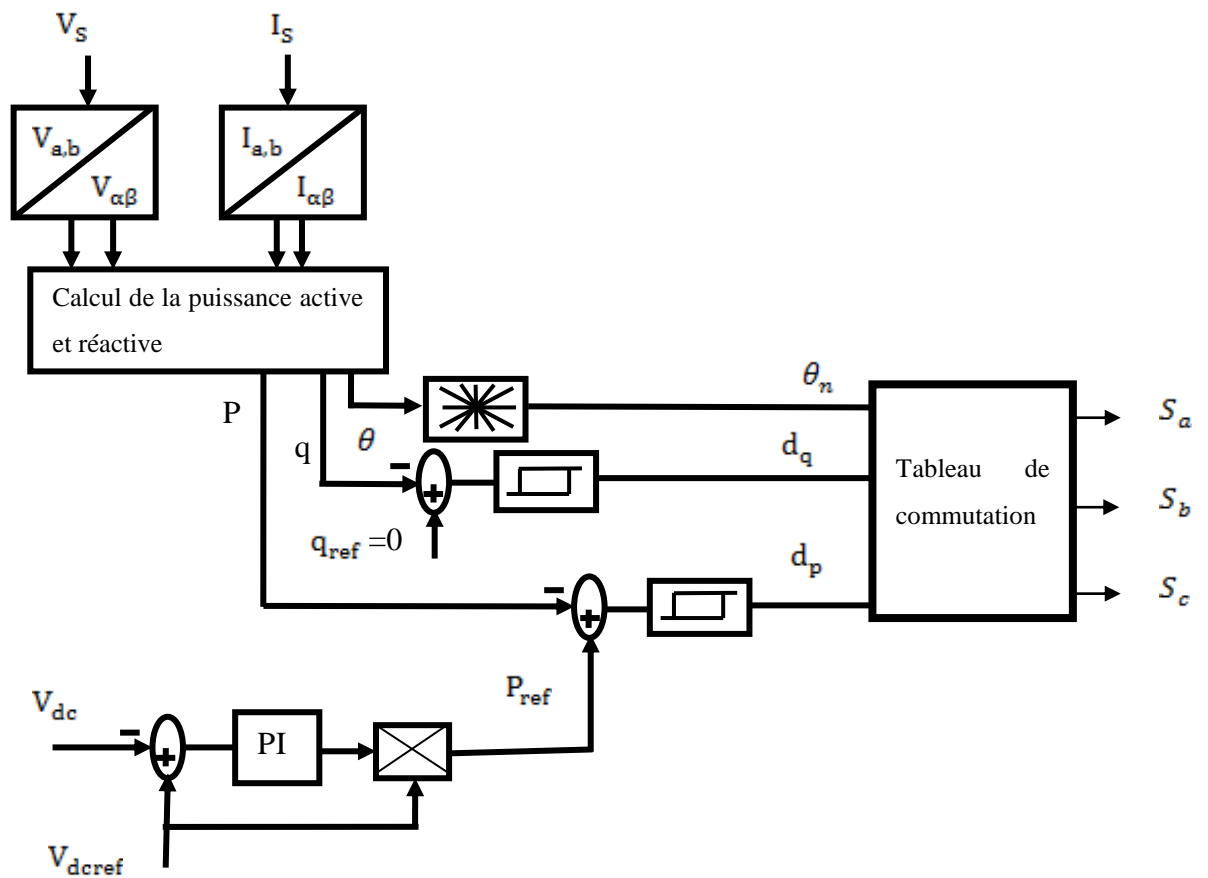


Figure (II.4) : Principe de DPC.

II.4.4. Régulation de la tension continue :

P et P_{ref} sont comparés, et l'erreur est contrôlée en utilisant un régulateur PI mesurant la différence entre le courant et sa référence. Ceci est fait dans le but de réduire les variations de tension du bus continu, comme illustré dans la figure (II.5) [82].

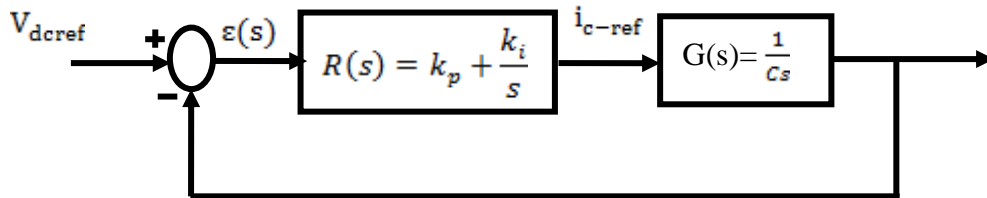


Figure (II.5) : Régulation de la DC avec un Régulateur PI.

La fonction de transfert est donnée par équations suivant :

$$H(s) = \frac{R(s)G(s)}{1+R(s)G(s)} \quad (\text{II.6})$$

On obtient :

$$H(s) = \frac{k_p s + k_i}{Cs^2 + k_p s + k_i} \quad (\text{II.7})$$

k_i et k_p pour contrôler le système en boucle fermée à l'aide de la fonction, mais sur le plan théorique les valeurs k_i et k_p calculées restent approximatives. La fonction de transmission d'un système en boucle fermée de second ordre est caractérisée par [75]:

$$F(s) = \frac{1}{s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{II.8})$$

Par analogie entre les expressions (II.7) et (II.8), on trouve :

$$\begin{cases} k_p = 2C\varepsilon\omega_n \\ k_i = C\omega_n^2 \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Le courant de référence est exprimé comme suit :

$$I_{dc_ref} = I_{c_ref} + I_{ch} \quad (\text{II.10})$$

La puissance de référence est déduite comme suit :

$$P_{ref} = V_{dc_ref} \cdot I_{dc_ref} \quad (\text{II.11})$$

II. 5. Résultats de simulation sous Matlab/Simulink:

La technique DPC classique est simulée dans le logiciel de simulation MATLAB/Simulink afin de vérifier les performances dynamiques de la commande de puissance utilisant le DPC. La méthode est validée à l'aide de cette approche de simulation.

Tableau (II.2) : Paramètres du système (DPC classique) [76].

<i>Paramètre</i>	<i>Value</i>
Source voltage fréquence f	50 Hz
Inductance de réseau électrique L_{sabc}	1.32e-3 H
Résistance de réseau électrique R_{sabc}	0.33 Ohms
Inductance de filtre L_{fabc}	3e-3 H
Inductance de Charge non linéaire L_L	1.3e-3/2 H
Résistance de Charge non linéaire R_L	12 ohms
Capacitance de bus continu C	1100e-6 F
Tension de bus continu V_{dc}	173 V
Temps d'échantillonnage (T_s)	$1e^{-6}s$

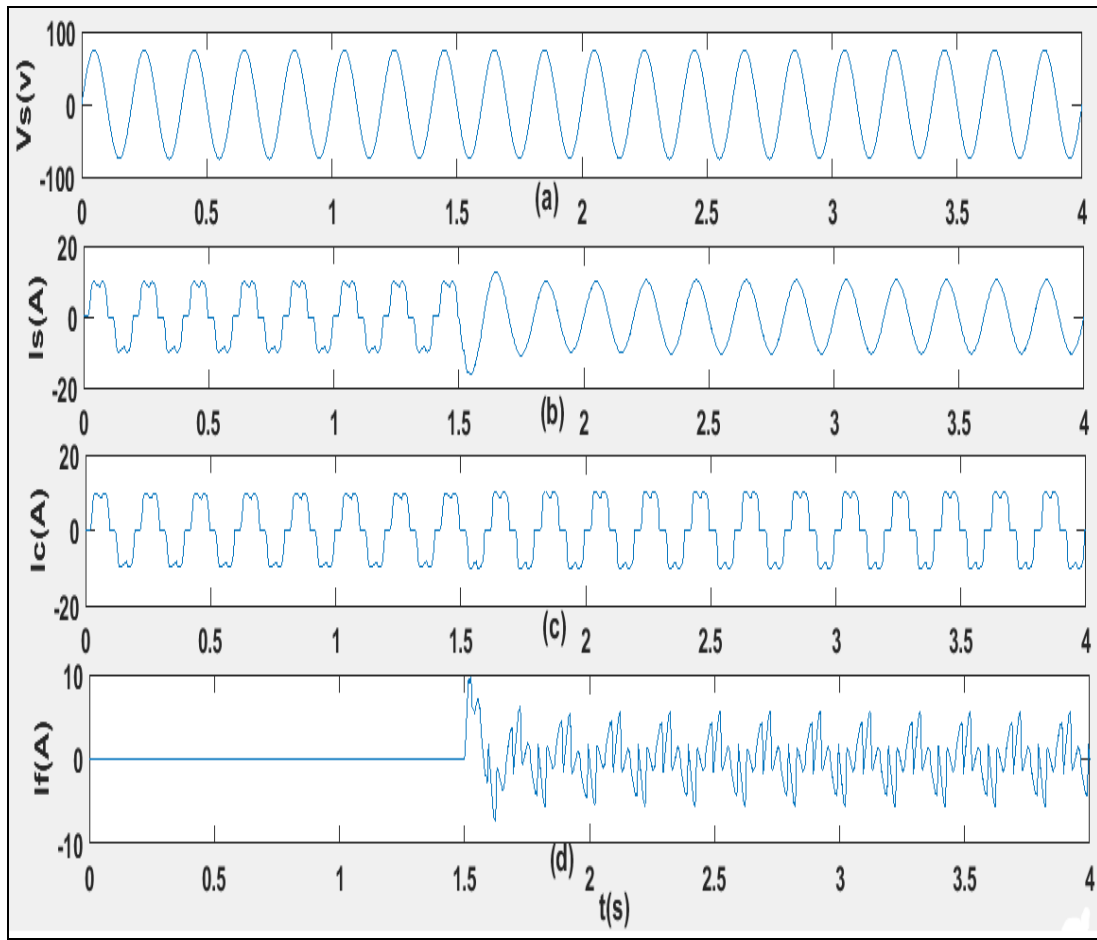


Figure (II.6): Résultats de simulation de la tension de source V_s (a), courant de charge I_s (b), courant de source I_c (c) et courant de filtre I_f avant et après l'application du filtre a $t=1.5s$.

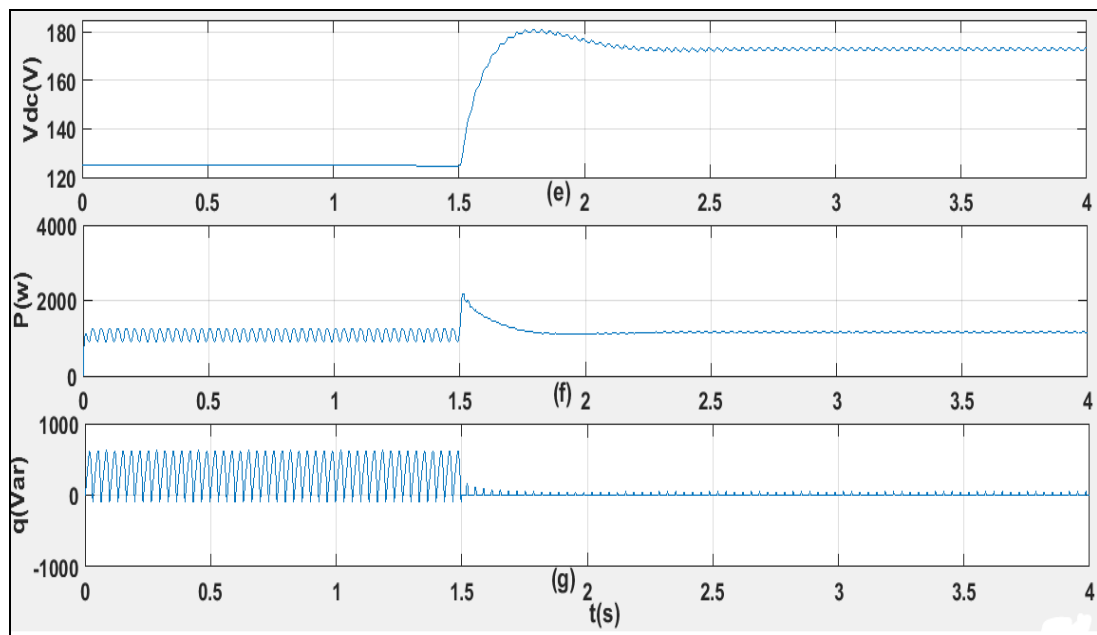


Figure (II.7) : Tension V_{dc} (e) la puissance P (f), la puissance q (g) avant et après l'application du filtre active à $t=1.5s$

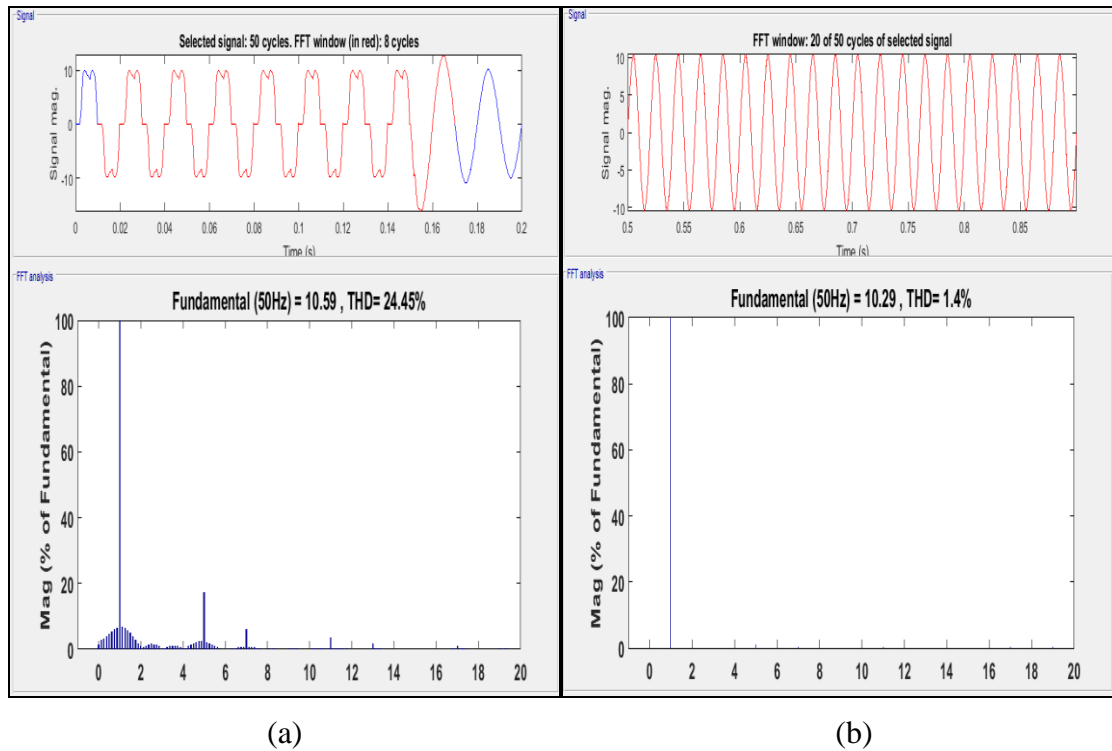


Figure (II.8) : Courant de source avant (a) et après (b) l'application du filtre.

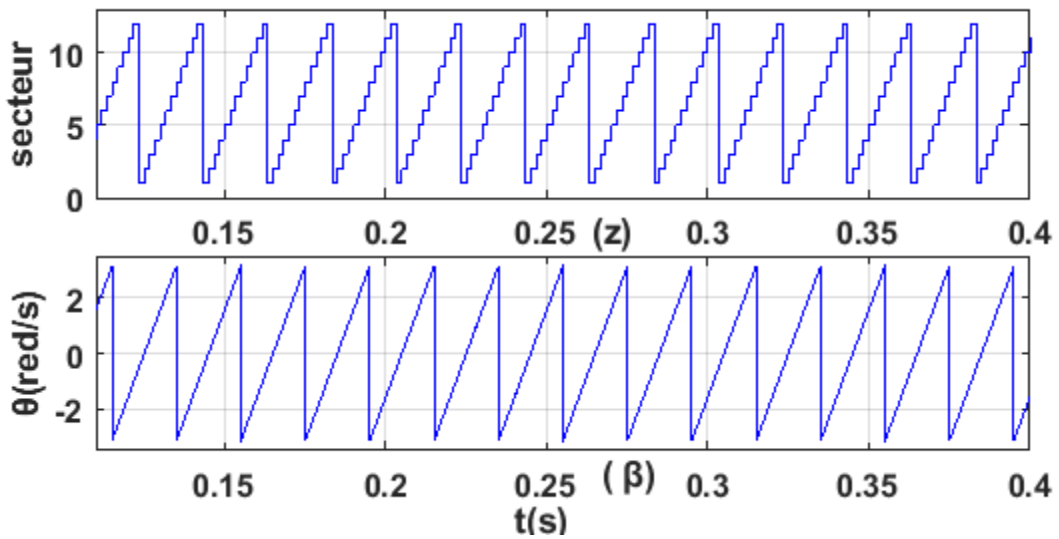


Figure (II.9) : Secteur (z) et position angulaire (β).

La figure (II.6) présente les résultats de simulation de la tension de source V_s (a), le courant de charge I_s (b), le courant de source I_c (c), et le courant du filtre I_f (d).

La figure (II.7) présente les résultats de simulation de la tension du bus continu V_{dc} (e), la puissance active P (f), et la puissance réactive q (g).

La figure (II.6) montre que le courant I_s n'était pas sinusoïdal et le courant du filtre I_f était nul avant la mise en service du FAP à $t=1.5s$. Après la connexion du FAP, le courant de source I_s devient sinusoïdal et le courant du filtre devient non nul.

La figure (II.7-e) montre que la tension du bus continu V_{dc} n'est pas stable en sa valeur avant la mise en service du FAP à $t=1.5s$. Après la connexion du FAP, atteint la référence ($V_{ref}=173V$) et maintient sa stabilité.

La figure (II.7-f) montre que la puissance active P était perturbée et non constante avant la mise en service du FAP à $t=1.5s$. Après la connexion du FAP, la puissance active P reste constante à sa valeur désirée. Quant à la figure (II.7-g), elle montre que la puissance réactive q n'était pas nulle avant la mise en service du FAP à $t=1.5s$. Cependant, après la connexion du FAP, la puissance réactive q devient nulle, ce qui assure un facteur de puissance unitaire. On peut observer que les puissances active et réactive présentent un temps de réponse satisfaisant et une faible ondulation.

La figure (II.8) montre le spectre du courant de source avant et après la mise en service du FAP.

Avant de filtrer la valeur du taux de distorsion harmonique $THDi = 24,45\%$ et après filtrage, ce sera $THDi = 1,4\%$, Cela prouve l'efficacité du FAP.

La figure (II.9) montre le spectre du secteur (z) et de la position angulaire (β).

II. 6. DPC avec de nouvelles tables de commutation :

Pour surmonter les inconvénients classiques des tables de commutation, ce travail se concentre sur le développement et la conception de nouvelles tables de commutation DPC pour le contrôle de l'APF. A partir de la topologie APF et de son analyse du circuit électrique, Les variations de puissance active et réactive instantanées du réseau sont obtenues.

La table de commutation est utilisée dans chaque secteur. Il s'agit d'identifier les cas de commutation à des moments délibérés et spécifiques, pour assurer le meilleur contrôle en fonction de l'ensemble des signaux d'entrée numériques, les variables sont inscrites dans la table de commutation en entrant la position angulaire et les signaux d'erreur numériques. Ces deux derniers sont responsables des états de commutation de l'interrupteur de sorte que tous les états (dp et dq) qui prennent l'état "1" ou "0" sont mémorisés pour augmenter ou diminuer la grandeur contrôlée (P ou q) à la sortie nous obtenons les commandes pour contrôler l'ouverture et la fermeture de l'IGBT par les états des commutateurs S_a , S_b et S_c .

Dans la stratégie DPC proposée, la référence de la puissance active instantanée est obtenue avec le contrôleur IP, en régulant la tension du bus continu. Alors que, pour la compensation de puissance réactive totale et le facteur de puissance unitaire, la référence de puissance réactive est réglée égale à zéro. La source de tensions et courants mesurés permet d'estimer les puissances instantanées (p_s, q_s) à comparer à leurs référence (p_{ref}, q_{ref}).

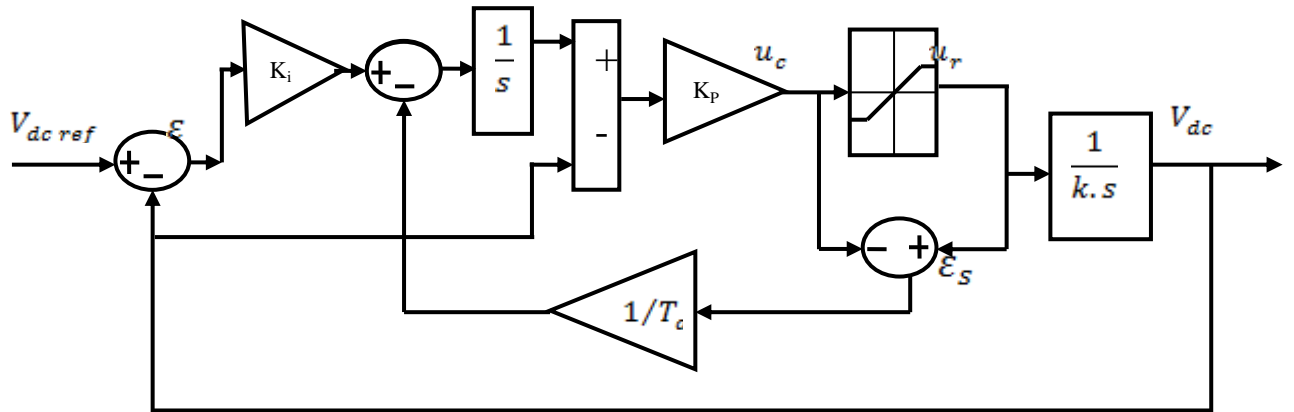


Figure (II.10) : Régulateur PI avec une compensation anti-windup.

Pour réguler la tension du bus continu dans cette partie du travail nous proposons un régulateur à intégration proportionnelle (PI) avec compensation anti-windup :

$$K = \frac{\sqrt{2} * c_{dc} * V_{dc\ ref}}{3V_s} \tag{II.12}$$

II.6.1. Étude des variations des puissances instantanées :

Le modèle électrique par phase du FAP, associé à une charge non linéaire et raccordé au réseau alternatif est représenté par la figure (II.11)

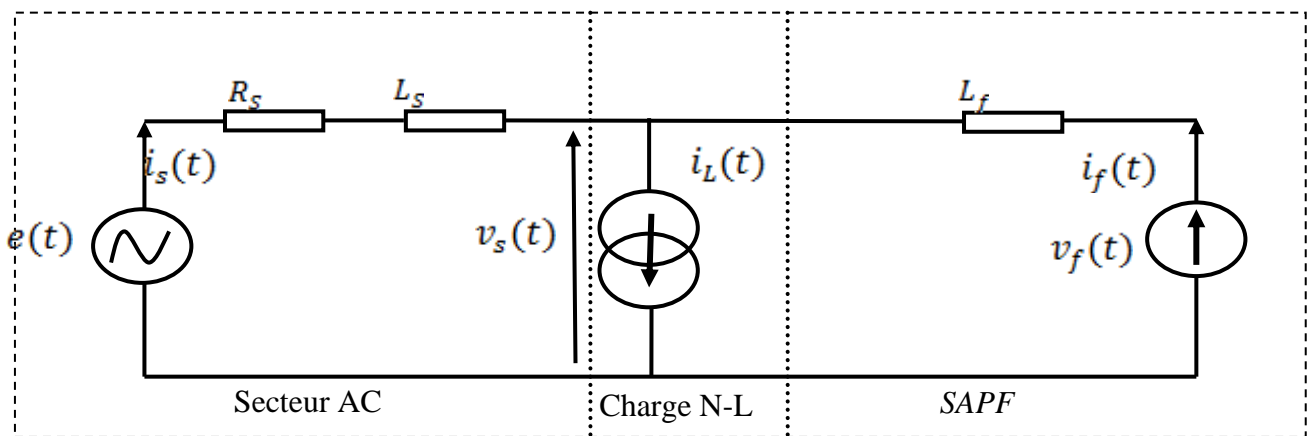


Figure (II.11) : Schéma électrique équivalent du FAP connecté à une charge non linéaire alimentée par une source alternative.

Dans le repère stationnaire α - β la dynamique des courants est régie par les deux équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = \frac{1}{L} (e_\alpha - v_\alpha - v_{f\alpha}) \\ \frac{di_\beta}{dt} = \frac{1}{L} (e_\beta - v_\beta - v_{f\beta}) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Basé sur l'équation (II.13), l'évolution du vecteur courant $[i_\alpha \ i_\beta]^T$ peut être contrôlée en utilisant la vectrice tension à l'entrée du redresseur $[V_\alpha \ V_\beta]^T$. En effet, la variation de chaque composante du vecteur courant dépend principalement de la vectrice tension réseau $e_{\alpha\beta}$, du vecteur de commande appliqué $V_{\alpha\beta}$, et dans une moindre mesure du courant.

D'autre part, Dans le repère stationnaire α - β , les puissances active et réactive sont données par:

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Si la période de tension du réseau est trop grande par rapport à la période de commutation, on peut considérer que l'évolution de la tension vectorielle pendant la période de commutation est négligeable.

A partir de la figure (II.11) et après développement, les variations normalisées des puissances P et q dans le repère stationnaire (α - β), en négligeant la résistance R_s , sont obtenues comme suit :

$$\begin{cases} \overline{\Delta p_s}(i) = \frac{\Delta p_s(i)}{\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{T_S}{L_S + L_f} \|e^{\alpha\beta}\| V_{dc}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\|e^{\alpha\beta}\|}{V_{dc}} - \left(\cos(\theta) v_{f(i)}^\beta - \sin(\theta) v_{f(i)}^\alpha \right) \\ \overline{\Delta q_s}(i) = \frac{\Delta q_s(i)}{\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{T_S}{L_S + L_f} \|e^{\alpha\beta}\| V_{dc}} = \left(\cos(\theta) v_{f(i)}^\beta - \sin(\theta) v_{f(i)}^\alpha \right) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

II.6.2. Développement d'une nouvelle table de commutation

Pour créer la nouvelle table de commutation, le vecteur choisi doit assurer une augmentation ou une diminution à la fois des puissances P et q, C'est ce qu'on appelle la sélection des vecteurs de commande, qui dépend du signe de la variation provoquée sur les puissances q et P. [83].

$$\begin{cases} \bar{v}_f^\alpha(i) = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{v_f^\alpha(i)}{V_{dc}} = \cos\left((i-1)\frac{\pi}{3}\right) \\ \bar{v}_f^\beta(i) = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{v_f^\beta(i)}{V_{dc}} = \sin\left((i-1)\frac{\pi}{3}\right) \end{cases} \quad i = (0, 1, 2, \dots, 6) \quad \text{avec} \quad \bar{v}_f^\alpha(i) = \bar{v}_f^\beta(i) = 0 \quad (\text{II.16})$$

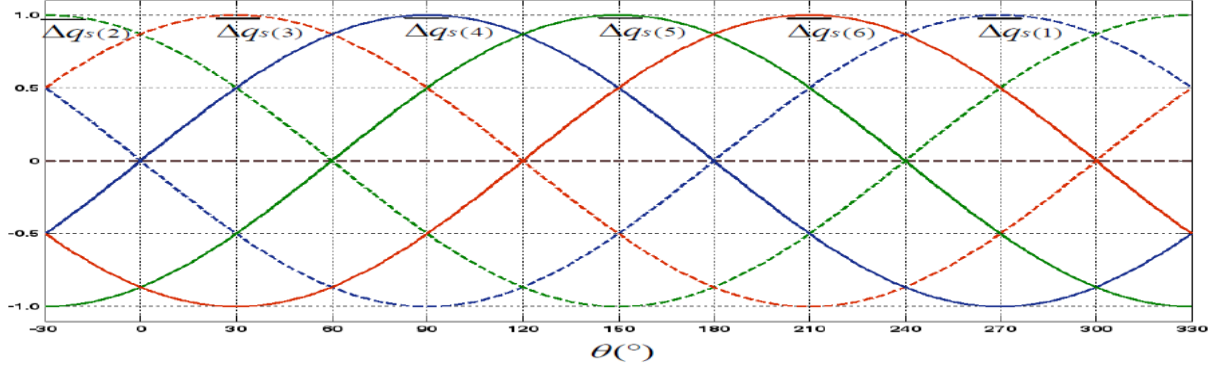


Figure (II.12) : Changements de comportement des variations de puissances actives et réactives en fonction des vecteurs pour différents secteurs.

Avec $\bar{v}_f^\alpha(i) = \bar{v}_f^\beta(i) = 0$ les variations de puissances normalisées pour le SAPF peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} \overline{\Delta p_s}(i) = \frac{1}{2} - \cos\left(\theta - (i-1)\frac{\pi}{3}\right) \\ \overline{\Delta q_s}(i) = -\sin\left(\theta - (i-1)\frac{\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{Pour} \quad \begin{cases} i = (0, 1, 2, \dots, 6) \\ -\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{11\pi}{6} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Puis à partir de l'équation (II.17), la figure (II.12) montre l'effet des vecteurs de tension de l'onduleur sur le comportement des variations de puissances normalisées pour les douze secteurs. La nouvelle table de commutation est représentée dans le tableau (II.3).

Tableau (II.3) : Table de commutation proposé.

S_p	S_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
1	0	v_3	v_4	v_4	v_5	v_5	v_6	v_6	v_1	v_1	v_2	v_2	v_3
1	1	v_3	v_5	v_5	v_6	v_6	v_1	v_1	v_2	v_2	v_3	v_3	v_4
0	0	v_1	v_2	v_2	v_3	v_3	v_4	v_4	v_5	v_5	v_6	v_6	v_1
0	1	v_6	v_1	v_1	v_2	v_2	v_3	v_3	v_4	v_4	v_5	v_5	v_6

II.6.3. Les Résultats de la simulation :

Plusieurs tests de simulation ont été effectués pour vérifier la faisabilité et les performances du DPC proposé :

Avant connecté le FAP : La figure (II.14) montre que le courant I_s n'était pas sinusoïdal et que le courant du filtre était nul avant la mise en service du FAP à $t=1.5s$ (figure II.15). La tension du bus continu V_{dc} Figure (II.16) Il n'est pas stable en sa valeur et la puissance réactive q non nulle, produite par la source (Figure II .18) et la puissance active P perturbe et non constant (Figure II .17). Après connecté le FAP ($t = 1.5 s$) et l'utilisation d'une nouvelle table de commutation : le courant de source I_s devient sinusoïdal (Figure II.14) avec moins d'ondulations grâce à la commande DPC sans nouvelle table de commutation, et le courant de filtre non nul et moins d'ondulations grâce au nouvelle table Après la mise en service du FAP a $t=1.5s$ (figure II.15). La tension du bus continu V_{dc} (Figure II.16) atteint la valeur de référence ($V_{ref}=173V$) plus rapidement avec moins d'ondulations, et elle maintient sa stabilité grâce à la nouvelle table et maintient sa stabilité pendant l'état stable.

La puissance réactive q est nulle (Figure II.18), ce qui garantit un fonctionnement à facteur de puissance unitaire, et la puissance active P reste constante, maintenant ainsi sa stabilité pendant l'état stable. On peut observer que les puissances active et réactive ont un bon temps de réponse et présentent moins d'ondulations après la connexion du FAP ($t = 1,5 s$) avec la nouvelle table de commutation.

La figure (II.19) montre le spectre du courant de source avant et après l'utilisation de la nouvelle table de commutation.

Avant l'utilisation de la nouvelle table de commutation, la valeur du taux de distorsion harmonique $THDi = 1,4\%$. Après l'utilisation de la nouvelle table de commutation, le $THDi$ est réduit à $0,81\%$. Cela démontre l'efficacité du FAP avec la nouvelle table de commutation.

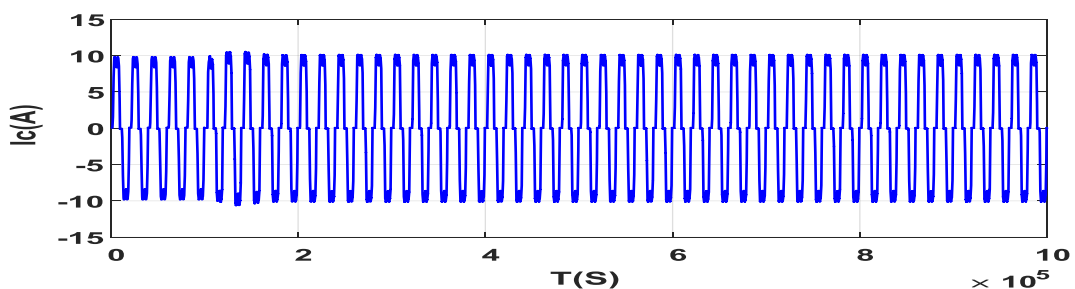


Figure (II.13) : Courant de charge I_c .

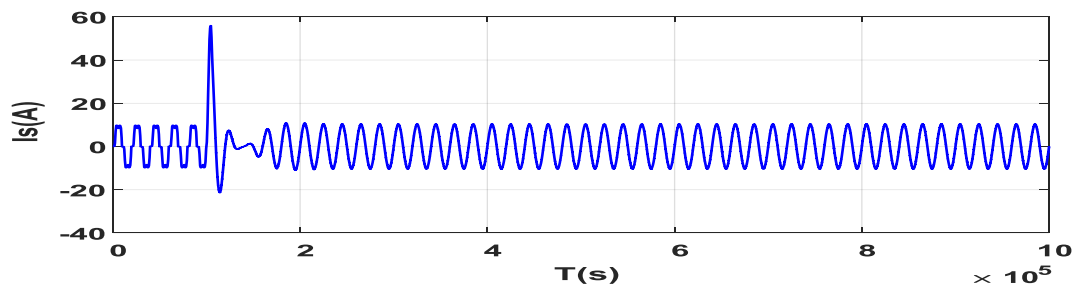


Figure (II.14) : Courant de source I_s .

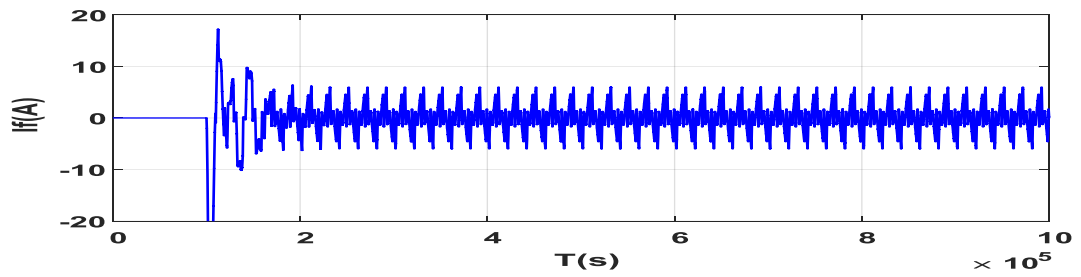


Figure (II.15) : Courant du filtre I_f .

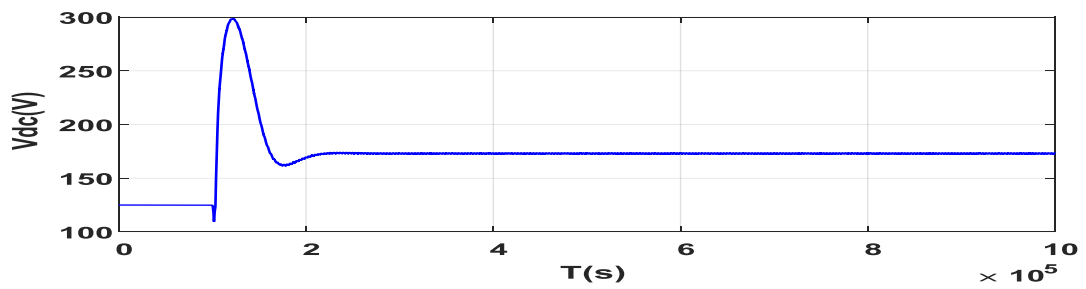


Figure (II.16) : La tension du bus continu V_{dc} avant et après l'application du filtre à $t=1.5$ s.

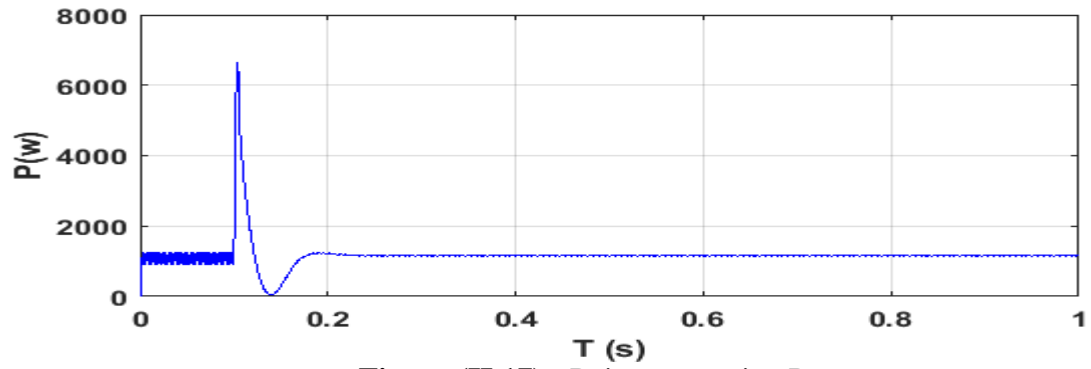
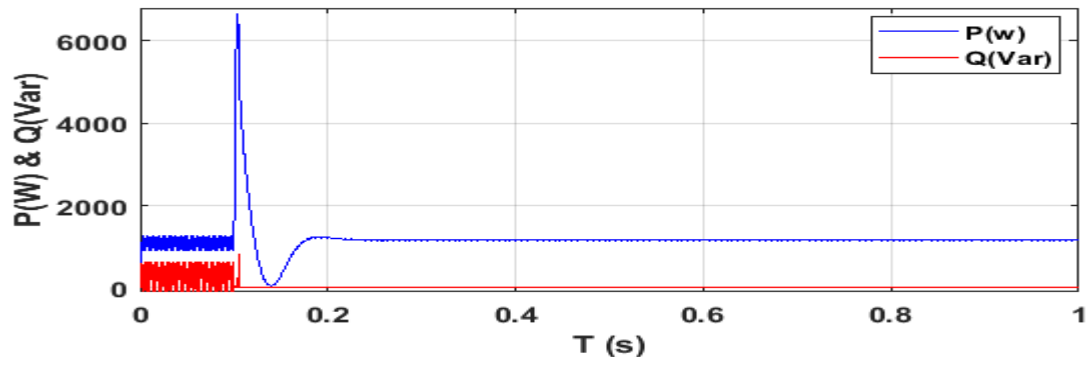


Figure (II.17) : Puissance active P.

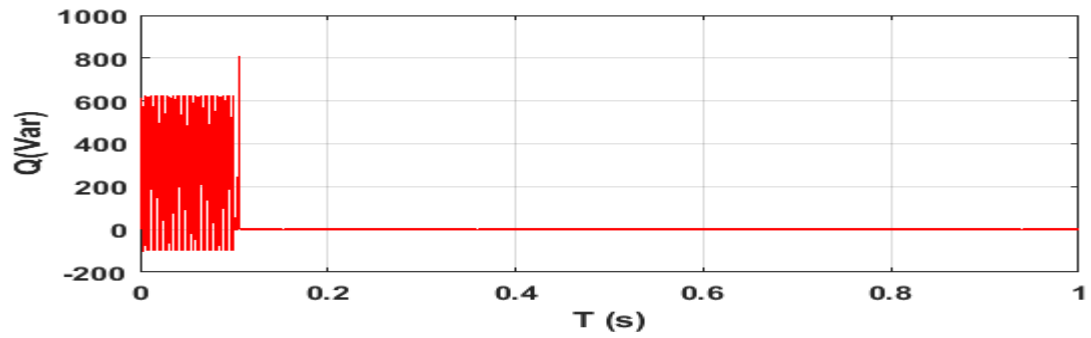
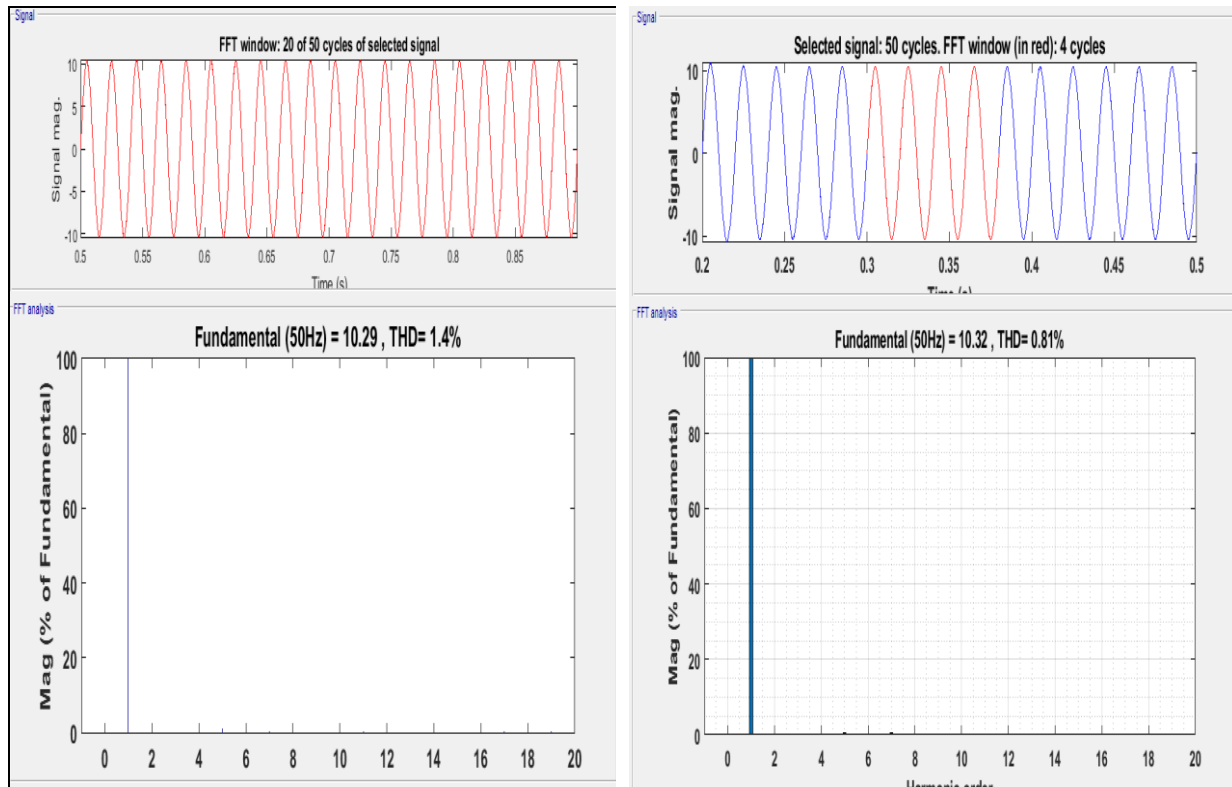


Figure (II.18) : Puissance réactive q avant et après l'application du filtre à $t=1.5$ s



(a)

(b)

Figure (II.19) : Analyse spectrale avant (a) et après (b) nouvelle table de commutation.

II. 7. Conclusion :

De ce qui précède, nous pouvons conclure que la table de commutation classique ne permet pas de réaliser un contrôle simultané de la puissance active et réactive. Par conséquent, il est nécessaire de développer une nouvelle table de commutation qui permet un contrôle précis et simultané des puissances active et réactive dans tous les secteurs. La commande optimale des onduleurs est essentielle car elle joue un rôle crucial dans la réduction des harmoniques générés par les onduleurs. Étant donné que la commande utilisée est la DPC (Direct Power Control), il est essentiel de développer une table de commutation pour améliorer la précision du contrôle de l'onduleur.

Les résultats obtenus confirment l'efficacité de la nouvelle table de commutation par rapport à la table de commutation classique, en permettant un contrôle simultané de la puissance active et réactive.

CHAPITRE III :

La Commande Directe de Puissance (DPC) et DPC-SVM

III.1. Introduction :

Les charges non linéaires telles que les transformateurs, les convertisseurs, etc., ont un impact significatif sur la distorsion harmonique du courant dans le réseau. Ces dispositifs ont la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux, ce qui entraîne une pollution harmonique du courant dans les lignes électriques. Cette pollution harmonique a des effets néfastes, tels que la déformation de la tension du secteur au point de connexion, ainsi que la surchauffe des câbles et des équipements électriques [84]. Afin de remédier à ces problèmes, des normes internationales ont été établies, telles que la norme IEEE 519 [85] et la norme CEI 61000 [86]. Ces normes fixent des limites pour le courant et la tension en termes de distorsion harmonique totale (THD) dans le réseau d'alimentation. Afin de réduire ou d'éliminer les harmoniques causées par des charges non linéaires ou l'électronique de puissance connectée au réseau [87], Afin de réduire ou d'éliminer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent : la commande directe de puissance (DPC) et DPC –SVM ...ect.

La DPC est une stratégie de commande haute performance basée sur la théorie de la puissance instantanée [88] et plus clairement présenté dans l'idée de base de la commande DPC est basée sur le choix du vecteur de tension de commande à partir de la table de commutation constituée de défauts de puissance active et réactive en plus de la position angulaire du vecteur de tension source de sorte que l'état de commutation optimal est déterminé pour améliorer les performances [89]. Dans la méthode DPC – SVM, les états de commutation du convertisseur sont générés par un bloc modulateur SV-PWM fonctionnant avec une fréquence de commutation constante [90]. L'utilisation de la technique SVM pour la génération du signal de commutation du convertisseur est basée sur le modèle de contrôle de puissance du convertisseur en coordonnées synchrones (dq). Cette approche vise à garantir un échange de puissance active stable, une bonne réponse dynamique, une fréquence de commutation constante et surtout à fournir un courant de ligne sinusoïdal [91]. L'objectif principal de cette stratégie est d'améliorer le facteur de puissance et de réduire la distorsion harmonique totale.

Dans ce chapitre, nous présenterons une étude sur l'onduleur couplé au réseau en utilisant la commande DPC et DPC-SVM. Nous donnerons une explication détaillée de la commande DPC et DPC-SVM, et enfin, nous présenterons les résultats de simulation obtenus.

III.2. Etat de l'art de la technique DPC :

La DPC a été proposée en 1991 par Ohnishi en utilisant des valeurs de puissance active et réactive comme variables de contrôle au lieu de courants triphasés instantanés. La commande directe de puissance (DPC) a été développée par Noguchi et Takahashi en 1998. Le terme "contrôle direct de l'énergie" a été utilisé pour la première fois par Noguchi.

La DPC est basée sur le calcul de la puissance active et réactive à partir des mesures du courant et de la tension d'entrée d'un convertisseur PWM, et elle implémente un contrôle de puissance en temps réel en utilisant des comparaisons d'hystérésis et une table de commutation.

Le vecteur de tension de commande est déterminé à partir de la table de commutation, qui est construite en prenant en compte les valeurs de puissance active et réactive ainsi que la position angulaire du vecteur de tension source. Cela permet de sélectionner l'état de commutation optimal [92]. Afin d'améliorer les performances, l'espace vectoriel est divisé en douze secteurs pour déterminer la position du vecteur de tension source. L'espace vectoriel est divisé en douze secteurs pour déterminer la position du vecteur de tension source. Cette approche permet de se passer des blocs de modulation et des boucles de régulation internes, ce qui nécessiterait des transformations de coordination. Les avantages de cette méthode sont de séparer le contrôle de puissance et d'obtenir de bonnes performances dynamiques.

III.3. La Commande directe de puissance :

Le système étudié est représenté sur la Figure (III.1). Le système global est composé de trois blocs principaux : Le premier est un système photovoltaïque (PV) qui fournit de l'énergie à un circuit. Le suivant est le convertisseur élévateur DC-DC contrôlé à l'aide du contrôleur P&O MPPT. Le second consiste en un DPC pour l'onduleur qui a deux rôles principaux : le premier est de combiner le réseau électrique avec le système photovoltaïque et le second est de compenser les harmoniques et la puissance réactive, le troisième est le réseau triphasé [81].

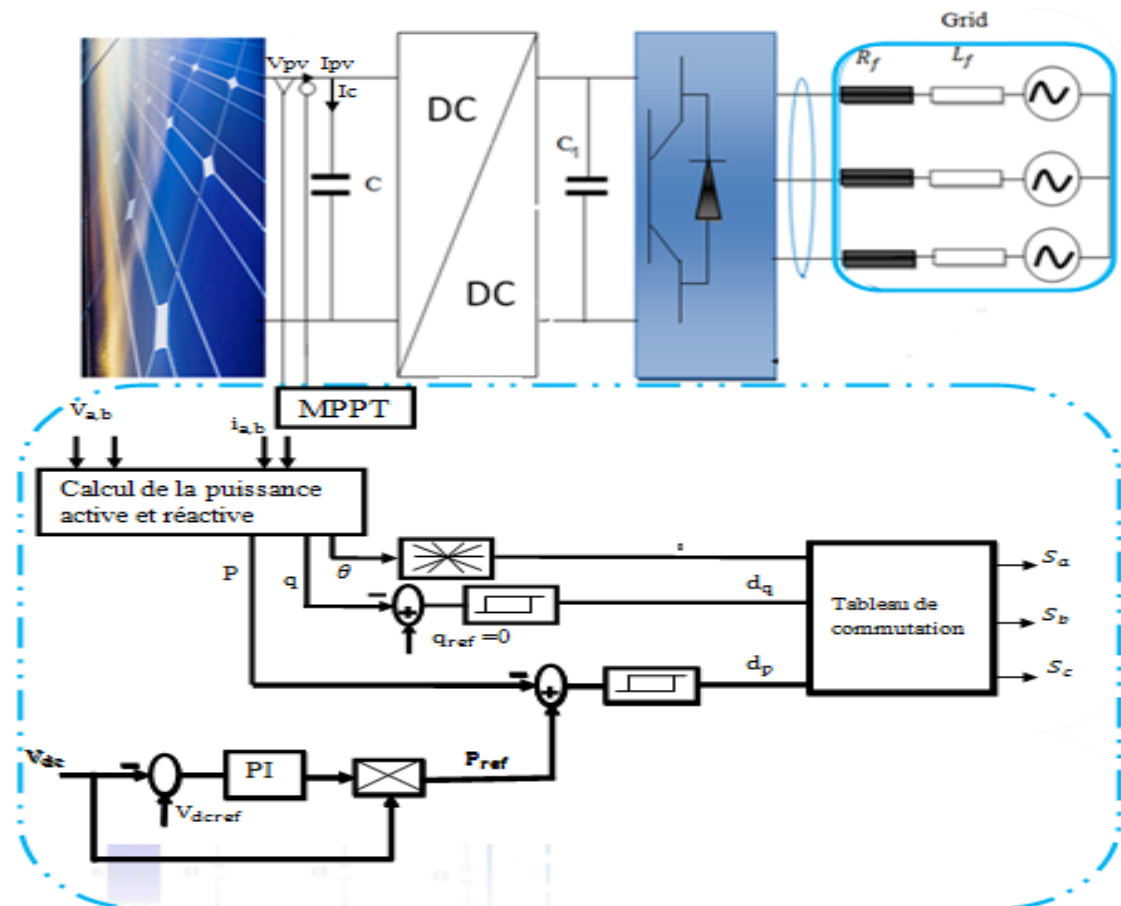


Figure (III.1) : Etude de simulation du DPC.

III.3.1 La table de commutation :

En utilisant la position angulaire et les signaux d'erreur numériques en entrée, ces derniers déterminent les états de commutation des interrupteurs. La table de commutation stocke tous les états de commutation du convertisseur, représentés par les variables d_q et d_p . Lorsque ces variables prennent la valeur "1", la variable contrôlée (P ou Q) augmente, tandis que la valeur "0" indique une diminution de la variable contrôlée.

La largeur de la bande d'hystérésis a un impact sur l'ensemble du système, ce qui se traduit par des effets sur les performances du filtre actif, le THD_i et la fréquence de commutation moyenne.

Alors qu'à la sortie, nous obtenons les commandes pour contrôler l'ouverture et la fermeture des IGBT de l'onduleur par les états des commutateurs S_a , S_b et S_c , comme indiqué sur la Figure (III.2). Cela est réalisé en utilisant une table de commutation qui est basée sur les dérivées des puissances P et q [93].

Dans chaque secteur, la table de commutation est utilisée pour déterminer les états de commutation du convertisseur à chaque instant spécifique. Cela est réalisé en fonction de l'ensemble des signaux d'entrée numériques, comme indiqué dans le Tableau III.1. [94]:

dq	dp	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
1	0	V_6	V_7	V_1	V_0	V_2	V_7	V_3	V_0	V_4	V_7	V_5	V_0
	1	V_7	V_7	V_0	V_0	V_7	V_7	V_0	V_0	V_7	V_7	V_0	V_0
0	0	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
	1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1

$V_1(100)$, $V_2(110)$, $V_3(110)$, $V_4(011)$, $V_5(001)$, $V_6(101)$, $V_7(111)$.

Tableau (III.1) : Table de commutation.

III.4. Résultats de simulation sous Matlab-Simulink:

Afin de vérifier les performances dynamiques du contrôle de puissance utilisant la commande DPC, on a réalisé des simulations en mettant l'accent sur ses propriétés visant à maintenir la qualité de l'énergie. La méthode de simulation utilisée a été validée dans MATLAB/Simulink.

Tableau (III.2): Paramètres de système (DPC).

<i>Paramètre</i>	<i>Value</i>
<i>Puissance maximale (P_{mpp})</i>	<i>320.606W</i>
<i>Puissance maximale</i>	<i>5129.696W</i>
<i>Résistance série (R_s)</i>	<i>0.2007 Ω</i>
<i>Tension de bus continu (V_{dc})</i>	<i>700 V</i>
<i>Tension du réseau (V_{max})</i>	<i>$220\sqrt{2}$ V</i>

Inductance du filtre (L_f)	0.01 H
Temps d'échantillonnage (T_s)	$1e^{-6}s$
Capacitance de bus continu (c)	0.6Mf

La courbe représentée sur la Figure (III.2) concerne la tension et le courant de ligne.

La Figure (III.3) représente les résultats de simulation de la Puissance active instantanée On note que la puissance active P est perturbée et n'est pas constant au début et après l'instant $t=0.02s$ la puissance active P est constante on peut voir que les puissances active possèdent un temps de réponse significative et moins d'ondulation et suivre la valeur de référence.

La Figure (III.4) représente les résultats de simulation de la puissance réactive instantanée On note que la puissance q perturbe et après l'instant $t=0.02s$ la puissance q est nulle assurant ainsi une opération d'un facteur de puissance unitaire. Concernant la Figure (III.6), elle représente les résultats de simulation de la Puissance q et P instantanée dans laquelle le temps de réponse est remarquable (petit) quant à la puissance q et P et moins d'ondulation.

La Figure (III.6) représente les résultats de simulation de la Analyse spectrale du courant de source, utilisation la technique de DPC sera la valeur du taux de distorsion harmonique THDi = 1,95% Cela prouve l'efficacité du DPC.

La Figure (III.7) représenté les résultats de simulation du secteur (a) et de la position angulaire (b).

La Figure (III.8) représenté les résultats de simulation de la tension du bus continu on note que la tension V_{dc} suit la valeur référence V_{ref} , Cela prouve l'efficacité de la commande DPC.

Dans cette partie, la commande directe de puissance classique est décrite, et une simulation d'un onduleur avec la commande DPC à douze secteurs est réalisée. Les résultats obtenus révèlent que la fréquence de commutation n'est pas fixe. Pour obtenir une forme d'onde de courant acceptable, il est nécessaire d'avoir une valeur élevée d'inductance. Ainsi, la commande DPC-SVM sera étudiée dans la partie suivante afin d'améliorer ces aspects.

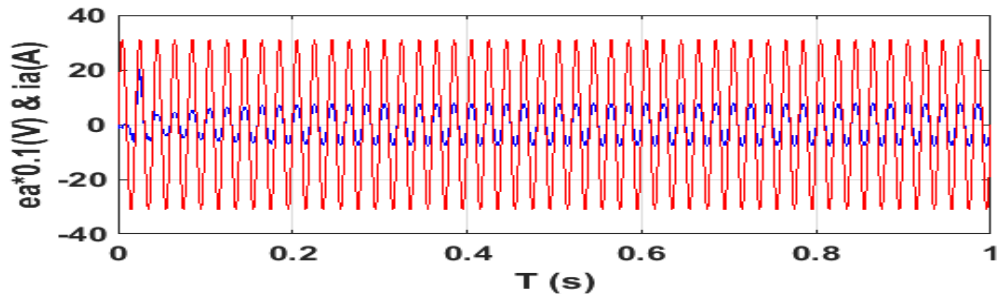


Figure (III.2) : Tension et courant de ligne.

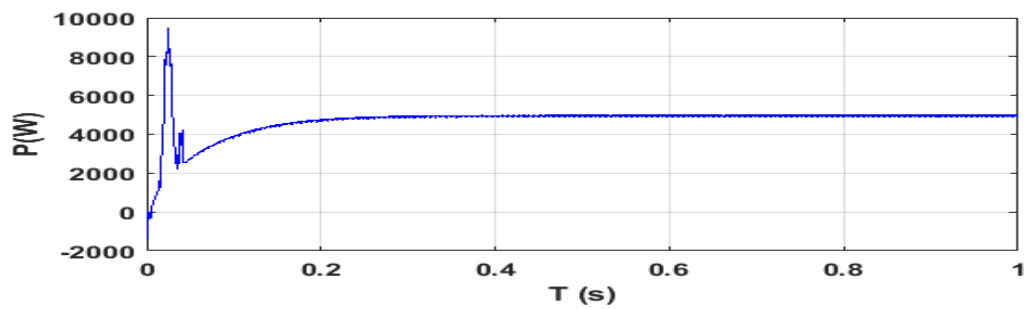


Figure (III.3) : Puissance active P.

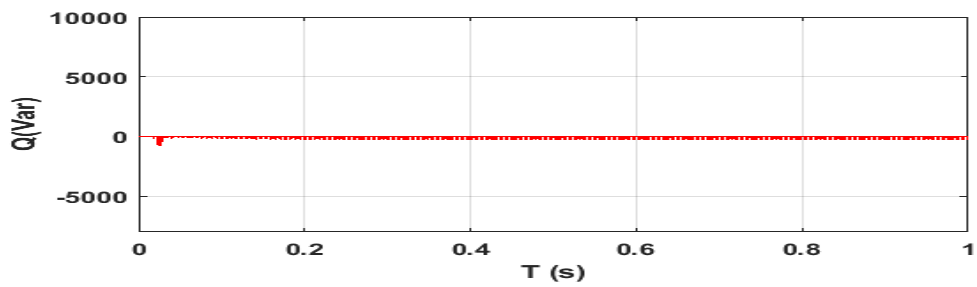


Figure (III.4) : Puissance réactive q.

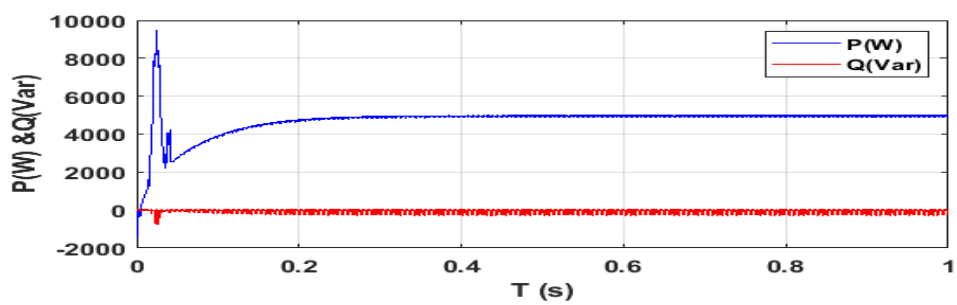


Figure (III.5) : La Puissance active et réactive.

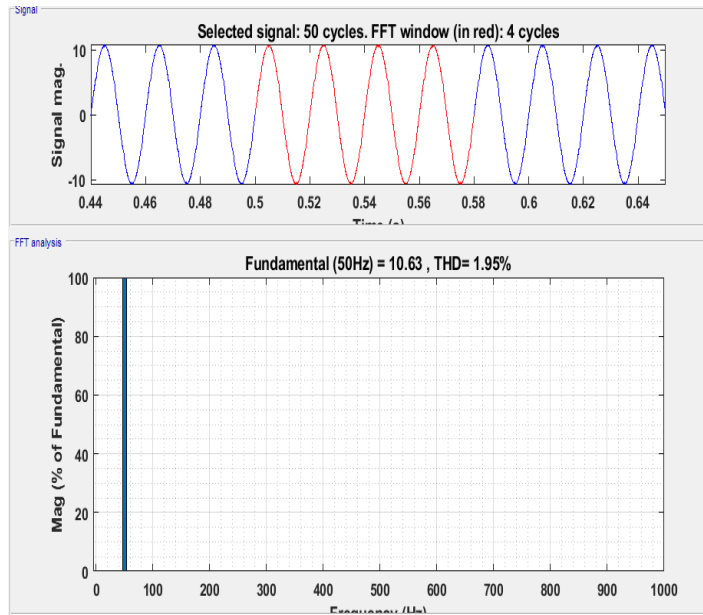


Figure (III.6) : Analyse spectrale du courant de source.

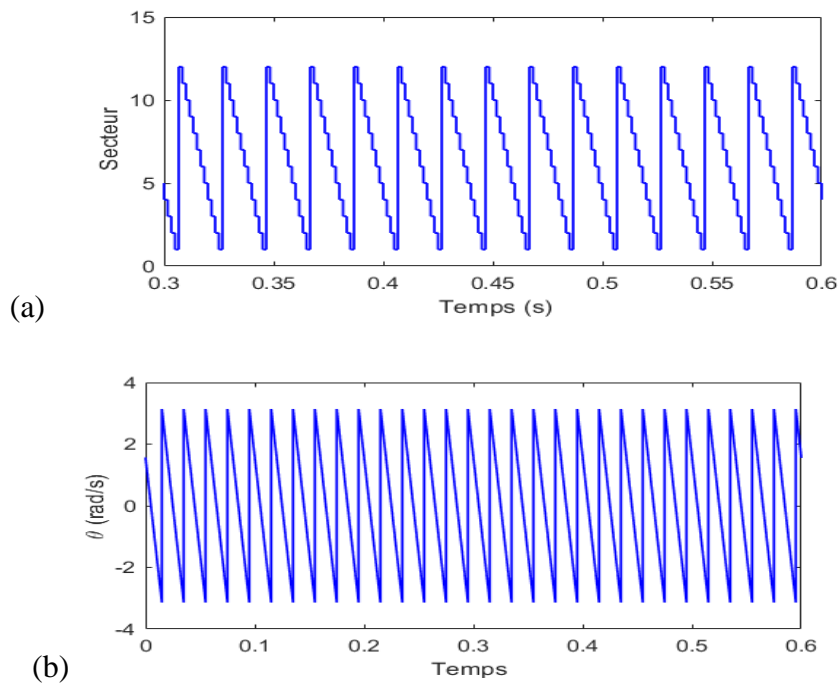


Figure (III.7) : Secteur (a) et de la position angulaire (b).

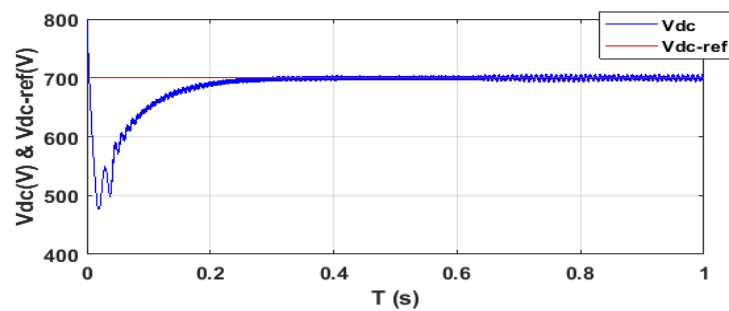


Figure (III.8) : Tension du bus continu.

III.5. Commande direct de puissance avec modulation vectorielle DPC-SVM:

Les avantages du DPC-SVM sont nombreux. Contrairement au DPC classique, il offre une fréquence de commutation constante, ce qui permet de réduire ou d'éliminer les harmoniques. De plus, le DPC-SVM permet d'apporter quelques modifications au système afin d'améliorer ses performances. L'inconvénient principal de la commande DPC réside dans sa fréquence de commutation non constante. Pour surmonter les limitations liées à ce fonctionnement, une solution efficace consiste à utiliser un SVM [95].

III.6. Principe de la commande DPC-SVM:

Dans le schéma fonctionnel présenté par la figure (III.1) du DPC-SVM, il existe une différence avec le DPC classique. Dans le DPC-SVM, la comparaison hystérétique utilisée dans le DPC classique est remplacée par deux boucles internes pour réguler la puissance réactive et active avec le régulateur IP. En fixant la puissance de référence q_{ref} à zéro, une modulation vectorielle est introduite lors de la mesure du courant et de la tension dans la transformation de coordonnées $(dq - \alpha\beta)$. Lors du calcul de la puissance instantanée, le signal à l'entrée du module SVM est utilisé pour déterminer l'état de l'IGBT [96] [97].

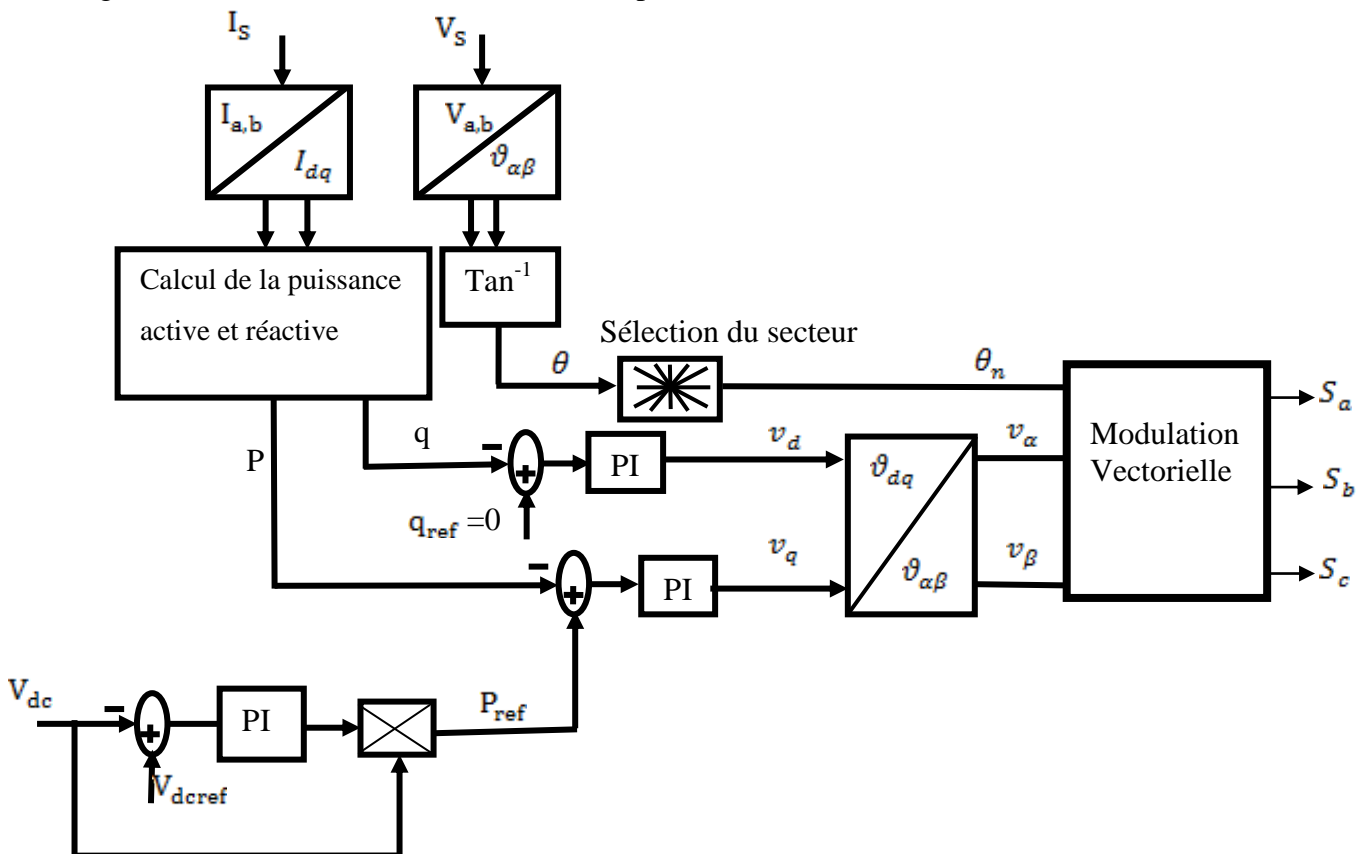


Figure (III.9): La commande directe de puissance avec modulation vectorielle (DPC-SVM).

Le calcul de la puissance réactive (q) et active (P) est basé sur deux étapes. La première étape consiste à projeter la tension du réseau sur l'axe d (Park), et la deuxième étape consiste à déterminer la composante orthogonale à l'axe q en utilisant le flux virtuel. Les étapes sont les suivantes :

$$\begin{cases} P = e_d i_d + e_q i_q \\ q = e_d i_q - e_d i_d \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Le modèle peut être simplifié selon la Figure (III.10), l'axe de repère (dq) et l'axe (d) coïncide sur lui le vecteur de tension réseau du système triphasé équilibré L'équation (III.1) devient :

$$\begin{cases} e_d = U = \sqrt{\frac{3}{2}} U_m \\ e_q = 0 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

L'équation de puissance q et P est :

$$\begin{cases} P = e_d i_d \\ q = e_d i_q \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

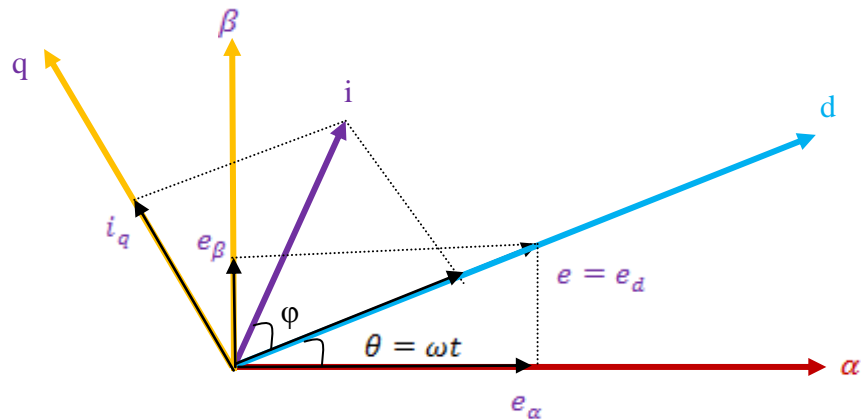


Figure (III.10) : Diagramme vectoriel de la tension réseau.

Le bloc SVM est responsable de la commande de l'interrupteur de puissance dans la boucle de régulation de la puissance réactive et active.

Les paramètres du régulateur de puissance PI peuvent être calculés en utilisant un modèle simplifié du redresseur dans le repère (d, q). L'expression dans le repère $d-q$ est la suivante :

$$\begin{cases} v_d = R i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q + e_d \\ v_q = R i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

L'équation de la tension réseau sur l'axe d s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} v_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + U \\ v_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d \end{cases} \quad (III.5)$$

Régulateur PI avec boucle de contrôle qui contrôle les puissances P et q. Voir la Figure (III.11) :

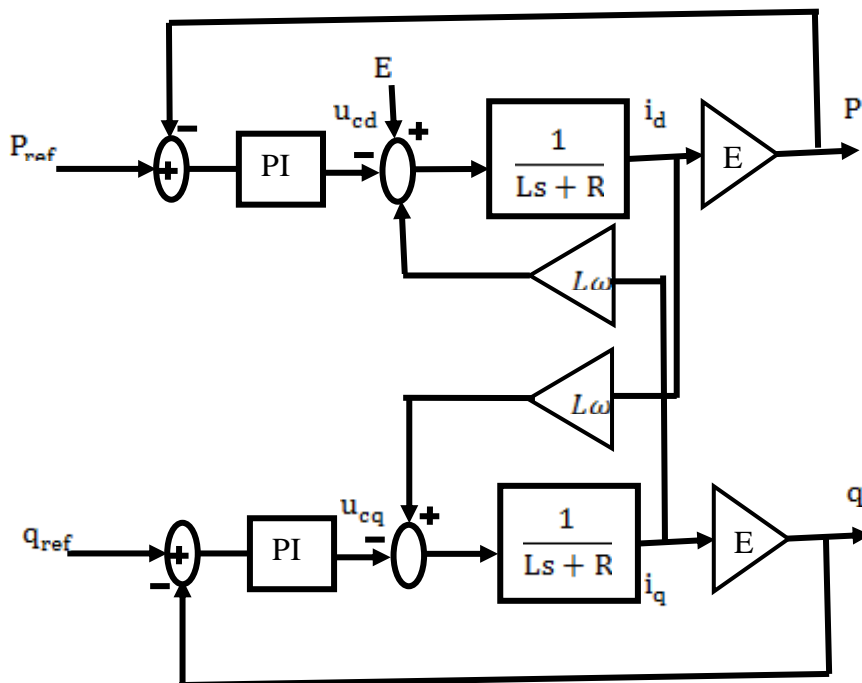


Figure (III.11) : Schéma synoptique des boucles de p et q.

Les courants i_d et i_q sont définis par les tensions V_d et V_q , régulées par deux régulateurs PI. C'est le résultat de la régulation des puissances réactive et active.

Les coefficients du correcteur PI peuvent être modifiés en utilisant le théorème de superposition. Dans ce cas, la boucle de puissance réactive est complètement indépendante de la boucle de régulation de puissance active P, comme illustré dans la figure (III.12).

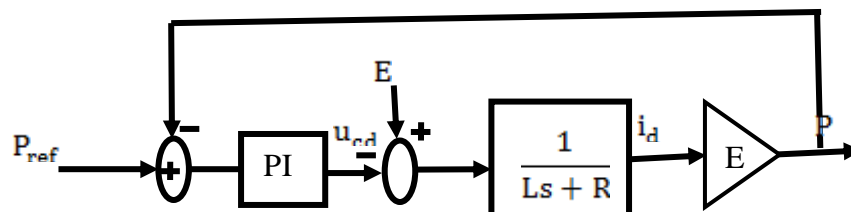


Figure (III.12) : Schéma synoptique des boucles de P.

La régulation PI ajuste précisément la commande de tension afin de maintenir la tension de ligne à la valeur souhaitée, en dépit des variations et des perturbations.

La fonction de transfert est donnée par :

$$H(s) = \frac{E(k_p s + k_i)}{Ls^2 + (Ek_p + R)s + Ek_i} \quad (\text{III.6})$$

La fonction de deuxième ordre est donnée par :

$$F(s) = \frac{1}{s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{III.7})$$

En comparant l'expression (III.6) et (III.7) On obtient ce qui suit :

$$k_p = \frac{2.L.\varepsilon\omega_n - R}{E} \quad (\text{III.8})$$

$$k_i = \frac{L.\omega_n^2}{E} \quad (\text{III.9})$$

Il est important de souligner que l'équation (III.9) fournit la solution pour les deux correcteurs.

III.7. Résultats de simulation sous Matlab-Simulink:

Pour évaluer les performances et la faisabilité de la technique DPC-SVM, une simulation a été réalisée à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. Cette simulation permet de mettre en évidence les caractéristiques de la commande DPC-SVM et de vérifier ses performances dynamiques en contrôlant les puissances.

Tableau (III.3): Paramètres de système (DPC/SVM).

<i>Paramètre</i>	<i>Value</i>
<i>Puissance maximale (2 × 3)</i>	<i>1923.636W</i>
<i>Résistance série (Rs)</i>	<i>0.2007 Ω</i>
<i>Tension de bus continu (V_{dc})</i>	<i>700 V</i>
<i>Tension du réseau (V_{max})</i>	<i>220√2 V</i>
<i>Inductance du filtre (L_f)</i>	<i>0.02 H</i>
<i>Temps d'échantillonnage (T_s)</i>	<i>1e⁻⁶ s</i>

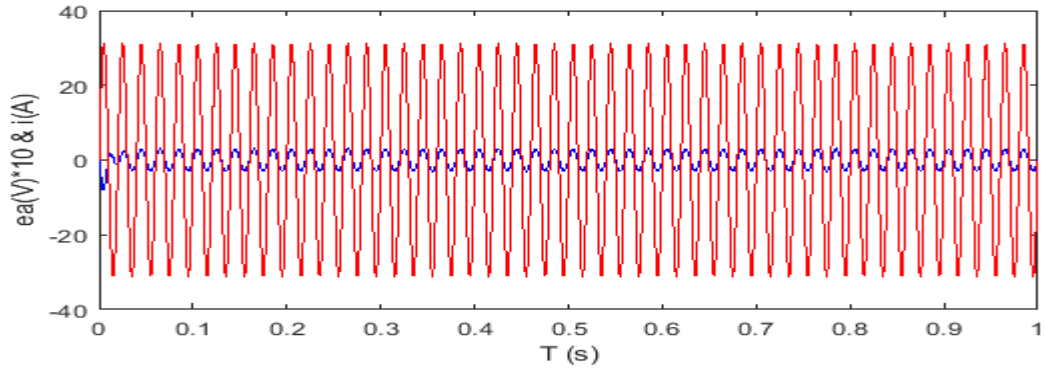


Figure (III.13) : Tension et courant de ligne.

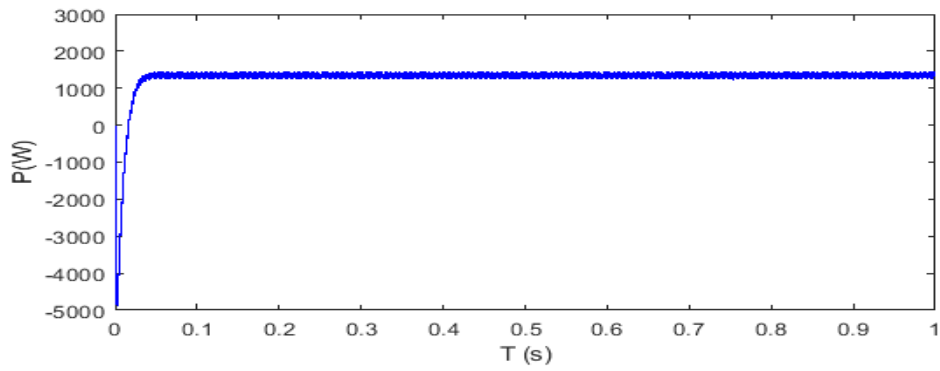


Figure (III.14) : Résultats de simulation de la Puissance active.

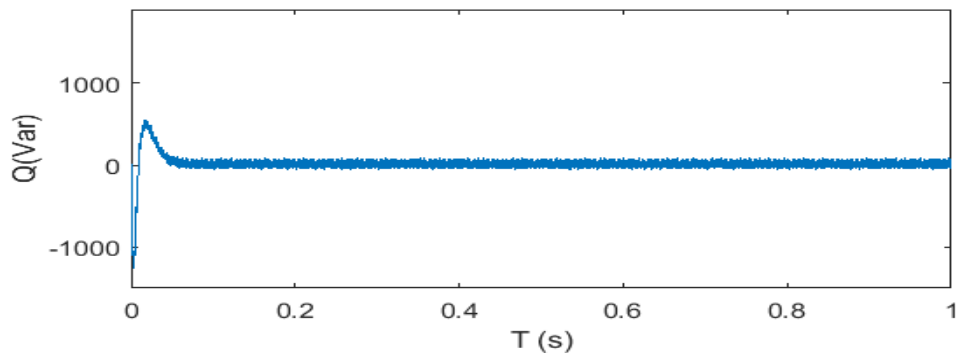


Figure (III.15): Résultats de simulation de la Puissance réactive.

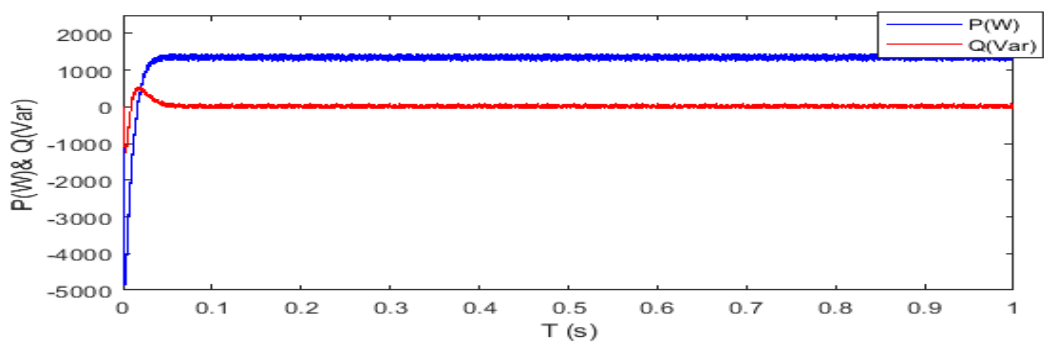


Figure (III.16): La Puissance réactive et active.

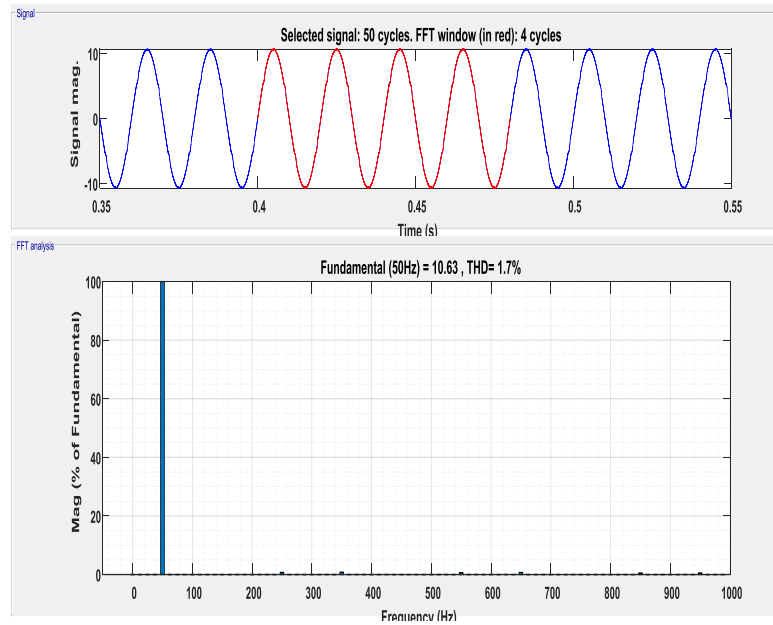


Figure (III.17) : Analyse spectrale du courant de source.

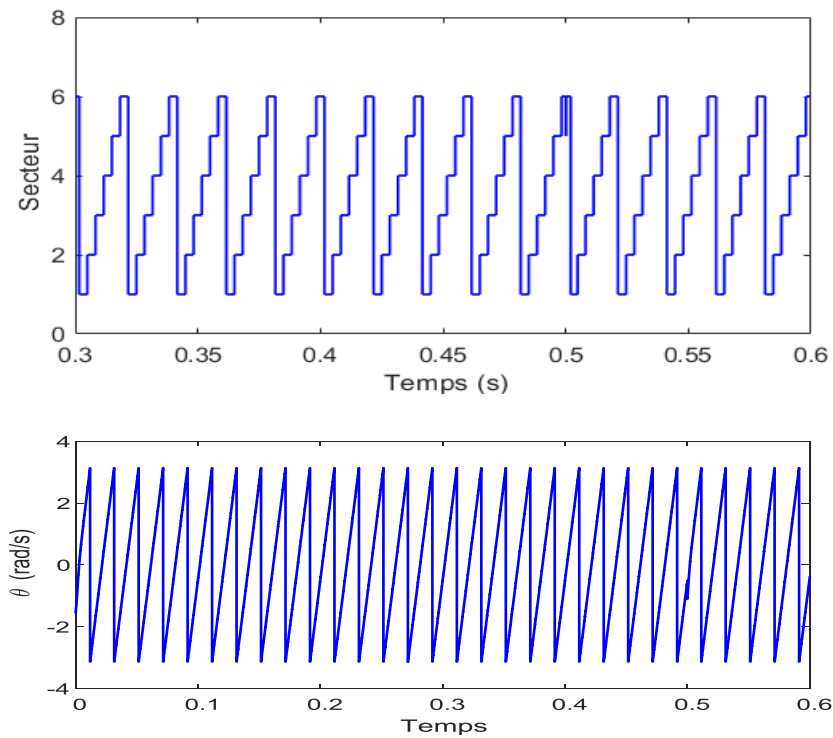


Figure (III.18) : Secteur (a) et la position angulaire (b).

La Figure (III.14) présente les résultats de simulation de la puissance active instantanée, on note que la puissance active P perturbé et n'est pas constant au début et après l'instant $t=0.03s$ la puissance active P est constante on peut voir que les puissances active possède un temps de

réponse considérablement satisfait et moins d'ondulation et la puissance P suivant la valeur de référence.

La Figure (III.16) représente la résultats de simulation de la Puissance réactive et active instantanée, on peut voir que les puissances réactive et active atteint un temps de réponse désirée et moins d'ondulation, Sur cette figure, on remarque aussi que la puissance réactive et active sont instables avant l'instant $t = 0,03s$ la puissance réactive q est égale à zéro et l'énergie active P est devenue constante dans sa valeur et sans ondulation Puisque le moment de stabilisation (la puissance réactive q est égale à zéro et l'énergie active P est devenue constante) était simultanée et suivre la valeur de référence et cela prouve l'efficacité de la commande DPC-SVM.

La Figure (III.17) présente les résultats de simulation de l'analyse spectrale du courant de source, ou avec l'utilisation de la technique de DPC-SVM, la valeur du taux de distorsion harmonique est $THDi = 1,7\%$, ce qui prouve l'efficacité de la technique de commande DPC-SVM.

La Figure (III.18) présente le secteur (a) et la position angulaire (b).

III.8. Etude comparative :

Dans cette partie du travail, une comparaison des résultats de l'onduleur connecté au réseau utilisant la technologie de la commande DPC et DPC-SVM est étudiée afin de vérifier l'efficacité des deux stratégies. Les performances des deux méthodes de commande, DPC et DPC-SVM, sont comparées pour évaluer leur efficacité.

Les critères de performance retenus pour cette étude sont les puissances q et P ainsi que le $THDi$. Les tests sont réalisés pour chacune des deux techniques de commande en utilisant les mêmes critères et conditions que lors de la simulation afin de permettre une comparaison précise.

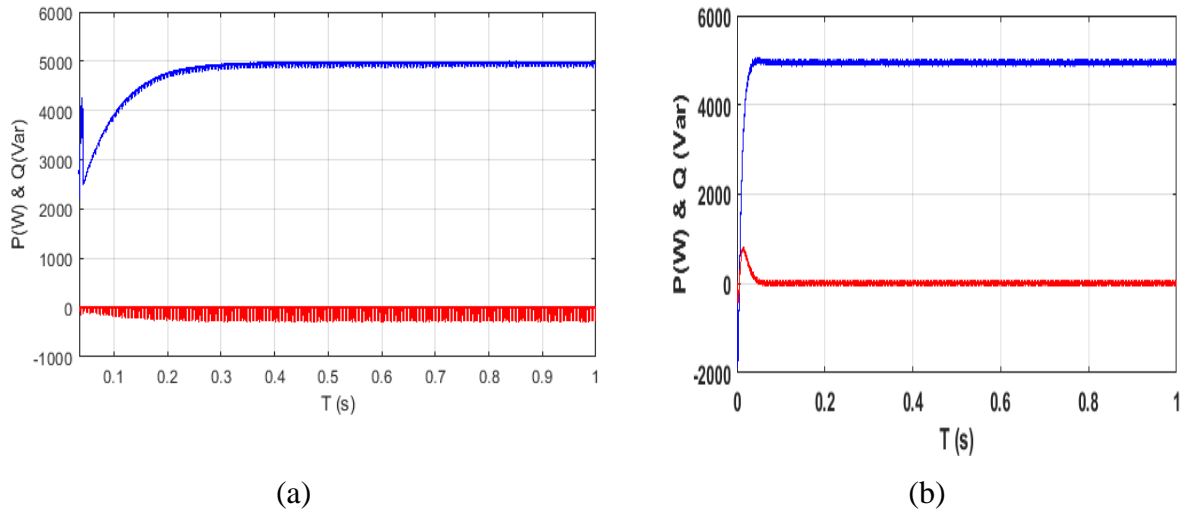


Figure (III.19) : Résultant des commandes DPC (a), DPC-SVM (b)

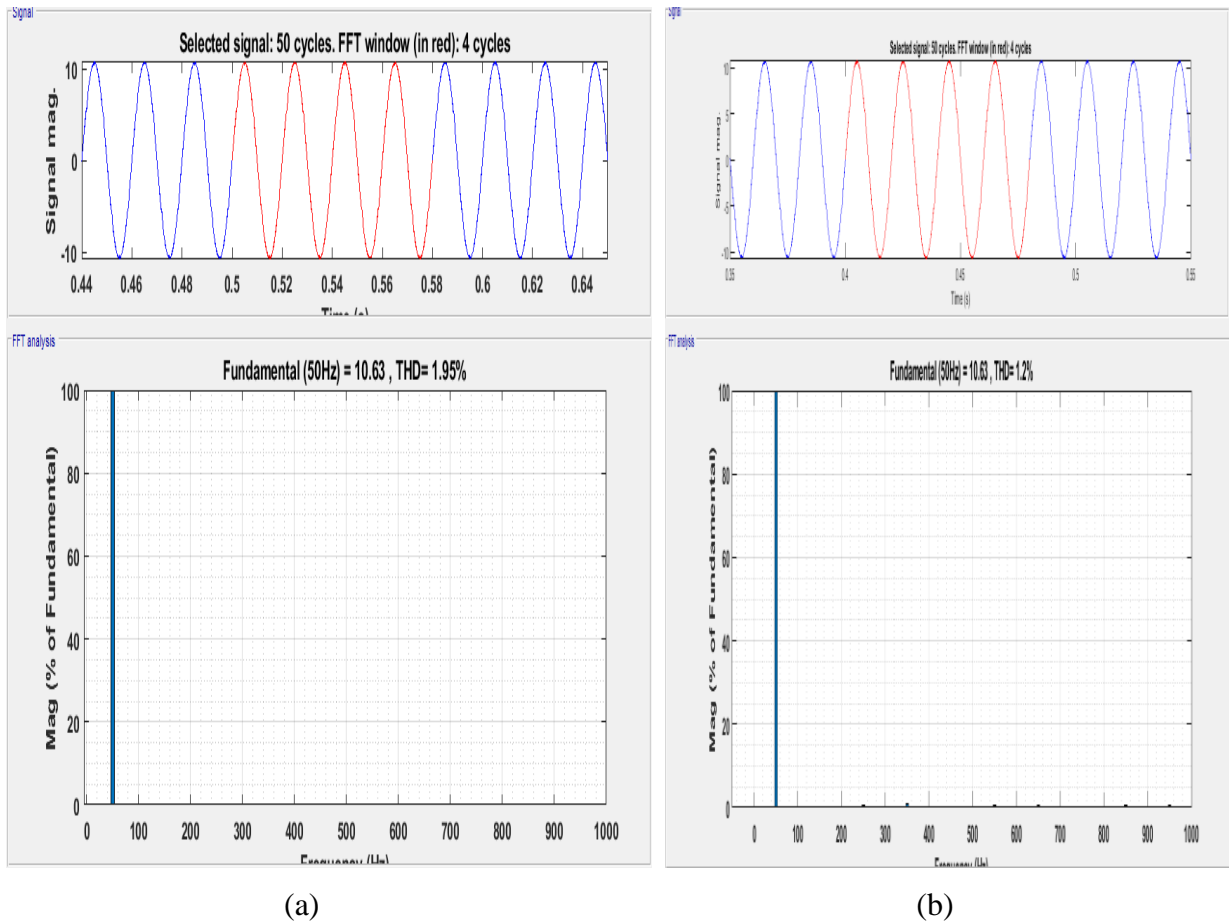


Figure (III.20) : Analyse spectrale des commandes DPC (a), DPC-SVM (b).

La figure (III.19) présente les puissances réactives et actives résultant de DPC (a) et DPC-SVM (b) et la Figure (III.20) présente l'analyse spectrale du courant de source pour

l'onduleur connecté au réseau en utilisant la topologie de commande suivante : commandes DPC (a), DPC-SVM (b)

A partir des figures (III.19) et (III.20) on peut noter :

- En utilisant la commande DPC-SVM, on peut obtenir une réponse dynamique plus rapidement que les autres méthodes (DPC) et le taux d'harmonique $THD = 1,2\%$ (Fig. III.20-b).
- La stratégie DPC-SVM permet d'obtenir une réponse dynamique rapide sans ondulations ainsi qu'une minimisation de la fonction coût.
- A partir de la figure (III.19) qui décrit les puissances réactive et active résultantes de la commande DPC-SVM (b), on remarque que la puissance P revient rapidement à son état stable sans ondulations
- Pour la commande DPC (a), le temps de réponse est plus long, tandis que les ondulations restent élevées par rapport à la commande DPC-SVM (b) ou on a un $THD = 1,95\%$ (Fig. III.20-a).

III.9. Conclusion :

À partir de ces résultats, on remarque que la fréquence de commutation est constante. Ainsi, avec une valeur d'inductance minimale, nous observons une amélioration de la forme d'onde du courant qui devient presque sinusoïdale. De plus, le taux de distorsion harmonique est réduit et la tension devient continue, car le régulateur induit une réponse très rapide.

Lors de l'exécution de la commande avec DPC-SVM, la valeur du taux de distorsion harmonique ($THDi$) est réduite à 1,2%, ce qui est considérablement inférieur à la valeur obtenue avec la commande DPC. Cette diminution démontre l'efficacité de la méthode DPC-SVM. Il a été conclu que la structure DPC-SVM présente des performances acceptables, car elle fonctionne à une fréquence de commutation constante, ce qui la rend adaptée à des applications industrielles en tant qu'onduleur de contrôle. De plus, le DPC-SVM répond instantanément aux changements de consigne de puissance et offre des résultats améliorés.

CHAPITRE IV :

***Approches d'Amélioration de la
Commande DPC***

IV.1 Introduction:

La production d'énergie a toujours été un défi majeur en raison des besoins énergétiques croissants à mesure que les populations et les communautés industrielles augmentent. En conséquence, les pays développés auront besoin de plus en plus d'énergie pour mettre en œuvre leur développement. Il existe plusieurs types de sources d'énergie renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque. Si l'énergie photovoltaïque est connue depuis des années comme source d'énergie électrique de quelques watts à quelques mégawatts, c'est une alternative intéressante aux sources d'énergie traditionnelles en raison de ses avantages [98].

Ces dernières années, plusieurs chercheurs travaillent à développer des techniques de contrôle des systèmes photovoltaïques pour maximiser la production d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire [99]. Plusieurs suggestions ont été proposées par les chercheurs pour développer des systèmes connectés au réseau, y compris des convertisseurs DC-DC. De nombreuses topologies de convertisseurs DC-DC ont été conçues dans le but d'améliorer le rendement [100], comme les transformateurs de type résonant qui utilisent une conversion de courant nul ou une commutation de tension nulle et le système de conversion DC-AC qui utilise le type résonant CLC complet convertisseur DC-DC à pont et nouveau convertisseur DC-DC à gain élevé non isolé appelé Double Zeta Quadratic Converter et combinaison de deux étages de suralimentation, à savoir Quadratic Boost Zeta et Isolated Zeta formant un convertisseur quadratique boost intégré à haute tension statique gain.

Cependant, dans ce type de transformateurs, le volume du circuit augmente. Une autre topologie d'adaptateur DC-DC a été utilisée pour améliorer l'efficacité de la production [101].

En plus de cela, diverses méthodes de contrôle de la puissance ont été prises en compte dans des conditions de réseau déséquilibrées. Dans l'article [102], l'auteur propose DPC-SVM, ceci pour éliminer les fluctuations de puissance et obtenir une fréquence de commutation constante. L'un des avantages du DPC-SVM est qu'il élimine la table de commutation et utilise le bloc SVM de sorte que la fréquence de commutation devient constante [103]. Cela garantit un bon transfert d'énergie entre le PV et le réseau; il a également une fréquence d'échantillonnage plus basse qu'un DPC conventionnel qui aide à surmonter le problème des fluctuations d'énergie. La technique de SVM est donc utilisée pour obtenir une fréquence de commutation fixe et moins de pulsations de puissance [104, 105].

Dans l'étude [106], DPC-SVM est utilisée pour obtenir une puissance active constante et des courants de réseau sinusoïdaux en utilisant la théorie de l'énergie étendue. Alors que

Ouchen et al. [107] ont proposé d'améliorer le remplacement des contrôleurs PI par des contrôleurs à mode glissant du second ordre (ST-SMC) dans les boucles de contrôle de puissance active et réactive. Benbouhenni [108] a proposé un contrôleur en mode de glissement neuronal basé sur la modulation de largeur d'impulsion neurale (NPWM), alors que dans l'article [109] l'auteur propose un DPC basé sur le mode de glissement neural super-twisting (NSTSM). Heydari et coll. [110] ont présenté un DPC basé sur la logique floue et l'algorithme génétique (GA). Selon la recherche [111], les performances et la résistance du DPC conventionnel et de la méthode NDPC-NPWM sont comparées.

Dans ce chapitre, nous étudions un système PV connecté au réseau à l'aide d'un convertisseur boost DC-DC optimisé avec harmonique injectée dans la Commande direct de puissance avec modulation vectorielle (DPC-SVM). Le DPC-SVM conventionnel a également été amélioré afin que la puissance réelle puisse suivre avec précision sa référence. Nous parlerons également du rôle du SVM dans l'amélioration des fluctuations de puissance et l'obtention d'une fréquence de découpage stable.

Dans un premier temps, nous commençons par expliquer le concept du convertisseur DC-DC utilisé et son fonctionnement ; Dans la deuxième étape : nous expliquons la puissance réactive étendue, un des points positifs de cette méthode proposée est l'annulation des oscillations d'énergie réactive et active.

Dans la première étape: le circuit convertisseur fonctionne comme un levier de tension, sa vitesse d'augmentation est bien supérieure à celle du convertisseur conventionnel. Le circuit a deux condensateurs identiques qui sont chargés en parallèle et sont automatiquement déchargés par la transition marche-arrêt (1-0) du dispositif de commutation principal. Le circuit est similaire au circuit conventionnel mais diffère dans la connexion des condensateurs $c1$ et $c2$.

Dans le cas $S1 = 0$, les deux condensateurs sont chargés en même temps.

Dans le cas $S1 = 1$, les condensateurs sont déchargés en même temps vers le circuit de sortie lorsqu'ils sont connectés en série par $S1$.

Ce convertisseur proposé est capable de donner une tension dans la sortie plus grande, ce convertisseur est meilleur que le convertisseur élévateur conventionnel.

IV.2. Principe du système :

Le système étudié est représenté sur la Figure (IV.1). Le système global est composé de trois blocs principaux : Le premier est un système photovoltaïque (PV) qui fournit de l'énergie à notre circuit étudié. Le suivant est le convertisseur élévateur DC-DC contrôlé à l'aide du

contrôleur P&O MPPT. Le second consiste en un DPC-SVM pour l'onduleur qui a deux rôles principaux : le premier est de combiner entre le réseau et le système PV et le second est de compenser la puissance réactive, le troisième est le réseau triphasé.

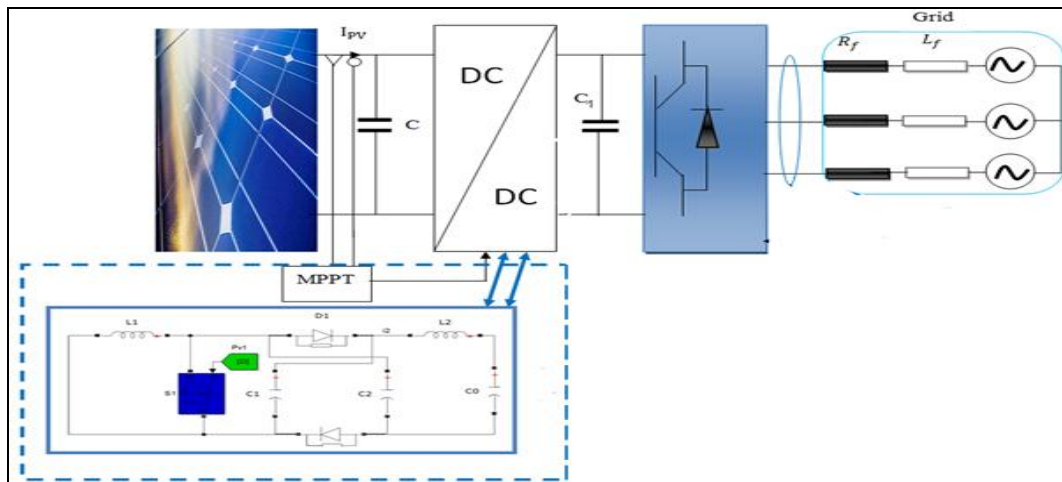


Figure (IV.1): Schéma global du système.

Le convertisseur DC-DC proposé peut fournir une tension de sortie plus élevée que le boost conventionnel [112], grâce aux deux condensateurs (c_1, c_2) fixés en parallèle comme sur Figure (IV.2).

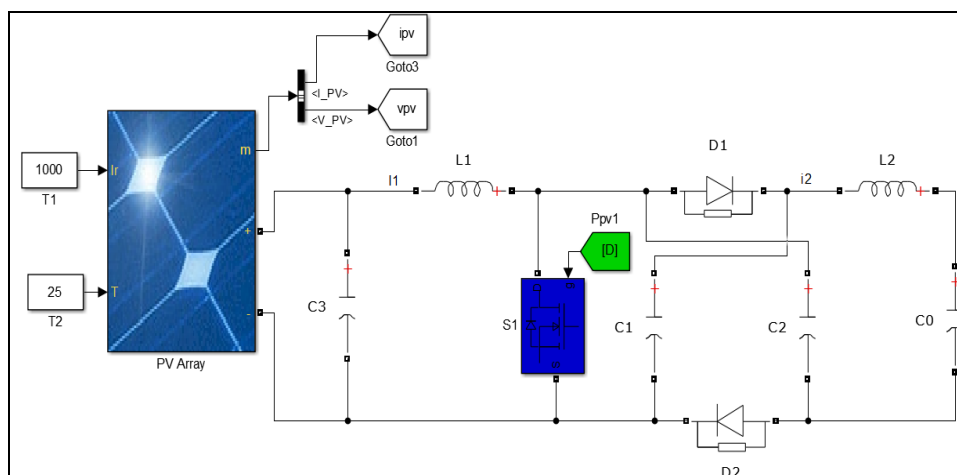


Figure (IV.2): DC-DC converter circuit.

IV.2.1 Conception du circuit :

Le circuit a été étudié sur la Figure (IV.2), on pose ($t = 0$) au début de chaque mode de fonctionnement. En analysant le circuit, on trouve deux états : allumer (Switch on) correspond à l'état «1» tandis que l'état est «0» lorsque la coupure (Switch of). Dans le premier cas comme sur la figure (IV.3), la valeur de I_1 est donnée par (IV.1):

Supposons que la valeur initiale de $i_1(0) = I_{1min}$.

$$i_1(0) = I_{1min} \frac{V_{PV}}{L_1} t \quad (IV.1)$$

Les condensateurs C_1 et C_2 sont connectés en série dans cet intervalle de temps pour charger le condensateur C_0 de la tension du condensateur résultante et de la tension de condensateur résultante de $V_{C1} + V_{C1} = 2V_C$ charge le condensateur de sortie C_0 . De plus, charge le condensateur C_0 à partir de la tension résultante du condensateur et l'équation suivante explique comment le courant i_2 circule à travers l'inductance L_2 [113].

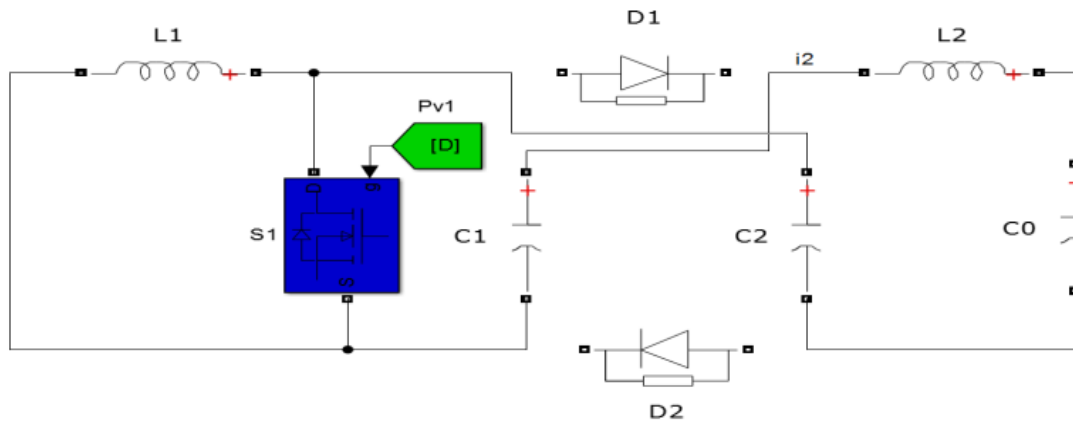


Figure (IV.3): Circuit dans le cas "1"

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{2}{C} \int i_2 dt = c_0 i_0 \quad (IV.2)$$

Puisque C_1 est égal à C_2 , nous mettons C dans les équations à venir. Nous obtenons l'équation d' i_2 comme suit :

$$i_2(t) = X + Y \quad (IV.3)$$

$$\begin{cases} X = I_{2min} \cos \sqrt{\frac{2}{CL_2}} t \\ Y = \sqrt{\frac{C}{2L_2}} (2V_{Cmax} - V_0) \sin \sqrt{\frac{2}{CL_2}} t \end{cases}$$

$$i_2(0) = I_{2min}$$

$$V_C(0) = V_{C1}(0) = V_{C2}(0) = -V_{Cmax} \tag{IV.4}$$

Intégrer équation. (3) donnera :

$$V_C = A + B + C \tag{IV.5}$$

$$\begin{cases} A = \sqrt{\frac{L_2}{2C}} I_{2min} \sin \sqrt{\frac{2}{CL_2}} t \\ B = \frac{1}{2} (2V_{Cmax} - V_0) \cos \sqrt{\frac{2}{CL_2}} t \\ C = \frac{V_0}{2} \end{cases}$$

L'analyse du circuit pendant le mode 2 comme le montre la figure (IV.4) donne
Supposons que $i_1(0) = I_{1max}$:

$$i_1(t) = I_{1max} + \frac{V_{pn} - V_C}{L_1} t \tag{IV.6}$$

L'équation dans la sortie est comme suit :

$$L_2 \frac{di_2}{dt} - \frac{1}{C} \int i_C dt = -V_0 \tag{IV.7}$$

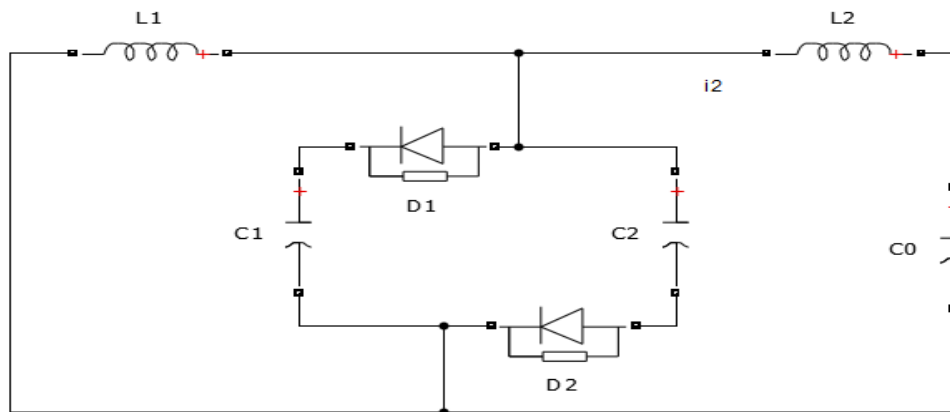


Figure (IV.4): Circuit dans le cas "0"

$$2i_C = i_1 - i_2 \tag{IV.8}$$

On met $i_1 = \text{const}$ et donné :

$$\begin{cases} v_C = V_{Cmin} \\ i_2 = I_{2max} \end{cases} \tag{IV.9}$$

En utilisant l'équation. (IV.7), (IV.8) et (IV.9), on a:

$$i_2(t) = \alpha + \beta \quad (IV.10)$$

$$\begin{cases} \alpha = I_1 \left\{ 1 - \cos \sqrt{\frac{1}{2L_2C}} t \right\} + I_{2max} \cos \sqrt{\frac{1}{2L_2C}} t \\ \beta = \sqrt{\frac{2C}{L_2}} (V_{Cmin} - V_0) \sin \sqrt{\frac{1}{2L_2C}} t \end{cases}$$

$$v_c(t) = k + h + g \quad (IV.11)$$

$$\begin{cases} k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2L_2}{C}} (I_1 - I_{2max}) \sin \sqrt{\frac{1}{2L_2C}} t \\ h = (V_{Cmin} - V_0) \cos \sqrt{\frac{1}{2L_2C}} t \\ g = V_0 \end{cases}$$

Pour comparer le convertisseur conventionnel avec le convertisseur proposé, nous comparons l'amplification de leur signal de sortie et l'ondulation de la tension de sortie avec l'ondulation du courant d'entrée.

IV.2.1.1. Ondulation du courant d'entrée :

Nous mettons l'ondulation du courant d'entrée égale pour le convertisseur élévateur conventionnel et le convertisseur proposé. Nous mettons le rapport cyclique α_N et l'ondulation de courant ΔI_{1N} pour le convertisseur proposé. α_C et ΔI_{1C} pour le convertisseur élévateur conventionnel. Utilisation de l'équation (1) donner ce qui suit :

$$\frac{\Delta I_N}{\Delta I_C} = \frac{\alpha_N}{\alpha_C} \quad (IV.12)$$

Lorsque α_N et α_C sont liés, la même tension est produite pour le convertisseur élévateur proposé et le convertisseur élévateur conventionnel comme suit :

$$\alpha_N = \frac{\alpha_C}{2 - \alpha_C} \quad (IV.13)$$

Nous mettons l'équation (13) dans l'équation (12) nous obtenons :

$$\frac{\Delta I_N}{\Delta I_C} = \frac{1}{2 - \alpha_C} < 1 \quad (IV.14)$$

Par conséquent, l'ondulation du courant d'entrée est plus petite que le transformateur de courant conventionnel sachant que les mêmes caractéristiques initiales étaient fournies pour chaque circuit, celui-ci des mérites du nouveau circuit.

IV.2.1.2. Ondulation de la tension de sortie :

Le courant de charge I_0 , dans le circuit élévateur conventionnel est donné par le condensateur C_0 pendant l'intervalle "1" et imposé I_0 est constant, dans ce cas l'ondulation de tension ΔE_{oc} est donnée par :

$$\Delta V_{0C} = \frac{I_0}{C_0} \alpha_C T = \frac{1}{C_0} \frac{V_0}{R_0} \alpha_C T \tag{IV.15}$$

Le courant de sortie approché dans chaque mode est illustré sur la figure 5 et l'ondulation de tension de sortie est donnée par :

$$\Delta V_{0C} = x + y = \frac{1}{8C_0} \Delta I_2 T \tag{IV.16}$$

$$\begin{cases} x = \frac{1}{C_0} \int_0^{\alpha T/2} \frac{\Delta I_2}{\alpha T} t dt \\ y = \frac{1}{C_0} \int_0^{(1-\alpha)T/2} \left[\frac{\Delta I_2}{2} - \frac{\Delta I_2}{(1-\alpha)T} t \right] dt \end{cases}$$

On met $V_{Cmax} = V_0$ pour donner ce qui suit :

$$\Delta V_{0N} = \frac{1}{8C_0} \frac{V_0}{L_2} \alpha_N T^2 \tag{IV.17}$$

Pour comparer l'ondulation de tension dans le convertisseur conventionnel avec le convertisseur proposé, nous comparons l'équation (IV.17) et l'équation (IV.15) à condition d'avoir la même tension de sortie.

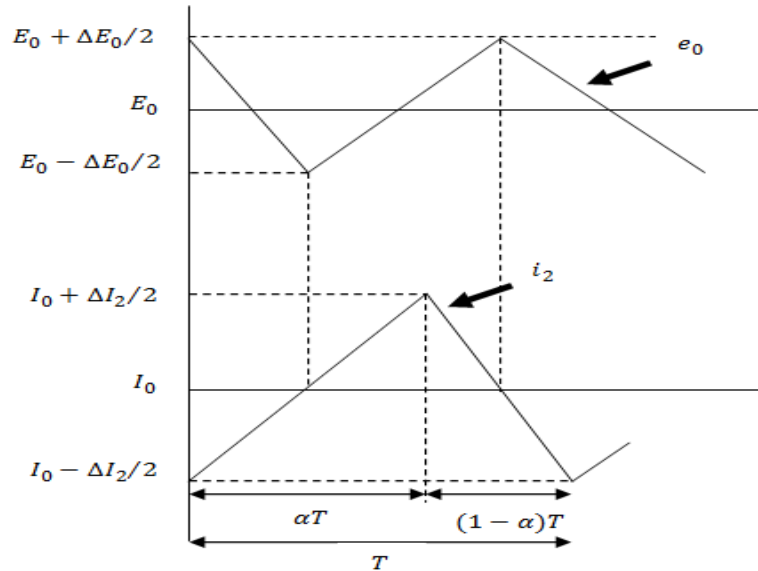


Figure (IV.5): Schéma de la nouvelle tension du circuit.

$$\frac{\Delta V_{0N}}{\Delta V_{0C}} = \frac{1}{8} \frac{R}{L_2(2-\alpha_C)} T \quad (\text{IV.18})$$

Utilisation de l'équation (18), la nouvelle ondulation de tension peut être évaluée. La discussion a montré que le circuit proposé fournit une tension de sortie plus élevée avec une meilleure stabilité.

IV.3. Stratégie de la commande DPC-SVM :

Le DPC-SVM à fréquence de commutation constante utilise une commande de puissance en boucle fermée. Comme le montre la figure (IV.6), les signaux de sortie sont transformés en trame fixe pour générer les signaux de commutation par le modulateur vectoriel spatial (SVM) [111].

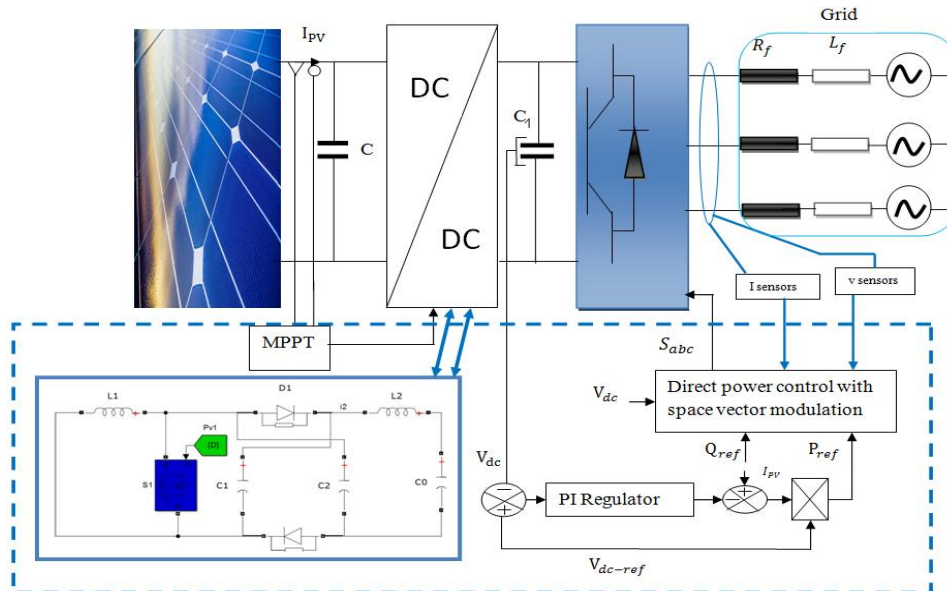


Figure (IV.6): DPC avec modulation vectorielle spatiale (DPC-SVM).

Nous avons besoin des tensions du réseau et de l'onduleur et de leurs valeurs retardées pour dériver la compensation de puissance à ajouter aux références de puissance. La tension continue du circuit intermédiaire et les courants sinusoïdaux du réseau sont obtenus simultanément sans affecter la puissance réactive et la valeur moyenne de la puissance active côté réseau.

L'un des points positifs de cette méthode proposée est d'annuler les oscillations de puissance réactive et active.

La puissance complexe est définie comme :

$$S = \frac{3}{2}(ei^*) \quad (\text{IV.19})$$

La puissance q et P de la puissance complexe :

$$p = \frac{3}{2} \text{Re}(ei^*) \quad (\text{IV.20})$$

$$q = \frac{3}{2} \text{Im}(ei^*) \quad (\text{IV.21})$$

Dans l'article [112], la puissance complexe est définie comme:

$$q^{ext} = \frac{3}{2} \text{Im}(e' i^*) \quad (\text{IV.22})$$

La méthode proposée s'est avérée excellente pour éliminer les oscillations par rapport à la méthode conventionnelle qui utilisant (q^{ext}) avec la puissance active. En éliminant l'ondulation de puissance active, cela entraîne naturellement l'élimination de l'ondulation de puissance réactive et permet d'obtenir un courant sinusoïdal. Les composants de séquence positive et négative constituent la tension et le courant du réseau.

$$e = e^+ + e^- = E_{dq}^+ e^{j\omega t} + E_{dq}^- e^{-j\omega t} \quad (\text{IV.23})$$

$$\dot{e} = jE_{dq}^+ e^{j\omega t} + E_{dq}^- e^{-j\omega t} \quad (\text{IV.24})$$

Dérivée «puissance active» et «puissance réactive étendue».

$$\frac{dp}{dt} = \frac{3}{2} \text{Re} \left(\frac{d\dot{e}}{dt} i^* + \dot{e} \frac{di^*}{dt} \right) \quad (\text{IV.25})$$

$$\frac{dq^{ext}}{dt} = \frac{3}{2} \text{Re} \left(\frac{d\dot{e}}{dt} i^* + \dot{e} \frac{di^*}{dt} \right) \quad (\text{IV.26})$$

Dérivé (19) et (20) sont comme suit :

$$\frac{de}{dt} = j\omega e^+ - j\omega e^- = \omega \dot{e} \quad (\text{IV.27})$$

$$\frac{d\dot{e}}{dt} = \omega e^+ - \omega e^- = \omega e \quad (\text{IV.28})$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (e - v - ri) \quad (\text{IV.29})$$

Compensation (23) et (25) en (21) et (22) respectivement :

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1.5}{L} [|e|^2 - \text{Re}(ev^*)] - \frac{R}{L} p - \omega q^{ext} \quad (\text{IV.30})$$

$$\frac{dp^{ext}}{dt} = \frac{1.5}{L} \text{Re}[(e^* - v^*)e'] - \frac{R}{L} q^{ext} - \omega p \quad (\text{IV.31})$$

Les erreurs des q et P sont appliqués aux régulateurs PI respectifs. La sortie dans le système d'espace vectoriel (d-q) est les tensions (u_{cd}, u_{cq}), comme le montre la figure (IV.8), [111, 112].

Les paramètres du régulateur de puissance PI peuvent être calculés par un modèle simplifié du redresseur sous la forme (d, q), la forme dans le repère d-q est (32):

$$\begin{cases} e_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + u_{ed} \\ e_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d + u_{eq} \end{cases} \quad (IV.32)$$

D'où devenir l'équation (33) comme suit :

$$\begin{cases} e_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + u_{ed} \\ 0 = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d + u_{eq} \end{cases} \quad (IV.33)$$

Régulateur PI avec boucle de contrôle qui contrôle les puissances P et q, le schéma suivant est obtenu (Figure IV.7) [107]:

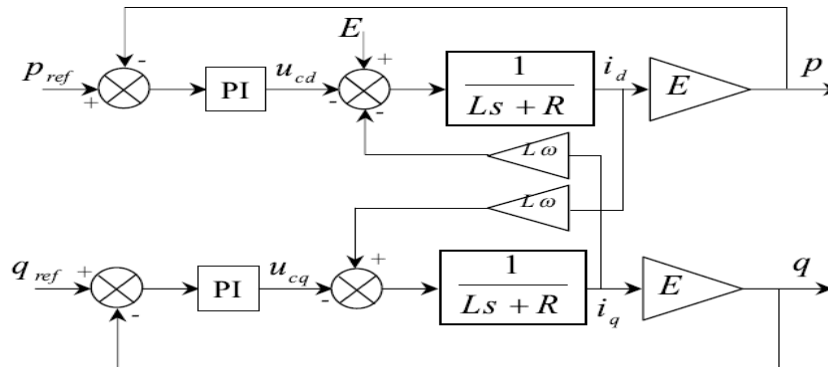


Figure (IV.7) : Schéma fonctionnel des boucles de P et q.

Lorsque la puissance réactive est mise à zéro. La forme devient comme (Figure IV.8).

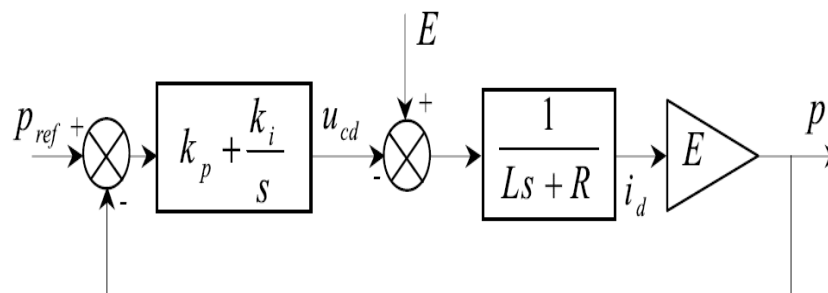


Figure (IV.8) : Schéma de puissance P.

La régulation PI joue un rôle important dans la compensation de la tension de ligne, Ce dernier soumise à des perturbations constantes.

La fonction de transfert est donnée par :

$$G(s) = \frac{E(k_p s + k_i)}{Ls^2 + (Ek_p + R)s + Ek_i} \quad (\text{IV.34})$$

La fonction de transfert de deuxième ordre est donnée par :

$$F(s) = \frac{1}{(s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (\text{IV.35})$$

En comparant l'expression (34) et (35) On trouve :

$$\begin{cases} k_p = \frac{2.L.\varepsilon\omega_n - R}{E} \\ k_i = \frac{L.\omega_n^2}{E} \end{cases} \quad (\text{IV.36})$$

Il est à noter que l'équation (36) donne la solution des deux correcteurs.

IV.4. Résultats de la Simulation:

Pour vérifier les performances et la faisabilité du DPC-SVM avec le convertisseur DC-DC proposé appliqué sur le système PV connecté avec un filtre de puissance P parallèle, une simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel MATLAB / SIMULINK qui compare les performances du système conventionnel. [113] et le convertisseur proposé sous la même commande du convertisseur DC-DC (P&O) et des paramètres (Tableau IV.1).

<i>Paramètre</i>	<i>Value</i>
<i>Puissance maximale (2 × 3)</i>	<i>1923.636W</i>
<i>Tension du réseau (Vmax)</i>	<i>220√2 V</i>
<i>Inductance du filtre (L_f)</i>	<i>0.02 H</i>
<i>Temps d'échantillonnage (T_s)</i>	<i>1e⁻⁶s</i>

Tableau (IV.1) : Paramètres système.

Les résultats de simulation montrent l'efficacité et les performances du convertisseur DC-DC proposé.

La Figure IV.9 présente les formes d'ondes de la tension et du courant de ligne. On peut observer que le courant de ligne présente moins d'oscillations, et il est en phase avec la tension du réseau, ce qui montre l'obtention exacte de la phase en utilisant la PLL.

La figure IV.10 représente les puissances active et réactive instantanées. On peut voir que les puissances active et réactive ont une bonne réponse temporelle et moins d'ondulation avec le convertisseur DC-DC proposé sans oscillations et suivre la valeur de référence, cela prouve l'avantage de la méthode proposée.

La Figure IV.11 et la Figure IV.12 présentent le spectre harmonique du courant de ligne. On constate que la valeur du THD est de 1,7% avec le convertisseur DC-DC classique, tandis qu'elle est réduite à 1,02% avec le convertisseur DC-DC proposé. Cela démontre une amélioration significative de la distorsion harmonique totale grâce à la méthode proposée.

Les résultats de la simulation démontrent clairement que la technique adoptée améliore le facteur de puissance et réduit significativement la distorsion harmonique totale. L'amélioration du facteur de puissance contribue à une utilisation plus efficace de l'énergie électrique, tandis que la réduction de la distorsion harmonique garantit un fonctionnement plus stable et une meilleure protection des équipements connectés.

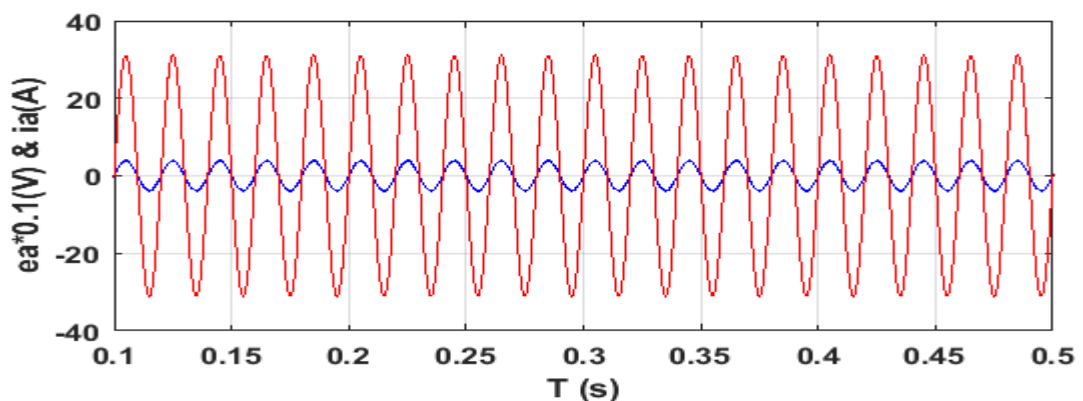


Figure (IV.9) : Courant et tension du réseau.

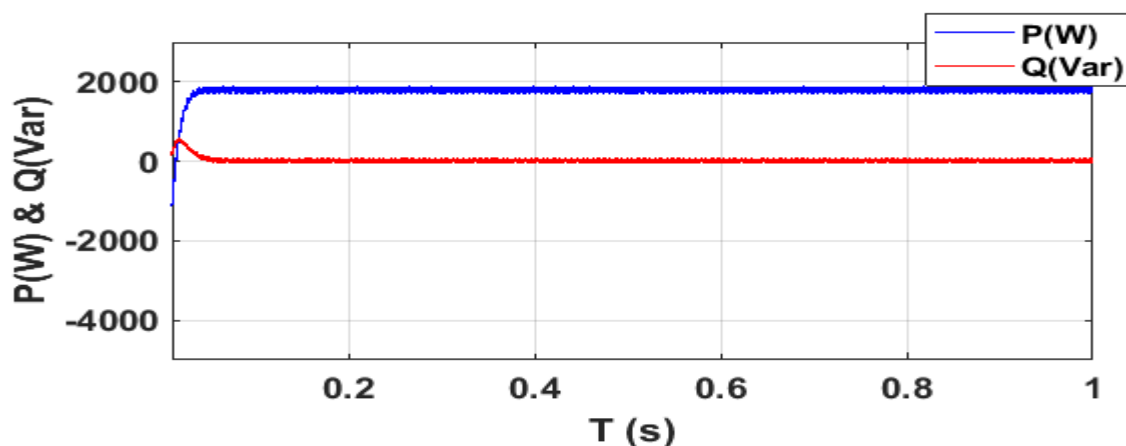


Figure (IV.10) : Puissance active et réactive.

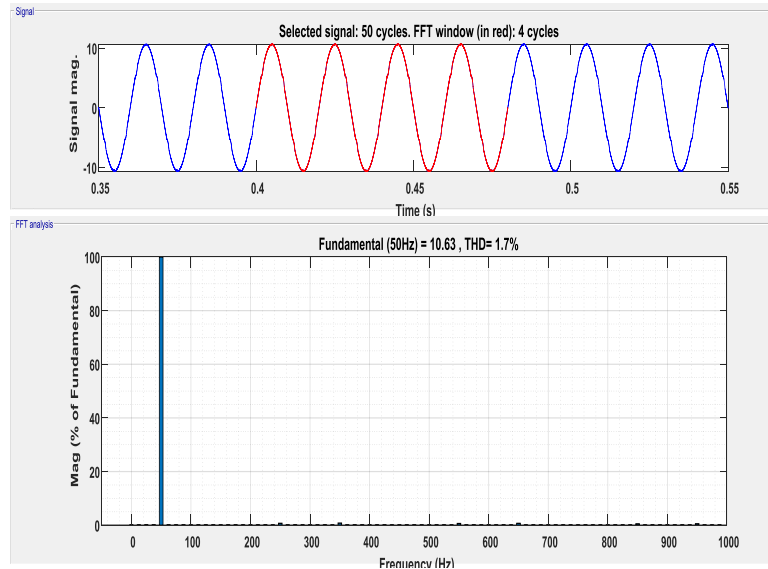


Figure (IV.11): Spectre harmonique du courant de ligne (THD = 1,7%) avec le convertisseur DC-DC classique.

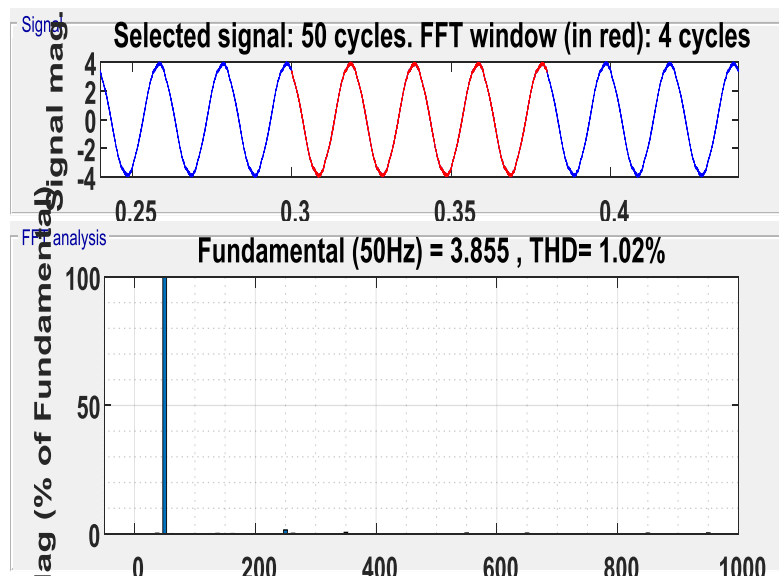


Figure (IV.12): Spectre harmonique du courant de ligne THD = (1,02%).

Les résultats de la simulation sont très satisfaisants et montrent que la technique adoptée améliore le facteur de puissance et réduit la distorsion harmonique totale.

IV.5. Le système avec une variation d'éclairément solaire :

Pour évaluer les performances et la faisabilité de la méthode de la commande DPC-SVM, des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. Les simulations se sont focalisées sur les caractéristiques de la commande directe de puissance avec modulation vectorielle DPC-SVM, en mettant notamment l'accent sur sa réponse aux variations

d'éclairage solaire. L'objectif était de vérifier les performances dynamiques du contrôle de puissance dans ce contexte spécifique.

La présente étude est divisée en trois modes de fonctionnement : le premier mode couvre la période de $t = 0$ s à $t = 0.3$ s, le deuxième mode se déroule entre $t = 0.3$ s et $t = 0.6$ s, ensuite, le troisième mode se déroule entre $t = 0.6$ s et $t = 1$ s.

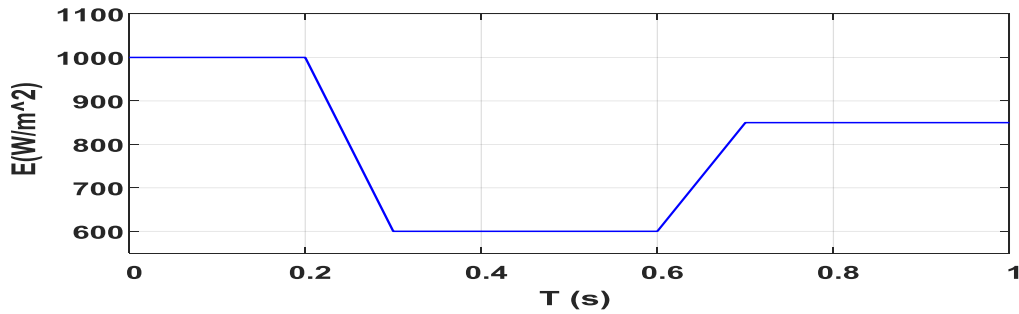


Figure (IV.13) : Profil d'éclairage solaire.

Array type: Eoply New Energy Technology EP156P-72-320W;
2 series modules; 3 parallel strings

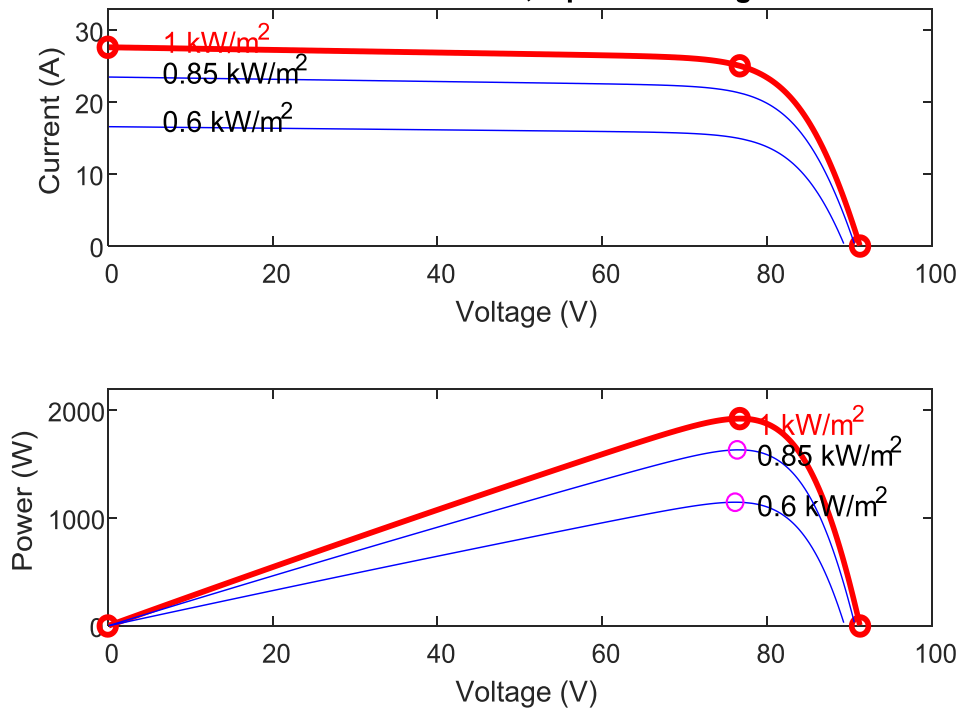


Figure (IV.14): Caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire sous un changement d'éclairage.

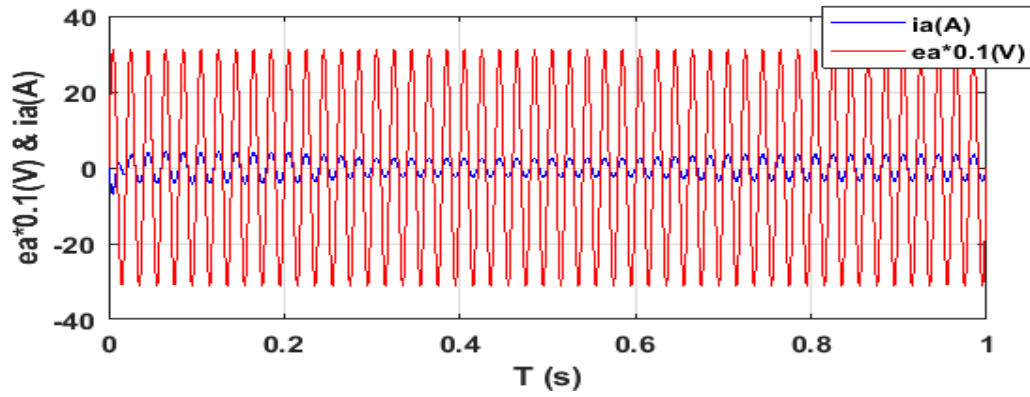


Figure (IV.15): La tension et le courant de source.

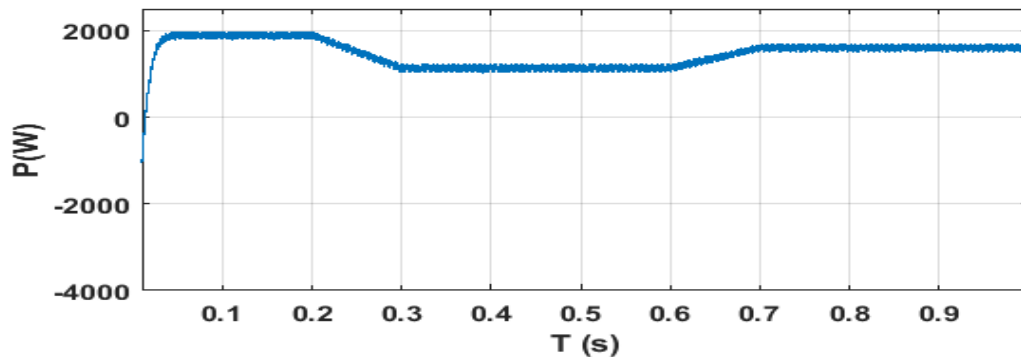


Figure (IV.16) : Résultats de simulation de la Puissance active.

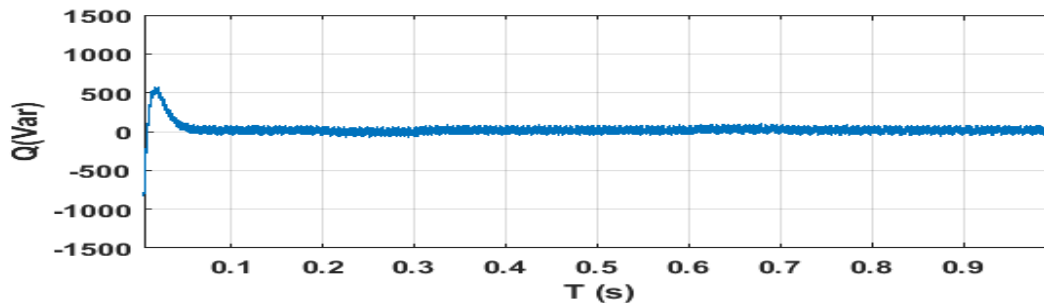


Figure (IV.17): Résultats de simulation de la Puissance réactive instantanée.

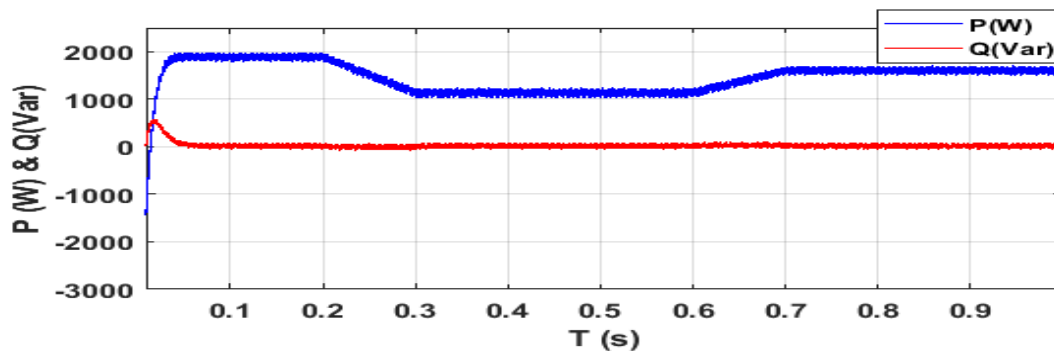


Figure (IV.18): Résultats de simulation de la Puissance active et réactive.

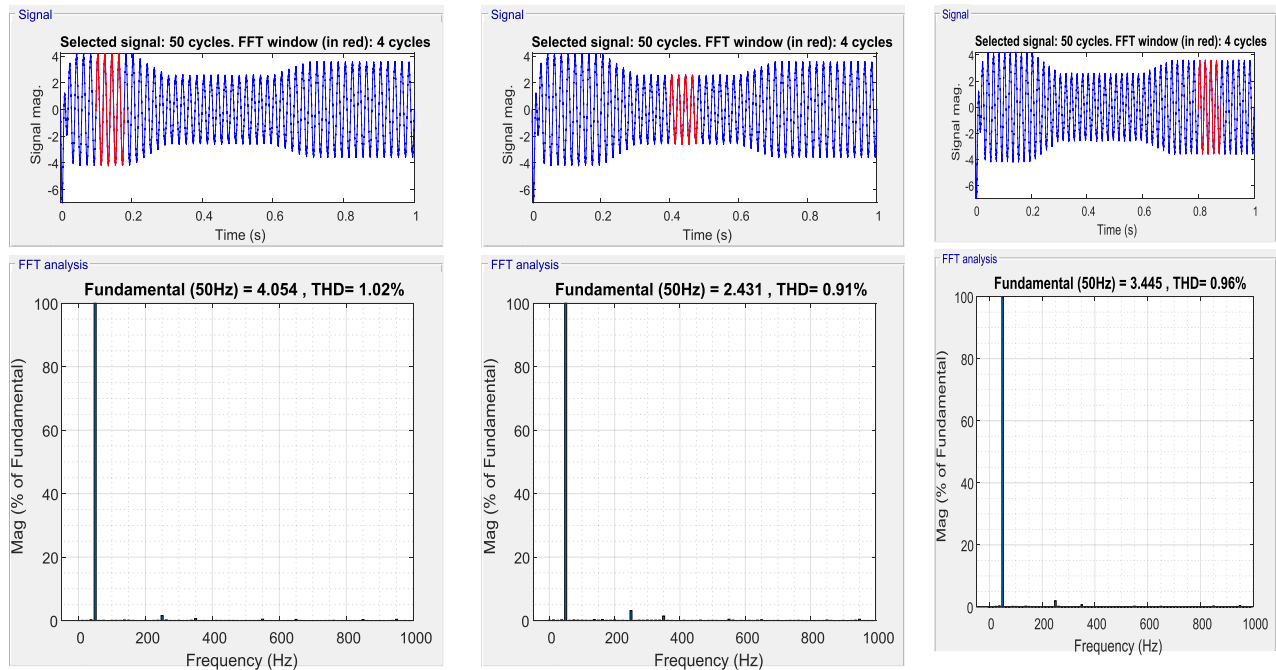


Figure (IV.19): Spectre harmonique du courant de ligne (THD).

La Figure (IV.13) présente les résultats de simulation du profil d'éclairement solaire utilisé lors des tests du système.

La Figure (IV.14) montre les caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire sous le profil d'éclairement de la Figure (IV.13). On observe que la puissance du point maximale est de 1924 W sous un éclairement de 1000 W/m² et une puissance de 1634 W sous un éclairement de 850 W/m² et une puissance de 1148 W sous un éclairement de 600 W/m².

La Figure (IV.15) présente les résultats de simulation de la tension et du courant de la source. On observe que la valeur du courant varie en fonction du rayonnement solaire, ce qui montre l'efficacité de la commande.

La Figure (IV.16) présente les résultats de simulation du système étudié sous le profil d'éclairement de la Figure (IV.13), sur la figure on voit que la puissance transmise du panneau solaire vers la charge est maximale quel que soit le niveau d'éclairement solaire, et cela est montré par la puissance active P du réseau qui a une réponse très élevée, et cela prouve l'efficacité de la commande MPPT et la commande DPC-SVM. On peut voir que la puissance active possède un temps de réponse considérablement satisfaisant et moins d'ondulations. Alors que la puissance réactive instantanée q reste toujours fixe à une valeur nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire quel que soit le changement d'éclairement, comme montre la figure (IV.17).

La figure (IV.19) présente le spectre harmonique du courant de ligne, avec un THD de 1,02%. Il est important de noter que lorsque la valeur d'éclairage est modifiée, le THD varie, mais reste dans la plage tolérable. Cela démontre l'efficacité de la commande.

La puissance active et réactive, représentées sur la Figure (IV.18), suivent les trajectoires définies par le système de contrôle. Entre 0 et 0,3 seconde, on observe que la puissance active P présente une réponse significative, ce qui est dû aux variations de la valeur du rayonnement solaire. Cela démontre l'efficacité du contrôle. On peut également constater que la puissance active présente un temps de réponse satisfaisant et une faible ondulation. Entre 0,3 seconde et 0,6 seconde, la valeur de la puissance P varie en fonction du rayonnement solaire. Entre 0,6 seconde et 1 seconde, la valeur de la puissance P continue à varier en fonction du rayonnement solaire, mais avec un temps de réponse très rapide et une ondulation réduite. Cela démontre l'efficacité du contrôle. Tandis que la puissance réactive q est maintenue à zéro pour assurer un facteur de puissance unitaire. Cela garantit un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.

IV.6. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons utilisé une puissance réactive étendue au lieu de la puissance réactive habituellement utilisée dans le DPC-SVM conventionnel. Afin que la puissance réelle puisse suivre avec précision sa référence. En outre, nous avons contrôlé les convertisseurs à l'aide de l'algorithme MPPT en même temps, sans contrôler chacun d'eux séparément. De plus, nous avons décrit les bases, les paramètres du circuit et la conception d'un circuit du convertisseur élévateur DC-DC utilisé qui donne un rapport d'élévation plus grand. Les résultats de la simulation ont confirmé que le DPC-SVM avec le convertisseur DC-DC pouvait réduire les pertes ; augmenter la tension à la sortie avec une meilleure stabilité et une tension beaucoup plus élevée que le convertisseur élévateur conventionnel avec de meilleures caractéristiques d'ondulation d'entrée et de sortie. La DPC-SVM a montré une efficacité et une stabilité élevées dans le système. En outre, le THD et la puissance réactive et active ont été améliorés en utilisant une puissance réactive étendue comme le montrent les résultats. Où nous avons remarqué une amélioration de la réponse de la puissance active et réactive où elle s'est stabilisée sur une valeur en moins de temps. En outre, la stabilité a été améliorée là où il n'y avait pas beaucoup d'ondulations par rapport à la DPC-SVM conventionnelle.

Nous avons également enregistré une diminution de la valeur du THD (1,02%) en utilisant la technique DPC-SVM proposée. Par conséquent, nous concluons que notre système

avec le convertisseur DC-DC utilisé a de bonnes performances telles que la stabilité, la robustesse et des ondulations plus petites par rapport au convertisseur DC-DC classique et a également enregistré une diminution du rapport harmonique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans la recherche de nouvelles solutions permettant d'améliorer la qualité de la transmission de l'énergie électrique de la source vers le récepteur et s'appuie sur la conception de nouvelles stratégies de contrôle qui vise à éliminer ou à réduire les harmoniques dues à une utilisation excessive de charge non linéaire. Par conséquent, de nombreuses méthodes de commande ont été développées, dont la plus importante est la commande direct de puissance (DPC).

Le travail de cette thèse est divisé comme suit :

- La partie commande direct de puissance (DPC) appliquée au filtrage actif. L'étude de simulation a enregistré l'efficacité de (DPC) dans la vitesse de stabilité et une diminution de l'ondulation P et q en particulier dans le régime transitoire et une diminution du THD surtout avec la nouvelle table de commutation.
- Dans la deuxième partie, la commande directe de puissance (DPC) et (DPC-SVM) ont été appliquées à l'onduleur à injection réseau. Une étude de simulation a été réalisée pour évaluer l'efficacité de chacune de ces deux méthodes, ainsi que pour identifier leurs avantages, leurs inconvénients et leur capacité à contrôler l'échange d'énergie entre l'onduleur et le réseau électrique. Nous procéderons à une comparaison détaillée des deux méthodes:

La première méthode est la commande directe de puissance active et réactive du convertisseur. Dans cette méthode, les puissances active et réactive peuvent être régulées directement en contrôlant les relais de puissance. Cela est réalisé en utilisant des comparateurs à hystérésis et une table de commutation. Dans cette configuration, les écarts entre les commandes de puissance et les signaux de rétroaction sont comparés par les éléments d'hystérésis, et l'état de commutation spécifique du convertisseur est sélectionné de manière appropriée par la table de commutation. Cela permet de limiter les erreurs dans les bandes d'hystérésis.

Il est également montré que DPC-SVM a prouvé d'excellentes performances et vérifie la validité du système de contrôle proposé. Le système DPC-SVM constitue une alternative viable aux stratégies de contrôle conventionnelles et présente les caractéristiques et les avantages suivants :

- Fréquence d'échantillonnage plus faible (qu'un DPC conventionnel)
- Bonne réponse dynamique

- Offre des courants de ligne sinusoïdaux (faible THD), pour une tension de ligne idéale et déformée.
- Fréquence de commutation constante.

Dans la troisième partie, la commande DPC-SVM a été appliquée à l'onduleur à injection réseau avec un nouveau circuit convertisseur, élévateur DC-DC et nous avons utilisé une puissance réactive étendue au lieu de la puissance réactive habituellement utilisée dans le DPC-SVM conventionnel. Afin que la puissance réelle puisse suivre avec précision sa référence. En outre, nous avons contrôlé les convertisseurs à l'aide de l'algorithme MPPT en même temps, sans contrôler chacun d'eux séparément. De plus, nous avons décrit les bases, les paramètres du circuit et la conception d'un circuit de convertisseur élévateur DC-DC proposé qui donne un rapport d'élévation plus grand. Les résultats de la simulation ont confirmé que le DPC-SVM avec le convertisseur DC-DC pouvait réduire les pertes; augmenter la tension à la sortie avec une meilleure stabilité et une tension beaucoup plus élevée que le convertisseur élévateur conventionnel avec de meilleures caractéristiques d'ondulation d'entrée et de sortie. Le DPC-SVM a montré une efficacité et une stabilité élevées dans le système. En outre, le THD et la puissance réactive et active ont été améliorés en utilisant une puissance réactive étendue comme le montrent les résultats. Où nous avons remarqué une amélioration de la réponse de la puissance active et réactive où elle s'est stabilisée sur une valeur en moins de temps. En outre, la stabilité a été améliorée là où il n'y avait pas beaucoup d'ondulations par rapport au DPC-SVM conventionnel, Nous avons également enregistré une diminution de la valeur de THD (1,02%) en utilisant la technique DPC-SVM proposée par conséquent, nous concluons que notre système avec le convertisseur DC-DC proposé a de bonnes performances.

On peut observer que la distorsion harmonique totale (THD) est de 0,92%, ce qui est conforme à la norme IEEE 519-1992. Cette norme établit que la valeur THD ne doit pas dépasser 5%, comme indiqué dans l'introduction.

La recherche dans cette thèse a ouvert la porte à de nouveaux défis et a mis en évidence d'autres contributions et investigations qui pourraient être nos futurs travaux qui peuvent être énumérés comme suit :

- DPC-SVM est prédictif.
- DPC utilisant des techniques d'intelligence artificielle.
- DPC utilisant l'algorithme génétique.
- Amélioration de la table de commutation à l'aide de nouvelles technologies.

Références Bibliographiques

Références

- [1] Talaat, M., et al. "Artificial intelligence applications for microgrids integration and management of hybrid renewable energy sources." *Artificial Intelligence Review* (2023): 1-55.
- [2] Tamvada, Karthik, and Rohit Babu. "Control of doubly fed induction generator for power quality improvement: an overview." *International Journal of System Assurance Engineering and Management* (2022): 1-24.
- [3] Meng, Ningning, and Jianfeng Yang. "Multi-loop power control strategy of current source PWM rectifier." *Energy Reports* 8 (2022): 11675-11682. 1.
- [4] Gunther, "Harmonic and Interharmonic Measurement According to IEEE 519 and IEC 61000-4-7," 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, TX, USA, 2006, pp. 223-225, doi: 10.1109/TDC.2006.1668490.
- [5] Dai, J. J., and SIEEE PE. "Industrial and commercial power system harmonic studies." *Proc. 2019 7th PCIC Middle East Annual Electrical and Automation Knowledge Sharing Event* 388 (2019): 1-10.
- [6] Waseem, Mohammad, Ahmad Faizan Sherwani, and Mohd Suhaib. "Integration of solar energy in electrical, hybrid, autonomous vehicles: a technological review." *SN Applied Sciences* 1 (2019): 1-14.
- [7] Amar, Omeiri. « simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant » thèse de doctorat en sciences option : commande électrique, Université Badji Mokhtar- Annaba , 2007.
- [8] M. Shafiee Khor : "Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques", Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [9] Hetita, Ibrahim, et al. "Experimental and Numerical Analysis of Transient Overvoltages of PV Systems When Struck by Lightning." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 71 (2022): 1-11.
- [10] Chenchireddy, Kalagotla, et al. "A Review on D-STATCOM Control Techniques for Power Quality Improvement in Distribution." 2021 5th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). IEEE, 2021.
- [11] Ahuja, Hemant, et al. "Coordinated Control of Wind Energy Conversion System during Unsymmetrical Fault at Grid." *Energies* 15.13 (2022): 4898.
- [12] Ahsan, Syed M., and Hassan A. Khan. "LV Harmonic Analysis of Single-Phase Rooftop Solar PV Systems with Non-Linear Loads." 2022 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech). IEEE, 2022.
- [13] Ahmed, Hafiz, Rosane Ushirobira, and Denis Efimov. "Robust estimation of fundamental frequency positive-sequence component for grid-integration applications in energy systems." *Energy Reports* 8 (2022): 357-363.
- [14] Huaman, Anthony Rolando Ocaña, Israel Said Ortiz Monzon, and Edilberto Horacio Vásquez Díaz. "Study and simulation of the use of an active filter for the mitigation of current harmonics in electrical systems." 2022 IEEE ANDESCON. IEEE, 2022.
- [15] Khalil, Sara, et al. "A Critical Review of DC/AC Converter Structures for Grid-Connected Photovoltaic Systems." *Digital Technologies and Applications: Proceedings of ICDTA'22, Fez, Morocco, Volume 2* (2022): 497-506.

- [16] Bettega, E., & Fiorina, J. N. (1996). Harmoniques: convertisseurs propres et compensateurs actifs. Schneider Electric España SA.
- [17] Serres, Julien, et al. "Réseau électrique haute qualité." *La Revue 3EI* 58 (2009): 20-26.
- [18] Sanz, M., et al. Merits and limitations of full-bridge rectifier with LC filter in meeting IEC 61000-3-4 harmonic-limit specifications. In: 2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37018). IEEE, 2000. p. 1133-1136.
- [19] Harici Otmane « Etude d'un filtre actif à commande intelligente » doctorat de génie électrique , Université des sciences et de la technologie Oran,2012
- [20] B. Nouri, "Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées Application : Amélioration de la Qualité de l'Energie Soutenue," Thèse de doctorat, Université de Ferhat Abbas, Setif 1, 2011.
- [21] M. Alaa Eddin Alali, "Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension" these de doctorat l'Université Louis Pasteur – Strasbourg 2002.
- [22] Rouabah, Boubakeur. « Commande d'un convertisseur multicellulaire pour une application de filtrage actif ». 2018. PhD Thesis.
- [23] Harhouz, Mariya; Nebbache, Haroun. « Amélioration de la qualité d'énergie par filtrage actif utilisant la commande ZDPC ». 2021. PhD Thesis. Université de M'sila.
- [24] Yan, Shuo, et al. "A review on direct power control of pulsewidth modulation converters." *IEEE Transactions on Power Electronics* 36.10 (2021): 11984-12007.
- [25] A. CHAOUI, "filtrage actif triphasé pour charges non linéaires", Thèse de doctorat, Génie Electrique, Université FERHAT ABBAS DE SÉTIF, Octobre 2010.
- [26] Mohammed, Mohammed Kareem, et al. "Optimization and fault diagnosis of 132 kV substation low-voltage system using electrical transient analyzer program." *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 13.3 (2023): 2375-2383.
- [27] Sébastien, Serpaud. Application de la méthode de mesure champ proche en émission pour l'aide à la conception et à l'investigation des non-conformités CEM des cartes électroniques. Diss. INSA: Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2023.
- [28] Darkawi, Abdallah. "La Compatibilité Electromagnétique (CEM)." (2016).
- [29] C. Dewez, "Modélisation d'un filtre actif parallèle triphasé pour la dépollution Harmonique et synthèse d'une commande basée sur le rejet de perturbations ", Thèse de doctorat, LAII-ESIP, Université de Poitiers, France, Décembre 2007.
- [30] Lenne, Marwa, et al. Contribution à La Commande d'un filtre hybride multi niveaux. 2021. PhD Thesis. UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR.
- [31] Belal Said, MOHAMED, et al. Commande par Logique Floue d'un Redresseur de Tension à MLI. 2022. PhD Thesis. university of M'sila.
- [32] A.Omeiri, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant ». Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2007.
- [33] A.E. CHAOUI, "Techniques De Commande Prédictive Et Floue Pour Les Systèmes D'électronique De Puissance: Application Aux Redresseurs MLI ", Thèse De

Doctorat, Université Ferhat Abbas De Sétif, Alger, Octobre 2010.

- [34] BECK, Geoffrey. Modélisation et étude mathématique de réseaux de câbles électriques. 2016. PhD Thesis. Université Paris-Saclay.
- [35] Messad, Oussama, and Nouh Agguini. Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées. Diss. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2021.
- [36] Djamel, Nadji; Nadir, CHikh. Etude des Filtres pour Amélioration de la Qualité de l'Energie Electrique. 2022. PhD Thesis. Université de M'Sila.
- [37] M. Shafiee Khor : "Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques", Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [38] Lenne, Marwa, et al. Contribution à La Commande d'un filtre hybride multiniveaux. 2021. PhD Thesis. Université Ahmed Draia-Adrar.
- [39] Isabelle El Baakli « Outil de simulation de propagation des creux de tension dans les réseaux industriels » thèse de doctorat en sciences option : Sciences de l'ingénieur, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2001. Français.
- [40] Ignatova, Vanya. « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique ». Ingénieur Université Technique de Sofia, le 20 Octobre 2006.
- [41] Tsobzé, S. Kenfack, et al. "Atténuation du Déséquilibre de tension d'un système triphasé par injection de puissance à partir d'une source décentralisée." (2022).
- [42] A. Kusko. Marc T.Thompson " Power Quality in Electrical System" McGraw-Hill, New-York, 2007.
- [43] LANSARI, Yahia, et al. Amélioration de la qualité d'énergie dans un réseau électrique par le dispositif STATCOM. 2017. PhD Thesis. Université Ahmed Draia-ADRAR.
- [44] Adamou, Mamane, et al. Dépollution harmonique des réseaux électriques: Etude comparative des commandes, par Modulation de Largeur d'Impulsion et par Hystérésis, des filtres actifs shunts triphasés. International Journal of Innovation and Applied Studies, 2020, 28.2: 557-566.
- [45] Sahoo, Buddhadeva; Alhaider, Mohammed M.; ROUT, Pravat Kumar. "Power quality and stability improvement of microgrid through shunt active filter control application: An overview". Renewable Energy Focus, 2023.
- [46] Habib, Salman, et al. "Assessment of electric vehicles concerning impacts, charging infrastructure with unidirectional and bidirectional chargers, and power flow comparisons" International Journal of Energy Research, 2018, 42.11: 3416-3441.
- [47] Rouabah, Boubakeur. « Contribution à l'amélioration des performances d'un filtre actif parallèle de puissance par l'utilisation d'un convertisseur multicellulaire ». Diss. 2021.
- [48] Bijor, Prashant Singh; SHARMA, A. K. A "Review of Three-Phase Grid-Connected with Solar PV power based using MPPT Controller" 2022.
- [49] Ravichandran, D., and N. Muruganantham. "Effect Of Filter Current Reduction On Hybrid Shunt Active Filters In Three-phase Four Wire Network With Unbalanced Linear And Non-Linear Loads." *Journal of Applied Science and Engineering* 26.1 (2022): 79-90.
- [50] Ghadbane, Ismail. Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs. 2011. PhD Thesis. Faculté des sciences et de la technologie UMKBiskra.
- [51] Mallajoshula, Ravikanth, and I. E. S. Naidu. "Voltage-and Current-Based Hysteresis

- Controller-Fed Series Active Filter to Compensate Voltage Sag Problem." *Sustainable Energy and Technological Advancements*. Springer, Singapore, 2022. 411-422.
- [52] Koganti, Srilakshmi, Krishna Jyothi Koganti, and Surender Reddy Salkuti. "Design of Multi-Objective-Based Artificial Intelligence Controller for Wind/Battery-Connected Shunt Active Power Filter." *Algorithms* 15.8 (2022): 256.
- [53] KONGTRAKUL, Nattanapong; WANGDEE, Wijarn; CHANTARASKUL, Soamsiri. Comprehensive review and a novel technique on voltage unbalance compensation. IET Smart Grid, 2023.
- [54] Hadi, Ayad M., Ekhlal M. Thjeel, and Ali K. Nahar. "A review of control technique applied in shunt active power filter (SAPF)." *Engineering and Technology Journal* 40.8 (2022): 140-149.
- [55] Yang, Ruo Huan, et al. "Battery-energy-storage-based triple-active-bridge DC unified power quality conditioner for energy management and power quality enhancement of DC renewable sources." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 143 (2022): 108442.
- [56] A. CHAOUI " Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires " Thèse Doctorat, Université de ferhat abbas se setef, Génie Électrique, october 2010.
- [57] Barva, Akash V., and Siddharth Joshi. "A Comprehensive Survey on Hybrid Active Power Filter Topologies & Controller and Application in Microgrid." 2022 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP). IEEE, 2022.
- [58] H. Chahalamani : "Filtrage actif hybride des perturbations harmoniques produites par des systèmes d'entraînement asynchrones à vitesse variable", Thèse de doctorat de l'UHP, Nancy, Nov. 2001.
- [59] M. T. Tsai, C. H. Liu: "Design and implementation of a cost-effective quasi line-interaction UPS with novel topology", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 18, no. 4, pp. 1002-1011, Jul. 2003.
- [60] Meenakshi, V., et al. "T-Type Three Phase Inverter with Grid Connected System used in Renewable Energy Resources." 2023 International Conference on Sustainable Computing and Data Communication Systems (ICSCDS). IEEE, 2023.
- [61] Sarvi, Mohammad, and Ahmad Azadian. "A comprehensive review and classified comparison of MPPT algorithms in PV systems." *Energy Systems* 13.2 (2022): 281-320.
- [62] Hassaine, Linda, et al. "Contrôle Avancé des Onduleurs Photovoltaïques Connectés au Réseau." *Journal of Renewable Energies* 24.2 (2021): 181-201.
- [63] Chen, Weimin, Shengnan Xia, and Kefeng Yin. "The current status and development of DC/AC inverter technology." *Highlights in Science, Engineering and Technology* 43 (2023): 527-536.
- [64] Morey, Meghraj, Nitin Gupta, and Man Mohan Garg. "A comprehensive review of grid-connected solar photovoltaic system: Architecture, control, and ancillary services." *Renewable Energy Focus* (2023).
- [65] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre and A.V. Timbus, «Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems», *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol.53, No.5, October 2006.
- [66] AOUCHICHE, Nedjma. Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque. 2020. PhD Thesis. Bourgogne

Franche-Comté.

- [67] Ait Cheikh, Mohamed Salah. Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques. Diss. Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [68] Zhu, Tianle. "A review on promising MPPT control methods of Photovoltaic System." *Highlights in Science, Engineering and Technology* 43 (2023): 537-544.
- [69] Kumar, Madhav, et al. "Comprehensive Review of Conventional and Emerging Maximum Power Point Tracking Algorithms for Uniformly and Partially Shaded Solar Photovoltaic Systems." *IEEE Access* (2023).
- [70] Zhang, Xinge, et al. "Maximum power point tracking algorithms for wind power generation system: Review, comparison and analysis." *Energy Science & Engineering* 11.1 (2023): 430-444.
- [71] Le, Xuan Chau, Minh Quan Duong, and Kim Hung Le. "Review of the Modern Maximum Power Tracking Algorithms for Permanent Magnet Synchronous Generator of Wind Power Conversion Systems." *Energies* 16.1 (2023): 402.
- [72] Sami, Benredjem, and Djeroud Ines. "Effet des Différents Types de Modèle sur les Caractéristiques de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque." (2021).
- [73] Boukhalfa, M., Benaissa, A., Bengourina, M. R., Khoudiri, A., & Boudiaf, M. (2022). Performance Enhancement of the DPC Control Based on a VGPI Controller Applied to a Grid Connected PV System. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(2), 8253-8258.
- [74] Trivedi, Tapan, et al. "Implementation of modified switching table for direct power control of shunt active power filter." *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering* (2022): 1-17.
- [75] Hassen Kaddour, Abderrahmane Dib. "Design a New DC-DC Converter for a Grid Connected Photovoltaic System", *European Journal of Electrical Engineering*, 2021.
- [76] CHAOUI, Abdelmadjid, et al. DPC controlled three-phase active filter for power quality improvement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2008, 30.8: 476-485.
- [77] Ojha, Guatam, and Vijay Anand Bhart. "A Review on Series Voltage Regulator and PV based Voltage Modulated Direct Power Control for Grid Connected." (2022).
- [78] Xue, Cheng, et al. "Model Predictive Control for Grid-Connected Current-Source Converter With Enhanced Robustness and Grid-Current Feedback Only." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* (2022).
- [79] Huang, Wenwen, et al. "A Direct Power Control of Single-Phase PWM Rectifiers Without Grid Voltage Sensor." *Conference Proceedings of 2021 International Joint Conference on Energy, Electrical and Power Engineering*. Springer, Singapore, 2022.
- [80] Ghosh, Atanu, and Yash Pal. "A Simplified Space Vector PWM Technique of Three-Level Diode Clamped Inverter with Rectifier Side Direct Power Control Topology." *2022 2nd International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET)*. IEEE, 2022.
- [81] Hamdaoui, Habib, et al. Élaboration d'une table de commutation floue pour la commande d'un filtre actif de puissance. *Rev. Roum. Sci. Techn.–Électrotechn. et Énerg*, 2013, 58.4: 405-414.

- [82] Dourari, A. L.; Fellah, M. K. Application d'un Filtre Actif Parallèle au Contrôle de la Tension d'un Réseau à Haute Tension. In: Conférence Nationale sur la Haute Tension, Laghouat, ALGERIE. 2013.
- [83] Trivedi, Tapankumar; JADEJA, Rajendrasinh; BHATT, Praghnes. Improved direct power control of shunt active power filter with minimum reactive power variation and minimum apparent power variation approaches. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2017, 12.3: 1124-1136.
- [84] Ahmed, Mostafa, et al. "Direct Power Control Based on Dead-Beat Function and Extended Kalman Filter for PV Systems." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* (2022).
- [85] Gasmi, Hamza. Contribution à l'amélioration de la commande des chaînes de conversion éoliennes. 2023. PhD Thesis.
- [86] G. Landera, Yandi, et al. "A Review of Grid Connection Requirements for Photovoltaic Power Plants." *Energies* 16.5 (2023): 2093.
- [87] J. Lamterkati, M. Khaffalah, and L. Ouboubker, "Fuzzy Logic Based Improved Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifier," 2nd Int. Conf. Electr. Inf. Technol. ICEIT, pp. 0–5, 2016.
- [88] T. Noguchi, H. Tomiki., S. Takahashi, "Direct Power Control of PWM converter without power-source voltage sensors". *IEEE Trans. on Industrial Application*, vol 34, p. 473- 479, 1998.
- [89] S. Aurtenechea. "Predictive Control of the 2L-VSI and 3L-NPC VSI Based on Direct Power Control for MV Grid Connected Power Applications". Ph.D. Thesis, Mondragon Universitea Goi Eskola Politeknikoa Faculty of Engineering, Mondragon (Spain) 2007.
- [90] Xie, Shiming, et al. "Resistance-emulating control strategy for three-phase voltage source rectifiers under unbalanced grids." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 69.2 (2021): 1103-1113.
- [91] Abderrahmane, Berkani. Technique de commande intelligente d'un convertisseur statique triphasé multiniveaux pour l'intégration d'une ferme éolienne au réseau électrique. 2020. Thèse de doctorat. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-.
- [92] M. Malinowski, M. Jasinski, M. P. Kazmierkowski. "Simple Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifier Using Space Vector Modulation". *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 51, n° 2, p. 447-454, April 2004.
- [93] A. Bouafia, F. Krim, and J.-P. Gaubert, "Fuzzy-Logic-Based Switching State Selection for Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifier," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 1984–1992, 2009.
- [94] Tlili, Faouzi, Faouzi Bacha, and Moncef Guesmi. "New switching lookup table for direct power control of a three-phase PWM rectifier." 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC). IEEE, 2018.
- [95] D. Borkowski, "Average-value model of energy conversion system consisting of PMSG, diode bridge rectifier and DPC-SVM controlled inverter," 2017 International Symposium on Electrical Machines (SME), 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISEM.2017.7993544.
- [96] W. Song, J. Ma, L. Zhou, and X. Feng, "Deadbeat Predictive Power Control of Single-Phase Three-Level Neutral-Point-Clamped Converters Using Space-Vector Modulation

- for Electric Railway Traction,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 1, pp. 721–732, 2016.
- [97] A. Bouafia, J.-P. Gaubert, and F. Krim, “Analysis and design of new switching table for direct power control of three-phase PWM rectifier,” *13th Int. Power Electron. Motion Control Conf.*, pp. 703–709, 2008.
- [98] Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1513-1524.
- [99] Ouchen, Sabir, et al. "Experimental validation of sliding mode-predictive direct power control of a grid connected photovoltaic system, feeding a nonlinear load." *Solar Energy* 137 (2016): 328-336.
- [100] Hirachi, K., et al. "Circuit configuration of bidirectional DC/DC converter specific for small scale load leveling system." *Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No. 02TH8579)*. Vol. 2. IEEE, 2002.
- [101] Andrade, António Manuel Santos Spencer, and Mário Lécio da Silva Martins. "Quadratic-boost with stacked zeta converter for high voltage gain applications." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 5.4 (2017): 1787-1796.
- [102] Zhang, Yongchang, et al. "Direct power control of pulse width modulated rectifiers without DC voltage oscillations under unbalanced grid conditions." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 65.10 (2018): 7900-7910.
- [103] Ouchen, Sabir, et al. "Robust DPC-SVM control strategy for shunt active power filter based on H_{∞} regulators." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 117 (2020): 105699.
- [104] Hu, Bihua, et al. "Model predictive direct power control with fixed switching frequency and computational amount reduction." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 7.2 (2019): 956-966.
- [105] Zhang, Yongchang, and Changqi Qu. "Direct power control of a pulse width modulation rectifier using space vector modulation under unbalanced grid voltages." *IEEE Transactions on Power Electronics* 30.10 (2014): 5892-5901.
- [106] Suh, Yongsug, and Thomas A. Lipo. "Modeling and analysis of instantaneous active and reactive power for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced network." *IEEE Transactions on Power Delivery* 21.3 (2006): 1530-1540.
- [107] Ouchen, Sabir, et al. "Direct power control of shunt active power filter using space vector modulation based on supertwisting sliding mode control." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 9.3 (2020): 3243-3253.
- [108] Benbouhenni, H., Z. Boudjema, and A. Belaidi. "Direct power control with NSTSM algorithm for DFIG using SVPWM technique." *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering* 17.1 (2021): 1-11.
- [109] Heydari, E., M. Rafiee, and M. Pichan. "Fuzzy-genetic algorithm-based direct power control strategy for DFIG." *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 14.4 (2018): 353-361.
- [110] Benbouhenni, H., Z. Boudjema, and A. Belaidi. "Power control of DFIG in WECS using DPC and NDPC-NPWM methods." *Mathematical Modelling of Engineering Problems* 7.2 (2020): 223-236.
- [111] Lee, Sze Sing, and Yeh En Heng. "Table-based DPC for grid connected VSC under

unbalanced and distorted grid voltages: Review and optimal method." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017): 51-61.

- [112] Aouchiche, Nedjma. Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque. 2020. PhD Thesis. Bourgogne Franche-Comté.
- [113] Hiroshi Nomura, Kenichiro Fujiwara, Masanobu Yoshida, "A New DCDC Converter Circuit with Larger Step-up/down Ratio" 200-1, Monobe, Nankoku city, Kochi, Japan.