

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE
N° :.....



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ÉLECTRONIQUE
OPTION : INSTRUMENTATION

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master**

Par:

Ben Arbia Ibtihal

Intitulé

Amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans les installations industrielles par l'utilisation d'un filtre actif parallèle (APF)

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. Khannouf Salah	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
Dr. Tabbakh Mostefa	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Rapporteur
Dr. Ladjal Mohamed	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

Année universitaire : 2024 / 2025

Remerciement

C'est avec émotion que je remercie Allah, le Tout-Puissant, sans Sa bénédiction, ce modeste travail n'aurait jamais vu le jour...

La préparation minutieuse et méticuleuse de ce travail réalisé au sein de l'Université Mohamed Boudiaf - M'sila, a été développé avec l'aide appréciable de mon encadreur en l'occurrence Monsieur le Dr Tabbakh Mostefa, Chef du département d'électronique, que je tiens à remercier tout particulièrement, d'avoir proposé un tel sujet intéressant, grâce à qui j'ai en effet pu effectuer une expérience enrichissante sur tous les plans.

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait par leur présence, ainsi que pour le temps précieux qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce travail, avec bienveillance, rigueur et professionnalisme.

Je n'oublie pas mes camarades et amis, avec lesquels j'ai partagé les meilleurs moments durant mon cursus, mais aussi les moments les plus difficiles, qui resteront gravés dans le livre des souvenirs. Je les remercie également pour leur aide précieuse, tant sur le plan matériel que moral, qui m'a permis d'achever cette année avec succès.

Dédicace

À mes parents,

Souad et Mohamed

À mes frères

À ma sœur

À toute la famille

À mes amis



Résumé

L'utilisation croissante des charges non linéaires avec convertisseurs d'électronique de puissance engendre des problèmes de qualité de l'énergie dus aux harmoniques. Ce mémoire propose un filtre actif parallèle (APF) modélisé selon la théorie de la puissance instantanée et la théorie de l'axe synchronisé pour compenser ces harmoniques. Les résultats montrent une réduction efficace du taux de distorsion harmonique total (THD) pour des charges équilibrées et déséquilibrées.

Mots-clés : Qualité de l'énergie électrique, charges non linéaires, distorsion harmonique totale (THD), filtre actif parallèle (APF), théorie de la puissance instantanée, théorie de l'axe synchronisé.

Abstract

The increasing use of nonlinear loads with power electronic converters causes power quality issues due to harmonics. This thesis proposes a parallel active filter (APF) modeled using instantaneous power theory and synchronous reference frame theory to compensate for these harmonics. Results show effective reduction of total harmonic distortion (THD) for both balanced and unbalanced loads.

Keywords: Power quality, nonlinear loads, total harmonic distortion (THD), parallel active filter (APF), instantaneous power theory, synchronous reference frame theory.

ملخص

يزيد استخدام الأحمال غير الخطية المزودة بمحولات إلكترونية للطاقة من مشاكل جودة الطاقة بسبب التوافقيات. يقترح هذا البحث استخدام فلتري نشط موازي (APF) تم نمذجته وفق نظرية القدرة اللحظية ونظرية إطار المرجع المتزامن لتعويض هذه التوافقيات. تظهر النتائج تقليلًا فعالاً لمعدل التشويه التوافقي الكلي (THD) للأحمال المتوازنة وغير المتوازنة.

الكلمات المفتاحية: جودة الطاقة الكهربائية، الأحمال غير الخطية، معدل التشويه التوافقي الكلي (THD)، فلتري نشط موازي (APF)، نظرية القدرة اللحظية، نظرية إطار المرجع المتزامن.

Liste des figures

Fig I.1	Onde déformé, onde fondamentale et onde harmonique	5
Fig I.2	Distorsion de l'onde fondamentale	5
Fig I.3	Types d'harmoniques	6
Fig I.4	Schéma équivalent d'une phase du réseau	10
Fig I.5	Diagramme de Fresnel des puissances.	13
Fig I.6	Circuit de charge linéaire	15
Fig I.7	Forme d'onde de la tension et du courant de la charge linéaire	15
Fig I.8	Spectre des harmoniques de l'onde de courant et de tension de la source avec charge linéaire	16
Fig I.9	Circuit de charge non linéaire	17
Fig I.10	Forme d'onde de la tension et du courant de la charge non linéaire	17
Fig I.11	Spectre des harmoniques de l'onde de courant et de tension de la source avec charge non linéaire	18
Fig II.1	Principaux types de méthodes traditionnelles	19
Fig II.2	Transformateur à couplage spécial (ZIG ZAG)	20
Fig II.3	Redresseur à double pont	21
Fig II.4	Insertion d'une inductance en série avec le circuit du produit pour un variateur de vitesse en courant continu	21
Fig II.5	Schéma du filtre passif	22
Fig II.6	Formes principales des filtres passifs	22
Fig II.7	Filtre passe-bande	23
Fig II.8	Filtre passe-haut	23
Fig II.9	Filtre passe-haut de premier ordre	23
Fig II.10	Filtre passe-haut de troisième ordre	24
Fig II.11	Schéma des types de filtres	24
Fig II.12	Schéma du filtre actif	26
Fig II.13	Schéma du filtre actif série	27

Fig II.14	Schéma du filtre actif parallèle	30
Fig II.15	Schéma du filtre actif série-parallèle (C)	30
Fig II.16	Schéma du filtre actif hybride (a) Filtre actif parallèle en parallèle avec un filtre passif parallèle (b) Filtre actif série en série avec un filtre passif parallèle	32
Fig II.17	Schéma d'un système aérien avec filtre utilisant (MADA)	33
Fig III.1	Source de tension triphasée	37
Fig III.2	Modèle du filtre actif parallèle	38
Fig III.3	Schéma de commande générale du filtre actif parallèle	39
Fig III.4	Schéma de la théorie de la puissance instantanée	41
Fig III.5	Représentation vectorielle de la transformation de Clarke	42
Fig III.6	Représentation des courants et tensions dans le plan complexe	44
Fig III.7	Puissances échangées et transférées à travers le système	46
Fig III.8	Schéma de la méthode du repère synchronisé	48
Fig III.9	Redresseur triphasé non commandé en pont	51
Fig III.10	Modèle général du filtre actif dans MATLAB/SIMULINK	52
Fig III.11	Diagramme fonctionnel pour la détection des courants par la méthode de la puissance instantanée	53
Fig III.12	Diagramme fonctionnel pour le calcul de (V_α , V_β , I_α , I_β) (Transformation de Clarke)	53
Fig III.13	Diagramme fonctionnel pour le calcul des puissances (p) et (q)	54
Fig III.14	Diagramme fonctionnel pour le calcul des courants de référence (I_{ref} , I_{bref} , I_{cref})	54
Fig III.15	Diagramme fonctionnel de la technique de commande par boucle hystérésis	55
Fig III.16	Diagramme fonctionnel de la charge non linéaire équilibrée	56
Fig III.17	Diagramme fonctionnel de la charge non linéaire déséquilibrée	56
Fig III.18	Signal du courant de charge (I_{La}) pour la charge non linéaire équilibrée	57

Fig III.19	Signal du courant de référence (I_{ref}) pour la charge non linéaire équilibrée	57
Fig III.20	Signal du courant de la source (I_{sa}) pour la charge non linéaire équilibrée	58
Fig III.21	Signal du courant du filtre (I_{fa}) pour la charge non linéaire équilibrée	58
Fig III.22	Signal du courant du filtre et du courant de référence (I_{fa} et I_{ref}) pour la charge non linéaire équilibrée	59
Fig III.23	Spectre des harmoniques du courant de la source (I_{sa}) avant filtrage pour la charge non linéaire équilibrée	60
Fig III.24	Spectre des harmoniques du courant de la source (I_{sa}) après filtrage pour la charge non linéaire équilibrée	60
Fig III.25	Signal de la puissance active $p(W)$ et réactive $q(Var)$ pour la charge non linéaire équilibrée	61
Fig III.26	Signal du courant de charge (I_{La}) pour la charge non linéaire déséquilibrée	62
Fig III.27	Signal du courant de référence (I_{ref}) pour la charge non linéaire déséquilibrée	63
Fig III.28	Signal du courant de la source (I_{sa}) pour la charge non linéaire déséquilibrée	63
Fig III.29	Signal du courant du filtre (I_{fa}) pour la charge non linéaire déséquilibrée	64
Fig III.30	Signal du courant du filtre et du courant de référence (I_{fa} et I_{ref}) pour la charge non linéaire déséquilibrée	64
Fig III.31	Spectre des harmoniques du courant de la source (I_{sa}) avant filtrage pour la charge non linéaire déséquilibrée	65
Fig III.32	Spectre des harmoniques du courant de la source (I_{sa}) après filtrage pour la charge non linéaire déséquilibrée	66
Fig III.33	Signal de la puissance active $p(W)$ et réactive $q(Var)$ pour la charge non linéaire déséquilibrée	67
Fig III.34	Modèle du repère synchronisé	68
Fig III.35	Diagramme fonctionnel de la boucle à verrouillage de phase (PLL)	68
Fig III.36	Diagramme fonctionnel de la transformation des coordonnées (abc) vers (dq) (Transformation de Park)	69
Fig III.37	Diagramme fonctionnel pour l'obtention du courant	69

	harmonique de référence	
Fig III.38	Diagramme fonctionnel de la transformation des coordonnées (dq) vers (abc) (Transformation de Park inverse)	70
Fig III.39	Diagramme fonctionnel du régulateur de tension (PI)	70

Liste des tableaux

Tableau II.1	Avantages et inconvénients des filtres actifs et des filtres passifs	34
Tableau III.1	Caractéristiques du système étudié	52

Liste des symboles

I_{1m}, I_{2m}, I_{3m}	Valeur maximale des courants harmoniques
V_{1m}, V_{2m}, V_{3m}	Valeur maximale des tensions harmoniques
$THD_{(v)}$	Distorsion harmonique totale de la tension
$THD_{(i)}$	Distorsion harmonique totale du courant
D_n	Facteur harmonique
C_n	Amplitude de l'harmonique d'ordre n
C_1	Amplitude de la composante fondamentale
HV	Haute tension
LV	Basse tension
T_0	Période (T)
a_0, a_n, b_n	Coefficients de Fourier
φ_n	Angle de phase
PF	Facteur de puissance
Xeq	Réactance équivalente du filtre
V_a, V_b, V_c	Tensions de la source
I_a, I_b, I_c	Courants de charge
P	Puissance active instantanée
Q	Puissance réactive instantanée
S	Puissance apparente instantanée
N_1, N_2	Enroulements primaire et secondaire
I_f	Courant du filtre
R_f	Résistance du filtre actif
L_f	Inductance du filtre actif
I_L	Courant de la charge
I_S	Courant de la source
V_{fa}, V_{fb}, V_{fc}	Tension à la sortie du filtre actif
I_{fa}, I_{fb}, I_{fc}	Courant du filtre actif

$V_{\alpha,\beta}$	Tension en coordonnées orthogonales ($\alpha\beta$ ou dq)
$I_{\alpha,\beta}$	Courant en coordonnées orthogonales ($\alpha\beta$ ou dq)
\bar{p}	Valeur moyenne de la puissance active
\tilde{p}	Composante alternative de la puissance active
\bar{q}	Valeur moyenne de la puissance réactive
\tilde{q}	Composante alternative de la puissance réactive
p_{toss}	Puissance continue du condensateur
V_{dc}	Tension continue (DC)
$I_{\text{ref}}, I_{\text{bref}}, I_{\text{cref}}$	Courants de référence

Liste des abréviations

Bjts	Bipolar junction transistor	Transistors Bipolaires à Jonctions
F	Fundamental	fondamental
FFT	Fast Fourier Transform	Transformée de Fourier Rapide
GTO	Gate Turn-off	Thyristor à Mise Hors Tension Forcée
HPF	High Power Filter	Filtre Passe-Haut
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	Transistor Bipolaire à Grille Isolée
LCS	Load control switch	Circuit Interrupteur-Inductance
LPF	Low Pass Filter	Filtre Passe-Bas
MADA	Machine asynchrone à double alimentation	Système de Distribution Actif Multi-Agent
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion	Modulation de Largeur d'Impulsion
Mosfets	Metal oxide semiconductor field Effect Transistor	Transistors à Effet de Champ Métal-Oxyde-Semiconducteur
PARK	Park Transformation	Transformation de Park
PCC	Point of common coupling	Point de Couplage Commun
PWM	Pulse-width modulation	Modulation de Largeur d'Impulsion
RLC	Resistor Inductor capacitor	Circuit Résistance-Inductance-Capacité
SCR	Silicon-controlled rectifier	Redresseur Commandé au Silicium
THD	Total Harmonic Distortion	Taux de Distorsion Harmonique
UPS	Uninterruptible power supply	Alimentation Sans Interruption
VSC	Voltage source converter	Convertisseur Source de Tension
VSI	Voltage source Inverter	Onduleur à Source de Tension

Table des matières

Remerciement	i
Dédicace	ii
Résumé (Fr,Ang,Ar)	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux.....	viii
Liste des symboles	ix
Liste des abréviations.....	xi
Introduction generale	1

Chapitre I :

Les harmoniques dans les réseaux électriques et leurs impacts négatifs

I.1 Introduction	3
I.2 Aperçu sur les perturbations électrique	3
I.3 Origine des harmoniques	4
I.4 Les perturbations harmoniques	4
I.5 Types d'harmoniques.....	6
I.6 Sources des harmoniques et leurs effets	7
I.7 Conséquences des harmoniques	8
I.7.1 Effets instantanés	8
I.7.2 Effets à terme	9
I.8 Caractérisation des perturbations harmoniques	9
I.8.1 Le taux de distorsion harmoniques	9
I.8.2 Les Normes Imposées Sur Le THD.....	11
I.8.3 Le facteur de puissance.....	12
I.8.4 Série de Fourier sinusoïdale	13
I.9 Charge linéaire et charge non linéaire	14
I.9.1 Charge linéaire.....	14
I.9.2 charge non linéaire.....	16
I.10 Conclusion	18

Chapitre II :

Différentes méthodes et moyens d'élimination des harmoniques

II.1 Introduction	19
II.2 Solutions traditionnelles de réduction des perturbations harmoniques.....	19
II.2.1 transformateur à couplage spécial.....	20
II.2.2 redresseur à deux ponts	20
II.2.3 Inductances (selfs) série	21
II.2.4 Filtre passe-bande	22
II.2.5 Filtre passe-haut	23
II.3 Types de filtres	24
II.4 Solutions modernes	25
II.5 Classification des filtres actifs	26
II.5.1 Le filtre actif série (F.A.S).....	26
II.5.2 Le filtre actif parallèle (F.A.P).....	27
II.5.3 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)	30
II.6 Avantages des filtres actifs	30
II.7 Inconvénients des filtres actifs	31
II.8 Combinaison hybride active et passive	31
II.8.1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	31
II.8.2 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	31
II.9 Filtrage dynamiques	32
II.10 avantages et inconvénients des filtres actifs et passifs.....	33
II.11 Conclusion	35

CHAPITRE III : Modélisation et simulation du filtre actif parallèle (APF)

III.1 Introduction	36
III.2 Modélisation du système étudié charge	36
III.3 Modélisation de la tension de la source	36
III.4 Modélisation du filtre (APF)	37
III.4.1 Système de commande du filtre (APF)	38
III.4.2 Méthodes de génération du courant de référence	39
III.4.3 Théorie de la puissance instantanée	40

III.4.4	Transformation de Clarke	41
III.4.5	Calcul de la puissance instantanée dans le repère (α - β)	43
III.4.6	Sélection des composantes de puissance à éliminer	45
III.4.7	Calcul des courants de référence dans le repère (α - β)	47
III.4.8	Méthode du repère synchrone (d-q)	48
III.4.9	Boucle à verrouillage de phase (PLL)	50
III.5	Modélisation de la charge non linéaire	50
III.6	Simulation du filtre actif parallèle (APF)	51
III.6.1	Simulation utilisant la théorie de la puissance instantanée	51
	• Résultats de simulation dans le cas d'une charge non linéaire équilibrée	57
	• Résultats de simulation dans le cas d'une charge non linéaire déséquilibrée	62
III.6.2	Simulation utilisant la méthode du repère synchrone (d-q)	68
III.7	Conclusion	71
III.8	Références	73
III.9	Annexes	76

Introduction générale

Le développement rapide de l'électronique de puissance, conjugué à la croissance continue des charges non linéaires, a entraîné une distorsion significative des formes d'onde électriques ainsi que des pertes d'énergie importantes. Cette distorsion, connue sous le nom d'harmoniques, perturbe gravement le fonctionnement des équipements électriques industriels, pouvant même les endommager ou les mettre hors service.

Les systèmes électriques ont initialement été conçus pour générer des tensions équilibrées de forme sinusoïdale, à une fréquence constante de 50 Hz ou 60 Hz. Toutefois, cet objectif devient de plus en plus difficile à atteindre en raison de certains types de charges qui injectent dans le réseau des courants et des tensions contenant des composantes fréquentielles multiples de la fréquence fondamentale. Ces fréquences parasites compromettent les performances des moteurs, des générateurs et des transformateurs, provoquent une surchauffe des câbles, des condensateurs et des équipements électroniques, altèrent la précision des mesures, et perturbent le fonctionnement des relais, des disjoncteurs ainsi que des systèmes de communication. Tous ces effets contribuent à une dégradation notable de la qualité de l'énergie électrique consommée.

Les filtres ne sont généralement utilisés que lorsque les méthodes conventionnelles s'avèrent insuffisantes pour limiter ou éliminer les harmoniques, principalement en raison du coût élevé de ces dernières.

Le filtre actif parallèle (APF) est l'un des dispositifs les plus répandus pour annuler les distorsions harmoniques et compenser la puissance réactive. Il est connecté en parallèle avec la charge non linéaire. Plusieurs méthodes de commande existent pour ce type de filtre. Dans cette étude, nous privilégierons principalement la théorie de la puissance instantanée dans deux cas : charge non linéaire équilibrée et non équilibrée, tout en abordant également la méthode du repère synchrone. [1]

Ce travail a été structuré en trois chapitres comme suit :

- **Chapitre I** : Il traite de la définition des harmoniques et de leurs types, des causes de leur apparition – notamment leur forte croissance au cours des dernières années – ainsi que des principaux problèmes qu'elles génèrent dans les réseaux électriques. Leurs effets sur les différents équipements industriels sont analysés en vue de proposer des solutions adaptées. Ce chapitre aborde également la série de Fourier, le facteur de puissance et le taux de distorsion harmonique total (THD).

-
- **Chapitre II** : Ce chapitre se concentre sur les solutions proposées pour atténuer les effets néfastes des harmoniques. Il présente les méthodes conventionnelles ainsi que les approches modernes comme les filtres, en détaillant leur conception et leur principe de fonctionnement.
 - **Chapitre III** : Le dernier chapitre est consacré au filtre actif parallèle (APF). Il en détaille la modélisation à travers deux approches : la théorie de la puissance instantanée et la méthode du repère synchrone. Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce chapitre présente également les principales conclusions et recommandations issues de l'étude, mettant en évidence l'efficacité de la méthode de la puissance instantanée pour l'atténuation des harmoniques et l'amélioration de la qualité du réseau électrique dans les deux cas de charges non linéaires : équilibrées et déséquilibrées.

Conclusion Générale

Ce mémoire s'achève par la présentation d'une stratégie de commande visant à améliorer la qualité de l'alimentation électrique dans les installations industrielles, à travers l'utilisation d'un filtre actif parallèle (APF). Nous avons abordé les aspects essentiels de cette thématique, en partant de l'origine des harmoniques et des perturbations qu'elles engendrent, jusqu'aux différentes solutions disponibles, en mettant en évidence le filtre actif parallèle comme solution principale et prometteuse.

À travers ce travail, nous avons pu aboutir à plusieurs conclusions que nous résumons ci-dessous, suivies de recommandations utiles pour de futures recherches :

Principaux résultats :

- L'application de la théorie de la puissance instantanée ainsi que de la méthode du repère synchrone nous a permis de commander efficacement le filtre actif parallèle, en assurant la compensation des courants harmoniques générés par les charges non linéaires.
- Le filtre actif parallèle (APF) s'est révélé efficace pour réduire significativement le taux de distorsion harmonique total (THD), aussi bien dans le cas de charges non linéaires équilibrées que déséquilibrées.
- Contrairement aux filtres passifs traditionnels, le APF permet une élimination plus étendue des harmoniques, tout en apportant une meilleure flexibilité et adaptabilité au réseau électrique.

Recommandations et perspectives :

- Explorer la commande directe de la puissance appliquée au APF afin d'optimiser à la fois le facteur de puissance et le THD.
- Intégrer des techniques d'intelligence artificielle (contrôleur flou, algorithmes génétiques, réseaux de neurones, etc.) pour améliorer les performances dynamiques et l'adaptabilité du filtre.
- Évaluer l'efficacité de la théorie de la puissance instantanée dans des cas plus complexes, notamment :
 - Charge non linéaire équilibrée alimentée par une source déséquilibrée.
 - Charge non linéaire déséquilibrée alimentée par une source également déséquilibrée.
- Réaliser une implémentation expérimentale du APF sur un réseau basse tension réel, afin de valider les résultats obtenus en simulation et d'en évaluer la robustesse en conditions pratiques.

- [1] *J. George Wakileh*, Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design, Springer, 2020.
- [2] **Parkatti, P.** Transformerless Active Harmonic Filtering using Series-Connected Supply Filter Capacitors, Thèse de doctorat, Tampere University of Technology, Finlande, 2011 .
- [3] KASHIF, Muhammad. Approches de commande améliorées pour la compensation des harmoniques et le soutien de la puissance réactive afin d'améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau. Thèse de doctorat, Université Macquarie, Australie, août 2020.
- [4] Qasim, Mohammed. Stratégies de commande innovantes basées sur les réseaux de neurones artificiels pour les filtres actifs de puissance. Mémoire de Master, Département de Génie Électrique, Université Khalifa, Émirats Arabes Unis, juin 2013.
- [5] BENKADRI, Samir. Filtrage actif parallèle pour la compensation des harmoniques dans les réseaux basse tension alimentés par des convertisseurs statiques. Thèse de magistère, Université de Constantine, Algérie, 2018.
- [6] **BEN SAAD, Walid.** Étude et modélisation des compensateurs actifs pour réseaux électriques basse tension : conception, commande et applications. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 2019.
- [7] **HAMOUDA, Nouredine & BENALLA, Hocine.** *Amélioration de la qualité du réseau électrique à l'aide de compensateurs actifs.* Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri – Constantine 1, Algérie, 2018
- [8] Ab. Hamadi, , S. Rahmani and K. AI-Haddad, Fellow, « A New Hybrid Series Active Filter Configuration to Compensate Voltage Sag, Swell, Voltage and Current Harmonics and Reactive Power » IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009) Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea July 5-8, 2009
- [9] OTHMAN, Sana. Modélisation et commande à base d'une représentation par réseau de Pétri d'un filtre actif parallèle avec un onduleur multicellulaire série. Thèse de doctorat, CY Cergy Paris Université (en cotutelle avec ENIG – Tunisie), soutenue le 10 décembre 2021

- [10] Mohamed Muftah Abdusalam, « Structures et Stratégies de Commande des Filtres Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales », Thèse de Doctorat, Univ. H. Poincaré, Nancy-I, Mai 2008.
- [11] WAKILEH, George J. Power Systems Harmonics : Fundamentals, Analysis and Filter Design, Springer, Cham, 2020.
- [12] BELLANGER, Maurice. Traitement numérique du signal – 10^e édition, Dunod, Paris, mai 2022.
- [13] B. Malinowski, Qualité de l'énergie électrique – Effets des charges linéaires et non linéaires, Mémoire de Master, Université de Lille, Département de Génie Électrique, France, 2016.
- [14] S. Bernard, G. Trochain, “Compensation des courants harmoniques générés par les ordinateurs grâce à un compensateur actif d’harmoniques révolutionnaire”, Cahier technique n° 128.
- [15] Université Annaba, Mémoire filtre Actif, Boukadoum Abd Elaziz,
- [16] LAHMADI, Ouarda. Contribution à l'identification et la commande d'un filtre actif parallèle par des techniques neuromimétiques. Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Algérie, juin 2017 .
- [17] BENOUADAH, Djamel Eddine & HASNAOUI, Farouk. Étude et commande d'un filtre actif série pour le contrôle de la tension dans les réseaux basse tension. Mémoire de master, Université Saad Dahlab – Blida, Algérie, 2016
- [18] BOUDAOU, Malika & ZERARI, Mohamed. Commande avancée d'un compensateur série dynamique pour la restauration de la tension en présence de creux dans les réseaux basse tension. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, septembre 2020.
- [19] Pan, X., Liu, X., & Zhao, Y. Control of a transformerless static synchronous series compensator for unbalanced voltage compensation, IET Power Electronics, vol. 16, no. 4, pp. 623–634, avril 2023.

- [20] BOUDAUD, Malika & ZERARI, Mohamed. Commande avancée d'un compensateur série dynamique pour la restauration de la tension en présence de creux dans les réseaux basse tension.
- [21] Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, septembre 2020.
- [22] BOUDAUD, Malika & ZERARI, Mohamed. Commande avancée d'un compensateur série dynamique pour la restauration de la tension en présence de creux dans les réseaux basse tension. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, septembre 2020.
- [23] Kashif, Muhammad, Enhanced control approaches for harmonic compensation and reactive power support for improving grid power quality, PhD Thesis, Macquarie University, Australie, août 2020.
- [24] Ahfouda, Abdelkarim. *Integration of Z-Source Converter in Active Harmonic Filtering*. Thèse de doctorat, Université de Eloued, Algérie, 2024.
- [25] M. Benyoucef, "Contrôle avancé des convertisseurs à modulation de largeur d'impulsion pour la gestion de l'énergie active et réactive dans les réseaux électriques intelligents", Thèse de doctorat, Université de Grenoble Alpes, France, 2021.
- [26] S. K. Dwivedi, M. K. Mishra, and B. Singh, "A Comprehensive Review on Active Power Filters for Power Quality Improvement," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 8, pp. 9115-9135, Aug. 2022.
- [27] R. C. Bansal, "Active Filters in Power Systems," 2nd Edition, Wiley-IEEE Press, 2017.
- [28] L. Zhang, L. Guo, "Design and Implementation of a Real-Time Digital Control System for Active Power Filters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 9, pp. 8880–8890, Sept. 2019.
- [29] Gaillard, A., Poure, P., Saadate, S., & Machmoum, M. (2009). Variable speed DFIG wind energy system for power generation and harmonic current mitigation. *Renewable Energy*, 34(6), 1545–1553.

REFERENCES

- [30] M. T. Abolhassani, H. A. Toliyat “A Sensorless Integrated Doubly- Fed Electric Alternator/Active Filter (IDEA) for Variable Speed Wind Energy System”, IEEE, Industry Applications Conference, 12-16 Oct. 2003 Page(s): 507 - 514 vol.1
- [31] M. T. Abolhassani, P. Enjeti, and H Toliyat, “ Integrated Doubly Fed Electric Alternator/Active Filter (IDEA), a Viable Power Quality Solution, for Wind Energy Conversion Systems ”, IEEE, industry Applications Conference, 3-7 Oct. 2004 Page(s): 2036 - 2043 vol.3.
- [32] AJAMI, A ; HOSSEINI, S.H ; HAMIDEI, RASHIDEI, R, A Simple Control Strategy for Shunt Active Filter and Its Implementation, International Conference On Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. 2005
- [33] CHEN, D, XIE, S, Review of the control strategies applied to active power filters, IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power and Electrical Engineering, Vol.27 ,2010.
- [34] ASIMINOAEI, L, BLAABJERG, F, HANSEN, S, Evaluation of Harmonic Detection Methods for Active Filter Applications, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition ,2005.
- [35] AFONSO, J, COUTO, C, MARTINS, J, Active Filters based on the p-q theory, IEEE Industrial Electronics Society Newsletter, Vol.47,2000
- Berhane Dimd (Power Converters as smart instruments and actuators in a smarter grid). June 2015

Annexe A : La boucle à verrouillage de phase (PLL)

La PLL (Phase Locked Loop) est un système de commande asservie basé sur la comparaison de phase entre un signal d'entrée et un signal de sortie généré par un oscillateur contrôlé en tension (VCO). Le but de ce système est d'ajuster dynamiquement la fréquence du VCO afin de maintenir la phase de la sortie synchronisée avec celle de l'entrée. La PLL est constituée de trois blocs principaux.

- Détecteur de phase (PD) : compare les phases du signal d'entrée et du signal de sortie, et génère une tension d'erreur proportionnelle à l'écart de phase :

$$\varepsilon(t) = K_D[\varnothing_{out}(t) - \varnothing_{in}(t)] \quad (\text{A.1})$$

- Filtre passe-bas : élimine les hautes fréquences présentes dans le signal d'erreur produit par le détecteur de phase.

- Oscillateur contrôlé en tension (VCO) : convertit la tension issue du filtre en une fréquence de sortie ajustée dynamiquement.

La PLL est très utilisée dans de nombreuses applications, notamment dans les systèmes de commande de puissance, où il est souvent nécessaire d'extraire la fréquence et la phase d'un signal de tension ou de courant.

Annexe B : Transformations de Park et de Clarke

1. Transformation de Park directe

La transformation de Park permet de convertir un système triphasé en un système biphasé tournant, facilitant ainsi l'analyse et la commande des machines électriques. Elle est donnée par la matrice suivante :

$$[\theta] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

où θ est l'angle de rotation du vecteur dans le repère tournant.

2. Transformation de Park inverse

La transformation de Park inverse permet de revenir du repère tournant (d, q) au repère triphasé (a, b, c) :

$$[\theta] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

3. Transformation de Clarke

La transformation de Clarke permet de passer d'un système triphasé (a, b, c) à un système biphasé stationnaire (α , β) :

$$\begin{bmatrix} V\alpha \\ V\beta \end{bmatrix} = K \times \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

$$\begin{cases} V\alpha = Va - \cos\left(\frac{\pi}{3}\right)Vb - \cos\left(\frac{\pi}{3}\right)Vc \\ V\beta = -\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)Vb - \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)Vc \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

4. Relations inverses de Clarke

À partir de $V\alpha$ et $V\beta$, on peut retrouver les tensions triphasées à l'aide de la transformation inverse :

$$\begin{cases} Va = V\alpha \\ Vb = -\cos\left(\frac{\pi}{3}\right)V\alpha + \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)V\beta \\ Vc = \cos\left(\frac{\pi}{3}\right)V\alpha - \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)V\beta \end{cases} \quad (\text{B.5})$$