# REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE MINISTRE DE L'ENSEGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mohammed Seddik BENYAHIA - Jijel Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'électronique



# Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de master en électronique

**Option : Electronique des systèmes embarqués** 

# Thème :

Modélisation et simulation d'un filtre actif parallèle optimisé par l'essaim particulaire.

Réalisé par :

- BENKINIOUAR Hadjer Yasmine
- BOUFENINZA Aicha

Dr. YACEF Rima

**Proposé par :** 

**Promotion : Juillet 2021** 

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe reconnaissance et de respect:

- A mes chers parents
- A ma cher sœur Hosna
- A mon frère Oussama
- A toute la famille qui mon donner de l aide et de la sagesse
- A tous mes amis
- A tout mes collègues de la promotion Electronique des systèmes embarqués 2021

Hadjer yasmine

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe reconnaissance et de respect:

- A mes chers parents
- A mes sœurs
- A mes frères
- A toute la famille qui mon donner de l aide et de la sagesse
- A tous mes amis
- A tout mes collègues de la promotion Electronique des systèmes embarqués 2021

Aicha

# Sommaire

Remerciements	Ι
Sommaire	Π
Liste des figures	III
Liste des tableaux	IV
Nomenclature	V
Introduction générale	VI

# Chapitre I

# Les perturbations harmoniques, caractéristique et normes

I.	Introduction	1
I.1	Qualité de l'énergie	1
I.2	Les perturbations électriques et leurs origines	1
	I.2.1 Creux et coupures de tension	2
	I.2.2 Fluctuations de tension	2
	I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension	2
	I.2.4 Variation de fréquence	2
	I.2.5 Harmoniques et interharmoniques	3
I.3	Les perturbations harmoniques	5
	<b>I.3.1</b> Origine des harmoniques	5
	I.3.2 Conséquences des harmoniques	5
	I.3.3.1 Les effets instantanés	5
	I.3.3.2 Les effets à terme	6
	I.3.4 Caractéristiques de la perturbation harmonique	6
	<b>I.3.4.1</b> Le taux de distorsion harmoniques	6
	<b>I.3.4.2</b> Le facteur de puissance	7
I.4	Spécifications des harmoniques	8
	I.4.1 Le rang harmonique	8
	I .4.2 Classification des harmoniques	9
I.5	Normalisations	9
	I.5.1 Des normes appareillage	9
	I.5.2 Des normes qualité réseaux	9
I.6	Conclusion	12

# Chapitre II Solutions de dépollution des réseaux électriques

II.	Introduction	13
II.1	Solutions de dépollution des réseaux électriques	13
	II.1.1 Solutions de dépollution traditionnelles	13
	II.1.1.1 Dépollution des courants perturbateurs	13
	II.1.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices	15
	II.1.2 Solutions de dépollution moderne	15
II.2	Filtrage actif de puissance	16
	II.2.1 Filtre actif parallèle (APF)	16
	II.2.1.1 Partie puissance	17
	II.2.1.1.1 Onduleur de tension triphasé	17
	II.2.2.1.2 Stockage de l'énergie	19
	II.2.2.1.3 Filtre de sortie	20
	II.2.1.2 La partie commande	20
	II.2.2 Filtre actif série (FAS)	20
	II.2.3 Filtre combiné parallèle-série (UPQC)	21
	<b>II.2.4</b> Combinaison hybride active et passive	22
	II.3 Conclusion	22

# Chapitre III

# **Optimisation de l'APF par la méthode de l'essaim particulaire**

III.	Introduction	23
III.1	Stratégie de control-commande de l'APF	23
	III.1.1 Méthodes d'identification des courants perturbés	24
	III.1.1.1 Méthode de détection du courant de la source	24
	III.1.1.2 Méthode de détection de l'amplitude du courant de source	24
III.2	Régulation et principe de commande	25
	<b>III.2.1</b> Principe de régulation de la tension continue avec le PI optimisé par le	
PSO		26
	III.2.2 Régulation PI	29
	III.2.3 Le régulateur à hystérésis	31

<b>III.3</b> Essaim particulaire dans la commande de l'APF	32
III.3.1 Principe de fonctionnement du PSO	32
III.3.2 Mécanisme de confinement	34
III.3.3 Déroulement de l'algorithme	35
III.3.4 Le régulateur PI optimisé par le PSO	36
III.3.4.1 Indices de performance d'un régulateur PI	36
<b>III.3.4.2</b> Approche d'optimisation des paramètres du régulateur PI par le PSO	38
III.3.4.2.1 Codage des paramètres du régulateur PI	38
III.3.4.2.2 Définition de la fonction objective	38
III.4 Conclusion	39

# Chapitre V Résultats de simulation de l'APF optimisé par le PSO

V.1 Introduction	40
V.2 Modèle de simulation de l'APF	41
V.2.1 Modèle de la source	41
V.2.2 Modèle de la charge polluante	41
V.2.3 Modèle du filtre actif parallèle	41
<b>V.3</b> Simulation d'un APF optimisé par la méthode intelligente du PSO connecté au	42
réseau électrique perturbé par une charge non linéaire	
V.3.1 Optimisation des paramètres du régulateur PI avec l'approche intelligente	42
basée sur le PSO	
V.3.1.1 Caractéristiques du PSO utilisé	42
V.4 Conclusion	55
Conclusion générale	56
Bibliographie	57

# Liste des figures

Figure.I-1	Les perturbations électriques								
Figure.II-1	Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage	14							
Figure.II-2	Filtre passif résonnant	15							
Figure.III-3	Principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle	16							
Figure.II-4	Schéma bloc d'un filtre actif parallèle	17							
Figure.II-5	Onduleur de tension triphasé								
Figure.II-6	Filtre actif série	21							
Figure.II-7	La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)	21							
Figure.III-1	Schéma fonctionnel de la détection du courant de source	24							
Figure.III-2	Schéma fonctionnel de la commande de l'APF par l'amplitude	25							
	courant de source								
Figure.III-3	Schéma de principe de la partie commande de l'onduleur avec	26							
	contrôle de la tension du condensateur par un PI optimisé par le								
	PSO								
Figure.III-4	Schéma bloc de l'APF Parallèle	27							
Figure.III-5	Schéma de régulation de la tension aux bornes du condensateur	30							
	régulateur PI								
Figure.III-6	Commande par hystérésis à bande fixe	31							
Figure.III-7	Déplacement d'une particule								
Figure.III-8	Organigramme général de la méthode PSO								
Figure.III-9	Approche d'optimisation du PI par l'algorithme PSO 3								
Figure.V-1	Organigramme de l'algorithme PSO utilisé pour l'optimisation des	43							
	paramètres de régulateur PI pour la tension continue aux bornes de								
	l'élément de stockage d'énergie de l'APF								
Figure.V-2	Evaluation de la première fonction objective en fonction du	47							
	nombre d'itérations pour une taille de l'essaim égale à 20.								
Figure.V-3	Evaluation de la deuxième fonction objective en fonction du	48							
	nombre d'itérations pour une taille de l'essaim égale à 20								
Figure.V-4	Evaluation de la troisième fonction objective en fonction du	48							
	nombre d'itération pour une taille de 20 de l'essaim								

Figure.V-5	Modèle de simulation du réseau triphasé connecté à l'APF optimisé 5					
	par la méthode intelligente du PSO					
Figure.V-6	Modèle de simulation de la commande de l'APF optimisé par la	50				
	méthode intelligente du PSO.					
Figure.V-7	La tension aux bornes du condensateur pour un APF optimisée par	51				
	le PSO <sub>1</sub>					
Figure.V-8	La tension aux bornes du condensateur pour une APF optimisée par	51				
	le PSO <sub>2</sub>					
Figure.V-9	La tension aux bornes du condensateur pour une APF optimisée par	51				
	le PSO <sub>3</sub>					
Figure.V-10	Courant de charge $i_c$ (A) et son spectre correspondant	53				
Figure.V-11	Courant de source $i_s(A)$ , et son spectre correspondant.	53				
Figure.V-12	Courant du filtre $i_f(A)$ , et son spectre correspondant					
Figure.V-13	(a) Puissance active, (b) Puissance reactive et (c) Facteur de	54				
	puissance.					

# Liste des tableaux

Tableau.I-1	THD <sub>i</sub> pour quelques charges non-linéaires	8
Tableau.I-2	Séquences des harmoniques	9
Tableau.I-3	Limites demission de courants harmoniques des appareils basse	
	tension de courant inférieur à 16A et de classe A ( Norme : CEI	10
	61000-3-2)	10
Tableau.I-4	Limitation des émissions de courants harmoniques (Norme : CEI	11
	61000-3-4)	
Tableau.I-5	Limites de perturbations définies par EN 50160	12
Tableau.II-1	Tensions générées par l'onduleur	19
Tableau.V-1	Les paramètres de la source tension du réseau triphasé	41
Tableau.V-2	Les paramètres de la charge polluante	41
Tableau.V-3	Les paramètres d'un filtre actif parallèle.	41
Tableau.V-4	Evaluation de fval <sub>1</sub> , T <sub>r</sub> , T <sub>m</sub> , D <sub>1</sub> en fonction de la taille de l'essaim	
	pour un nombre d'itération égal a 10	44
Tableau.V-5	Evaluation de fval <sub>1</sub> , T <sub>r</sub> , T <sub>m</sub> , D <sub>1</sub> en fonction du nombre d'itérations	44
	pour une taille de l'essaim égale a 20	
Tableau.V-6	Evaluation de fval <sub>2</sub> , T <sub>r</sub> , T <sub>m</sub> , D <sub>1</sub> en fonction de la taille de l'essaim	45
	pour un nombre d'itération égal a 10	
Tableau.V-7	Evaluation de fval <sub>2</sub> , T <sub>r</sub> , T <sub>m</sub> , D <sub>1</sub> en fonction du nombre d'itérations	45
	pour une taille de l'essaim égale a 20	
Tableau.V-8	Evaluation de $f$ val <sub>3</sub> , T <sub>r</sub> , T <sub>m</sub> , D <sub>1</sub> en fonction de la taille de l'essaim	46
	pour un nombre d'itération égal a 10	
Tableau.V-9	Evaluation de fval <sub>3</sub> , T <sub>r</sub> , T <sub>m</sub> , D <sub>1</sub> en fonction du nombre d'itérations	46
	pour un taille de l'essaim égale a 2	
Tableau.V-10	Tableau récapitulatif des paramètres optimaux du régulateur PI pour	10
	les différents algorithmes (PSO <sub>1</sub> , PSO2 et PSO <sub>3</sub> )	49
Tableau.V-11	Tableau récapitulatif des paramètres : THD <sub>i</sub> et T <sub>r</sub> pour les différents	50
	PSOs utilisés	52
Tableau.V-12	Comparaison de quelques méthodes existantes dans la littérature avec	
	celle proposée	55

# Nomenclature

THD <sub>i</sub> (%)	Taux de distorsion harmoniques en courant
$\mathrm{THD}_{v}(\%)$	Taux de distorsion harmoniques en tension
F <sub>Dis</sub>	Facteur de distorsion
MT	Moyenne Tension
BT	Basse Tension
FAS	Filtre Actif Série
FAP	Filtre Actif Parallèle
UPQC	Unified Power Quality Conditioner (En français : filtre combiné parallèle-
	sérié)
$\mathbf{N}_{\mathbf{p}}$	Le nombre de particules de l'essaim
$N_d$	Le nombre de variables du problème (cà-d. dimension d'une particule)
NI <sub>max</sub>	Le nombre maximum d'itérations
fval	La fonction objective
PSO	L'algorithme de l'essaim particulaire
<b>PSO</b> <sub>1</sub>	L'algorithme de l'essaim particulaire utilisant $f$ val <sub>1</sub>
PSO <sub>2</sub>	L'algorithme de l'essaim particulaire utilisant fval <sub>2</sub>
PSO <sub>3</sub>	L'algorithme de l'essaim particulaire utilisant $f$ val <sub>3</sub>
<b>PSO</b> <sub>S</sub>	Algorithmes PSO utilisés dans le contexte d'étude
AG <sub>S</sub>	Algorithmes génétiques
ZN	Ziegler Nichols

# **Introduction générale :**

L'électronique de puissance est un domaine relativement nouveau et en pleine croissance. L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance (charges nonlinéaires) dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques.

Ces perturbations sont générées par les charges non-linéaires connectées au réseau, tel que les équipements à charge déséquilibrée et les convertisseurs statiques (redresseurs et cycloconvertisseurs). Ces charge non-linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux, même si elles sont alimentées par une tension sinusoïdale, elles se comportent par conséquent comme des générateurs des harmoniques et échangent en plus l'énergie réactive provenant des dysfonctionnements au niveau des équipements électriques.

Les harmoniques engendrées par ces charges non linéaires circulent dans les réseaux électriques et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voire même engendrer leur destruction. Ces effets néfastes peuvent apparaître instantanément ou se produire en différé tant pour le distributeur que pour les utilisateurs. C'est pour ces raisons que le filtrage des distorsions en courant et en tension est au centre des préoccupations actuelles à la fois des fournisseurs, et des utilisateurs d'énergie électrique; ils adoptent donc, les uns comme les autres, les limites proposées par les normes *IEEE,CEI*.

Donc il est nécessaire de réduire ces harmoniques pour protéger le réseau électrique contre cette pollution harmonique. Actuellement, il existe un certain nombre de solutions techniques pour éliminer ou réduire les effets liés à une mauvaise qualité de l'énergie. Il s'agit là d'un domaine très riche tant en innovations qu'en développement [1,2,3].

On peut distingue deux principaux types des filtres, les filtres passifs qui sont beaucoup utilisés, mais qui présentent certains inconvénients du fait que les harmoniques couvrent un domaine fréquentiel large et fluctuant. En outre, ils peuvent présenter des risques d'apparition de résonance avec le réseau auquel ils sont connectés.

Pour toutes ces raisons d'autres solutions de dépollution des réseaux électriques a été proposées dans la littératures, il s'agit des filtres actifs.

Les filtres actifs sont un moyen efficace pour la compensation des harmoniques de courants ou de tensions générés par des charges non-linéaires. Ils compensent, en temps réel, les perturbations dues à une charge non-linéaire en injectant sur le réseau des courants qui s'opposent à l'harmonique propagé dans le réseau afin que le réseau n'est plus qu'à fournir un courant sinusoïdal et en phase avec la tension.

Les filtres actifs plus souples et moins encombrants, sont basés essentiellement sur les onduleurs de tension ou courant avec une commande appropriée (*MLI*, hystérésis...). Ils comportent deux fonctions principales; une fonction d'identification des courants de références et une fonction de commande d'onduleur pour injecter des courants de compensation.

Notre travail est basé sur l'optimisation du filtre actif parallèle (APF) de puissance par la méthode intelligente de l'essaime particulaire ou bien en anglais (Particle Swarm Optimization: PSO). La méthode sert a l'optimisation des paramètres de l'APF pour un fonctionnement meilleur en termes de qualité d'énergie ,restitution du courant de source polluer par compensation des harmoniques produits dans le réseau (diminution du taux de distorsion d'harmonique totale, diminution de l'énergie réactive consommée par les charges non-linéaires et l'amélioration du facteur de puissance).

Dans le premier chapitre nous présentons les perturbations des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes et nous exposons les origines/les conséquences de cette pollution harmonique. Finalement, un récapitulatif sur les normes internationales imposées aux utilisateurs est présenté.

Dans le second chapitre, nous exposons les solutions de dépollution des réseaux électriques existantes, traditionnelles et modernes pour la réduction des harmoniques. Nous donnons ensuite une vue générale sur le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle avec sa structure générale.

Dans le chapitre trois, nous présentons la méthode d'extraction du courant de référence. Cette méthode d'identification est basée sur la détection du courant de source a partir de la régulation de la tension aux bornes de l'élément de stockage d'énergie de l'APF. Nous exposons pour cette cause un contrôleur PI classique ainsi qu'un contrôleur PI optimisé par la méthode de l'essaim particulaire.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation de l'ensemble réseau, charge non linéaire et filtre actif parallèle sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats de simulations sont présentés pour la validation de la méthode proposée.

# Chapitre I

# Les perturbations harmoniques, caractéristiques et normes

# Résumé

Dans ce chapitre nous présentons les différents phénomènes perturbateurs qui influents sur la qualité du courant et de la tension, ainsi qu'un récapitulatif de certaines normes utilisées.

- I. Introduction
- I.1 Qualité de l'énergie
- I.2 Les perturbations électriques et leurs origines
- I.3 Les perturbations harmoniques
- I.4 Spécifications des harmoniques
- I.5 Normalisations
- I.6 Conclusion

#### I. Introduction :

L'objectif fondamental des réseaux électriques est de fournir aux clients une énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Cependant cet objectif semble idéal mais on n'est jamais facile à l'assurer dans les dernières années, car l'utilisation croissante des appareils industriels ou domestiques des systèmes de commande à base d'électronique de puissance entraine de plus en plus des problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Bien que ces appareils apportent une souplesse d'utilisation et une augmentation de la fiabilité avec un rendement élevé, ils se comportent comme des charges non linéaires qui absorbent des courants avec des formes d'ondes différentes de celle des tensions d'alimentation ce qui affecte la qualité de l'énergie électrique.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principales perturbations affectant la qualité de l'onde électrique, notamment les harmoniques pour les quelles on s'intéresse particulièrement. Nous parlerons également de l'origine, l'analyse et l'effet des harmoniques sur les récepteurs électriques. Finalement, nous exposerons les normes internationales imposées aux utilisateurs [4].

#### I.1 Qualité de l'énergie :

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants :

- Les fluctuations.
- Le déséquilibre.
- La fréquence.
- La forme d'onde.

La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Une détérioration de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposé la présence d'une anomalie dans le réseau [4].

#### I.2 Les perturbations électriques et leurs origines :

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres précédemment définis peuvent se manifester. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation [4] :

#### I.2.1 Creux et coupures de tension :

Le creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 minutes jusqu'à quelques secondes.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc...)[4,5].

La coupure brève c'est une baisse de l'amplitude qui peut dépasser les 90% de la tension nominale pendant une courte durée qui n'excède pas une minute. Ces coupures sont dues au fonctionnement du système de protection des réseaux. La figure.I-1(a) montre un exemple de creux et coupures de tension.

#### I.2.2 Fluctuations de tension :

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension qui se produisent sur un intervalle de temps de quelque centième de seconde.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courant d'appel important. L'origine principale de ce courant et le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide (fours à arc, machines à souder, etc...).

Ces fluctuations entraînent des variations de flux lumineux pour les lampes à incandescence créant un papillotement de la lumière est appelé fliquer [3]. La figure.I-1(b) montre un exemple de fluctuation tension.

#### I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension :

Dans un réseau triphasé, on a idéalement des amplitudes égales de la tension respectivement sur chacune des trois phases et un angle de phase de 120 degrés. Lorsque les tensions présentent une différence d'amplitude, il y a un déséquilibre et cela peut causer des problèmes pour les équipements triphasés branchés sur le réseau.

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau [3]. La figure.I-1(c) montre un exemple de déséquilibre du système triphasé de tension.

#### I.2.4 Variation de fréquence :

Les réseaux de distributions ou de transports ont une fréquence constante, sa variation de fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau.

Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de 50 Hz  $\pm$ 1%. [3,6].La figure.I-1(d) montre un exemple de variation de fréquence.

#### I.2.5 Harmoniques et interharmoniques :

Les harmoniques sont des ondes sinusoïdales de fréquences multiples entier du fondamental superposées à l'onde fondamentale (50Hz). La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation des équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors .La figure.I-1(e) montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz.

La tension du réseau peut contenir des composantes fréquentielles qui ne sont pas des multiples entiers du fondamental. Ce type de composantes sont communément, appelées interharmoniques. Leurs sources principales sont les cyclo-convertisseurs, les convertisseurs de fréquence, les variations de vitesse, les moteurs asynchrones, les machines à souder et les fours à arc [2,7].



Figure.I-1 : Les perturbations électriques [4].

#### I.3 Les perturbations harmoniques :

#### I.3.1 Origine des harmoniques :

L'augmentation sensible du niveau de la pollution harmonique du réseau électrique est une conséquence de la prolifération des convertisseurs statiques .En effet, Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale.

Toutes les charges non linéaires étaient représentées par convention comme sources de courants harmoniques. Cela est dû au fait que les courants appelés ont une allure non sinusoïdale imposée par les paramètres de la charge [8].

En peut cité quelques exemples de ces charges : les variateurs de la fréquence (cyclo convertisseurs), les non-linéarités dues à la magnétisation des transformateurs, les machines alternatives tournantes, les fours à arc, les chauffages par induction, les gradateurs de lumière,..etc [10].

#### I.3.2 Conséquences des harmoniques :

Une fois que les sources d'harmoniques sont bien définies, elles doivent être interprétées en termes de leurs effets sur les installations et les équipements électriques on distingue deux sortes d'effets possibles [9] :

#### I.3.3.1 Les effets instantanés :

Les effets instantanés apparaissent immédiatement sur les équipements [9]:

- Defauts de fonctionnements de certains équipements électriques : En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demipériode, par conséquent tous les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques appareils utilisant la tension comme référence peuvent être affectés .

- Trouble fonctionnel des micro-ordinateur : Les affects sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entrainement de disque .

- Les perturbations et la dépollution dans les systèmes électriques : certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesures et des erreurs de lecteur supplémentaires en présence des harmoniques.

- *Vibrations et bruits* : les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustique, principalement dans les appareils, électromagnétique (transformateurs, inductances et machines tournantes).

#### I.3.3.2 Les effets à terme :

Les effets à terme se traduisent par une fatigue mécanique prématurée (due aux vibrations) des matériaux et des lignes.

La liste suivante donne une idée de l'impact des harmoniques sur certains équipements à usage fréquent qui font partie intégrante du réseau électrique, tels que les [9]:

- *Alternateurs* : Perte supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liés à la circulation des courants harmoniques. Ces pertes provoquent un échauffement supplémentaire et réduisent également le rendement de ces machines .

- *Câbles électriques* : Pertes ohmiques supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques d'ordres 3 ou homopolaires corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation des courants harmoniques pairs associés à une composante continue .

- *Transformateurs* : Pertes supplémentaires dans les enroulements par effet joule et dans le noyau par courant de Foucault .

Moteurs à courant alternatif : Pertes supplémentaires dans le fer et enroulements plus l'échauffement du moteur.

- *Condensateurs de puissance* : Pertes diélectrique supplémentaires conduisant au vieillissement rapide du condensateur.

- *Equipements à base d'électronique de puissance* : Dysfonctionnement lié à la déformation de la tension qui peut créer des faux passages par zéro (perte de synchronisation).

- Ordinateurs : Troubles fonctionnels liés à la distorsion de la tension du réseau .

- *Réseaux de télécommunication* : Génération de bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication. Dans des cas particuliers, surtout lors de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable [11].

#### I.3.4 Caractéristiques des perturbations harmoniques :

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (*THD*) et le facteur de puissance, ces deux facteurs sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

#### I.3.4.1 Le taux de distorsion harmoniques:

Notre étude se limite au cas ou la source de tension est sinusoïdale ou le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions le taux de distorsion harmonique est un paramètre qui définit globalement la déformation de la

6

grandeur alternative. Le *THD* s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée. Il existe deux types de *THD* selon le type de dépollution appliqué, tel que :

- Un taux de distorsion harmoniques de courant, est donné par l'expression suivante :

$$THD_{i}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{n} I_{ci}^{2}}}{I_{c1}}$$
(I.1)

Avec  $I_{c1}$  la valeur efficace du courant fondamental et  $I_{ci}$  les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant.

- Un taux de distorsion harmoniques de tension, est donné par l'expression suivante :

$$THD_{\nu}(\%) = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_{cn}}{V_{c1}}\right)^2} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{|Z_{scc}^n|I_{cn}}{V_{c1}^2}\right)}$$
(I.2)

Avec  $V_{c1}$  la valeur efficace du tension fondamental et  $V_{cn}$  les valeurs efficaces des différentes harmoniques du tension,  $Z_{scc}$  est l'impédance de court-circuit.

#### I.3.4.2 Le facteur de puissance :

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties: active P, réactive Q et déformante D. Son expression est donnée par l'équation suivante:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$
(I.3)

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant (avec  $D = 3V\sqrt{I_c^2 + I_{c1}^2}$  ou  $I_c$  est la valeur efficace du courant de charge).

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance  $F_P$  est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S:

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$
(I.4)

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1. En posant :

$$P=3V.I_{C1}.\cos\phi \tag{I.5}$$

On aura :

.

$$F_P = \frac{I_{C1}}{I_C} \cos \phi = F_{Dis} \cos \phi \tag{I.6}$$

Ou  $F_{Dis}$  représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il détroit lorsque la déformation de l'onde s'accentue,  $\cos \emptyset$  représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

Afin d'éviter les désagréments causés par la présence des courants et des tensions harmoniques dans le réseau, des normes sont imposés aux utilisateurs :

Le tableau.I-1 indique le  $THD_i$  du courant pour différentes charges non linéaires [3].

Charges non linéaires	<i>THD</i> <sub>i</sub> (%)
Variateurs de vitesse.	70
Alimentation de micro-ordinateur.	80
Tubes fluorescents.	>100

**Tableau.I-1 :** *THD<sub>i</sub>* pour quelques charges non-linéaires [9].

Le  $THD_i$  ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le  $THD_v$  est fonction des tensions harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit, imposée par le réseau.

#### I.4 Spécifications des harmoniques :

#### I.4.1 Le rang harmonique :

On définit le rang harmonique comme le rapport entre la fréquence de l'harmonique considéré et la fréquence du fondamental, il est donnée par l'équation suivantes :

$$h = \frac{\int harmonique}{\int fondamentale}$$
(I.7)

Par principe, le courant fondamental a le rang 1.

On peut distinguer les harmoniques de rangs pairs : 2, 4, 6...etc, et les harmoniques de rangs impairs : 3,5,7,9,...etc, qui sont les plus courants dans les réseaux électriques industriels.

En effet, les harmoniques de rang pairs s'annulent en raison de la symétrie du signal. Ainsi dans la majorité des cas, on parle des harmoniques de rangs impairs. Où d'une autre manière on peut les classer en trois catégories ou séquence suivant leur effets sur le réseau électrique notamment positif, négatif et zéro suivant ce tableau.I-2 [14].

Ordre d'harmonique	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Séquence d'harmonique	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Tableau.I-2 : Séquences des harmoniques.

#### I.4.2 Classification des harmoniques :

Le système triphasé équilibré non sinusoïdal est la superposition d'une série de systèmes triphasés équilibrés sinusoïdaux [12].

- Systèmes directs : Dus au fondamental et aux harmoniques de rang impair égal à 3k+1, soit 7,13,19,25,...etc. Ces harmoniques tendent à augmenter l'amplitude de la tension et du courant.

- Systèmes inverses : Dus aux harmoniques de rang impair égal à 3k-1, soit 5,11, 17,23,...etc. Ces harmoniques tendent à diminuer l'amplitude de tension et de courant.

- Systèmes homos polaires : Dus aux harmoniques de rang impair égal à 3k (3, 9, 15, 21,..etc).

### **I.5 Normalisations :**

Afin d'atténuer rapidement la pénétration de la pollution harmonique, un double dispositif normatif est en vigueur [13] :

#### I.5.1 Des normes appareillage :

CEI 61000-3-2 ou EN 61000-3-2 pour les appareils basse tension absorbant un courant inférieur à 16 A, CEI 61000-3-4 ou EN 61000-3-4 pour les appareils ou installations basse tension absorbant un courant supérieur à 16 A.

#### I.5.2 Des normes qualité réseaux :

EN 50160 précisant les caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics basse tension, IEEE519 (Recommended Practices for Harmonics Control in Electrical Power Systems) approche conjointe entre le distributeur d'énergie et le client pour limiter l'impact des charges non linéaires. Cette recommandation constitue un engagement mutuel pour limiter les harmoniques. **CEI 61000-3-2 :** Cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des matériels individuels raccordés aux réseaux publics pour les appareils consommant moins de 16 A par phase[10].

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)			
2	1,08			
3	2,30			
4	0,43			
5	1,14			
6	0,30			
7	0,77			
$8 \le h \le 40$	0,23*8/h			
9	0,40			
11	0,33			
13	0,21			
$15 \le h \le 39$	0,15*15/h			

**Tableau.I-3 :** Limites d'émission de courants harmoniques des appareils basse tension de courant inférieur à 16A et de classe A (Norme : CEI 61000-3-2) [10].

**CEI 61000-3-4 :** Cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16A et jusqu'à 75A. Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales entre 230V (monophasée) et 600V (triphasé) [10]

Rang harmonique	Courant harmonique en % du fondamental			
3	21,6			
5	10,7			
7	7,2			
9	3,8			
11	3,1			
13	2,0			
15	0,7			
17	1,2			
19	1,1			
21	$\leq 0,6$			
23	0,9			
25	0,8			
27	≤ 0,6			
29	0,7			
31	0,7			
≥33	$\leq 0,6$			
pair	$\leq$ 0,6 ou $\leq$ 8/h			

Tableau.I-4 : Limitation des émissions de courants harmoniques(Norme:CEI 61000-3-4)[10].

D'autre part, pour assurer la compatibilité entre les installations sensibles alimentées par le réseau, il faut imposer des limites d'émission et donner des niveaux d'immunité suffisants.

	- Pour chaque période d'une semaine		
Amplitude de la tension	95% des valeurs efficaces moyennes sur 10		
	minutes doivent être dans la plage $V_n \pm 10\%$ .		
Variations rapides de la tension	- De 5% à10% de $V_n$ en basse tension ( 4 à 6% de		
variations rapides de la cension	$V_n$ en moyenne tension).		
Creux de tension	- Profondeur : entre 10% à 99% de $V_n$ .		
	- Durée : entre 10 ms et 1 minute.		
	- Nombre : quelques dizaines à 1 millier par an.		
Coupures brèves	- Durée : jusqu'à 3 minutes.		
	- Nombre : quelques dizaines à plusieurs		
	centaines par an.		
Coupures longues	- Durée : supérieure à 3 minutes.		
	- Nombre : entre 10 et 50 par an.		
Fréquence	- 50 Hz $\pm$ 1% pendant 95% d'une semaine		
	- 50Hz + 4%, 6% pendant 100% d'une		
	semaine.		

Tableau.I-5 : Limites de perturbations définies par EN 50160 [10].

Les caractéristiques principales de la tension fournie par un réseau de distribution (MT ou BT), définies par la norme Européenne EN 50160, précisent les tolérances qui doivent être garanties pour la tension et la fréquence ainsi que les niveaux des perturbations habituellement rencontrées [15].

### **I.6 Conclusion:**

Dans ce chapitre nous avons présenté les perturbations électriques leurs origines ,ses effets a terme et a long terme sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Nous avons donné quelques caractérisation et spécifications de ces dernières. Enfin nous avons présenté un aperçu sur les normes internationales existantes.

# **Chapitre II :** Solutions de dépollution des réseaux électriques

### Résumé

Dans ce chapitre nous présentons les différentes solutions, traditionnelles et modernes pour la réduction des harmoniques, nous exposons la structure générale d'un APF comme une solution de dépollution des réseaux électriques.

- *II. Introduction*
- II.1 Solutions de dépollution des réseaux électriques
- II.2 Filtrage actif de puissance
- II.3 Conclusion

### **II. Introduction :**

Les systèmes d'électronique de puissance utilisée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie sont essentiellement des systèmes de compensation. Ils travaillent en combinaison avec le réseau, en superposant leur énergie à celle de ce dernier. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques. Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en 2 types (courant et tension), 2 groupes de solutions de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiées [16,17].

# II.1 Solutions de dépollution des réseaux électriques :

On peut regrouper les solutions visant a réduire les perturbations harmoniques en deux groupes : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

### II.1.1 Solutions de dépollution traditionnelles :

Suivant les types de perturbation (tension ou courant), il existe deux approches solutions de dépollution traditionnelles.

### **II.1.1.1 Dépollution des courants perturbateurs :**

Afin de dépolluer les réseaux électriques affectés par ce type de perturbation, plusieurs solutions ont été introduites dans la littérature [18].

### > Rééquilibrage des courants du réseau électrique :

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases. Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur (montage de Steinmetz).

Ce montage permet de présenter à 50 Hz une impédance équilibrée. Cependant, ce montage provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de 50 Hz, avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques. La figure.II-1 illustre le montage de Steinmetz pour le rééquilibrage [19].





#### Compensation de la puissance réactive :

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance.

Le but des méthodes de compensation est d'améliorer le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau est l'une des techniques utilisées pour augmenter le facteur de puissance. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin [18].

#### > Compensation des courants harmoniques :

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.

- L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtre passif consiste à implanter en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de très faible valeur autour de la fréquence à filtrer [20,10].



Figure.II-2 : Filtre passif résonnant [10].

#### **II.1.1.2** Dépollution des tensions perturbatrices :

Dans un réseau électrique les tensions perturbatrices basse tension sont principalement les creux de tension, les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrés, ces deux derniers sont généralement causés par les circulations des courants harmoniques et/ou déséquilibrés.

Pour dépolluer le réseau électrique des perturbations dues aux tensions (harmoniques et/ou déséquilibrées), on peut limiter la circulation du courant perturbateur en utilisant les solutions traditionnelles présentées dans le cas des perturbations de courant.

Quant aux creux de tension, la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels...etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique. Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème [21].

#### II.1.2 Solutions de dépollution moderne :

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus a l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite a l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière a compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Nous citerons deux topologies possibles de filtres actifs [22] :

- Le filtre actifs (parallèle ou série ou bien encore associant des deux).
- Combinaison hybride active et passive.

# II.2 Filtrage actif de puissance :

### II.2.1 Filtre actif parallèle (APF) :

Le filtre actif parallèle conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant coté réseau est alors sinusoïdal. Le schéma de la figure.II-3, illustre le principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle [18].



Figure.II-3 : Principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle [11].

La structure générale des filtres actifs est présentée dans la figure.II-3. Les filtre actifs sont constitués de deux parties distinctes : une partie puissance et une partie commande (figure.II-4).



Figure.II-4 : Schéma bloc d'un filtre actif parallèle.

# II.2.1.1 Partie puissance [23] :

La partie puissance constituée d':

- Un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, command ables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, etc....) avec des diodes en antiparallèle.
- Un circuit de stockage d'énergie.
- Un filtre de sortie.

### II.2.1.1.1 Onduleur de tension triphasé :

La figure.II-5 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur  $C_{dc}$  de tension  $V_{dc}$ .

Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre  $(R_f, L_f)$  employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.



Figure.II-5 : Onduleur de tension triphasé [27].

Cette structure du filtre actif parallèle ne permet pas la fermeture simultanée des semiconducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage .Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras. En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire: la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations .Afin d'éviter un court circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre.

Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en comptée par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est craindre [25].

#### Tension fournie par l'onduleur

En théorie nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire, la conduction de l'un implique alors que l'autre soit bloqué. Avec cette hypothèse l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la dépendent de l'état de trois signaux de commande  $(S_1, S_2 \text{ et } S_3)$  comme défini ci-dessous [26] :

 $S_1 = \begin{cases} 1 \ T_1 \text{fermé} \ et \ T_4 \text{ouvert} \\ 0 \ T_1 \text{ouvert} \ et \ T_4 \ \text{fermé} \end{cases}$ 

 $S_2 = \begin{cases} 1 \ T_2 \text{ fermé } et \ T_5 \text{ ouvert} \\ 0 \ T_2 \text{ ouvert} et \ T_5 \text{ fermé} \end{cases}$ 

 $S_3 = \begin{cases} 1 \ T_3 \text{fermé} \ et \ T_6 \text{ouvert} \\ 0 \ T_3 \text{ouvert} \ et \ T_6 \text{fermé} \end{cases}$ 

Ainsi, à partir des états des interrupteurs présentés par les variables  $S_1, S_2, S_3$  on obtient huit cas possibles pour les trois tensions de sortie du filtre actif  $V_{s1}, V_{s2}$  et  $V_{s3}$  (référées au neutre *n* de la source), comme le montre le tableau suivant :

N• du cas	$S_3$	$S_2$	$S_1$	V <sub>s3</sub>	V <sub>s2</sub>	V <sub>s1</sub>
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$-V_{dc}/3$	- V <sub>dc</sub> /3	$2 V_{dc}/3$
2	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2 V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	0	1	1	$-2 V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
4	1	0	0	$2 V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2 V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
6	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

Tableau.II-1 : Tensions générées par l'onduleur [27].

#### II.2.2.1.2 Stockage de l'énergie :

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par le condensateur qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$ , comme le montre la Figure.II-5. Le choix des paramètres du système de stockage ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ).Dans les applications de compensation d'harmoniques. En effet, une tension  $V_{dc}$ , élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$ , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C, peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle.

Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système du stockage [28].

### II.2.2.1.3 Filtre de sortie :

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants [27] :

- Assurer la dynamique du courant .
- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique .

### II.2.1.2 La partie commande :

La partie commande du filtre actif est constituée de quatre modules distincts réalisant les fonctions suivantes [27] :

- Identification des courants harmoniques .
- Régulation de la tension du bus continu .
- La régulation du courant injecté .
- Stratégie de commande de l'onduleur.

### II.2.2 Filtre actif série (FAS) :

Ce type de compensateur connecté en série sur le réseau de distribution se comporte comme une source de tension harmonique qui s'oppose à une éventuelle tension harmonique venant de la source. Il s'oppose également, à celle provoquée par la circulation du courant harmonique de la charge polluante à travers l'impédance du réseau rendant sinusoïdale la tension aux bornes de la charge polluante. Son rôle d'isolateur empêche les courants harmoniques de remonter vers le réseau. Dans ce cas, le filtre protégé les installations sensibles des perturbations provenant du réseau tel que les harmoniques, les surtensions et les déséquilibres. Si la charge génère des courants harmoniques, le filtre série ne permet pas de corriger ces courants et en cas de court-circuit de la charge, le compensateur doit supporter toute la tension du réseau et tout le courant de court-circuit. D'où, un moyen de protection s'avère dispensable qui lui compense soit les courants harmoniques consommés par la charge ou par la distorsion de tension déjà présente sur le réseau [29,30]. La figure.II-6 illustre un filtre actif série.



Figure.II-6 : Filtre actif série [10].

### II.2.3 Filtre combiné parallèle-série (UPQC) :

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtre actifs parallèle et série (Figure.II-7) .Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallélise-série actifs (Unified Power Quality Conditioner : UPQC). L'UPQC possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et séries.

Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle, il permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices et lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée [31].



Figure.II-7 : La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) [10].

### **II.2.4** Combinaison hybride active et passive :

C'est l'association de filtres actifs séries de faibles puissances à des filtres passifs. Cette solution semble être prometteuse car elle réduit le dimensionnement du filtre actif de puissance, par conséquent, leurs prix. De plus, leurs potentialités d'application ne cessent de s'accroître et la fréquence de commutation est, considérablement, réduite. Plusieurs configurations ont été présentées dans littérature, les plus étudiées étant [32]:

- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

# **II.3 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté plusieurs solutions traditionnelles et modernes pour réduire les harmoniques et améliorer la qualité de l'énergie. Nous avons choisi le filtre actif parallèle (APF) comme une solution de dépollution des réseaux électrique des courants harmonique, déséquilibrés et réactifs. On a évoqué essentiellement la structure générale d'un APF triphasé permettant de compenser les harmoniques de courant d'un réseau électrique triphasé.
### **Chapitre III**

# *Optimisation de l'APF par la méthode de l'essaim particulaire*

#### Résumé

Dans ce chapitre nous présentons les différentes méthodes d'identification des courants perturbés, ainsi que la commande du filtre actif parallèle et nous donnons un détail de la stratégie intelligente de l'essaim particulaire employée dans la commande de l'APF.

- III. Introduction
- III.1 Stratégie de control-commande de L'APF
- III.2 Régulation et principe de commande
- III.3 Essaim particulaire dans la commande de l'APF
- III.4 Conclusion

#### **III. Introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons détailler par l'analyse la méthode de commande et de l'optimisation de l'APF a étudier. Notre étude est basée sur la compensation des courants harmoniques propagés dans un réseau triphasé par une charge non linéaire. Dans ce contexte la méthode de compensation employée est basée essentiellement sur l'identification des courants perturbateurs. Dans ce qui suit, nous allons présentés la méthode intelligente de l'essaim particulaire (en anglais : Particle Swarm Optimisation: PSO) pour l'optimisation de l'APF proposé.

La méthode d'optimisation concerne particulièrement la partie commande control du filtre actif est précisément la régulation de la tension continue aux bornes de l'élément de stockage d'énergie .Une optimisation des paramètres d'un régulateur PI est conduite a l'aide de l'algorithme de l'essaim particulaire.

#### III.1 Stratégie de control-commande de l'APF :

Les différentes méthodes d'identification des courants perturbateurs peuvent être regroupées en deux familles d'approche :

- La première famille est basée sur l'analyse de Fourier dans de domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant.
- La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Elles sont largement utilisées pour le calcul de courant de référencée la charge non linéaire. Cette méthode utilisée pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.
- Récemment quelques méthodes nouvellement développées en littérature dans le domaine temporelle intervenant l'intelligence artificielle dans la partie d'identification ont donnés un plus en terme de restitution du courant de source [33-39]

Dans le domaine temporel, la commande du APF dépend de la méthode de détection des courants perturbateurs, on peut distinguer trois méthodes d'identification :

- Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante.
- Identification à partir de la détection du courant de la source.
- Identification à partir de la détection de la tension de la source.

Les méthodes de détection des courants de la source d'alimentation et de la charge sont plus utilisées que la méthode de détection de tension.

#### III.1.1 Méthodes d'identification des courants perturbés :

Notre étude est basée sur les deux méthodes suivantes :

- Méthode de détection du courant de la source.
- Méthode de détection de l'amplitude du courant de source.

#### III.1.1.1 Méthode de détection du courant de la source :

Dans cette méthode le courant de la source est détecté et comparé à une référence sinusoïdale synchronisée à la tension de la source dans le but de forcer l'APF à produire un signal de signe opposé aux composants harmoniques total du courant de la source pour n'avoir que le fondamental du courant de source [27].

La difficulté principale dans cette méthode est l'obtention du signal de référence du courant de la source. Plusieurs auteurs proposent le filtre passif pour extraire la composante fondamentale réelle du courant de source (Figure.III-1).



Figure.III-1 : Schéma fonctionnel de la détection du courant de source [27].

#### III.1.1.2 Méthode de détection de l'amplitude du courant de source :

La tension  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur de stockage  $C_{dc}$  est détectée et comparée à une tension de référence constante  $V_{réf}$  (Figure.III-2).

Le résultat de la comparaison est appliqué au contrôleur pour générer l'amplitude maximale  $I_{smax}$  du courant de source.

Le signal de sortie du contrôleur est multiplié par un signal sinusoïdal de référence  $V_s$  en phase avec la tension de la source et d'amplitude égale à l'unité pour obtenir le courant référence  $I_{sréf}$ .

L'erreur de comparaison entre le courant de source  $i_s$  et le courant de référence  $I_{sréf}$  est appliquée à l'entrée d'un régulateur (PI, ou flou,....etc.) [27].



**Figure.III-2 :** Schéma fonctionnel de la commande de l'APF par l'amplitude du courant de source [27].

Il est à noter que cette technique a été adoptée dans la suite de notre travail et sera détaillée dans ce qui suit.

#### III.2 Régulation et principe de commande :

La stratégie de commande de l'APF consiste à :

- Trouver un schéma de régulation convenable pour maintenir la tension aux bornes du condensateur constant.

- Détermination de la valeur du courant maximale.

## III.2.1 Principe de régulation de la tension continue avec le régulateur PI optimisé par le PSO :

La source d'énergie associée à l'onduleur est un condensateur. Pour que l'injection d'un courant de filtre actif dans chacune des phases soit possible, la tension aux bornes de ce condensateur doit être constante et fixée à une valeur prédéterminée afin d'assurer le rôle d'une source de tension continue.

Les pertes de puissance active dans le filtre actif (les pertes par commutation des interrupteurs et les pertes par effet de Joule dans les composants du filtre de sortie sont les principales causes susceptibles de modifier la tension aux bornes du condensateur.





Nous basons dans notre étude sur la partie commande régulation de l'APF et plus précisément sur la partie régulation, ou nous allons introduire une nouvelle méthode de régulation basée sur l'optimisation des paramètres de l'APF par la méthode intelligente de l'essaim particulaire (en anglais : Particule Swarm Optimisation : PSO), la figure.III-3 présente le principe de régulation de la tension aux bornes du condensateur à l'aide d'un contrôleur PI optimisé par le PSO.

La valeur de la tension mesurée  $V_{dc}$  est soustraite à la tension de référence  $V_{dcréf}$ , de telle manière que l'erreur de tension puisse être annulée par l'action du correcteur PI optimisé. La sortie du correcteur est une image de l'amplitude de courant fondamental actif nécessaire pour corriger la tension aux bornes du condensateur. Si cette tension est inférieure à la référence, cela signifie que la puissance réelle n'est pas suffisante. C'est pourquoi, le courant et la puissance réelle du réseau sont augmentés. De même, si la tension aux bornes du condensateur est supérieure à la référence, l'amplitude du courant du réseau doit être réduite pour limiter la puissance réelle fournie.

Alors, la tension  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur est détectée et comparée à une tension de référence  $V_{dcréf}$ , le résultat de cette comparaison (l'erreur) est appliqué à un régulateur de type (PI optimisée par le PSO) pour obtenir l'amplitude du courant de référence de source  $I_{s max}$ .

Cette amplitude est multipliée par des signaux sinusoïdaux d'amplitude égale à l'unité  $sin\omega t$ ,  $sin(\omega t-120^\circ)$  et  $sin(\omega t-240^\circ)$  et en phase avec la tension de source, afin de trouver le courant de référence instantané  $I_{sréf}$ , ce courant est comparé avec le courant de source réel  $i_s$ , l'erreur est envoyée à un régulateur par hystérésis qui génère les signaux (six impulsions) aux gâchettes des interrupteurs de l'onduleur, pour délivrer le courant de compensation  $i_f$  (Figure.III-4) [27].



Figure.III-4 : Schéma bloc de l'APF Parallèle [27].

Le principe de compensation de cette méthode est donné comme suit :

Le courant de compensation est donné par :

$$i_f(t) = i_s(t) - i_{sref}(t) \tag{III.1}$$

$$i_f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{sn} \sin(n\omega t + \phi_{sn}) - I_{s\max} \sin(\omega t)$$
(III.2)

$$\mathbf{i}_{f}(t) = \mathbf{I}_{s1}\sin(\omega t + \boldsymbol{\phi}_{s1}) + \sum_{n=2}^{\infty} \mathbf{I}_{sn}\sin(n\omega t + \boldsymbol{\phi}_{sn}) - \mathbf{I}_{s\max}\sin(\omega t)$$
(III.3)

Puisque  $I_{s1} = I_{smax}$ 

$$\Rightarrow i_f(t) = I_{s \max} \left\{ \sin\left(\omega t + \phi_{s1}\right) - \sin\left(\omega t\right) \right\} + \sum_{n=2}^{\infty} I_{sn} \sin\left(n\omega t + \phi_{sn}\right)$$
(III.4)

$$i_f(t) = I_{s \max} \cos\left(\frac{\omega t + \phi_{s1} + \omega t}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega t + \phi_{s1} - \omega t}{2}\right) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{sn} \sin\left(n\omega t + \phi_{sn}\right)$$
(III.5)

$$i_f(t) = I_{s \max} \cos\left(\frac{2\omega t + \phi_{s1}}{2}\right) \sin\left(\frac{\phi_{s1}}{2}\right) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{sn} \sin\left(n\omega t + \phi_{sn}\right)$$
(III.6)

$$i_f(t) = A\cos\left(\frac{2\omega t + \phi_{s1}}{2}\right) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{sn}\sin\left(n\omega t + \phi_{sn}\right)$$
(III.7)

Avec:

$$A = \left[ I_{s \max} \sin \left( \frac{\phi_{s1}}{2} \right) \right]$$
(III.8)

Il est clair que le courant de compensation est constitué de composantes réactive et harmonique :

$$\boldsymbol{i}_{f}(t) = \boldsymbol{I}_{fr} + \boldsymbol{I}_{fh} \tag{III.9}$$

Avec :

$$I_{fr} = A\cos\left(\frac{2\omega t + \phi_{s1}}{2}\right) \text{ est la composante réactive.}$$

 $I_{fh} = \sum_{n=2}^{\infty} I_{sn} \sin(n\omega t + \phi_{sn})$  est la composante harmonique.

#### **III.2.2 Régulation PI :**

Le régulateur PI largement utilisé dans l'industrie du fait de sa simplicité d'implémentation et de la possibilité d'obtenir une bonne réponse dynamique où ses qualités correctives s'appliquent à de multiples grandeurs physiques, lorsque ses paramètres sont bien réglés, Ce régulateur est la combinaison des régulateurs proportionnels et intégraux [40].

#### L'action proportionnelle P :

Elle est à la base de la constitution de la boucle, où elle se trouve quasiment toujours présente. Elle se traduit par une variation du signal de commande u(t) du régulateur proportionnellement à l'écart mesure-consigne constatée, variation qui accompagne immédiatement de l'apparition d'un écart. En présence d'une variation brutale de la consigne ou d'une grandeur perturbatrice, elle va dans une boucle bien conçue, ramener le système à un nouvel état d'équilibre [40].

#### L'action intégrale I :

Elle permet d'obtenir un signal régulateur supérieur au signal initial, et ce à écart nul. Elle le fait évoluer tant que cette nullité n'est pas atteinte, il y a en quelque sorte effet d'accumulation [40].

L'équation du régulateur PI est donnée par :

$$u(t) = k_p e(t) + k_p \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$
(III.10)

Le signal de commande u(t), peut être approximé dans le domaine discret par :

$$u(k+1) = k_p e(k+1) + k_i T_i e(k+1) + u(k)$$
(III.11)

La fonction de transfert du régulateur PI peut être exprimée par :

$$k_p + \frac{k_i}{p} = \frac{k_i}{p} (1 + \tau p) \tag{III.12}$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système de la figure.III-5 est donnée par

$$v_{dc}(p) = \frac{1+\tau p}{1+\tau p + \frac{c_{dc}}{k_i} p^2}$$
(III.13)



Figure.III-5 : Schéma de régulation de la tension aux bornes du condensateur par le régulateur PI.

En comparant l'équation caractéristique de la fonction de transfert de l'équation (III.13) avec la forme standard du second ordre (III.14).

$$S(p) = \frac{1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0}p + \frac{1}{\omega_0^2}p^2}$$
(III.14)

On en déduit :

$$\frac{k_i}{c_{dc}} = \omega_0^2 \tag{III.15}$$

$$\tau = \frac{k_p}{k_i} = \frac{2\xi}{\omega_0} \tag{III.16}$$

Pour un amortissement critique ( $\xi = 1$ ), on obtient:

$$k_i = c_{dc} \omega_0^2 \Longrightarrow k_i = c_{dc} \frac{4}{\tau^2}$$
(III.17)

Le régulateur PI décrit souvent l'état permanent, parce qu'il est utilisé pour réduire l'erreur à l'état permanent dans la réponse du système grâce à l'action intégrale  $(k_i,T_i)$ .

Alors il faut déterminer soigneusement les constants  $(k_p, k_i)$ , pour arriver à un système dynamique performant.

Il y a toujours un compromis entre un niveau acceptable d'erreur à l'état permanent et une stabilité selon le choix des paramètres du régulateur PI. Pour ces raisons, un régulateur PI optimisé par le PSO est étudier et réalisé pour une qualité meilleur de la réponse dynamique (meilleur régulation de la tension aux bornes du condensateur de stockage d'énergie, et un courant maximal de source le plus proche de la réalité).

#### III.2.3 Le régulateur à hystérésis :

La technique de contrôle du courant de bande d'hystérésis a fait ses preuves pour être le plus approprié pour toutes les applications des onduleurs à source de tension contrôlée en courant dans les filtres de puissance actifs.

Le principe de la commande consiste à forcer la tension ou le courant de sortie à suivre une sinusoïdale de référence dans une bande fixée par l'élément à hystérésis. Le caractérisé par une stabilité inconditionnée, une réponse très rapide et une bonne précision. Les limites de la bande de commutation peuvent être de type fixe ou sinusoïdal, ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence [41,42].

Bande fixe:

$$i_{max} = I_m \sin(\omega t) + \Delta i \tag{III.18}$$

$$i_{min} = I_m \sin(\omega t) - \Delta i \tag{III.19}$$

Bande sinusoïdale :

$$i_{max} = (I_m + \Delta i)\sin(\omega t) \tag{III.20}$$

$$i_{max} = (I_m - \Delta i)\sin(\omega t) \tag{III.21}$$



Figure.III-6 : Commande par hystérésis à bande fixe.

Le courant de sortie à commander est appliqué à un élément à hystérésis et comparé au signal de référence à chaque instant pour générer le signal de commutation comme suit :

Si  $|i_s| > |i_{max}|$  L'interrupteur haut du bras est fermé et celui du bas ouvert.

 $|i_s| > |i_{min}|$  L'interrupteur haut du bras est ouvert et celui du bas fermé.

 $|i_{min}| < |i_s| < |i_{max}|$  Pas de changement.

Le principal inconvénient de la commande par hystérésis est l'incertitude de détermination de la fréquence de commutation.

#### **III.3** Essaim particulaire dans la commande de l'APF :

Après avoir vu dans la section précédente les méthodes conventionnelles pour l'identification et l'extraction des courants perturbés ainsi que les méthodes de régulation et commande conventionnelles. Nous allons présenter ici, une nouvelle méthode pour la régulation de la tension aux bornes de l'élément de stockage d'énergie de l'APF basé sur la méthode de l'essaim particulaire, et par conséquent nous avons insisté sur l'importance de l'étape de régulation sur le rendement et l'efficacité du filtre actif parallèle.

#### **III.3.1** Principe de fonctionnement du PSO :

L'optimisation par l'essaim particulaire (en anglais : Particle Swarm Optimisation: PSO), est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995. Il s'inspire à l'origine du monde du vivant, plus précisément du comportement social des animaux évoluant en essaim, tels que les bancs de poissons et les vols groupés d'oiseaux.

L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position (la vectrice solution) et une vitesse. Chaque particule dispose d'une mémoire concernant sa meilleure solution visitée ainsi que la capacité de communiquer avec les particules constituant son entourage. A partir de ces informations, la particule va suivre une tendance faite, d'une part, de volonté à retourner vers sa solution optimale, et d'autre part, de son mimétisme par rapport aux solutions trouvées dans son voisinage. A partir des optimums locaux et empiriques, l'ensemble des particules va normalement converger vers la solution optimale globale du problème traité, Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes [43,44] :

- *Une composante d'inertie* : La particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.

- *Une composante cognitive* : La particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.

- Une composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères

et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée dans la figure.III-7.



Figure. III-7 : Déplacement d'une particule [45].

Le vecteur vitesse est calculée à partir de l'équation (III.22) suivante [46] :

$$v_{ij} = wv_{ij} (k-1) + c_1 r_1 \left( p_{ij} (k-1) - x_{ij} (k-1) \right) + \cdots + c_2 r_2 \left( g_j (k-1) - x_{ij} (k-1) \right)$$
(III.22)

La position à l'itération k de la particule i est alors définie par l'équation(III.23) :

$$x_{ij}(k) = x_{ij}(k-1) + v_{ij}(k)$$
(III.23)  

$$i=1, 2, 3 \dots N_P \qquad j=1, 2, 3 \dots N_P \qquad k=1, 2, 3 \dots k_{max}$$

Avec :

 $N_p$ : Est le nombre de particules de l'essaim.

 $N_d$ : Est le nombre de variables du problème (c.-à-d. dimension d'une particule).

 $k_{max}$ : Est le nombre maximal d'itération.

 $v_{ii}$ : Est la vitesse de la  $j^{i\acute{e}me}$  composante de la  $i^{i\acute{e}me}$  particule de l'essaim, à la itération.

 $p_{ij}$ : Est la  $j^{i\acute{e}me}$  composante de la meilleure position occupée par la  $i^{i\acute{e}me}$  particule de l'essaim enregistrée dans les itérations précédentes (local best).

 $g_j$ : Est la  $j^{i\acute{e}me}$  composante de la meilleure position occupée par la  $i^{i\acute{e}me}$  particule globale de l'essaim (global best).

 $x_{ij}(k)$ : Est la  $j^{i\acute{e}me}$  coordonnée de la position actuelle de la particule*i*, à la  $k^{i\acute{e}me}$  itération.

 $\omega$ : Est en général une constante appelée coefficient d'inertie.

 $c_1$  et  $c_2$ : Sont deux constantes appelées coefficients d'accélération.

 $r_1$  et  $r_2$ : Sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans [0,1] à chaque itération et pour chaque dimension.

 $w.v_{ij}$  (k-1): Correspond à la composante physique du déplacement. Le paramètre  $\omega$  contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur. Il est à noter que, dans certaines applications, le paramètre  $\omega$  peut être variable.

 $c_1 . r_1 (p_{ij \ best} - x_{ij} (k-1))$ : Correspond à la composante cognitive du déplacement où  $c_1$  contrôle le comportement cognitif de la particule.

 $c_2 \cdot r_2 (g_{ij \ best} - x_{ij} \ (k-1))$ : Correspond à la composante cognitive du déplacement où  $c_2$  contrôle le comportement cognitif de la particule.

Les gammes appropriées de valeur pour  $c_1$  et  $c_2$ , sont de 1 à 2, mais 2 est le plus approprié dans beaucoup de cas [47].

Le coefficient d'inertie peut être variable selon [48] :

$$w = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}}\right) * k$$
(III.24)

Où  $k_{max}$ , k sont respectivement le nombre maximum des itérations et le nombre d'itération courante.  $w_{min}$  et  $w_{max}$  sont respectivement les coefficients minimum et maximum d'inertie.

Le coefficient d'inertie w joue un rôle important dans la procédure de recherche. Elle garantit un équilibre entre la recherche locale et la recherche globale, un bon choix de cette fonction augmente l'efficacité de la méthode pour avoir une solution globale. L'expérience a montré que la diminution linéaire de la valeur de w 0.9 à 0.4 au cours de la procédure de recherche donne des meilleurs résultats [47].

#### III.3.2 Mécanisme de confinement :

Il arrive parfois que compte tenu de la position courante et de la vitesse courante d'une particule, cette dernière ayant tendance à sortir de l'espace de recherche au fur et à mesure de son déplacement. Lorsque c'est le cas, l'algorithme intègre un mécanisme de confinement appelé confinement. Intervalle, afin de gérer le déplacement de la particule et ce, pour qu'elle atteigne un nouveau point qui appartient également à l'espace de recherche. En général, ce mécanisme consiste à ramener la particule au point acceptable le plus proche [49,50].

$$\begin{cases} si x_{ij} > x_{jmax} & alors & x_{ij} = x_{jmax} \\ si x_{ij} < x_{jmin} & alors & x_{ij} = x_{jmin} \\ & v_{ij} = 0 \end{cases}$$
(III.25)

Ou :  $x_{jmax}$  et  $x_{jmin}$  sont les valeurs limites du paramètre  $x_{ij}$ .

#### III.3.3 Déroulement de l'algorithme :

Pour explique le principe de l'algorithme PSO appliqué pour résoudre un problème de minimisation ou de maximisation, considérons le problème d'optimisation :

$$\begin{cases} \min f(x) \\ x \in D \end{cases}$$
(III.26)

L'algorithme PSO se déroule suivant les étapes suivantes [51] :

**Etape 1 :** Initialiser une population de particules et de vitesses, uniformément reparties dans l'espace de recherche *D*, et fixer le critère d'arrêt.

**Etape 2 :** Evaluer la fonction objective, pour chaque particule.

**Etape 3 :** Mettre à jour la meilleure position  $P_{best}$  pour chaque particule et meilleure position globale  $g_{best}$  dans la population.

Etape 4 : Mettre à jour la position et la vitesse utilisant les équations (III.22) et (III.23).

**Etape 5 :** Si une particule, déplacée par l'algorithme vers la limite ou à l'extérieur de l'espace de recherche, le mécanisme de confinement des particules exprimé par l'équation (III.25) intervient et ramène la particule à l'intérieur de l'espace de recherche.

**Etape 6 :** Vérifier le critère d'arrêt. Si le critère d'arrêt n'est pas satisfait, aller vers l'étape 2 sinon, le programme se termine, et la solution optimale est produite.

La figure.III-8 montre l'organigramme qui résume ces étapes :



Figure.III-8 : Organigramme général de la méthode PSO [51].

#### III.3.4 Le régulateur PI optimisé par le PSO :

Dans la section III.2.2, nous avons présenté une méthode de réglage de la tension aux bornes du condensateur de l'APF avec un contrôleur PI conventionnel. Nous décrivons maintenant une application d'un procédé d'optimisation par l'algorithme PSO dans un problème standard de réglage : l'ajustement dynamique des coefficients d'un contrôleur de type PI.

#### III.3.4.1 Indices de performance d'un régulateur PI :

Afin de définir la qualité de la régulation, on se base en général sur l'analyse de la réponse indicielle de l'ensemble régulateur PI plus système.

Pour avoir une bonne précision dynamique d'un système à une entrée échelon, il faut que le régime transitoire soit caractérisé par un faible dépassement et un temps de réponse optimal. Dans notre cas dénude ,notre problème consiste a minimiser une fonction objective qui est a son tour en fonction de l'erreur entre une consigne qui est la tension de référence du condensateur de stockage d'énergie  $V_{dcréf}$  et une tension réelle aux bornes du condensateur (Figure.III-5) .L'erreur est donc donnée par :

$$e(t) = V_{dcréf} - V_{dc}$$
(III.27)

Différents indices de performance peuvent être évalués à partir de la réponse temporelle du système a savoir :

#### L'intégrale de la valeur absolue de l'erreur (IAE):

L'intégrale de la valeur absolue de l'erreur est donnée par :

$$IAE = \int_0^\infty |\boldsymbol{e}(t)| \, d(t) \tag{III.28}$$

Ce critère exprime la surface générée par la différence entre la valeur de consigne et la valeur réelle, et son rôle c'est de supprimer les petites erreurs.

#### L'intégrale du carré de l'erreur (ISE):

L'intégrale du carré de l'erreur est donnée par :

$$ISE = \int_{0}^{\infty} |e(t)|^{2} d(t)$$
(III.29)

L'intérêt de cet indice de performance est de corriger les systèmes dont le régime transitoire qui dure trop longtemps, et tient beaucoup moins compte des dépassements inferieure à 1.

#### > L'intégrale de la valeur absolue de l'erreur pondérée par le temps (ITAE):

L'intégrale de la valeur absolue de l'erreur pondérée par le temps est donnée par :

$$ITAE = \int_0^\infty t|e(t)| .d(t)$$
(III.30)

L'introduction du paramètre temps, va corriger les systèmes à réponse très oscillatoire.

#### > Dépassement :

Le dépassement se produit si la sortie du système sort à certains instants de l'intervalle [valeur initiale, valeur finale].

#### > Temps de réponse :

Il se traduit pratiquement la durée transitoire. Plus précisément, il s'exprime par le temps de réponse ou temps d'établissement, qui est le temps mis par la mesure pour atteindre sa valeur définitive à  $\pm$  5 % de sa variation tout en se maintenant dans cette zone des  $\pm$  5 % [52].

#### > Temps de montée :

C'est une mesure de la vitesse de réponse .On le définie généralement comme étant le temps que met la réponse indicielle pour passer de 10% a 90% de sa valeur finale.

#### III.3.4.2 Approche d'optimisation des paramètres du régulateur PI par le PSO :

La figure.III-9 illustre l'approche d'optimisation des paramètres du régulateur PI par le PSO. Le rôle de cette approche réside dans l'amélioration des performances de la boucle de régulation de la tension aux bornes du condensateur.



Figure.III-9: Approche d'optimisation du PI par l'algorithme PSO.

L'approche d'optimisation par le PSO consiste à trouver les paramètres optimaux du régulateur PI ( $k_i$  et  $k_p$ ), par une minimisation d'une fonction objective (définit dans ce qui suit).

Pour réaliser de tel système d'optimisation, deux majeurs problèmes doivent être résolus :

- Définition d'un codage des paramètres du PI ;
- Définition d'une fonction objectif.

#### III.3.4.2.1 Codage des paramètres du régulateur PI :

Le codage concerne la manière par laquelle les deux paramètres  $(k_P,k_i)$  du régulateur PI sont représentés sous forme d'une particule capable d'évoluer durant le processus d'optimisation.

#### III.3.4.2.2 Définition de la fonction objective :

C'est cette fonction que l'algorithme d'optimisation va devoir optimiser (trouver un optimum) pour améliorer les performances de la boucle de régulation telles que la précision dynamique, le dépassement, l'erreur statique, ... etc. Nous avons donné quelques critères (IAE, ISE, ITAE) les plus utilisés en automatique pour caractériser les performances d'une régulation et pour sélectionner les critères les plus pertinents pour nos applications.

Notre choix s'est porté sur trois critères à savoir IAE, ISE et ITAE. La minimisation des deux premiers critères (IAE, ISE) améliore la précision dynamique alors que la minimisation du troisième critère (ITAE) donne lieu à une régulation très précise en régime permanent. Comme nous utilisons un algorithme d'optimisation mono objectif, la fonction objective *f val* est obtenue par combinaison linéaire des trois critères IAE, ISE et ITAE :

$$\text{fval}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n e(t)}{n}$$
(III.31)

$$fval_2 = a.IAE + b.ISE$$
(III.32)

$$fval_3 = a. IAE + b. ISE + c. ITAE$$
(III.33)

Avec : a, b, c sont des coefficients de pondération.

Le choix de la fonction objective repose sur la fonction objective qui présente un minimum globale (cela veux dire un minimum de ces paramètres tel que IAE, ISE et ITAE, le premier dépassement, et le temps de réponse ...etc.

#### **III.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la stratégie de commande du filtre actif de puissance. Nous avons choisi la méthode de détection du courant de la source comme méthode d'identisation et de compensation des courants perturbateurs. Cette technique qui consiste à détecter et commander le courant de réseau, nécessite une régulation de la tension continue aux bornes du condensateur de l'onduleur en tenant compte du bilan énergétique. Cette régulation est effectuée par un contrôleur PI optimisé par l'algorithme du PSO.

Nous avons présenté la méthode d'optimisation par essaim particulaire (PSO) pour la synthèse d'un régulateur PI optimal. Durant le processus d'optimisation, les solutions possibles sont évaluées par l'intermédiaire des fonctions objectives qui font intervenir des critères de performance calculés sur la réponse du système global étudiée dans le chapitre qui suit.

### Chapitre V:

### Résultats de simulation de l'APF optimisé par le PSO

#### Résumé

Dans ce chapitre nous présentons les différents résultats de simulation de l'APF optimisé par le PSO et nous donnons une comparaison entre l'APF optimisé par le PSO et d'autres méthodes intelligentes proposées dans la littérature.

- V.1 Introduction
- V.2 Modèle de simulation de l'APF

V.3 Simulation d'un APF optimisé par la méthode intelligente du PSO connecté au réseau électrique perturbé par une charge non linéaire

V.4 Conclusion

#### V.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons mettre en évidence l'APF proposé basé sur la technique intelligente du PSO pour l'optimisation de ses paramètres.

Dans un premier temps nous commençons notre étude par une série de simulations pour le choix de la meilleure fonction objective, cette dernière qui présente une étape primordiale dans le processus d'optimisation.

Pour cette raison nous allons tester trois fonctions objectives pour plusieurs simulations en fonction des deux paramètres du PSO : la taille de population (de l'essaim) et le nombre d'itérations.

Le choix de la fonction objective repose sur quelques critères ou spécifications temporelles de la réponse du system à savoir : le temps de réponse et de monté ainsi que le premier dépassement.

Après le choix de la fonction objective, notre étude consiste a évaluer les nouveaux paramètres du régulateur PI optimisé.

Dans une troisième étape, nous allons mettre en place le nouveau régulateur optimisé par le PSO pour le réglage de la tension continue aux bornes du condensateur d'énergie de l'APF.

Nous effectuons des simulations dans un environnement comprenant le réseau électrique et une charge polluante, tous deux modélisés sous Matlab/Simulink avec le Power System Blockset. La compensation des harmoniques est effectuée avec un APF optimisé avec PSO. L'influence de la partie régulation sur le rendement de l'APF est testée. Les caractéristiques de la source, de la charge polluante ou celle du filtre actif parallèle sont brièvement rappelées ci-dessous [27].

Pour mieux envisagé l'importance de la méthode d'optimisation employée pour l'optimisation de l'APF, une étude comparative avec d'autre méthodes existantes dans la littérature de l'optimisation de l'APF est conduite.

40

#### V.2 Modèle de simulation de l'APF :

Les différents valeurs des paramètres de la source ,de la charge ainsi que du filtre actif sont résumés dans les tableaux suivants (Tableau.V-1, Tableau.V-2, Tableau.V-3).

#### V.2.1 Modèle de la source :

Le réseau électrique est représenté par une source de tension triphasée parfaitement sinusoïdale telle que montrer dans le tableau suivant:

Paramètres de la source de tension triphasé					
Paramètres	Notations	Valeurs			
L'amplitude maximale	V <sub>m</sub>	100 V			
La fréquence	f	50 Hz			
Impédance du réseau	L <sub>s</sub>	0.15 mH			
Résistance du réseau	R <sub>s</sub>	0.1 Ω			
Tension aux bornes de condensateur	V <sub>dc</sub>	220 v			

Tableau.V-1 : Les paramètres de la source de tension du réseau triphasé.

#### V.2.2 Modèle de la charge polluante :

La charge non linéaire est représentée par un pont redresseur triphasé à diodes alimentant un circuit $R_c$ ,  $L_c$ .Ses paramètres figurent sur le tableau suivant :

Paramètres de la charge polluante					
Paramètres	Notations	Valeurs			
La résistance aux bornes de la charge non linéaire	R <sub>c</sub>	6.7 Ω			
L'inductance aux bornes de la charge non linéaire	L <sub>c</sub>	20 mH			

**Tableau.V-2 :** Les paramètres de la charge polluante.

#### V.2.3 Modèle du filtre actif parallèle :

Le filtre passif du premier ordre qui se trouve à la sortie du filtre actif sert à connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Les valeurs des éléments caractérisant le filtre actif parallèle sont :

Paramètres d'un filtre actif parallèle					
Paramètres	Notations	Valeurs			
Le condensateur de stockage d'énergie	C <sub>dc</sub>	2000 µF			
L'inductance de couplage	$L_f$	0.33 mH			

Tableau.V-3 :Les paramètres d'un filtre actif parallèle.

## V.3 Simulation d'un APF optimisé par la méthode intelligente du PSO connecté au réseau électrique perturbé par une charge non linéaire :

Dans cette section, on va simuler un APF optimisé par la méthode intelligente du PSO connecté au réseau électrique perturbé par une charge non linéaire. Les résultats de simulation vont être détaillés afin de pouvoir donné suite à une comparaison de l'approche intelligente basée sur le PSO avec d'autres approches classiques et intelligentes cités dans la littérature. Les différents paramètres de l'APF cités précédemment sont employés pour le développement de l'approche intelligente du PSO (tableau.V-1, tableau.V-2 et tableau.V-3).

## V.3.1 Optimisation des paramètres du régulateur PI avec l'approche intelligente basée sur le PSO :

Dans cette section, nous allons jeter la lumière sur la méthode basée sur l'approche intelligente du PSO pour l'optimisation des paramètres d'un régulateur PI classique.

Le régulateur PI utilisé dans notre contexte d'étude sert a la régulation de la tension continue aux bornes du condensateur d'énergie pour pouvoir générer le courant maximal de référence (voir chapitre 3).

#### V.3.1.1 Caractéristiques du PSO utilisé :

Pour une meilleure optimisation des paramètres du régulateur PI (paramètres optimaux), nous allons effectuer plusieurs changements sur les caractéristiques du PSO :

- La fonction d'évaluation (la fonction objective) qui mesure l'efficacité globale du couple (PI, processus asservi).
- **4** La taille de la population (la taille de l'essaim).
- Nombres d'itération.

La figure.V-5 présente un organigramme de l'algorithme PSO utilisé pour l'optimisation des paramètres de régulateur PI pour la tension continue aux bornes de l'élément de stockage d'énergie de l'APF.



**Figure.V-1 :** Organigramme de l'algorithme PSO utilisé pour l'optimisation des paramètres de régulateur PI pour la tension continue aux bornes de l'élément de stockage d'énergie de l'APF

Dans notre étude, nous allons fixer un paramètre à la fois du PSO, soit la taille de population ou bien le nombre d'itérations pour trois différentes fonctions objectives ( $fval_1$ ,  $fval_2$  et  $fval_3$ ).

Les trois fonctions objectives sont citées précédemment (voir équations III.31, III.32 et 33) du chapitre 3.

**4** La première fonction objective : Est la fonction fval<sub>1</sub> donner dans le chapitre 3 par l'équation (III.31).

Le tableau.V-4présente l'évaluation de la  $1^{\text{ére}}$  fonction objective (fval<sub>1</sub>), ainsi que quelques spécifications temporelles ( $T_r$ ,  $T_m$ , D1) en fonction de la taille de population pour un nombre fixe d'itérations égal à 10 itérations.

#### Nombre d'itération=10.

Т	20	50	70	100	150
fval <sub>1</sub>	0.028072	0.0285063	0.0285759	0.0280783	0.02808
T <sub>r</sub>	0.0408	0.0492	0.0432	0.0424	0.0497
T <sub>m</sub>	0.00382	0.00645	0.00422	0.00397	0.00505
<b>D</b> <sub>1</sub>	1.04	1.14	1.03	1.04	1.07

**Tableau.V-4 :** Evaluation de  $fval_{1,}$  T<sub>r</sub>, T<sub>m</sub>, D<sub>1</sub> en fonction de la taille de l'essaim pour un<br/>nombre d'itération égal à 10.

Le tableau.V-5présente l'évaluation de la  $1^{\text{ére}}$  fonction objective (fval<sub>1</sub>), ainsi que quelques spécifications temporelles ( $T_r$ ,  $T_m$ , D1) en fonction du nombre d'itérations pour un nombre fixe de la taille de l'essaim égal à 20.

Taille	= 20.
--------	-------

NI	5	10	20	30	50
fval <sub>1</sub>	0.0289919	0.0282708	0.0280723	0.0280714	0.0280716
Tr	0.0461	0.0215	0.0502	0.0408	0.0481
T <sub>m</sub>	0.00462	0.00393	0.00501	0.00381	0.00452
<b>D</b> <sub>1</sub>	1.07	1.03	1.07	1.05	1.04

**Tableau.V-5 :** Evaluation de  $fval_1$ ,  $T_r$ ,  $T_m$ ,  $D_1$  en fonction du nombre d'itérations pour une<br/>taille de l'essaim égale à 20.

**4** La deuxième fonction objective : Est la fonction fval<sub>2</sub> donner dans le chapitre 3 par le tableau (III.32).

Le tableau.V-6présente l'évaluation de la  $2^{\text{émme}}$  fonction objective (fval<sub>2</sub>), ainsi que quelques spécifications temporelles ( $T_r$ ,  $T_m$ ,  $D_1$ ) en fonction de la taille de population pour un nombre fixe d'itérations égal à 10 itérations.

Nombre d'itération=10.

Т	20	50	70	100	150
fval <sub>2</sub>	14.5421	14.5661	14.5277	14.4151	14.3953
Tr	0.0538	0.0441	0.0406	0.0515	0.0658
T <sub>m</sub>	0.00505	0.00424	0.0038	0.00658	0.00896
$\mathbf{D}_1$	1.05	1.06	1.05	1.12	1.14

**Tableau.V-6 :** Evaluation de  $fval_2$ , T<sub>r</sub>, T<sub>m</sub>, D<sub>1</sub> en fonction de la taille de l'essaim pour un<br/>nombre d'itération égal à 10.

Le tableau.V-7présente l'évaluation de la  $2^{\text{émme}}$  fonction objective  $(fval_2)$ , ainsi que quelques spécifications temporelles  $(T_r, T_m, D_1)$  en fonction du nombre d'itérations pour un nombre fixe de la taille de l'essaim égal à 20.

#### Taille = 20

NI	5	10	20	30	50
fval <sub>2</sub>	15.6155	14.8048	14.3957	14.3946	14.4017
Tr	0.125	0.218	0.059	0.0576	1.56
T <sub>m</sub>	0.0159	0.0104	0.00764	0.00747	0.00859
<b>D</b> <sub>1</sub>	1.35	1.63	1.12	1.13	1.94

**Tableau.V-7 :** Evaluation de  $fval_2$ ,  $T_r$ ,  $T_m$ ,  $D_1$  en fonction du nombre d'itérations pour une<br/>taille de l'essaim égale à 20.

**4** La troisième fonction objective : Est la fonction fval<sub>3</sub> donner dans le chapitre 3 par le tableau (III.33).

Le tableau.V-8présente l'évaluation de la  $3^{\text{émme}}$  fonction objective (fval<sub>3</sub>), ainsi que quelques spécifications temporelles ( $T_r$ ,  $T_m$ ,  $D_1$ ) en fonction de la taille de population pour un nombre fixe d'itérations égal à 10 itérations.

#### Nombre d'itération=10.

Т	20	50	70	100	150
fval <sub>3</sub>	15.5527	14.6402	14.4482	14.4325	14.4383
T <sub>r</sub>	0.166	0.0624	0.0541	0.0706	0.0525
T <sub>m</sub>	0.00905	0.00645	0.00652	0.00891	0.00607
<b>D</b> <sub>1</sub>	1.58	1.03	1.11	1.32	1.1

**Tableau.V-8:**Evaluation de fval<sub>3</sub>,  $T_{r,} T_{m}$ ,  $D_{1}$  en fonction de la taille de l'essaim pour un<br/>nombre fixe d'itérations égal à 10 itérations.

Le tableau.V-9présente l'évaluation de la  $3^{\text{émme}}$  fonction objective (fval<sub>3</sub>), ainsi que quelques spécifications temporelles ( $T_r$ ,  $T_m$ , D1) en fonction du nombre d'itérations pour un nombre fixe de la taille de l'essaim égal à 20.

#### **Taille = 20.**

NI	5	10	20	30	50
fval <sub>3</sub>	14.8288	14.4813	14.3948	14.395	14.3955
Tr	0.0719	0.0609	0.0454	0.0494	0.0699
T <sub>m</sub>	0.00683	0.0278	0.011	0.00629	0.00899
D1	1.06	1.21	1.13	1.12	1.12

**Tableau.V-9 :** Evaluation de  $fval_3$ ,  $T_r$ ,  $T_m$ ,  $D_1$  en fonction du nombre d'itérations pour un<br/>taille de l'essaim égale à 20.

Avec :

NI : Le nombre d'itération.
T : La taille de l'essaim.
fval<sub>1</sub> : La valeur de la fonction objective1.
fval<sub>2</sub> : La valeur de la fonction objective2.
fval<sub>3</sub> : La valeur de la fonction objective3.

 $T_m$ : Le temps de monté.

 $T_r$  : Le temps de réponse.

 $D_1$ : Le premier dépassement.

Les figures (Figure.V-2, Figure.V-3 et Figure.V-4) représentent respectivement l'évaluation de la première, deuxième et troisième fonction objective en fonction du nombre d'itérations pour une taille de l'essaim égale à 20.



#### Valeur optimale de la première fonction objective : 0.0280716

**Figure.V-2 :** Evaluation de la première fonction objective en fonction du nombre d'itérations pour une taille de l'essaim égale à 20.



**Figure.V-3 :** Evaluation de la deuxième fonction objective en fonction du nombre d'itérations pour une taille de l'essaim égale à 20.



Valeur optimale de la troisieme fonction objective :14.3955

**Figure.V-4 :** Evaluation de la troisieme fonction objective en fonction du nombre d'itérations pour une taille de l'essaim égale à 20.

D'après les tableaux précédant nous avons constatés :

#### 1-Pour La première fonction objective :

- Les valeurs optimales de :  $fval_1=0.028072$ ,  $T_r=0.0408$ ,  $T_m=0.00382$  et  $D_1=1.04$  *pour une taille de 20*(Tableau.V-4).

- Les valeurs optimales de :  $fval_1=0.0282708$ ,  $T_r=0.0215$ ,  $T_m=0.00393$ ,  $D_1=1.03$  pour un nombre d'itération égale à 10(Tableau.V-5).

#### 2-Pour a deuxième fonction objective :

- Les valeurs optimales de :  $fval_2=14.5277$ ,  $T_r=0.0406$ ,  $T_m=0.0038$  et  $D_1=1.05$  *pour une taille de 70*(Tableau.V-6).

- Les valeurs optimales de :  $fval_2=14.3946$ ,  $T_r=0.0576$ ,  $T_m=0.00747$  et  $D_1=1.13$  pour un nombre d'itération égale à 30 (Tableau.V-7).

#### 3-Pour la troisième fonction objective :

- Les valeurs optimales de : fval<sub>3</sub>=14.4383, T<sub>r</sub>=0.0525, T<sub>m</sub>=0.00607 et D<sub>1</sub>=1.1 *pour une taille de 150*(Tableau.V-8).

- Les valeurs optimales de :  $fval_3=14.395$ ,  $T_r=0.0.0494$ ,  $T_m=0.00629$  et  $D_1=1.12$  *pour un nombre d'itération égale à 30*(Tableau.V-9).

Après avoir fixé les paramètres optimaux du PSO (taille de population de l'essaim et le nombre d'itérations), par les valeurs suivantes :

- Nombre d'itération=50.
- $\circ$  Taille =20.

Les paramètres optimaux du régulateur PI évalués par les algorithmes PSOs (PSO<sub>1</sub>, PSO<sub>2</sub> et PSO<sub>3</sub>) correspondants respectivement aux foncions objectives (*f*val<sub>1</sub>, *f*val<sub>2</sub> et *f*val<sub>3</sub>) sont résumés dans le tableau.V-10.

Le tableau.V-10 présente un récapitulatif des paramètres optimaux du régulateur PI pour les différents algorithmes PSOs (PSO<sub>1</sub>, PSO<sub>2</sub> et PSO<sub>3</sub>).

Méthode utilisée	$k_p$	k <sub>i</sub>
PSO <sub>1</sub>	1	29.17
PSO <sub>2</sub>	0.3940	17.25
PSO <sub>3</sub>	0.3359	12.5336

**Tableau.V-10:** Tableau récapitulatif des paramètres optimaux du régulateur PI pour les<br/>différentes algorithme (PSO, PSO2 et PSO3).Avec :

**PSO<sub>1</sub>**: L'algorithme de l'essaim particulaire utilisant *f*val<sub>1</sub>.

**PSO<sub>2</sub> :** L'algorithme de l'essaim particulaire utilisant *f*val<sub>2</sub>.

**PSO<sub>3</sub> :** L'algorithme de l'essaim particulaire utilisant *f*val<sub>3</sub>.

Après avoir fixé les paramètres de kp et ki pour les différents algorithmes PSOs (PSO1 PSO2 et PSO3), trois architectures optimisées du PI sont employées et testées en simulation pour apprécier l'impact de l'optimisation de chaque structure sur la qualité de la régulation de la tension continue aux bornes du condensateur de stockage d'énergie .

La figure.V-5 présente le modèle de simulation du réseau triphasé connecté à l'APF optimisé par les algorithmes PSOs.



**Figure.V-5 :** Modèle de simulation du réseau triphasé connecté à l'APF optimisé par la méthode intelligente du PSO.

La figure.V-6 présente le modèle de simulation de la commande d'APF optimisé par la méthode intelligente du PSO.



**Figure.V-6 :** Modèle de simulation de la commande de l'APF optimisé par la méthode intelligente du PSO.



La tension continue  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur de stockage d'énergie  $C_{dc}$ , se stabilisé à la tension de référence  $V_{dcref}$  fixée à 220V,

- Après un temps de réponse de presque Tr = 0.025s, pour le PSO<sub>1</sub> (Figure.V-7).
- Après un temps de réponse de presque Tr = 0,06s, pour le PSO<sub>2</sub> (Figure.V-8).
- Après un temps de réponse de presque Tr = 0,07s, pour le PSO<sub>3</sub> (Figure.V-9).

Le tableau.V-11 présente un récapitulatif des paramètres :  $THD_i$ , T<sub>r</sub> pour les différents PSOs utilisés.

APF optimisé par le PSO	THD <sub>i</sub> (%)	Tr
APF optimisé par PSO <sub>1</sub>	1	0.025
APF optimisé par PSO <sub>2</sub>	0.39	0.06
APF optimisé par PSO <sub>3</sub>	0.38	0.07

**Tableau.V-11 :** Tableau récapitulatif des paramètres :  $THD_i$  et  $T_r$  pour les différents PSOs<br/>utilisés.

D'après le tableau.V-11, les deux paramètres  $k_i$  et  $k_p$  de l'APF optimisé par le PSO<sub>3</sub> sont retenus pour le reste du travail ( les paramètres optimaux en termes de *THD<sub>i</sub>* et T<sub>r</sub>).





D'après les résultats obtenus de la simulation du modèle présenté dans la figure V-5, par l'APF optimisé par les PSO<sub>3</sub>, on peut tirer les remarques suivantes :

- Le courant de source  $i_s$  est parfaitement sinusoïdal avec un taux de distorsion (*THD<sub>i</sub>*) qui a passé de **26,74%**(avant compensation) à **0,38%** (après compensation). Ceci prouve la bonne qualité du filtrage de l'APF proposé.
- La figure.V-13(c) représente la puissance active et réactive dont la puissance réactive ramené à 0 après un temps de presque 0.14s.
- La figure.V-13(b) représente le facteur de puissance qui est ramené a 1 après un temps de presque 0.03s.

Le tableau.V-12, présente une comparaison de quelques méthodes classiques et intelligentes pour la dépollution de réseau à base d'APF faisant intervenir le régulateur PI pour la régulation de la tension continue.

Type de régulateur utilisé dans la commande de l'APF	$THD_i(\%)$ après compensation
PI proposé basé sur le PSO	0.38
PI conventionnel [53]	7.57
PI optimisé avec des Algorithmes génétiques (AGs ) [54]	4.55
PI optimisé par Ziegler Nichols [54]	7.57

Tableau.V-12 : Comparaison de quelques méthodes existantes dans la littérature avec celle proposée.

Il est bien claire du tableau.V-12 que le  $THD_i$  estimé par l'APF proposé dans notre contexte d'étude est le meilleur avec un THD<sub>i</sub> de moins de 1% par apport à la méthode d'optimisation de l'APF avec les AGs avec un  $THD_i$  de 4.55 % et celle de Ziegler Nichols avec un  $THD_i$  estimé à 7.57%.

#### V.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats de simulation obtenus pendant notre manipulation pratique, qui sont très satisfaisants et montrent bien le bon fonctionnement de l'APF optimisé par la méthode intelligente PSO.

Ces résultats prouvent que l'APF optimisé peut réduire les harmoniques du courant à des valeurs inférieurs de 1% correspondant aux recommandations et normes internationales. 55

En régime dynamique, les résultats sont très satisfaisants du point de vue dépassement et temps de réponse de la régulation de tension continue aux bornes du condensateur d'énergie.

La comparaison de la méthode employée basée sur l'optimisation de l'APF avec PSO ,a bien montrée l'intérêt de cette méthode sur le rendement de l'APF en terme de  $THD_i$  qui a passé de 26.74 % avant compensation à 0.38% après compensation par apport à la méthode d'optimisation de l'APF avec les AGs avec un  $THD_i$  de 4.55 % et celle de Ziegler Nichols avec un  $THD_i$  estimé à 7.57%.
## **Conclusion générale**

Notre travail porte sur l'étude de la stratégie de régulation et de commande d'un filtre actif parallèle. Cette étape est fondamentale dans le processus de filtrage. Sans une bonne stratégie de commande, la fonction d'identification des courants harmoniques du système, même très efficace, ne pourrait pas apporter à lui seul, les corrections suffisantes.

Nous avons basé dans notre étude sur la partie identification des courants de référence en vue de l'optimisation du fonctionnement de l'APF. Cette partie repose essentiellement sur la régulation de la tension aux bornes du condensateur de stockage d'énergie qui à son tour une relation directe avec l'amplitude du courant de source d'alimentation et par conséquent la restitution de la forme sinusoïdale du courant de source, élimination de la puissance réactive et amélioration du *THD* et du facteur de puissance.

La partie commande de l'APF repose sur la partie régulation de la tension continue aux bornes du condensateur. La régulation est réalisée par un régulateur classique PI qui reste toujours un système de réglage très performant pour la régulation de la tension aux bornes du condensateur de stockage, mais avoir ses paramètres reste un point primordial à l'efficacité de l'APF.

Une nouvelle méthode intelligente à base de l'essaim particulaire est réalisée en vue de l'optimisation des paramètres du contrôleur PI pour une meilleure régulation.

Des travaux de simulation sont effectués à l'aide du logiciel Matlab/Simulink, pour la simulation de l'APF optimisé par la méthode intelligente à base du PSO. Un travail approfondi de simulation des différents algorithmes PSOs utilisés pour donner au final la structure de l'APF optimale est conduit. Dans ce sens trois algorithmes PSOs ont été testés avec trois différentes fonctions objectives afin de trouver la structure la plus appropriée a la régulation de la tension du condensateur.

Les résultats de simulation concernant la régulation de la tension continue ont montrée que le PSO<sub>3</sub> est l'algorithme retenu pour optimiser l'APF proposé.

Après avoir fixé les paramètres du régulateur PI optimisé par le PSO<sub>3</sub>, des simulations de l'APF connecté a un réseau triphasé alimentant une charge non linéaire ont été effectuées.

Les différents résultats montrent que :

- L'utilisation du  $PSO_3$  a porté une amélioration en termes de temps de réponse pour la régulation de la tension continue, de la tension continue avec un temps de réponse estimé a 0.07s.

- Le courant de source  $i_s$  est parfaitement sinusoïdal avec un taux de distorsion  $(THD_i)$  qui a passé de 26,74% (avant compensation) à 0,38% (après compensation). Ceci prouve la bonne qualité du filtrage de l'APF proposé.

- Le facteur de puissance est ramené à l'unité et la puissance réactive ramené à 0 après un temps considérablement court inferieur a 0.05s.

Enfin une comparaison entre l'APF optimisé avec du PSO et d'autres APFs optimisé par des méthodes intelligentes à base (des algorithmes génétiques, Ziegler Nichols)a montée que : - Le *THDi* estimé par l'APF proposé dans notre contexte d'étude est le meilleur avec un *THDi* de moins de 1% par rapport à la méthode d'optimisation de l'APF avec les AGs avec un *THD<sub>i</sub>* de 4.55 % et celle de Ziegler Nichols avec un *THD<sub>i</sub>* estimé a 7.57%.

## **Bibliographie**

- S. Hafsia, «Commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées», Mémoire de magister, Université de Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- [2] D. Ould-Abdeslam, «Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : Application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension», Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, 2005.
- [3] T. Mahni, «Etude et conception d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils en vue de sa commande par des méthodes d'intelligence artificielle», Thèse de doctorat en sciences, Université de Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [4] A. Omeiri, «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant», Thèse de doctorat, Université de Badji Mokhtar-Annaba, 2007.
- [5] G.G. Champiot, «Les perturbations électriques et électromagnétiques : Conception et amélioration des installations industrielles et tertiaires», Collection electra, Dopee diffusion, 1991.
- [6] S. Hebaibia, L. Dakhli, «Modélisation et simulation d'un filtre actif parallèle à sept niveaux à commande MLI», Thème de mémoire master, Université de Tébessa, 2016.
- [7] S. Ben-Ali, S. Bouhanak, «Etude et simulation d'un filtre actif parallèle à quatre files», Mémoire de magister, Université d'El-Oued, 2015.
- [8] R.P. Bouchard, G.Olivier, «Electrotechnique», Presses inter polytechnique, 1999
- [9] S.A. Tadjer, «Etude d'un système de compensation des harmoniques en utilisantun générateur voltaïque GPV», Thèse de magister en génie électrique, Université de Mohamed Bougara-Boumerdès ,2008.
- [10] M. Sara, «Contribution a l'étude des filtres actifs hybrides», Thèse de doctorat, Université de Sétif 1-Ferhat Abbas, 2012.
- [11] A. Bouafia, «Technique de commande prédictive et flou pour les systèmes d'électronique de puissance : Application aux redresseurs à MLI», Thèse de doctorat, Université de Ferhat Abbas (UFAS)-Sétif, 2010.
- [12] M.A.E. Alali, «Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique», Thèse de doctorat, 2002.
- [13] Compensateurs actifs d'harmoniques Sine Wave de 20 à 480A.

- [14] M.F. Saidon, «Real time implementation active power filtering using fuzzy logic control», University of Wales Swansea-UK, April 2000.
- [15] Y. Abdelli, «Etude et commande de convertisseurs statiques multifonctions en vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique», Thèse de doctorat, Université de Nantes-Nantes, 2005.
- [16] J. Arrillaga, N.R. Watson et S. Chen, «Power system quality assessment», Nanyang Technological, University Singapore, University of Canterybury-Christchurch New Zeland, 1985.
- [17] S.D. Round, R.M. Duke, «Active filter optimisation for efficient variable frequency remote generation», Industry applications society annual meeting, Conference record of the IEEE, p 894-898, 1993.
- [18] M.A.E. Alali, «Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension», Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur-Strasbourg France, 2002.
- [19] F. Gauar, I. Chuidira et S. Ould-Dje, «Commande d'un filtre actif série», Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2010.
- [20] H. Sakkou, «Conception d'une compensatrice active multifonction corrigeant toutes les perturbations en tension générées par les charges non linéaires et les fours à arc», Mémoire de magister, Université de Québec, 2007.
- [21] Z. Chelli, «Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique», Thèse de doctorat, Université de Badji Mokhtar, 2015.
- [22] A. Chaghi, «Contribution au contrôle du courant sur un réseau de distribution électrique application d'un compensateur actif», Thèse de doctorat, Université de Batna, 2004.
- [23] M.D. Epanya, « Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique», Mémoire de magister, Université du Québec, 2010.
- [24] L. Zellouma, S. Saad, N. Debbache et A.Omeiri, «Etude de l'auto- adaptivité du filtre actif parallèle aux variations de la charge», Synthèse : Revue des sciences et de la technologie, p 64-72, vol 17, 2008.
- [25] M.X. Wang, «Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel», Thèse de l'institut national polytechnique de Toulouse, 1992.

- [26] S. Karimi, «Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage FPGA in the loop : Application au filtre actif parallèle», Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I, Janvier 2009.
- [27] R. Yacef, «Stratégie d'optimisation globale de l'APF a base des algorithmes génétiques», Mémoire de magister, 2009
- [28] T. Bounab, «Commande Prédictive d'un Filtre Actif Parallèle», Thème de mémoire master, 2016.
- [29] H. Fujita, H. Akagi, «Practical approach to harmonic compensation in power systems-séries connection of passive and active filters», Industry applications, IEEE transactions, p 1020-1025, vol 27, no 6, 1991
- [30] M. El-Hanrouk, M.K. Darwish et P. Mehta, «Active power filters : A review», Power applications, IEE proceedings-Electric, p 403-413, vol 147, no 5.
- [31] A.M. Chaoui, «Filtrage actif triphasé pour charges nonlinéaires», Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2010.
- [32] P.T. Cheng, S. Bhattacharya, et D.M. Divan, «Control of square-wave inverters in high-power hybrid active filter systems», Industry applications, IEEE transactions, p 458-472, vol 34, no 3, 1998
- [33] A. Munazzama, J.Dheeraj, «Analysis of shunt active filter with ann based controller», International journal of computer applications, p 0975-8887, vol 182, no 32, Décembre 2018.
- [34] A.A. Imam, R. Sreerama-Kumar et Y.A. Al-Turki, «Modeling and simulation of a PI controlled shunt active power filter for power quality enhancement based on P-Q theory», Electronics, p 637, vol 9, no 4, 2020.
- [35] A. Zoghbi, D. Berkani, «Performance improvement of the shunt active power filter using a novel adaptive filtering approach», Turkish journal of electrical engineering & computer sciences, p 203-222, vol 29, no 1, 2021.
- [36] F. P-Monteiro, S. A-Monteiro, M.E. Tostes et U. H-Bezerra, «Using true rms current measurements to estimate harmonic impacts of multiple nonlinear loads in electric distribution grids», Energies, p 4132, vol 12, no 21, 2019.
- [37] J.L Monroy-Morales, D. Campos-Gaona, M. Hernández-Ángeles, R. Peña-Alzola et J. Guardado-Zavala, «An active power filter based on a three-level inverter and 3dsvpwm for selective harmonic and reactive compensation», Energies, p 297, vol 10, no 3, 2017.

- [38] M.Y. Artemenko, V.M. Mykhalskyi, S.Y Polishchuk, V.V. Chopyk et I.A. Shapoval, «Modified instantaneous power theory for three-phase four-wire power systems», International conference on electronics and nanotechnology, IEE 39th, p 600-605, 2019.
- [39] S. Ouchen, J.P. Gaubert, H. Steinhart et A. Betka, «Energy quality improvement of three-phase shunt active power filter under different voltage conditions based on predictive direct power control with disturbance rejection principle», Mathematics & computers in simulation, p 506–519, vol 158, 2019.
- [40] M. Bertrand, «Chaînes de régulation types», Techniques de l'ingénieur, 2019.
- [41] J. Holtz, «Pulsewidth modulation-a survey», Industrial electronics, IEE transactions, p 420,1992, vol 39, no 5, 1992.
- [42] J. Holtz, «Pulsewidth modulation for electronic power conversion», Industrial electronics, IEEE transactions, p 1194–1214,1994, vol 82, no 8, 1994.
- [43] A.B. Gacem, «Utilisation des méthodes d'optimisations métaheuristiques pour la résolution du problème de répartition optimale de la puissance dans les réseaux électriques», Mémoire de magister, Université de Mohamed Lakhdar Ben Amara-El Oued, 2010.
- [44] J.J.E. Slotine, W. Li, «Applied nonlinear control»,1991.
- [45] I. Chalane, T.Ouari et O. Guenounou, «Optimisation des paramètres d'un PID par essaims particulaires (PSO)», Thèse de doctorat, Université de Abderrahmane Mira, 2017.
- [46] R. Mansouri, «Contribution a l'analyse et la synthèse des systèmes d'ordre fractionnaire par la représentation d'état», Thèse de doctorat en electrotechnique, UMMTO, 2008.
- [47] R. Eberhart, Y. Shi, «Comparing inertial weights and constriction factor in particle swarm optimization», Proceeding of the international congress on evaluationing computation, IEEE, p 84-88, vol 1, 2000.
- [48] Y. Cooren, «Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'optimisation par essaim particulaire : Applications en génie médical et en électronique», Thèse de doctorat, Université de Paris-Est, 2008.
- [49] M. Padma Lalitha, V.C. Veera-Reddy et V.Usha, «Optimal DG placement for minimum real power loss in radial distribution systems using PSO», Journal of theoretical & applied information technology, p 107-116, 2010.

- [50] M.T. Huynh, «Application de l'Optimisation par Essaim Particulaire à la représentation de matrice de préférence valuées», Université libre de Bruxelles, 2009.
- [51] R. Qi, B.Hu et P.H Cournede, «Psots : A particle swarm optimization toolbox in scilab», IEEE international workshop on open-source software for scientific computation (OSSC), IEEE, P 107-114, 2009.
- [52] M. Kihal, «Développement de modèles cem pour le diagnostic et la caractérisation des Perturbations dans les systèmes de puissance», Rapport scientifique, Université de Jijel, 2018/2019.
- [53] A. Sakthivel, P. Vijayakumar, A. Senthilkumar, L. Lakshminarasimman et S. Paramasivam, «Experimental investigations on ant colony optimized PI control algorithm for shunt active power filter to improve power quality», Control engineering practice, p 153-169, vol 42, 2015.
- [54] T. Parithimar-Kalaignan, «Power quality enhancement by minimizing current harmonics using soft computing based shunt active and hybrid filters», Available online : http://hdl.handle.net/10603/141027 (accessed on 15 January 2020).

## Abstract

The use of equipment with non-linear loads, absorbs non-sinusoidal currents and consumes reactive power. This equipment contributes considerably to the deterioration of the quality of electrical energy. So, to remedy this situation, active power filters are to date the most suitable solutions for pollution control both in terms of production and distribution. Active filters are only reliable if the disturbance identification strategies are effective and the filter control is effective.

As part of our work, we have introduced a new method for controlling the APF parallel active filter based on the intelligent approach of the PSO for optimizing the parameters of a classic PI regulator. To do this, we will develop a method for identifying the parameters of the regulators and their optimization using the particle swarm algorithm. Simulation work with the Matlab / Simulink tool will confirm the feasibility of the optimized APF. A comparative study between the APF method based on the intelligent approach of the PSO and other methods was carried out .

**Keywords:** Particle swarm algorithm, Active filter, optimization, identification, harmonic pollution, reactive power.

## Resumé

L'utilisation des équipements à charges non linéaire, absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment de la puissance réactive. Ces équipements contribuent considérablement à la détérioration de la qualité de l'énergie électrique. Alors, pour remédier à cette situation, les filtres actifs de puissance sont à ce jour, les solutions les plus adéquates pour la dépollution tant au niveau de la production que de la distribution. Les filtres actifs ne sont fiables que si les stratégies d'identification des perturbations sont efficaces et que la commande des filtres soit performante.

Dans le cadre de notre travail, nous avons introduit une nouvelle méthode pour la commande du filtre actif parallèle APF basée sur l'approche intelligente du PSO pour l'optimisation des paramètres d'un régulateur PI classique. Pour ce faire on développera une méthode d'identification des paramètres des régulateurs et leur optimisation à l'aide de l'algorithme d'essaim particulaire. Le travail de simulation avec l'outil Matlab / Simulink confirmera la faisabilité de l'APF optimisé. Une étude comparative entre la méthode APF basée sur l'approche intelligente du PSO et d'autres méthodes a été conduite.

**Mots clés :** Algorithme d'essaim de particules, filtre actif, optimisation, identification, pollution harmonique, puissance réactive.

استخدام المعدات ذات الأحمال غير الخطية ، يمتص التيارات غير الجيبية ويستهلك الطاقة التفاعلية. يساهم هذا الجهاز بشكل كبير في تدهور جودة الطاقة الكهربائية. لذا ، لتصحيح هذا الوضع ، مرشحات الطاقة النشطة هي حتى الأن الحلول الأكثر ملاءمة لمكافحة التلوث سواء من حيث الإنتاج والتوزيع. لا يمكن الاعتماد على المرشحات النشطة إلا إذا كانت استراتيجيات تحديد الاضطراب فعالة والتحكم في المرشح فعال.

كجزء من عملناً، قدمنا طريقة جديدة للتحكم في مرشح APF النشط المتوازي استنادًا إلى النهج الذكي لـ PSO لتحسين معلمات منظم PI الكلاسيكي. للقيام بذلك، سنطور طريقة لتحديد معلمات المنظمين وتحسينها باستخدام خوارزمية سرب الجسيمات. سيؤكد عمل المحاكاة باستخدام أداة Matlab / Simulink جدوى APF المحسّن. تم إجراء دراسة مقارنة بين طريقة APF على أساس النهج الذكي لجهاز PSO والطرق الأخر.

الكلمات الرئيسية : خوارزمية سرب الجسيمات، مرشح نشط، تحسين، تحديد، تلوث توافقي، طاقة تفاعلية.