UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées Département de Génie Electrique



Mémoire MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies Filière : Electrotechnique Spécialité : Réseaux électriques Présenté par :

TRABELSI Ala din

SALEM Mouldi

Thème:

Effets des harmoniques générées par les systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution électrique

> Soutenu publiquement Le : 01/07/2018 Devant le jury :

> > MAB

MAA

MAB

M	Med Lakhdar Louazen
M ^r	KADRI Ahmed Yacine

M Ben Bouza Naima

Président Encadreur/rapporteur Examinateur UKM Ouargla UKM Ouargla UKM Ouargla

Année universitaire 2017/2018

Remerciements

Nous remercions, en premier lieu, الله le tout puissant de nous avoir donnés La volonté et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur **Mr. KADRI Ahmed Yacine** pour le temps qu'il nous a consacrés et l'aide qui nous a apportés malgré ses occupations. Nous tenons à remercier les gents de la centrale PV de HADJIRA Mrs BENATELLAH Farouk, SIAGH Said et BELAID Youcef pour leur aide et assistance.

Nous adressons nos chaleureux remerciements à l'ensemble des enseignants du département génie électrique qui ont contribué à notre formation. Enfin, touts nos remerciements vont à nos familles.

Ala Din et Mouldi

SOMMAIRE

Liste des abréviationsI	
Liste des figuresII	
Listes des tableauxVI	
Introduction Générale01	
Chapitre I : Etude des phénomènes d'harmoniques	
I.1. Introduction:	03
I.2. Perturbation électrique	03
I.2.1Les creux de tension et les coupures brèves :	03
I.2.2. Variations de la tension:	04
I.2.3. Variation de la fréquence	04
I.2.4. Surtension	04
I.2.5. Déséquilibres de tension	04
I.2.6. Harmoniques	05
I.2.6.1. Définition des harmoniques	05
I.2.6.2. Origines des harmoniques	05
I.2.6.3. Types des harmoniques	07
I.2.6.4. L'analyse de Fourier	07
I.2.6.5. Expressions mathématiques	07
I.2.6.6. Parité des fonctions	08
I.2.6.7. Valeur efficace d'une grandeur déformée	08
I.2.6.8. Taux individuel	09
I.2.6.9.Taux Global de distorsion	09
I.2.6.10.Influence des harmoniques sur le facteur de puissance	09
I.2.6.11.Harmoniques et charges électriques	10
A/ Charges linéaires et charges non linéaires	10
A.1 Charges linéaires	10
A.2 Charges non linéaires	10
B/ Charges génératrices d'harmoniques	11
B.1 Charges génératrices d'harmoniques de tension	11
B.2 Charges génératrices d'harmoniques de courant	12
B.2.1 Les montages électroniques	12
B.2.2 Les charges non linéaires passives	12

B.2.3 Les appareils à arc électrique	12
I.2.6.12. Courants absorbés par les charges non linéaires	13
I.2.6.13. Effets des harmoniques	13
A. Effets instantanés	14
B. Effets à terme	14
C. Conséquences sur le conducteur de neutre	16
I.2.6.14. Phénomènes de résonance	16
I.2.6.15. Normes et réglementations	17
A. Concernant la tension	17
B. Concernant le courant	18
I.3. Les solutions générales aux harmoniques	19
I.3.1 Filtrage passif	19
I.3.1.1 Principe	19
I.3.1.1.1 Inductance anti-harmonique	19
I.3.1.1.2 Filtre résonant	20
I.3.1.1.3 Filtre amorti	21
I.3.1.2 Avantages et inconvénients des filtres passifs	22
I.3.2 Filtrage actif	23
I.3.2.1 Filtrage actif parallèle (shunt)	23
I.3.2.2 Filtrage actif série	23
I.3.2.3 Filtrage actif série –parallèle	24
I.3.2.4 Filtrage hybride (mixte actif -passif)	24
I.3.2.5 Avantages et inconvénients des filtres actifs	26
I.3.2.6 Transformateurs à couplages particuliers	26
A. Transformateurs à couplage triangle /étoileouétoile/zig-zag	26
B. Transformateurs à couplage triangle/ triangle-étoile	26
I.4 Conclusion	27

Chapitre II :

II.1. Introduction:	27
II.2. Étude des impacts de la production d'ENR sur les réseaux électriques	27
II.2.1.Impact sur le systeme de distribution	
II.2.2. Impact sur le systeme de transport	
II.3. Modélisation du système PV	27
II.3.1 Modélisation du générateur PV	27
II.3.2. Caractéristiques I-V et P-V d'un module	29
II.3.3. Association des générateurs photovoltaïques	31
II.4. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	31
II.5. Les Convertisseurs DC/AC (Onduleurs):	34
II.5.1. Structure d'onduleur	34
II.5.2. Techniques de contrôle et commande de l'onduleur	34
II.5.2.1. Techniques de maximisation de la puissance MPPT	35
II.5.2.2. Technique de commande par orientation de la tension VOC	35
II.5.2.3. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	37
II.6. Technique de commande PLL (Phase Locked Loop)	37
II.6.1. Modélisation du Transformateur	38
II.6.2. Modélisation du Réseau électrique	40
II.6.2.1. Représentation en π	41
II.6.2.2. Représentation en T	42
II.7. Dimensionnement du filtre passif	42
II.7.1. Critères de choix du filtre passif	43
II.7.2. Inductance de protectionL ₀	43
II.7.3. Inductance du filtre L (inductance de sortie de l'onduleur)	43
II.7.4. Condensateur de filtrage C et Résistance d'amortissement R	44
II.8.Conclusion	44

Chapitre III :

III.1. Introduction:	43
III.2. Présentation de la centrale	43
III.2.1 Éléments constitutifs du système PV connecté au réseau	44

Sommaire

III.2.1.1 Caractéristiques du module PV	44
III.2.1.2 convertisseur DC/AC triphasé couplé au réseau	45
III.2.1.3 Transformateur élévateur triphasé 0.315/30 K V	47
III.2.1.4 Poste d'évacuation 30KV	47
III.2.1.5 Système PV de Hadjira connecté au réseau de distribution 30 KV	48
III.2.2. Campagne de mesures des harmoniques	49
III.2.2.1 Analyseur d'énergie C.A 8335 (QUALISTAR)	50
II.2.2.2. Les données météorologiques sont représentées dans la figure suivante	51
III.2.2.3. Résultats des mesures	51
III.2.2.4. Conclusion	54
III.3. Simulations de système photovoltaïque raccordé au réseau	55
II.3.1. Simulation sans filtre	55
II.3.2. Simulation avec filtre	58
II.4 Conclusion	61

Liste des abréviations

- MPP: Maximum Power Point.
- GPV: Générateur photovoltaïque.
- RMS: Valeur efficace.
- **THD** : Taux de distorsion harmonique.
- **TDR :** Rapport total de distorsion.
- **Fp**: Facteur de puissance.
- E: Eclairement (W/m2).
- Vco : La tension de circuit ouvert (V).
- **P**: Puissance active.
- Q: Puissance réactive.
- S: Puissance apparente.
- **D** : Puissance déformante.

Chapitre I

N° figure	Titre	Page
Fig I.1	Creux et coupures de tension	02
Fig I.2	Déséquilibre de tension	02
Fig I.3	Exemple d'allures de signaux déformés	03
Fig I.4	Exemple d'un courant distordu et sa décomposition en composantes harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5, 7 et 9	04
Fig I.5	Représentation spectrale d'un signal périodique	05
Fig I.6	Diagramme de Fresnel des puissances	07
Fig I.7	Charge linéaire	08
Fig I.8	Charge non-linéaire	08
Fig I.9	Spectre de fréquences d'un courant non sinusoïdal	08
Fig I.10	Forme du courant absorbé par quelques charges non linéaires	11
Fig I.I1	Courant absorbé par un récepteur triphasé	13
Fig I.12	Résonance série	14
Fig I.13	Résonance parallèle	14
Fig I.14	Raccordement d'une inductance anti-harmonique	17
Fig I.15	Installations de filtres résonants	17
Fig I.16	Filtres amortis passe-haut	18
Fig I.17	Installation d'un filtre amorti	18
Fig I.18	Principe de filtrage actif parallèle	20
FigI.19	Principe de filtrage actif série	20
FigI.20	Combinaison parallèle- série	21
FigI.21	Filtre actif série avec filtre passif parallèle	21
Fig I.22	Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle	22
Fig I.23	Filtre actif série connecté en série avec filtre passif parallèle	22

Chapitre II

N° figure	Titre	Page
Fig II.1	Circuit équivalent d'une cellule PV	24
FigII.2	<i>L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V)</i>	25
FigII.3	<i>L'influence de l'éclairement sur la caractéristique</i> $P=f(V)$.	26
FigII.4	<i>L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V).</i>	26
FigII.5	<i>L'influence de la température sur la caractéristique</i> $P=f(V)$	27
FigII.6	Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage	28
FigII.7	Schéma d'un quadripôle électrique	28
FigII.8	périodes fermeture et ouverture d'un commutateur	28
FigII.9	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT	29
FigII.10	Signe de $\frac{dp}{dv}$ pour différentes zones de fonctionnement	30
FigII.I1	Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé	30
FigII.12	Structure d'un onduleur triphasée	30
FigII.13	Bloc de la commande VOC	32
FigII.14	Diagramme vectoriel de la tension du réseau et du courant de ligne	33
FigII.15	Signaux de comparaison (référence et porteuse).	33
FigII.16	Schéma équivalent en π d'une ligne	37
FigII.17	Schéma équivalent en T d'une ligne	37
FigII.18	Schémas du filtre	38

Chapitre III

N° figure	Titre	Page
FigIII.1	Plan de masse de la centrale PV de HADJIRA	40
FigIII.2	Schéma de la centrale de production d'électricité PV raccordée au réseau	41
	de distribution	
FigIII.3	Circuit électrique équivalent de l'onduleur de tension.	42
FigIII.4	Local de convertisseur inclut 2 onduleurs de 500KW	42
FigIII.5	Convertisseur installé à la centrale	42
FigIII.6	Local de transformateur en cabine	44
FigIII.7	Transformateur d'élévation	44
FigIII.8	Poste d'évacuation de la centrale	44
FigIII.9	chéma synoptique d'un sous champs du GPV	45
Fig III.10	Appareil d'Analyse de la qualité d'énergie électrique	46
FigIII.I1	Opération de mesure sur site	47
FigIII.12	Profil de la fréquence de l'onduleur 500W	48
FigIII.13	Tensions simples pour les trois phases	49
FigIII.14	Courant pour les trois phases	49
FigIII.15	Puissance active pour les trois phases	49
Fig III.16	Puissance réactive pour les trois phases	50
Fig III.17	THD tension pour les trois phases	50
FigIII.18	THD courant pour les trois phases	50
FigIII.19	Schémas bloc de l'association GPV, Onduleur et Réseau électrique	51
Fig III.20 a	Caractéristique I(V) et P(V) duGPV en fonction de l'éclairement	52
FigIII.21 b	Caractéristique I(V) et P(V) du GPVen fonction de la température	52
Fig III.22	Schémas bloc de l'association GPV, Onduleur et réseau électrique	53
Fig III.23	Allure du courant à la sortie de l'onduleur et sa représentation spectrale avant	53
	filtrage	
Fig III.24	Allure de la tension à la sortie de l'onduleur et sa représentation spectrale avant	54
	filtrage	

N° figure	Titre	Page
FigIII.25	Schémas bloc de l'association GPV, Onduleur, filtre et réseau électrique	54
FigIII.26	Allure du courant à la sortie de l'onduleur et sa représentation spectrale après filtrage	55
Fig III.27	Allure de la tension à la sortie de l'onduleur et sa représentation spectrale après filtrage	55

Tableau I.1	Forme du courant absorbé par quelques charges non linéaires	11
Tableau I.2	Ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique	13
Tableau I.3	Niveaux tolérable pour les tensions harmoniques	15
Tableau I.4	Niveaux tolérable pour les courants harmoniques	15

Chapitre I

Chapitre III

Tableau III.1	Caractéristiques électriques du module PV	41
Tableau III.2	Caractéristiques électriques de l'onduleur	43
Tableau III.3	Caractéristiques techniques du transformateur élévateur	43
Tableau III.4	Structure de la centrale PV	45

Introduction Générale

Introduction générale

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution devient de plus en plus préoccupant avec l'accroissement de l'usage des charges non-linéaires.

Les formes d'onde de courant et de tension relevées sur les réseaux électriques de distribution s'éloignent assez souvent de la sinusoïde idéale pure. La déformation de la tension résulte de la circulation sur le réseau de courants non sinusoïdaux. Les éléments du réseau ayant un comportement non linéaire, l'effet sur la tension de l'ensemble des courants est la superposition de l'effet qu'aurait chaque courant individuellement.

Dans de nombreux cas, ces charges se comportent comme des sources de courants harmoniques, le courant harmonique étant fixé par la charge et non par la tension ou l'impédance du réseau.

On peut définir aussi en tout point d'un réseau une impédance harmonique qui dépend du rang harmonique h considéré; elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point. On parle également d'une source de tension harmonique pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire; le produit des harmoniques de courant par l'impédance harmonique du réseau en un point crée des harmoniques de tension selon la loi d'Ohm.

La pollution harmonique est considérée comme étant un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les systèmes de distribution. Les effets des harmoniques les plus connus sont: la destruction de condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet de forts courants harmoniques amplifiés par des résonances ; l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre et les effets à long terme qui se traduisent par une fatigue ou vitusté accélérée du matériel. [10]

Les réseaux actuels sont caractérisés par l'introduction des nouvelles sources d'alimentation à savoirs les sources d'énergies renouvlables. En Algérie la filière qui connait un essor encouragent est l'énergie solaire

Dans ce contexte plusieurs centrales photovoltaïques ont été mises en service pour l'alimentation des réseaux de distribution dans une politique qui vise à atteindre 30% de la production de l'électricité a partir des énergies renouvelables. Le cœur de ces sources interconnectés au réseau est l'onduleur, cet élément est la source principales des tensions et courants harmonique. Ce dernier doit être doté d'une commande adéquate et judicieusement choisie afin d'avoir une tension compatible avec le réseau et avec le minimum d'harmonique [16].

Plusieurs études ont abordées l'analyse et les remèdes de ces harmoniques.

Dans ce contexte notre travail est orienté vers l'évaluation et l'atténuation des harmoniques injectés par les sources photovoltaïque dans un réseau de distribution .notre travail prend comme cas d'étude la centrale photovoltaïque de HEDJIRA (W. Ouargla).

Le présent mémoire est composé de trois chapitres à savoir:

Le premier chapitre est consacré à l'étude des phénomènes d'harmoniques induits sur les réseaux de distribution, leurs origines, leurs efferts indésirables sur les équipements électriques puis les différentes méthodes traditionnelles et modernes permettant leur atténuation ou élimination.

Le second chapitre est dédié à la présentation des différentes parties de la centrale photovoltaïque de HADJIRA et les mesures réalisées sur site.

Le dernier chapitre est réservé à la modélisation et la simulation du système PV de la centrale ainsi que la discutions et l'interprétation des résultats.

Finalement, une conclusion générale est présentée, résumant les résultats obtenus de la présente étude.

CHAPITRE I :



I.1. Introduction :

L'utilisation croissante des appareils industriels ou domestiques à systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Les convertisseurs statiques apportent une souplesse d'utilisation, des fonctionnalités supplémentaires, une augmentation de la fiabilité, et un rendement élevé. De plus, avec la généralisation de leur utilisation les coûts de ces modules d'électronique de puissance ne cessent de baisser. L'inconvénient de ces dispositifs c'est qu'ils se comportent comme des charges non linéaires et absorbent des courants avec des formes d'ondes différentes des tensions d'alimentation. Dans ce cas, l'évolution des courants n'est pas liée directement aux variations sinusoïdales des réseaux et donnent naissance à des tensions non sinusoïdales et desdéséquilibres qui viennent se superposer à la tension initiale au point de raccordement. Ils peuvent générer aussi une consommation de puissance réactive. Ces perturbations périodiques régulières sont désignées comme des perturbations harmoniques.

La nécessité des études harmoniques s'est fait ressentir, au fur et à mesure de l'identification des effets des harmoniques sur les réseaux et sur la qualité de service, on pourrait citer comme effets : l'échauffement supplémentaire des machines, les claquages des condensateurs, l'apparition de résonnance dans les différents harmoniques et des bruits téléphoniques...etc. [1] Dans ce chapitre, nous allons exposer des notions sur les perturbations de l'énergie électrique et la pollution harmonique, ainsi que leurs origines, conséquences et dépollution [2].

I.2. Perturbations électriques:

I.2.1. Les creux de tension et les coupures brèves :

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms 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.) [3].

Une coupure de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure (I.1) montre un exemple de creux et de coupure de tension.

3



Figure I.1Creux et coupures de tension

I.2.2. Variations de la tension:

Les variations de la tension, sont des variations de la valeur efficace ou la valeur crête d'amplitude inferieur à 10% de la tension nominale, et les fluctuations de la tension sont une suite de variation de tension. Les variations lentes de tension résultent de variation de la charge sur les réseaux ; elles sont corrigées par l'action des régleurs en charge équipant certains transformateurs. [4][5]

I.2.3. Variation de la fréquence:

La fréquence nominale de la tension alternative fournie par le réseau est de 50 *ou* 60 *Hz*. Cette valeur est déterminée par la vitesse des alternateurs des centrales.[3]

La fréquence doit être maintenue autour de la valeur nominale, quelles que soient les variations de consommation ou de production. Elle est mesurée et contrôlée en temps réel avec précision afin de la maintenir dans une zone acceptable (\pm 0,5 Hz autour de 50 Hz ou 60 Hz selon le pays).

I.2.4. Surtension:

Les surtensions temporaires sont des hausses soudaines de la valeur efficace de la tension de plus de 110% de la tension nominale, laquelle se rétablit après une courte durée. Les surtensions temporaires comprennent des durées entre 8 millisecondes et une minute. [3]

I.2.5. Déséquilibres de tension:

Le phénomène de déséquilibre de tension est la situation où les trois tensions du système triphasé ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas décalées normalement les unes par rapport aux autres de 120°. [6]

Il est résultant de l'élimination de charges déséquilibrées (ex : charges monophasés alimentées entre deux phases du réseau triphasé tels que certains fours à induction ou les sous stations pour la traction ferroviaire à fréquence industrielle).[3][6]



Figure I.2. Déséquilibre de tension

I.2.6. Harmoniques:

I.2.6.1. Définition des harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle de la fondamentale, due à la présence des harmoniques. Les récepteurs absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau et provoquent ainsi une déformation de la sinusoïde de tension d'alimentation. La déformation de la forme d'onde est caractérisée par l'apparition de fréquences harmoniques de tension comme l'indique la figure I.3

Le domaine de fréquence qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre l'harmonique 2 et celui du rang 40 [7].



Figure I.3 Exemple d'allures de signaux déformés

I.2.6.2. Origines des harmoniques:

Les dispositifs générateurs d'harmoniques sont présents dans tous les secteurs industriels, tertiaires et domestiques. Il s'agit, par exemple d'ordinateurs, de variateurs de vitesse, etc.

Les autres charges causent une distorsion du courant à cause de leur mode de fonctionnement et génèrent aussi des harmoniques. Il s'agit par exemple des lampes fluorescentes, des lampes à décharger, des machines à souder et des dispositifs comportantun cœur magnétique qui peut être saturé.

Toutes les charges qui provoquent une distorsion du courant sinusoïdal normal créent des harmoniques, et sont appelées des charges non linéaires [8]



Figure I.4. Exemple d'un courant distordu et sa décomposition en composantes

harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5, 7 et 9

I.2.6.3. Types des harmoniques

En règle générale, on distingue les harmoniques de rangs pairs (2, 4, 6,8 ...etc.) et les harmoniques de rangs impairs (3, 5,7 ...etc.) plusinfluentes, dans les réseaux industriels .Il existe aussi d'autre types d'harmoniques tel que :

✓ Inter harmoniques:

Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui n'est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamental.

✓ Infra harmoniques:

Ce sont des composantes de fréquences inférieures à celle du fondamental [7].



Figure I.5. Représentation spectrale d'un signal périodique

I.2.6.4. L'analyse de Fourier

Tout signal périodiques de période T=1/f, peut se décomposer en une somme infinie des termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f. [9]

I.2.6.5. Expressions mathématiques:

$$i(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t)$$
I.1

Avec : a_0 , a_n et b_n sont les coefficients de Fourier.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \mathrm{d}\omega t \qquad \text{I.2}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \qquad \text{I.3}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \qquad \text{I.4}$$

L'expression du courant d'une charge non linéaire est :

$$i(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi n)$$
 I.5

Où : n est un nombre entier.

:φ*n*est le déphasage de la composante harmonique à l'instant initial (t=0). D'une autre manière :

$$i(\omega t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi 1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi n) \qquad I.6$$
$$I_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \qquad I.7$$

Et
$$\varphi n = Arctg(\frac{b_n}{a_n})$$
 I.8

Les harmoniques se distinguent par leur rang, de type pair ou impair. Les harmoniques de rang paire (2, 4, 6, 8...), très souvent négligeables en milieu industriel, s'annulent en raison de la symétrie du signal. Ils n'existent qu'en présence d'une composante continue. Par contre, les harmoniques de rang impair (3, 5, 7, 9...) sont fréquemment rencontrés sur le réseau électrique. [10]

I.2.6.6. Parité des fonctions:

De plus, il existe quelques pré-requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

Si la fonction est paire, ou $i(\omega t) = i(-\omega t)$ les coefficients b_n sont nuls

La décomposition en série de Fourier d'une fonction paire ne contient que des termes en cosinus

Si la fonction est impaire, ou $i(-\omega t) = -i(\omega t)$ les coefficients a_n sont nuls La décomposition en série de Fourier d'une fonction impaire ne contient que des termes en sinus.

Si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls [9]

I.2.6.7. Valeur efficace d'une grandeur déformée:

Un procédé couramment utilisé pour décrire un signal G(t) périodique de période T est

l'évaluation de sa valeur efficace: $G_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T G(t) dt}$ I.9

Lorsque le développement en série de Fourier d'une fonction périodique est continu, on peut déterminer sa valeur efficace comme suit :

$$G_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (G_h)^2} \qquad I.10$$

<u>NB</u>: Lorsqu'un signal comporte des composantes harmoniques, sa valeur efficace est différente de la valeur efficace du signal fondamental. Il est donc possible d'évaluer grossièrement la déformation du signal en comparant la valeur efficace de la composante fondamentale et la valeur efficace. [3]

I.2.6.8. Taux individual de distorsion :

Il donne une mesure de l'importance de chaque harmonique par rapport au fondamental, c'est le rapport de la valeur efficace de l'amplitude de l'harmonique du rang h à celle du fondamental. [3]

$$Ti(\%) = 100 \left(\frac{G_{\rm h}}{G_{\rm 1}}\right)$$
 I.11

I.2.6.9. Taux Global de distorsion :

Le taux de distorsion d'harmoniques de courant que l'on notera THD sert à quantifier les perturbations harmoniques du courant et le facteur de puissance qui sert à quantifier la puissance réactive consommée. Il s'évalue par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde déformée du courant. Il est donné par l'expression suivante :

THD (%) = 100 x
$$\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} i^2 ci}}{i_{c1}}$$
 I.12

Avec i_{c1} la valeur efficace du courant fondamental et i_{ci} les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Il est à signaler que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence. [11]

Par analogie, le taux global de distorsion harmonique des tensions peut s'écrire :

THD (%) = 100 x
$$\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} u^2 c_i}}{u_{c_1}}$$
 I.13

I.2.6.10. Influence des harmoniques sur le facteur de puissance :

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S.

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P, réactive Q et déformante D. Cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, comme l'indique l'équation suivante:

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2 + D^2)}$$
 I.14

Avec :

P : puissance active,S : puissance apparente,Q : puissance réactive,D : puissance déformante Où $P = 3UI_1 \cos \varphi_1$ $Q = 3UI_1 \sin \varphi_1$

 φ_1 : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

Chapitre I

$$D = 3V_{eff} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} i_{h}^2}$$
 I.15

Le facteur de puissance (F.P) est le quotient de la puissance active par la puissance apparente :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{(P^2 + Q^2 + D^2)}}$$
 I.16

La puissance déformante D traduit les effets de la distorsion harmonique sur l'installation considérée.

La dégradation de la valeur du facteur de puissance est donc augmentée sur ce type d'installation.

Alors il en résulte que la pollution harmonique diminue le facteur de puissance. [9] [12]



Figure I.6 Diagramme de Fresnel des puissances [15] [19]

I.2.6.11. Harmoniques et charges électriques

A. Charges linéaires et charges non linéaires

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales [13] [3]

- 4 Les récepteurs linéaires ou charges linéaires.
- Les récepteurs non-linéaires ou charges non-linéaires.

A.1 Charges linéaires

On dit qu'une charge est linéaire lorsque celle-ci, alimentée par une tension sinusoïdale, consomme un courant sinusoïdal. Il reste par contre possible que le courant et la tension soient déphasés. Les charges linéaires le plus souvent utilisées sont faites de condensateurs, de résistances et d'inductances. (FigureI.7)

A.2 Charges non linéaires

Une charge est dite non linéaire lorsque celle-ci, alimentée par une tension sinusoïdale,consomme un courant non sinusoïdal ; de sorte que la relation entre le courant et la tensionn'est plus linéaire Figure I.8

Chapitre I



Figure I.7. Charge linéaire

Figure I.8 Charge non-linéaire



Figure 1.9 Spectre de fréquences d'un courant non sinusoïdal

B. Charges génératrices d'harmoniques

B.1 Charges génératrices d'harmoniques de tension

Les alternateurs, les transformateurs et les ASI (Alimentation Statique

Ininterruptibles)représentent les principales charges génératrices d'harmoniques de tension. Le taux de distorsion harmonique produit par ces charges est généralement faible.

Les alternateurs :

Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde.

Les transformateurs:

Ils peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé.

Les alimentations statiques ininterruptibles (ASI) :

Elles servent à protéger le matériel, en général des charges non-linéaires comme du matériel informatique, contre les creux de tension et les coupures. Le taux de tension harmonique est dû essentiellement aux courants harmoniques créés par les charges non-linéaires alimentées en aval [14].

B.2 Charges génératrices d'harmoniques de courant

Les charges non linéaires consomment un courant non sinusoïdal et représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux. [14].

On peut distinguer différents types de charges perturbatrices

B.2.1 Les montages électroniques

🖊 Le redresseur monophasé à filtre capacitif:

Il est utilisé comme premier étage des alimentations de télévisions, d'ordinateurs, d'imprimantes, des variateurs de vitesse des machines asynchrones, des lampes à ballast électronique, des ballasts électroniques pour rampes d'éclairage, etc.

🖊 Le gradateur monophasé

Il est utilisé pour la commande de l'intensité des lampes à incandescence halogène, la commande de certains fours de cuisson, la régulation de puissance (chaudières), les démarreurs de moteurs électriques, etc.

4 Le redresseur triphasé à thyristors :

Il permet de réguler la tension appliquée aux bornes d'une charge en faisant varier l'angle de commande des gâchettes; il est utilisé pour la commande en vitesse variable des moteurs à courant continu, des machines synchrones (nous rencontrons des montages redresseurs suivis d'un onduleur pour commander la machine synchrone en vitesse variable), les fours à induction lorsqu' ils sont régulés, etc. Les redresseurs triphasés à thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel.

Le redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif:

Il est utilisé pour la commande en vitesse variable des machines asynchrones, ces derniers servent pour l'entraînement des compresseurs, des ventilateurs, des pompes, etc.

B.2.2.Les charges non linéaires passives

4 Les moteurs asynchrones:

En théorie, ces moteurs génèrent des ondes de courant purement sinusoïdales; en pratique, les taux d'harmoniques mesurés sont variables.

4 Les lampes fluorescentes et les lampes à vapeur haute pression :

Elles représentent les deux tiers de la puissance consommée par l'éclairage dans le secteur tertiaire (bureaux, grands commerces, etc.).

B.2.3 Les appareils à arc électrique :

Ils regroupent les fours à arc à courant alternatif et les machines de soudure à l'arc à courant alternatif ou continu.

I.2.6.12. Courants absorbés par les charges non linéaires

Les courants harmoniques sont générés par les charges non-linéaires, c'est-à- dire, absorbant un courant n'ayant pas la même forme que la tension qui les alimente. Les charges de ce type les plus courantes sont celles à base de circuits redresseurs.

Une charge non-linéaire quelconque, absorbe un courant qui contient tous les rangs d'harmoniques, pairs et impairs. Les allures des courants absorbés par quelques charges non linéaires, dont les deux demi-alternances sont différentes, sont représentées par la figure I.10 [15].

I.2.6.13. Effets des harmoniques

Les courants harmoniques associés aux différentes impédances du réseau vont donner naissance à des tensions harmoniques qui vont se superposer à la tension fondamentale du réseau. La tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale. La pollution alors présente sur le réseau de distribution pourrait être préjudiciable au bon fonctionnement de tous les récepteurs (ou charges) raccordés sur ce même réseau.

On distingue deux types d'effet des harmoniques sur les équipements électriques :

• Les effets instantanés







• Les effets à terme

Figure I.10 Forme du courant absorbé par quelques charges non linéaires

A. Effets instantanés

Ils apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

Défauts de fonctionnements de certains équipements électriques :

En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans unedemi période. Les appareils, dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.

• Trouble fonctionnel des micro-ordinateurs : les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires

des moteurs d'entraînement de disque.

Chapitre I

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 lecture supplémentaires en présence des harmoniques.

• Vibrations et bruits : les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques. [11]

B. Effets à terme [10]

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel et des lignes.

• Echauffement des câbles et des équipements :

Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou àlong terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du suréchauffement du neutre et les matériels bobines comme les transformateurs ou les moteurs.

• Echauffement des condensateurs :

L'échauffement est causé par les pertes dues au cycle d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont aussi sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

• Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs:

Un échauffement est causé par les pertes dans le stator des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, Circuits magnétiques) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques

Nature du matériel électrique	Effet de la «pollution harmonique »		
Machines tournantes Moteurs triphasés, alternateurs	Echauffements supplémentaires (effet Joule) dans les enroulements statoriques. Couples oscillatoires.		
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule).		
Câbles	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. Pertes diélectriques supplémentaires.		
Electronique de puissance(ponts redresseurs à thyristor, transistors)	Troubles fonctionnels liés la forme d'onde (commutation, synchronisation).		
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissants à un vieillissement prématuré des condensateurs		
Ordinateur	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques		
Dispositifs de protection(Fusibles. Disjoncteurs magnétothermiques)	Fonctionnement intempestif		
Compteur d'énergie	Erreurs de mesure		
Téléviseurs	Déformation d'IMAGE		
Lampes à décharge	Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique		

 Tableau I.2 Ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique.

C. Conséquences sur le conducteur de neutre :

Théoriquement, les composantes homopolaires dans le neutre sont nulles. Mais avec les charges non linéaires du réseau équilibré, les courants harmoniques de rang 3 qui sont en phase vont s'additionner

dans le conducteur du neutre, avec une fréquence de 150Hz pour un réseau de 50Hz ; ce qui peut

détériorer ce dernier s'il est mal dimensionné, et même engendrer des incendies (Figure I.11).[13]



Figure I.11Courant absorbé par un récepteur triphasé [4]

I.2.6.14. Phénomènes de résonance

L'apparition de phénomène de résonance est due à la présence sur les réseaux d'éléments capacitifs et inductifs. Le danger de ce phénomène est qu'il peut engendrer de grandes valeurs d'impédance Zn, de tension Vn et de courant harmonique In aux bornes des différents éléments composants le réseau. Lorsque ces valeurs de tension et de courant harmoniques sont trop élevées, ils peuvent endommager et même détruire les équipements qui y sont soumis. On distingue deux types de résonance selon la configuration des éléments capacitifs et inductifs [13] [16]





i(t)

Figure I.12: Résonance série

Figure I.13: Résonance parallèle

A. Résonance parallèle[10] [16]

L'inductance et la capacité en parallèle donnent l'impédance suivante :

$$Zh = \frac{jL.h.\omega}{1-L.C.h^2.\omega^2}I.20$$

Il y'a résonance lorsque le dénominateur 1- L.C. h^2 . ω^2 est nul, cette impédance est alors infinie. La fréquence de résonance est donnée par :

$$fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{\text{L.C}}}\text{I}.21$$

B. Résonance série [14] [23]

De même, l'association en série d'une capacité et d'une inductance constitue une impédance donnée par:

$$Zh = \frac{1-\text{L.C.h}^2.\omega^2}{\text{jC.h.}\omega}$$
I.22

Il y'a résonance lorsque le numérateur est égal à zéro. L'impédance est alors nulle. La fréquence de résonance est donnée par :

$$fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{\text{L.C}}}\text{I}.23$$

I.2.6.15. Normes et réglementations

Afin de limiter les effets des perturbations harmoniques sur les réseaux électriques et assurer une qualité de produit fiable pour tous les usagés, des normes ont été mises en place. Ces normes devront être respectées par les distributeurs et les utilisateurs en appliquant les recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies : [13] [10]

- Au niveau international par la CEI,
- Au niveau européen par le CENELEC,
- Au niveau français par l'UTE et le CEF,

A. Concernant la tension:

Les niveaux tolérables pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension sont détaillés dans le tableau ci-dessous (CEI 61000-2-1 et 61000-2-2).

β

Harmonic	lues impairs	airs Harmoniques impairs			
non multiples de 3		multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang h	Taux %	Rang h	Taux %	Rang h	Taux %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.2	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	> 21		10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			> 12	0.2
25	1.50				
>25	0.2+0.5*25/h				

Tableau I.3 Niveaux tolérable pour les tensions harmoniques

0.23*8/n

B. Concernant le courant:

La norme CEI 61000-3-2 impose des limites à tous les matériels appelant un courant inférieur ou égal à 16A par phase exceptés les matériels de puissance inférieure à 50W.

Harmoniques pairs Harmoniques impairs Courant maxi. Courant maxi. Rang harmonique n Admissible (A) Rang harmonique n Admissible (A) 2.3 2 1.08 3 1.14 4 0.43 5 0.77 6 0.30 7

Ces limites sont définies selon la classe des appareils (A, B, C ou D). [17]

0.40

0.33

0.21

0.15*15/n

Tableau I.4 Niveaux tolérable pour les courants harmoniques

 $6 \le n \le 40$

I.3. Les solutions générales aux harmoniques

I.3.1 Filtrage passif [18], [19]

9

11

13

 $13 < n \le 39$

De nombreuses solutions ont été développées pour désensibiliser les installations industrielles et le réseau vis-à-vis de la pollution harmonique. La solution la plus fréquemment mise en œuvre est le filtrage passif des harmoniques.

I.3.1.1 Principe

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à « dériver » les courants harmoniques et à éliminer les tensions harmoniques y afférentes. Des éléments capacitifs et inductifs sont, en effet, associés de manière à obtenir une résonance série accordée sur une fréquence choisie.

Une connaissance précise des rangs harmoniques devant être filtrés et des atténuations requises est nécessaire à la réalisation d'un filtre. Une telle étude est généralement menée à l'aide d'un logiciel de simulation. En fonction de l'atténuation harmonique recherchée, différents types de filtres passifs sont utilisés.

Ils peuvent être classifiés selon leur emplacement, leur mode de connexion au circuit principal, leur degré d'amortissement ainsi que les fréquences de leurs résonances. On distingue

généralement un filtre shunt et un filtre série. Par ailleurs, le filtre shunt est utilisé exclusivement du côté courant alternatif (CA) pour les raisons suivantes :

- Le filtre série peut porter le courant en entier à partir du circuit principal et doit être isolé de la terre. Le filtre shunt, par contre, porte uniquement le courant harmonique et peut être lié à la terre à l'une des extrémités.
- A la fréquence fondamentale, un filtre shunt (CA) a l'avantage de fournir de la puissance réactive alors qu'un filtre série consomme de la puissance réactive.
- Pour des performances égales, un filtre shunt est beaucoup moins cher qu'un filtre série.
- Dans ce sens, le présent projet s'intéresse à l'étude de filtres passifs de type shunt (ou filtres parallèles) dont les différents types pouvant être rencontrés sont :
- i) L'inductance anti-harmonique,
- ii) Le filtre résonant,
- iii) Le filtre amorti.

I.3.1.1.1 Inductance anti-harmonique :

Cette première solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée.



Figure I.14 : Raccordement d'une inductance anti-harmonique

Ce type de filtre a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques. Il a en outre pour effet de réduire les tensions harmoniques aux bornes de cescondensateurs. Il permet souvent de réduire les valeurs d'impédance harmonique du réseau, vues du point d'injection au voisinage de la fréquence d'accord et donc les tensions harmoniques sur le réseau. Pour éviter que ce filtre présente une résonance parallèle (anti-résonance) avec l'inductance du réseau sur lequel ils sont raccordes, on les accorde sur une fréquence inferieure à celle de la première injection de courant harmonique.

A noter aussi que l'installation d'inductances anti-harmoniques accroît la tension permanente à la fréquence fondamentale aux bornes des condensateurs qui doivent donc être dimensionnés en conséquence.

I.3.1.1.2 Filtre résonant :

Un filtre résonant a pour objet de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique à un rang déterminé. Le facteur de qualité d'un filtre résonant est élevé ; l'accord du filtre est donc très pointu. Plusieurs filtres résonants correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer, sont souvent installés, en parallèle.



Figure I.15: Installations de filtres résonants.

La puissance réactive nécessaire pour l'installation est repartie entre condensateurs des différents filtres. Ceci nécessite une étude fine du profil de charge de l'installation. Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance (dues à la qualité de réalisation) ou de la capacité (dues au vieillissement ou à la température), ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble. Cette dérive est plus marquée pour les filtres utilisant des condensateurs de faible capacité. Afin d'ajuster la fréquence du filtre à la mise en service, l'inductance doit être munie de prises de réglage.

I.3.1.1.3 Filtre amorti:

On distingue trois types de filtres amortis tels qu'illustrés en figure I.16 nous avons en (a) un filtre amorti de premier ordre, en (b) un filtre amorti de second ordre et en (c) un filtre de troisième ordre.



Le filtre de premier ordre exige une grande capacité et présente une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale. Les filtres de second ordre et d'ordre 3 sont couramment utilisés. Tous les deux sont en général conçus avec un faible facteur de qualité Fq compris entre 0,7 et 1,4. Un filtre amorti de second ordre se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelé résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas enlevées pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre ; c'est un filtre passe-haut de deuxième ordre.



Figure I.17 : Installation d'un filtre amorti.

En pratique, il est courant de mettre en œuvre :

Des filtres résonants accordés sur les premiers rangs harmoniques (rangs 5 et 7) où les injections de courant sont importantes.

• Un filtre amorti pour limiter l'impédance harmonique sur le reste du spectre (rangs >11). L'anti-résonance des filtres provoque une amplification des rangs harmoniques inférieurs à la fréquence d'accord. Le premier filtre est alors accordé sur la première fréquence d'injection de façon à ne pas faire coïncider la fréquence d'anti-résonance avec une injection de courant. Il est important de prévoir une inductance ajustable afin d'accorder correctement le filtre ; ce en raison
des tolérances sur les valeurs des condensateurs et de l'inductance dont l'effet peut être très important sur l'efficacité du filtre.

I.3.1.2 Avantages et inconvénients des filtres passifs

Le filtrage passif a déjà largement fait ces preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance. Il présente cependant les inconvénients suivants:

- La présence sur un même réseau de deux filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, mais en pratique légèrement diffèrent, provoque entre eux la circulation de courants harmoniques très importants qui provoque rapidement leur destruction. Ce cas se rencontre facilement en raison du fait que la fréquence d'accord varie lentement avec le vieillissement des éléments du filtre. Il faut absolument éviter de raccorder des filtres harmoniques de même rang sur un même réseau.

- La mise en parallèle d'un filtre anti-harmonique et d'une batterie de condensateurs provoque unecontrainte pouvant amener la destruction des condensateurs.
- Lorsqu'il y a plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs correspondants. Ce problème peut être résolu en adoptant un filtre à large bande qui atténue plusieurs rangs harmoniques ; ce avec un facteur d'atténuation moindre.
- L'implantation de filtres passifs sur un réseau nécessite une étude poussée et précise. En outre, il n'est pas toujours possible de connaitre tous les paramètres du réseau, nécessaires à l'étude, lorsqu'il est de grande dimension.

Finalement, l'amortissement de la résonance dans les systèmes de puissance par les filtres passifs peut introduire des résonances additionnelles indésirables pouvant conduire à la destruction de ces filtres. L'amortissement utilisant la commande et l'électronique de puissance se présente comme solution pour améliorer efficacement le mode opératoire du réseau.

I.3.2 Filtrage actif:

Le filtrage actif comprend des convertisseurs de puissance. Ce sont des sources de courant ou de tension qui éliminent les harmoniques en injectant en série ou en parallèle sur le réseau des courants ou des tensions ou les deux à la fois[12].

I.3.2.1 Filtrage actif parallèle (shunt)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (I.18), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante.



Figure I.18 : Principe de filtrage actif parallèle.

I.3.2.2 Filtrage actif série

Le filtre actif fonctionnant en compensateur de tension fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique du côté de la source et à la chute de tension harmonique due à la charge nonlinéaire. Il permet de limiter la tension harmonique aux bornes de la charge. [12]



Figure I.19 : Principe de filtrage actif série.

I.3.2.3 Filtrage actif série –parallèle:

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure (I-20). Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actifs ou (United Power Quality Conditioner). Ilpossède les avantages cumulés desfiltres actifs parallèles et série

Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée [13]



Figure I.20 : Combinaison parallèle- série

I.3.2.4 Filtrage hybride (mixte actif -passif) :

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques, le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc d'optimiser le rapport performance/coût et d'avoir une meilleure tenue de tension. De nombreuses variantes sont possibles mais peu ont été réalisées industriellement. Des performances élevées sont possibles, même avec un filtre actif de puissance réduite [20] [7]

*Filtre actif en série avec la source / filtres passifs en parallèle avec la charge:*Les filtres passifs sont accordés aux fréquences des harmoniques fortement présents sur le réseau, ils absorbent une grande partie des courants harmoniques créés par le chargé non linéaire. Le filtre actif fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique venant du côté source et à la chute de tension harmonique due à la charge non linéaire de façon à contrôler la tension harmonique aux bornes de la charge. [20] [7]



Figure I.21 : *Filtre actif série avec filtre passif parallèle* [20] [7]

*Filtre actif et filtres passifs en parallèle avec la charge :*Les filtres passifs sont accordés aux fréquences des harmoniques fortement présents sur le réseau.Le filtre actif se comporte comme une source de tension contrôlée en courant. Les composantes harmoniques du courant de la

charge sont absorbées par la branche parallèle. Le courant *is* du réseau est alors sinusoïdal. [20] [7]



Figure 1.22 : Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle

Filtre actif série connecté en série avec filtre passif parallèle



Figure 1.23 : Filtre actif série connecté en série avec filtre passif parallèle[20] [7]

I.3.2.5 Avantages et inconvénients des filtres actifs

Le filtre actif offre de nombreux avantages :

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau ;
- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante) ;
- Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction ;
- Le risque de résonance entre le filtre et l'impédance du réseau ne se présente pas comme dans le cas du filtre passif ;
- Il peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge.

Toutefois, le filtrage actif présente quelques inconvénients :

• Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance ;

- Il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif ;
- Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtrage passif.

I.3.2.6 Transformateurs à couplages particuliers.

Certains couplages de transformateurs ont pour effet de supprimer certains rangs d'harmoniques.

A. Transformateurs à couplage triangle/étoileouétoile/zig-zag

Cette solution évite la circulation des courants harmoniques 3 et multiples de 3(h3, h9, h15....) au niveau du primaire du transformateur et de sa ligne d'alimentation.

Le couplage Yzn permet également de diminuer le taux de déséquilibre en courant au niveau du primaire. [12][21]

B. Transformateurs à couplage triangle/ triangle-étoile :

Avec une charge égale sur chacun des secondaires, ce montage évite, au primaire du transformateur, la circulation des courants harmoniques 5h et 7h. [12]

<u>NB</u> : Le même résultat peut être obtenu par la mise en œuvre de deux transformateurs séparés avec les couplages respectifs triangle / étoile et étoile / étoile (DyetYy).

Pour ces deux solutions, il y a augmentation de l'impédance deligne, donc du tauxde distorsion en tension due auxautres courants harmoniques.

Des montages appelés "phase shifting" c'est un transformateur déphaseur quipeuvent être réalisés pour traiter le problème des courants harmoniques générés par plusieurs charges en parallèles de type pont de Graetz et de puissance égale.

Les déphasages voulus sont alors obtenus par les autotransformateurs montés enamont de chacune de ces charges. Ce type de solution n'aura une efficacité maximale que si toutes les charges sont alimentées. [12]

I.4. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons vules différents types de phénomènes et perturbations affectant la qualité de l'énergie électrique,leurs origines, leurs effets, et les normes qui s'appliquent aux phénomènes des harmoniques à travers des critères de quantification mises à la disposition des ingénieurs, exploitants et fournisseurs pour limiter ces perturbations [22][23].

En dehors des perturbations occasionnées par des agents externes, les charges non linéaires engendrent un bon nombre de perturbations soit à caractère permanent (harmoniques, déséquilibres...) ou à caractère transitoire (fluctuations rapides de tension). [4]Vu le progrès technologique surtout dans le domaine de l'électronique, la perspective de retour rapide aux conditions de charge linéaire est illusoire. De récentes études [4] ont démontré que la consommation de courants non linéaires va augmenter de façon très gênante dans les prochaines années.

CHAPITRE II :



II.1.Introduction :

Ce chapitre présente les modèles des systèmes photovoltaïques raccordé aux réseaux électriques, les principes de commande pour un fonctionnement optimal, la qualité et normes d'interconnexion au réseau.

II.2. Étude des impacts de la production d'ENR sur les réseaux électriques

II.2.1 Impacts sur le système de distribution

- Modification du transit de puissance
- Impact sur le profil de la tension
- Les surtensions induites par la connexion d'un générateur d'énergie
- Indice de qualification
- Illustration en simulation du problème de surtension

II.2.2 Impacts sur le système de transport

- Risque de congestion
- Incertitude du système électrique
- Changement des marges d'exploitation
- Apparition des flux d'énergie réactive
- Fermeture des grandes centrales
- Perte de la production d'énergie

II.3. Modélisation du système PV:

II.3.1. Modélisation du générateur PV

Une cellule photovoltaïque comporte en réalité une résistance série Rs et une résistance shunt

Rp. Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la cellule : La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [24][25]



Figure II.1 Circuit équivalent d'une cellule PV [24]

On note :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_p \tag{II.1}$$

Avec:

$$I_D = I_S \left[exp\left(\frac{V_{PV} + I.R_s}{nV_T}\right) - 1 \right]$$
(II.2)

$$I_p = \frac{V_{PV} + I.R_s}{R_p} \tag{II.3}$$

$$I_{S} = I_{SC} \left[exp\left(\frac{V_{OC}}{nV_{T}}\right) - 1 \right]$$
(II.4)

$$I_{SC} = I_{SCR} \left(\frac{G}{1000}\right) \tag{II.5}$$

$$V_T = \frac{KT}{q} \tag{II.6}$$

Où

- I_{PV} : Courant fourni par la cellule.
- V_{PV} : Tension aux bornes de la cellule

Id : Courant de diode.

Iph : Photo courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.

Ip : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

- Is : Courant de saturation de diode, dépendant de la température
- ISCR : Le courant de court-circuit de référence
- Vco : La tension de circuit ouvert
- VT : La tension thermique
- Rp : Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant
- Rs : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts
- G: L'irradiation solaire en W/m2
- q : Charge d'électron 1.602*10⁻¹⁹C
- K : Constante de Boltzmann 1.381*10⁻²³ Nm/°K
- n : Facture de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

T : La température effective de la cellule en kelvin.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_S \left[exp\left(\frac{V_{PV} + I.R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I.R_s}{R_p}$$
(II.7)

II.3.2. Caractéristiques I-V et P-V d'un module :

La figure (II.2) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V). A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [26]



Figure II.2 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V) [03]

La figure II.3 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) [26]



Figure II.3: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(V). [26]

La figure II.4 montre l'influence de la température sur la caractéristique I=f(V). Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique I=f(V).

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvre. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [26]



Figure II.4: L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V). [26]

La figure (II.5) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique P=fct(V) [26]



Figure II.5: L'influence de la température sur la caractéristique P=f(V) [26]

II.3.3. Association des générateurs photovoltaïques

La puissance disponible aux bornes d'une cellule unitaire est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle des générateurs photovoltaïques pour augmenter la puissance et de rendre la puissance compatible avec l'équipement électrique usuel. Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelque watt crête et quelque dizaines de watt crête, 1 m2 de cellule produit environ 100W, En fait l'association de cellules PV est analogue à l'association de générateurs de courant, en série : leurs tensions s'ajoutent, En parallèle : leurs courants s'ajoutent.

Afin d'augmenter la puissance des générateurs photovoltaïque on est obligé à grouper les cellules photovoltaïque en série et en parallèle pour obtenir un générateur mixte équivalent. L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série Ns cellules et Np parallèle est la suivante :

$$I = N_P I_{PH} - N_P I_S \quad (II.8)$$

II.4. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. [26]

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage (Figure II.6), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue [03].



Figure II.6 : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle, jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [26].



Figure II.7 : Schéma d'un quadripôle électrique

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant

(figure II.8). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [26].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante fs avec un temps de fermeture =Tds et un temps d'ouverture = (1-d) Ts. Où:

- Ts est la période de commutation qui est égale à $\frac{1}{fs}$
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).



Figure II.8 : périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trios types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les déférentes charges [26].

Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC

Chapitre II

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes. La figure (II.9) montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module .Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.[26]



Figure II.9: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT

Dans cet algorithme la dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée d'une autre manière. Elle est calculée en fonction de la tension V et sa différence dV et du courant I et sa différence dI.

Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite.

La puissance du panneau solaire est donnée par : P = VI (II.9) La dérivé partielle $\frac{dp}{dv}$ est donnée par : $\frac{dp}{dv} = I + V \frac{dI}{dV}$ (II.10) $\frac{1}{V} \frac{dp}{dv} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dv}$ (II.11)



Figure II.10: Signe de $\frac{dp}{dv}$ pour différentes zones de fonctionnement

II.5. LES CONVERTISSEURS DC/AC (ONDULEURS):

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative.la forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée.[25]



Figure .II. 11: Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé

II.5.1. Structure d'onduleur :

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue. Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant.et se compose soit d'un thyristor et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle. [25]



Figure II. 12: Structure d'un onduleur triphasée

II.5.2. Techniques de contrôle et commande de l'onduleur: [24]

L'onduleur est muni d'un système de contrôle et surveillance intelligent DCS (système contrôle commande) par le protocole Profibus. Qui permet l'optimisation de son fonctionnement. Ce système de contrôle de type numérique, doit pouvoir contrôle les grandeurs caractéristiques suivantes :

• Facteur de puissance côté C.A: le système doit contrôler le facteur de puissance côté courant alternatif, dans une plage de réglage défini.

• Tension de la section CC pour permettre la poursuite du point de puissance maximale. Le système onduleur doit toutefois pouvoir de manière autonome distinguer les conditions d'anomalie du réseau (tension et fréquence) en empêchant son fonctionnement et en le rétablissant automatiquement à la reprise des conditions de fonctionnement normal du réseau. Dans la simulation de l'installation PV plusieurs stratégies de contrôle de l'onduleur sont utilisées à fin d'atteindre le but global qui est un point de puissance maximal, un facteur de puissance élevé et un courant de forme proche sinusoïdale. Les techniques utilisées sont : La technique de maximisation du point de puissance maximale MPPT.

La technique de commande par Orientation de la Tension VOC.

La technique de commande MLI.

La technique de contrôle PLL.

II.5.2.1. Techniques de maximisation de la puissance MPPT : [24]

(Maximum Power Point Tracking) Afin de simplifier la compréhension, l'explication qui suit est appliquée à un système de panneaux photovoltaïques. Un système MPPT est un ensemble de composants incluant des onduleurs, des chargeurs de batteries, et des panneaux solaires. L'objectif est d'obtenir la puissance maximale possible depuis un (ou plusieurs) panneau(x) photovoltaïque(s), typiquement un panneau solaire. L'énergie délivrée par les cellules photovoltaïques dépend d'une équation complexe mettant en relation le rayonnement solaire, la température, et la résistance totale du circuit, ce qui conduit à une puissance de sortie non linéaire. Cette puissance peut être analysée dans un graphique I=f(U) à double entrée, en comparant l'intensité I de sortie en fonction d'une tension U (aussi appelée V dans le graphique). Le principe de fonctionnement du système est d'analyser en permanence la sortie du panneau solaire, afin d'appliquer la résistance la plus appropriée pour un environnement et des conditions donnés. Typiquement, les systèmes MPPT sont intégrés dans les convertisseurs électriques qui incluent la conversion de l'intensité I ou du voltage U, le filtrage, et la régulation pour les adapter aux différentes charges, comme le réseau électrique, des batteries ou des moteurs.

II.5.2.2. Technique de commande par orientation de la tension VOC: [24]

Par analogie avec la commande par orientation du flux (*FOC feild orienter control*) d'un moteur asynchrone, la commande par orientation de la tension VOC (en anglais *Voltage Oriented Control*) est proposée pour la commande de l'onduleur PWM.

Cette technique peut garantir une dynamique élevée et des performances statiques par la boucle interne de contrôle de courant. Cette commande est devenue très connue et par conséquent elle est développée et améliorée. La figure (II.13) montre la configuration globale de la commande par orientation de la tension pour un onduleur PWM triphasé.



Figure II.13: Bloc de la commande VOC.

Cette technique de commande utilise deux régulateurs PI pour contrôler les composantes du courant dans le plan synchrone d-q. L'axe réel du repère tournant est typiquement fixé sur le vecteur tension de ligne.

En raison des transformations des coordonnées, les composantes de courant à commander deviennent des quantités continues en régime permanent, et l'action intégrale des contrôleurs peut ainsi éliminer les erreurs statiques en régime permanent. En outre, le réglage de la tension continue est typiquement mis en application avec un contrôleur simple de type PI. La référence de la composante directe du courant *id* est obtenue par réglage de la tension continue, où on utilise un régulateur PI pour contrôler l'erreur entre la tension captée (continue) et sa référence (Obtenue par MPPT). Si on veut travailler à facteur de puissance unitaire au niveau du réseau, il faut annuler la composante en quadratique du courant *iq*.



Figure II.14: Diagramme vectoriel de la tension du réseau et du courant de ligne.

II.5.2.3. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI): [24]

Les onduleurs de tension sont le plus souvent commandés par la technique de modulation de largeur d'Impulsion (MLI), c'est-à-dire, qu'au lieu de former chaque alternance des tensions de sortie d'un seul créneau rectangulaire, on la forme d'une succession de créneau de largeurs convenables. Cela permet d'obtenir des tensions ne contenant pas d'harmoniques à basses fréquences. La technique de modulation de largeur d'impulsion retenue dans cette étude est la méthode à MLI triangulé-sinusoïdale. Les commandes des interrupteurs du convertisseur sont définies à l'aide d'un algorithme comportant uniquement des expressions algébriques, directement adaptables à un système numérique de contrôle.

Le principe montré dans la figure (II.15) consiste à comparer chacune des trois tensions sinusoïdales de référence que nous souhaitons imposer (ondes modulantes ondulantes Vri(t), i = 1, 2, 3) par un signal triangulaire de haute fréquence (porteuse). Les intersections des ondes modulantes avec l'onde triangulaire, déterminent les impulsions de commande (*S*1, *S*2, *S*3) de l'onduleur.



Figure II.15: Signaux de comparaison (référence et porteuse).

II.6. Technique de commande PLL (Phase Locked Loop). :[24]

Le concept à verrouillage déphasé à base de la boucle (PLL) a été originalement publié par Appleton en 1923 et Bellescize en 1932 pour une application de réception synchrone des radios signaux. Depuis ce temps, les techniques de PLL n'ont cessé de croitre et d'être exploités dans plusieurs domaines industriels comme les systèmes de communication, les systèmes de contrôle de moteur et le chauffage par induction. Récemment, les techniques de PLL ont été utilisées pour synchroniser les convertisseurs raccordés au réseau électrique. Un PLL idéal peut fournir l'information rapide de synchronisation avec un niveau élevé d'immunité aux perturbations, aux harmoniques, aux déséquilibres et aux distorsions dans le signal d'entrée.

II.6.1. Modélisation du Transformateur:

Considérons initialement que le transformateur est constituée d "un bobinage primaire reparti et d'un secondaire de section de fil différent. Le modèle proposé est basé sur une approximation de circuit couplée magnétique.

Ces bobinages primaire et secondaire on suppose qu'ils sont formé de m phases constituées chacune par des bobines mises en séries reparties régulièrement dans des encoches sur la totalité de son circuit magnétique [17]

La détermination du modèle d'un transformateur est basée sur les hypothèses suivantes :

- Le fer est de perméabilité infinite
- Le circuit magnétique est linéaire
- > Equation du circuit primaire [17]

On peut mettre les tensions des phases primaires sous la forme suivante :

$$[Vp] = [Rp][Ip] + \frac{d}{dt}[\mathcal{O}p]$$

(II.12)

Où :

[Vp] Le vecteur des tensions des phases primaires

[*Ip*] Le vecteur des courants de phases primaires

 $[\mathcal{O}p]$ Le vecteur des flux traversant les phases primaires

[*Rp*] La matrice diagonale des résistances des phases du primaire

$$[Vp] = [Vp1 Vp2 \dots Vpn]$$

$$[Rp] = \begin{bmatrix} R_{p1} & 0 & . & . & 0 \\ 0 & R_{p2} & 0 & . & 0 \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & 0 \\ . & . & 0 & 0 & R_{pm} \end{bmatrix}$$

(II.13)

est de l'ordre (m,m) :

$$[Ip] = [Ip1 Ip2 \dots Ipn]$$
$$[Øp] = [Lpp][Ip] + [Lps][Is]$$

Avec La matrice inductances propres et mutuelles des phases primaires est de l'ordre (m, m).

$$[Lpp] = \begin{bmatrix} L_{p1p1} & L_{p1p2} & . & L_{p1pm} \\ L_{p2p1} & L_{p2p2} & . & L_{p2pm} \\ . & . & . & . \\ L_{pmp1} & . & . & L_{pmpm} \end{bmatrix}$$

La matrice inductances mutuelles entre les phases primaires et les spires secondaires est de l'ordre (m, q).

$$[Lps] = \begin{bmatrix} L_{p1s1} & L_{p1s2} & . & L_{p1sq} \\ L_{p2s1} & L_{p2s2} & . & L_{p2sq} \\ . & . & . & . \\ L_{pms1} & L_{pms2} & . & L_{pmsq} \end{bmatrix}$$
(II.15)

Equations du secondaire [17]

De la même façon pour le bobinage secondaire du transformateur, on peut écrire son équation générale est sous la forme suivante :

$$[Vs] = [Rs][Is] + \frac{d}{dt}[\emptyset s]$$

[*Vs*] Le vecteur des tensions des phases secondaires

[*Is*] Le vecteur des courants de phases secondaires

[OS] Le vecteur des flux traversant les phases secondaires

[Rs] La matrice diagonale des résistances des phases du secondaire

Le flux total du secondaire est donnée par l'équation suivante :

 $[\mathcal{O}s] = [Lsp][Ip] + [Lss][Is]$

La matrice des inductances mutuelles entre les spires du secondaire et les phases primaires est de l'ordre (n, m) :

$$[Lsp] = \begin{bmatrix} L_{s1p1} & L_{s1p2} & . & L_{s1pm} \\ L_{s2p1} & L_{s2p2} & . & L_{s2pm} \\ . & . & . & . \\ L_{snp1} & . & . & L_{snpm} \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances propres et mutuelles du rotor est de l'ordre (q+1, q+1)

$$[Lss] = \begin{bmatrix} L_{s1s1} & L_{s1s2} & . & L_{s1sm} \\ L_{s2s1} & L_{s2s2} & . & L_{s2sm} \\ . & . & . & . \\ L_{sms1} & . & . & L_{smsm} \end{bmatrix}$$
(II.17)

Si on regroupe les deux équations du primaire et du secondaire en une seule on aura :

$$\begin{bmatrix} Vp \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ip \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Lpp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ip \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Lpp \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Ip \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Lps \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Is \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Lps \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Is \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} Vs \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rs \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Is \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Lsp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ip \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Lsp \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Ip \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Lss \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Is \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Lss \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Is \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} Vp \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} Rp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Rs \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} Ip \\ Is \end{bmatrix} + \omega \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} Lpp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Lps \\ Lss \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} Lpp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Lps \\ Lss \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Ip \\ Is \end{bmatrix}$$

Sachant que :

$$\omega \frac{d}{d\theta} [L] [I] = 0$$

II.5.2 Modélisation du Réseau électrique:

Le réseau triphasé est assimilable à trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de $2\pi/3$, et ayant même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré.

Chapitre II

Le réseau de distribution électrique est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que (*Va Vb Vc*) est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour (*Uab Ubc Uca*). [5]

On a:
$$Va = Vm\sin(wt)$$

(II.18)

$$Vb = Vm \sin(wt - 2\pi/3)$$
$$Vc = Vm \sin(wt - 4\pi/3)$$
$$Uab = Va - Vb$$
$$Ubc = Vb - Vc$$

(II.19)

$$Uca = Vc - Va$$

Les relations pour un système triphasé équilibré : [5]

$$Vm = \sqrt{2} Veff$$

 $Um = \sqrt{3} Vm$

(II.20)

$$Ueff = \sqrt{3} Veff$$

Une ligne de transmission à trois constants R, L et C distribué uniformément le long de la longueur entière de la ligne. La résistance et l'inductance forment l'impédance de série. La capacité existant entre les conducteurs. Il existe trois types de ligne de transmission à savoir : Ligne de transmission courte ;

Ligne de transmission moyenne ;

Ligne de transmission longue.

Pour notre cas d'étude la ligne de transmission est considérée comme moyenne Càd la longueur de la ligne de transmission aérienne est comprise entre 50 à 150 km et la tension de ligne est

(> 20kV et < 100kV),

Vue la longueur suffisante et la tension de la ligne, les effets de capacité sont pris en considération. Cela nous conduit aux deux circuits équivalent T et π

II.5.2.1 Représentation en π



Figure II.16: *Schéma équivalent en* π *d'une ligne*

La relation entre tension et courant de départ et d'arrivée peut être exprimée par

$$\begin{split} &Vs = Vr + IZ \\ &Is = I + Vs \cdot Y/2 \\ &Z = R + jL\omega : impédance totale \\ &Y = jC\omega : admittance totale \\ &Vs et Is peuvent être déterminés en fonction de Vr et Ir \\ &I = Ir + Vr \cdot Y/2 \\ &Vs = (Vr \cdot Y/2 + Ir)Z + Vr \quad ; Vs = (ZY/2 + 1)Vr + ZIr \\ &En substituons dans Is on a : \\ &Is = Vs \cdot Y/2 + Ir + Vr \cdot Y/2 \quad ; Is = [((ZY/2 + 1)Vr + Zir] \cdot Y/2 + Vr \cdot Y/2 + Ir \\ &Is = Y/2(\frac{ZY}{2} + 1)Vr + \frac{ZY}{2} Ir + Vr \cdot Y/2 + Ir \\ &Is = Y/2(\frac{ZY}{2} + 2)Vr + (\frac{ZY}{2} + 1)Ir \\ &Is = Y/2(\frac{ZY+4}{2}) \cdot Vr + (\frac{ZY}{2} + 1)Ir \quad et Vr = Zir \end{split}$$

II.5.2.2 Représentation en T

La ligne peut être représentée par un circuit équivalent en T tel que

-		ł	S'		•	j.	j A	i.	ż	/2	:	i.	ż	ν N	Ar	L	Ì	:			ł	:	•	X) A	: A	Ż	2	•		N	: m	L	H	r.		:	2	
							Χ.	Χ.	Υ.									ι.		۱.					Υ.	Υ.	Υ.,								. '			·	<u> </u>
÷	Ť	÷	+	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	. 10	C	۲.	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	f		•	
1	1	1		1	÷	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	1	1		1	÷	1	÷	÷	•	1	•	•	•	1	÷	÷	1	•			•	
1	1	-	Vs	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	/r	1	
1	1	1		1	1		÷	÷			÷	÷	÷	1	÷	1	÷	Ŷ	:=	÷.	÷	÷	÷	1	1	1	1				1	1	1	1	1				
2	1	÷	1	2	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷		2		1	1	÷.	÷.	÷.	2	2	2	2	2	2	2	÷.	÷.	2		2		
	0																			-																			Γ.



Puisque la tension Vc = Vr + Ir.Z/2 et le courant Ic = Vc.Y

$$\begin{split} &Is = Ir + Ic = Ir + Vc.Y = Ir + (Vr + Ir Z/2).Y \\ &Vs = Vc + Is.Z/2 = Vr + Ir.Z/2 + [(Ir + Vr + Ir.Z/2)Y]Z/2 \\ &Vs = Vr(1 + Z.Y/2) + Ir(\frac{Z}{2} + \frac{Z}{2} + \frac{YZ^2}{4}) \\ &Vs = Vr(1 + ZY/2) + Ir(Z + \frac{YZ^2}{4}) = Vr(1 + ZY/2) + ZIr(1 + YZ/4) \\ &Vs = (1 + ZY/2).Vr + Z(1 + ZY/4)Ir \\ &Is = Y.Vr + (1 + ZY/2) Ir \end{split}$$

Autrement dit les paramètres d'entrée en fonction des paramètres de sortie sont :

$$Vs = A.Vr + B.Ir$$

Is = C.Vr + D.Ir

Avec A = D = 1 + Z.Y/2, B = Z (1 + Z.Y/4) et C = Y.

II.7. Dimensionnement du filtre passif:

En conséquence de la présence courante de la pollution harmonique dans les installations et réseaux électriques, il est important que des solutions de dépollution harmoniques soit mises en œuvre. Parmi les solutions existantes, le filtrage passif qui consiste à installer un circuit LC série accordé sur la fréquence

de la composante à éliminer. [12]

Le filtre à place est un filtre LC. On rajoute une inductance en série avec le réseau afin de protéger l'onduleur si un court-circuit se produit au niveau de la connexion au réseau. Ce circuit comportant deux inductances et une capacité, il possède deux fréquences de résonance II.18:

Une résonance parallèle entre le condensateur de filtrage et la somme des inductances du réseau, l'impédance vue par l'onduleur est infinie pour cette fréquence.

Une résonance série entre le condensateur du filtre et les inductances du réseau en parallèle avec l'inductance du filtre, l'impédance vue par l'onduleur est nulle pour cette fréquence.

Afin de limiter les effets des résonances, on place une résistance d'amortissement en série avec le condensateur.

On a donc le schéma monophasé équivalent suivant



Figure II.18 : Schémas du filtre

II.7.1. Critères de choix du filtre passif:

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel. A cet effet nous avons opté pour ce type de filtrage en se basant sur les critères suivants : [12]

- ➢ Coût faible,
- Efficacité importante
- Grande capacité de filtrage en courant
- Adaptation pour des réseaux de forte puissance
- Souplesse d'exploitation

II.6.2 Inductance de protectionL₀**.**

On place une inductance de protection contre les courts-circuits entre l'onduleur et le réseau pour limiter les variations du courant de sortie de l'onduleur.

II.6.3 Inductance du filtre L (inductance de sortie de l'onduleur).

Cette inductance constituera également l'inductance du filtre LC de sortie. Elle est déterminée en fonction de l'ondulation du courant de sortie de l'onduleur et de la fréquence de découpage.

L'ondulation a été fixée à $\Delta i = 0,2$ În (20% du courant nominal crête).

Pour une régulation du courant par hystérésis, l'ondulation Δi est constante. L'inductance impose donc la fréquence de découpage.

Une valeur élevée d'inductance entraînera une résistance série parasite, vu la faible valeur du courant nominal.

II.6.4 Condensateur de filtrage C et Résistance d'amortissement R.

Dans le cas d'une commande par hystérésis le spectre de la tension de sortie ne présente pas des bandes mais un paquet d'harmoniques autour de la fréquence de découpage maximale fixée par

l'inductance L_0 . Le condensateur de filtrage et la résistance d'amortissement sont dimensionner pour maximiser la qualité du courant.

II.8. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'introduction de quelques notions et définitions relatives aux systèmes photovoltaïques, les convertisseurs DC- DC et DC- AC ainsi que les différentes technique de commande (MPPT-VOC-MLI- PLL), La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir des modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, le MPPT, filtre et réseau) ; cette modélisation est une étape essentielle permettant d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constituants.

CHAPITRE III :



III.1. Introduction :

Dans un nouveau climat économique et énergétique en Algérie, le programme national des énergies renouvelables, vise à produire 37 % des besoins en électricité, à partir de sources d'énergie renouvelable d'ici à 2030 .cette nouvelle orientation favorise l'amélioration de l'efficacité énergétique en produisant une énergie propre.

Le parc national des énergies nouvelles et renouvelables comprend actuellement 23 centrales photovoltaïques cumulant une puissance globale de 344,1 MW, réparties aux nord et au sud du payé.

Parmi les centrales photovoltaïques réalisées, celle de Hadjira Wilaya d'Ouargla (30MW) à, au niveau de la quelle notre étude est réalisée.

Ce chapitre concerne la présentation de la compagne de mesure effectuée au de la centrale de HADJIRA ainsi la simulation des composants d'un sous champ de la centrale PV connectée au réseau. Le dit sous champ est composé de générateur photovoltaïque, de l'onduleur DC/AC, de transformateur de puissance (élévateur), de filtre qui a pour tâche d'éliminer les perturbations harmoniques présentes au niveau de l'installation.[26]

III.2. Présentation de la centrale :

La centrale photovoltaïque de HADJIRA est réalisée par la société chinoise Groupement YINGLI / SINOHYDRO / HYDROCHINA pour le compte de l'entreprise Algérienne Shariket Khahraba wa Taket Moutadjadida -SKTM / Filiale Sonelgaz, sur un site à proximité de la nouvelle ville de Hadjira, avec les cordonnées géométriques 32,35° N et 05,50° E. Le terrain d'assiette est d'une envergure de 60 hectares.

La zone de Hadjira est caractérisé par une irradiation solaire qui atteint en été des valeurs d'ordre de 900 à 1000 W/m² et un climat saharien dont les conditions climatiques sont très sévères vu la température élevée et les tempêtes de sable auxquelles les régions de sud sont soumises.

L'énergie produite par ladite centrale est injectée dans le réseau de distribution de 30KV via le poste d'interconnexion 30/60KV situé à proximité. La centrale est d'une puissance nominale de 30 MWc (MW crête), répartie en 30 sous-champs de un

(01) MW chacun.



Figure III.1. Plan de masse de la centrale PV de HADJIRA

III.2.1.Éléments constitutifs du système PV connecté au réseau

- * Panneau en silicium
- * Équipement de raccordement (Boites de jonction)
- * Convertisseur (DC/AC)
- * Transformateur de puissance élévateur 0.315/30 KV 1500 KVA
- * Poste d'évacuation 30KV
- * Systèmes des auxiliaires
- * Système de commande
- * Groupe Diesel de secours



Figure III.2 Schéma de la centrale de production d'électricité PV raccordée au réseau de distribution

III.2.1.1. Caractéristiques du module PV

La cellule photovoltaïque est l'élément de base de la conversion d'énergie lumineuse (solaire) en électricité (courant continu) : c'est l'effet photovoltaïque, une des propriétés électriques des semi-conducteurs.

Un module photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série afin d'obtenir une tension souhaitée.

Au niveau la centrale PV de HADJIRA, lesdites cellules utilisées sont en poly-cristallines, sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples, dont les caractéristiques électriques à1000W/m² et 25° C sont représentées sur le tableau II.1.

Description des paramètres	Référence
Туре	YL250P-29b classe A
Puissance maximale du module (Pmax)	250 W
Courant de court circuit (Icc)	8.92 A
Tension de circuit ouvert (Voc)	37.6 V
Courant au point de MPPT (Im)	15 A
Tension au point MPPT (Vm)	1000 V

 Tableau III.1: Caractéristiques électriques du module PV

III.2.1.2. convertisseur DC/AC triphasé couplé au réseau :

Les onduleurs PV raccordés au réseau en tète de la Centrale de HEDJIRA sont du type d'onduleur PV sans transformateur, sont destinés pour convertir le courant continu du générateur PV en courant alternatif. Ils sont incorporés dans le réseau électrique via les transformateurs élévateurs externes 315/30000V.

En plus de la mission de transformation DC /AC, ils exploitent la puissance délivrée par le générateur PV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum, ils assurent également une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant soit du réseau lui-même soit de l'installation, Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau [27].



Figure III. 3 Circuit électrique équivalent de l'onduleur de tension. [28]



Figure III.4 Local de convertisseur inclut 2 onduleurs

Figure III.5 Convertisseur installé à la centrale de 500KW.

Tableau III.2 : Caractéristiques électriques de l'ondul	eur
---	-----

Données d'entrées DC								
scription des paramètres	Référence							
nsion maximale DC	1000 Vdc							
nsion de démarrage	520 V							
ge de tension MPPT à pleine charge	500 V~ 850 V							
nsion minimale	500 V							
issance DC maximale	560 KW							
urant d'entrée max	1120 A							
Données de sortie AC	·							
scription des paramètres	Référence							
issance de sortie nominale	500 KW							
Puissance de sortie maximale	550 KW							
Courant de sortie AC maximale	1008 A							
Tension nominale de grille	315 Vac							
Plage de tension admissible de la grille triphasée	252 Vac~ 362 Vac							
Fréquence nominale de la grille	50 Hz / 60 Hz							
Fréquence admissible de la grille	47 ~ 52 Hz / 57 ~ 62 Hz							
Taux de distorsion de la forme d'onde du courant total	< 1.5 % (Puissance nominale)							
Composante du courant AC	< 0.5 % (Courant nominal de sortie)							
Facteur de puissance	0.9 (en avant) ~ 0.9 (en arrière)							

III.2.1.3. Transformateur élévateur triphasé 0.315/30 K V

Le raccordement au réseau s'effectuera en HTA (30 kV). De ce fait, la présence de transformateur élévateur (BT/HTA) est indispensable. Ce dernier est de marque SUNTEN et implanté dans le poste à proximité immédiate des onduleurs.

Description des paramètres	Référence
Туре	ONAN
Isolement	Huile minérale
Capacité nominale	1250 KVA
Tension nominale	0.315/30 KV
Fréquence nominale	50 Hz
Niveau d'isolement	36 KV
Groupe de connexion	DY11-Y11

 Tableau III.3 : Caractéristiques techniques du transformateur élévateur





L'avant du contenu du local en cabine, est un transformateur, tandis que l'arrière est une cellule de boucle et de distribution.

III.2.1.4. Poste d'évacuation 30KV

Le poste d'évacuation comporte huites cellules dont :

- Six (06) cellules arrivées des trois boucles du système
- Une (01) cellule départ auxiliaires
- Une (01) cellule départ réseau de distribution 1250A



Figure III.8 : Poste d'évacuation de la centrale

III.2.1.5. Système PV de Hadjira connecté au réseau de distribution 30 KV

Le générateur PV de la centrale connectée au réseau de distribution 30 KV de Hadjira, est composé de 120120 modules de 250Wc, répartis en 30 sous-champs de un (01) MW, chacun est composé de:

- Quatre vingt et onze (91) chaines, chaque chaine regroupe deux (02) string en parallèle et chaque string contient vingt et deux (22) modules en série (soit 4004 modules par sous champ)
- ✤ Un (01) compartiment contenant deux (02) Onduleurs triphasés de 500W chacun
- Un (01) transformateur élévateur triphasé 315/30000 V de puissance nominale de 1500 KVA

L'énergie produite par l'ensemble des sous champs est transitée en connectant le secondaire de chaque transformateur au jeu de barres 30KV du poste d'évacuation par des câbles souterrains, puits vers le réseau de distribution via un disjoncteur départ 30KV.

Le système auxiliaires contient le groupe de secours, redresseurs chargeurs batteries, éclairage, télésurveillance et d'anti intrusion, détection et lutte anti-incendie.

Nb du S /Champ	Type du module	Puissance du S/Champ	Nb de modules/ S/champ	Nb de chaines/ S/champ	Nb de modules/ chaine	Puissance du module	Rendement du module
30	Poly ristallin	1MWc	4004	91	44	250W	15%

 Tableau III.4: Structure de la centrale PV



Figure III.9 Schéma synoptique d'un sous champs du GPV

III.2.2. Campagne de mesures des harmoniques

La compagne de mesures de la pollution est très importante car elle permet de caractériser les installations et de s'assurer de la bonne qualité de l'énergie distribuée. Plusieurs critères existent pour mesurer les perturbations harmoniques mais c'est la Distorsion Totale des Harmoniques (en anglais, Total Harmonic Distorsion, THD) qui est le plus couramment utilise [3].

$$\mathbf{I}(t) = \sqrt{2I1} (\omega 1 \ t + \varphi 1) + \Sigma \sqrt{2IhSin} (h\omega 1 t + \varphi h)$$
(II.1)

11: Valeur efficace du courant du fondamental

Ih: Valeur efficace du courant harmonique de rang h

- φ_1 : Déphasage du courant fondamental
- φh : Déphasage de l'harmonique de rang h

Le *THD* étant défini comme le rapport entre la résultante de toutes les composantes harmoniques $(h \ge 2)$ et le TDR peut être exprimé en pourcentage et calculé comme suit :

$$TDR = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{I_h}{I_1}$$
(II.2)

I : Valeur efficace de i(t)

Ih : Résultante des composantes harmonique [14]

Dans notre étude pratique une campagne de mesure a été réalisée le 31 mai 2018 au niveau de la centrale de hadjira pour déterminer les taux d'harmoniques injectées par l'onduleur a l'aide d'un analyseur de réseau électrique type QUALISTAR plus C.A 8335 du fabricant CHAUVIN ARNOUX (Figure II.12), Il permet

Cette étude menée avec un certain nombre de données nous a permis de visualiser pratiquement le comportement du courant fondamental et les harmoniques existants les plus répandus sur le système électrique de la central). Ces perturbations harmoniques sont ceux qui produisent des effets néfastes sur le réseau électrique.

La norme IEC 61000-4-7 définit les méthodes de mesures des harmoniques. Cette dernière tolère un taux d'harmonique dans le réseau qui ne dépasse pas 5% pour la tension et 10% pour le courant.

III.2.2.1. Analyseur d'énergie C.A 8335 (QUALISTAR)

Le C.A 8335 (Qualistar) est un analyseur de réseau triphasé AC+DC 1000 Vrms catégorie III ou 600 Vrms catégorie IV (IEC61010-1) à affichage graphique. Son rôle est triple. Il permet de : - Mesurer les valeurs efficaces des grandeurs et des perturbations électriques dans les réseaux de distribution.

- Obtenir une image instantanée des principales caractéristiques d'un réseau triphasé.

- Suivre les variations des différents paramètres dans le temps a été utilisé afin de déceler ces harmoniques.



Figure III.10 Appareil d'Analyse de la qualité d'énergie électrique

Les facteurs les plus importants pris dans les mesures sont :

- La tension : qui doit être plus de 400 V et ne doit pas dépasser les 440 V (c'est relatif aux caractéristiques des équipements installés).
- Déséquilibre : ne doit pas dépasser 10%, (c'est le courant qui circule dans le neutre)
- Le Cos phi : doit être supérieur ou égale à 0.8944.
- Le taux d'harmonique ne dépasse pas les 5% selon la norme CEI61000-4-7.

A la sortie du l'onduleur, l'appareil a été branché comme l'indique la figure suivante et programmé d'effectuer les mesures pour une période plus de 24 heurs.

Le type de branchement réalisé est le triphasé 5 fils.



Figure III.11 Opération de mesure sur site

III.2.2.2. Les données météorologiques sont représentées dans la figure suivante :

Les données météorologiques lors des mesures au niveau de station météorologique sont :

Température: 27.7°C,

Rayonnement: 1100 WC/h,

Pression: 292.3hPa,

Vitesse de vent: 6.7m/s,

Humidité: 39.5%

Le résumé des mesures électriques est présenté dans les figures suivantes :

III.2.2.3. Résultats des mesures:

Les grandeurs mesurées pour chaque phase sont :

- Mesure des valeurs efficace(RMS) s des tensions alternatives jusqu'à 1000 V entre bornes.
- Mesure des valeurs efficaces (RMS) des courants alternatifs jusqu'à 6500 A (neutre compris).
- Mesure de la fréquence des réseaux 50 Hz.
- Mesure du facteur de distorsion (DF) des courants et des tensions (hors neutre).
- Mesure des puissances actives, réactives et apparentes par phase et cumulées (hors neutre).
- Mesure des facteurs de puissance (PF).

Les résultats présentés sont obtenus suite à la mesure réalisée sur une durée plus de vingt quatre heures (24) heures, du mercredi 30 à 13h50 au Jeudi 31 Mai 2018 à 15h30, Pour toutes les mesures présentées, la période d'échantillonnage est de dix minutes (10 min.), les phases de sortie de l'onduleur 01, 02 et 03 sont toujours identifiées par les couleurs noire, rouge et bleu respectivement.

La Figure II.12 montre le profil de la fréquence de l'onduleur, elle varie dans un intervalle compris entre 49,99 Hz et 50,04 Hz. On observe que la fréquence de l'onduleur est très stable autour de sa valeur nominale (50 Hz).



Figure III.12 Profil de la fréquence de l'onduleur 500W

La Figure III.17 montre l'allure de la tension simple, valeurs efficaces (RMS), pour chaque phase de l'onduleur. On remarque que la plage de variation des tensions sortie onduleur est différente pour chaque phase. Entre 52.11 et 61.92V pour la phase 01, entre 51,51et 62,37V pour la phase 02 et entre 51,48 et 62,4V pour la phase 03.





La Figure III.18 montre les valeurs efficaces (RMS) du courant pour chaque phase. On observe le courant de la phase 03 est supérieur aux deux autres courants faibles.


Figure III.14 Courant pour les trois phases







Figure III.16 Puissance réactive pour les trois phases



Figure III.17 THD tension pour les trois phases



Figure III.18 THD courant pour les trois phases

III.1.1.1. Conclusion :

D'après les résultats des mesures données par les courbes, nous constatons que le THD de la tension est dons les normes, tandis que celui du courant qui est 12.34% dépasse la valeur max imposée par la norme

Et qui est fixée à 10%.

Quelles solutions envisager ?

Des filtres anti-harmoniques accordés sur une fréquence harmonique. Ces filtres sont caractérisés par une impédance faible aux fréquences nécessitant une atténuation importante. C'est la solution optimale.

III.2. Simulations de système photovoltaïque raccordé au réseau :

Dans cette partie nous avons simulé sous l'environnement MATLAB/SIMULING tous les équipements représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique de distribution pour un seul sous champ de la centrale PV de HADJIRA.

Cette opération est réalisée dans le but de faire apparaitre la mission principale du filtre passif dans l'élimination des harmoniques affectant le système d'alimentation électrique.

Tout d'abord nous avons procédé à la simulation du système suscité sans filtre, puis avec filtre, et cela nous permettra de comparer les résultats des deux étapes.

III.2.1.Simulation sans filtre



Figure III.19 Schémas bloc de l'association GPV, Onduleur et Réseau électrique

Simulation du générateur PV

Le GPV à simuler est celui d'un seul onduleur de 500W avec 91 chaines en parallèle avec 22 modules en série dans chaque chaine, pour différentes valeurs de température et irradiation.

Température fixe 25 °C





Figure III.20 a Caractéristique I(V) et P(V) du du GPV en fonction de l'éclairement

Figure III.20 b Caractéristique I(V) et P(V) GPV en fonction de la température

D'après la figure III.20 b, la température influe négativement sur la tension du circuit ouvert

- (l'augmentation de la température, conduit à la diminution de la tension).
 - Egalement pour la puissance qui diminue avec l'augmentation de la température. On constate bien sur la figure III.20 a, que la puissance et le courant du générateur PV dépendent directement de la puissance du flux lumineux, tandis que la tension change peu en fonction du dit flux.



Simulation du système PV connecté au réseau avant filtrage

Figure III.21 Schémas bloc de l'association GPV, Onduleur et réseau électrique

- 2002 panneaux (91 chaines en parallèles avec 22 panneaux en séries pour chaque chaine)
- Un onduleur de 500w

Paramètres météorologiques du site : Température de station : 27.7°C, Rayonnement : 1110W/m² Pression station : 292.3 hPa Vitesse de vent station: 6.7m/s Humidité station: 39.5%



Figure III.22 Allure du courant à la sortie de l'onduleur et sa représentation spectrale avant filtrage



Figure III.23 Allure de la tension à la sortie de l'onduleur et sa représentation spectrale avant filtrage





Figure III.24 Schémas bloc de l'association GPV, Onduleur, filtre et réseau électrique



Figure III.25 Allure du courant à la sortie de l'onduleur et sa représentation spectrale après filtrage



Figure III.26 Allure de la tension à la sortie de l'onduleur et sa représentation spectrale après filtrage

Calculer la puissance réactive monophasée Q (var) requise pour la compensation

$$C_{tot} = \frac{Q}{\left(\omega_I . V_{CI}^2\right)} \tag{2.28}$$

V_{CI} :valeur efficace de la tension fondamentale aux bornes du condensateur

 $\omega = 2\pi f$; f est la frequence fondamentale (50 Hz)

$$E_{s} = U_{c} + \frac{U_{L}}{5_{2}} \qquad M_{5} = \left(\frac{I_{5}^{2}V_{CI}^{2}}{5}\right) \cdot (U_{c} + U_{L}) \qquad (2.31)$$

$$Q_{F5} = \sqrt{\frac{M_{5}}{E_{5}}} \qquad C_{5} = \frac{Q_{F5}}{\omega I \cdot V_{C\,I\,F5}^{2}}$$

$$Q_{F7} = \sqrt{\frac{M_{7}}{E_{7}}} \qquad C_{7} = \frac{Q_{F7}}{\omega I \cdot V_{CIF7}^{2}}$$

$$I_{hp} = \sqrt{\sum_{h=11}^{50} I_{h}^{2}} \qquad Q_{Fph} = \sum_{h=11}^{50} \sqrt{\frac{M_{ph}}{E_{ph}}} \qquad C_{ph} = \frac{Q_{Fph}}{\omega_{I} \cdot V_{cIFph}^{2}}$$

QFtot = QF5 + QF7 + QFph

$$C_{tot} = C_5 + C_7 + C_{ph}$$

 $1_{5}, 1_{7}$: valeurs efficaces des courants harmoniques de rangs 5 et 7 parcourant respectivement les filtres résonants accordés L_{5} - C_{5} , L_{7} - C_{7} ;

 I_{ph} : valeur efficace des courants harmoniques de rangs supérieurs à 11 parcourant le filtre passehaut ;

*C'*_{tot} : valeur totale des condensateurs à utiliser pour obtenir un coût minimum sur chacun des filtres.

S'il n'y a pas de contingence sur la correction du facteur de puissance, C_5 . C_7 et C_{ph} sont utilisés comme valeurs initiales de filtre, sinon on augmente la capacité totale de façon proportionnelle sur chacun des filtres (résonants et passe-haut) suivant les équations suivantes :

$$C_5 = C'_{tot} \cdot \frac{Q_{F5}}{Q_{Ftot}} \qquad \qquad C_7 = C'_{tot} \cdot \frac{Q_{F7}}{Q_{Ftot}} \qquad \qquad C_{ph} = C'_{tot} \cdot \frac{Q_{Fph}}{Q_{Ftot}}$$

 Q_{F5} , Q_{F7} : Puissance réactives (var) monophasées des filtres résonants accordés respectivement sur les 5^{ième} et 7^{ième} rangs harmoniques ;

 Q_{ph} : Puissance réactive (var) monophasée du filtre passe-haut ;

 Q_{Ftot} : Puissance réactive (var) monophasée totale de l'ensemble des filtres (filtres résonants + filtre passe-haut).

Déterminer les valeurs des inductances des filtres résonants et du filtre passe-haut

$$L_5 = \frac{1}{(2\pi f \times 5)^2 C_5} \qquad \qquad L_7 = \frac{1}{(2\pi f \times 7)^2 C_7} \qquad \qquad L_{11} = \frac{1}{(2\pi f \times 11)^2 C_{11}}$$

 f_n est la fréquence de résonance du filtre n ; $f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_nC_n}}$;

Donc les paramètres de filtre sont :

$$\label{eq:pc} \begin{split} & Pc = Qc/50 = 500e2 \; /50 = 10e2 = 1000 \; W \\ & Q_L = 10 \; VAR \\ & Q_c = \! 500e2 = 500.10^2 \; VAR \end{split}$$

D'après les figures (III.22 et III.23) on observe la forme déformée de la tension et celle du courant aux bornes du GPV.

La mesure du THD des deux grandeurs donne pour la tension **43.60%** et pour le courant **21.23%**.

D'après les figures III.25 et III.26 on remarque que l'intégration du filtre améliore bien la forme du courant et de la tension à la sortie de l'onduleur.

Les deux grandeurs ont regagné leurs formes sinusoïdales presque parfaites et suite à cela, les THD de tension et de courant sont respectivement réduits à **4.96% et 4.31%** d'après les figures susmentionnées.

III.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation du système photovoltaïque connecté au réseau avec l'illustration des différentes opération que subit la tension produite par le générateur PV à fin de satisfaire les besoin de la charge. Le problème des harmoniques a été présenté, l'analyse spectrale du courant et de la tension de réseau ont montré l'effet de la perturbation harmonique sur la qualité de l'énergie fournir par le GPV et les résultats de simulation ont prouvés l'efficacité de l'ajout d'un filtre passif à la sortie de l'onduleur pour améliorer la qualité de la tension et du courant injectés au réseau.

Donc la présente étude confirme bien que la solution de filtrage passif est efficace, simple, robuste et moins coûteuse. Quant à la conception, elle-même est très facile et moins chère si on dispose d'outils adéquats d'analyse de qualité et de simulation numérique.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La fonction principale et l'objectif essentiel du réseau électrique depuis la construction des premiers réseaux étaient la fourniture et l'acheminement de cette énergie aux différents, consommateurs avec continuité et bonne qualité. Cependant vue la construction complexes des réseaux électriques et la diversité des différents éléments assurant l'acheminement de cette énergie, la qualité de cette dernière sera sans doute exposé à des perturbations dans les différents étages de la chaine.

On a établi, dans le cadre de ce travail, dans un premier cas une vue générale sur les perturbations causés par les charges non linéaires, leurs origines, leurs effets nuisibles sur le réseau électrique ainsi que les différentes solutions pour les atténuer ou les éliminer, notamment filtrage passif et filtrage actif.

Dans la deuxième partie et pour application de notre étude sur le système photovoltaïque, nous avons procéder à la présentation générale de la centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution 30KV de HADJIRA (30MW) au niveau de la quelle une opération de mesures a été effectuée pour mettre en évidence le niveau des perturbations harmoniques et la qualité des deux principales grandeurs pouvant être dégradée qui sont la tension et le courant.

Les dites mesures prises à la sortie de l'un des onduleurs 500W en utilisant un analyseur de qualité d'énergie électrique ont montré que les valeurs mesurées dépassent celles normalisées THDi : 12.34% ce qui rend une solution de filtrage nécessaire.

La troisième partie consiste à l'étude par simulation sous l'environnement Matlab Sumuling d'un sous champ parmi les trente autres de la centrale PV de HADJIRA connectée au réseau de distribution.

Nous avons procédé à la modélisation des différents organes constituant la chaine de production (GPV, Onduleur, Transformateur élévateur et réseau électrique) et la simulation du sous champ dont on a pu mettre en évidence les perturbations harmoniques dues au convertisseur d'électronique de puissance DC/AC,

Une solution a été proposée pour l'élimination ou la réduction de ces harmoniques qui consiste à la mise en place d'un filtre passif à la sortie de l'onduleur.

D'après les résultats de la simulation, les courbes obtenues de la tension et du courant avant filtrage présentent le THD élevé, par contre les courbes obtenues après filtrage ont montré que le THD de tension a été réduit de 43.38% à 2.01% et pour le courant de 13.66% à 2.93%, ces

résultats satisfaisantes ont bien montré l'influence des perturbations sur la qualité et la forme d'onde des deux grandeurs principales (tension et courant) et ont montré également la nécessité du système de filtrage.

Références Bibliographiques

[1] OMARI A. KENNAZ A.S. « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant généré par une charge polluante » Thèse de master présentée à l'université de LARBI TEBESSI TEBASSA.

[2] Sahli Abdeslem, « Filtrage actif et contrôle de puissances: application aux systèmes Photovoltaïques interconnectés au réseau. », Thèse de magister en Electrotechnique Présenté à la faculté de Technologie, Université FERHAT ABBAS – SETIF UFAS (ALGERIE).

[3] MIDOUNE N et HIKA M, « Etude par simulation des effets des harmoniques et de la puissance réactive sur le réseau électrique», Mémoire de master présentée à la faculté des sciences appliqués , département de génie électrique , Université KASDI MERBAH Ouargla MAI 2016.

[4] YOUSFI Abdelkader, « Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension à cinq niveaux» mémoire de magister en électrotechnique présenté à l'université de Hassiba Benbouali de Chlef année 2008.

- [5] MEDOUR Youcef « Etude de raccordement d'un système photovoltaïques au réseau électrique » Mémoire de master présentée à l'université de KASDI Merbah Ouargla Juin 2015.
- [6] Eric Labouré, François Costa, Lionel Pichon «Compatibilité électromagnetique»
- [7] ZIDANE Abdallah, ZELLOUMA Said « Compensation des harmoniques et de la puissance réactive à l'aide du filtre actif parallèle», Thèse de magister en Electrotechnique Présenté à la faculté de Technologie Université Echahid Hamma Lakhder

d'El-Oued Juin 2015.

[8] Schneider Electric « Détection et filtrage des harmoniques ».

[9] GALOU E, HAMANI R., « Contribution à la commande d'un filtre actif parallèle », Mémoire de master en commande Electrique, département génie électrique, Université Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2017

[10] BOUCIF A. « Filtrage actif d'un réseau électrique », mémoire de master en commande Electrique, département génie électrique Université Mohamed Khider Biskra, 2014 [11] BOUKADOUM. A. « Contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique », Mémoire de magister présentée à la faculté des sciences de l'ingénieur, département d'électrotechnique, Université BADJI MOKHTAR Annaba 2007.

[12] DOUAR HAKIM, « Evaluation du cout des pertes générées par les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques », Thèse de magister présenté à l'université de Boumerdes 2006

[13] MARCEL DANIEL 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 » Thèse de doctorat en Electrotechnique, Université du Québec à Trois-Rivières SEPTEMBRE 2010.

[14] SANAE RECHKA, « Étude de méthodes de filtrage des Harmoniques dans les réseaux électriques de distribution », Thèse de doctorat en Electrotechnique Université du Québec à Trois-Rivières, Avril2002

[15] Mohammed ALAMI « Etude et analyse des harmoniques générés dans le réseau électrique» Rapport de fin d'études présenté à la faculté des sciences et techniques, Département Génie électrique Université Sidi Mohammed Ben Abdellah FES.

[16] Zineb HAOUATE, Lamyae ELOGRI « Etude et analyse des harmoniques générés dans le réseau électrique MT & BT » Rapport de fin d'études présenté à la faculté des sciences et techniques, Département Génie électrique Université Sidi Mohammed Ben Abdellah FES.

[17] STEEVE BEAULIEU, « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », Thèse de doctorat présenté à l'université du QUEBEC A CHICOUTIMI Mai 2007

[18] REKIK BADRI, «Etude et modélisation des défauts des transformateurs de puissance» mémoire de magister présentée à l'UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA.

[19] Edward Wilson Kimbark « Direct current transmission », Volume 1, New York-Wiley Interscience Division, United States 197 [20] Fang Z. Peng, Gui-Jia Su, and George Farquharson « A series LC filter for harmonie compensation of AC drives », Power Electronics Specialists Conference , PESC 99. 30 annual IEEE, VoLl , pp. 213-218, 1999

[21] Hideak Fujita and Hirofumi Akagi, « A practical approach to harmonic compensation in power systems - series connection of passive and active filters », Industry Applications Society Annual Meeting, 1990., Conference Record of the 1990 IEEE, Vol.2, pp. 1107-1112, 7-12 October 1990.

[22] Michael Balducci, Ajitha Choudary, and Jonathan Hamaker, « Comparative analysis of FFT algorithms in sequential and parallel form », The 1996 Mississippi State University Conference on Digital Signal Processing, Paralle1 DSP Group / Department of Electrical and Computer Engineering / Mississippi State University, pp. 5-16, 2 December 1996.

[23] Timothy A. George and David Bones, « Harmonic power flow determination using the fast Fourier transform», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No 2, pp. 530-535, April 1991 .

[24] MISSOUM MOHAMMED «Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie» Thèse de magister, Université Hassiba BENBOUALI de Chlef Décembre 2011

[25] CHEBANA Abdelkrim, « Contrôle d'un système photovoltaique connecté au réseau» mémoire de master présentée à l'université de Biskra Juin 2014.

[26] BEMANA NGUEOUELE Yannick « Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public » Mémoire de master en Energie et Procédés Industriels 2iE/LESEE Juillet 2012.

[27] BOUKEZATA Boualem «Système solaire photovoltaïque connecté au réseau électrique et associé à un filtre actif parallèle» Poster de publication à l'Université de

[28] MURTADHA MED SULTAN AL-MOGHALLES, «Étude Et Simulation De L'intégration Des Systèmes PV Dans Les Réseaux Électriques Intelligents (SMART GRIDS)» mémoire de master présentée à l'université de KASDI Merbah Ouargla 2015.

Résumé :

L'utilisation des convertisseurs de l'électronique de puissance a augmenté sensiblement le niveau de la pollution harmonique des réseaux électriques. En effet, ces équipements, considérés comme des charges non linéaires, absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment de la puissance réactive.

Le passage des courants harmoniques dans l'impédance du réseau électrique entraîne inévitablement des tensions harmoniques et par conséquent, pollue les consommateurs alimentés par le même réseau. Alors, une action technique, pour réduire l'effet indésirable de ces harmoniques, est devenue indispensable et ce, pour assurer la qualité souhaitée de l'énergie électrique.

A cet effet, ce document présente d'abord une étude justifiant la présence des perturbations harmoniques causées par les convertisseurs statiques, puis les moyens techniques traditionnels et modernes existants pour permettre leur atténuation.

Toutefois, dans le cadre de la réalisation de ce mémoire une attention particulière est réservée aux mesures, analyses et méthodes de réduction ou atténuation des perturbations harmoniques au niveau du convertisseur statique (Onduleur) d'une centrale Photovoltaïque connectée au réseau électrique de distribution (Application à la centrale Photovoltaïque de HEDJIRA W OUARGLA).

Mots Clés : Harmoniques, pollution, réseaux électriques,

Abstract:

The use of the converters electrics of power appreciably increased the level of the harmonic pollution of the electrical supply networks. Indeed, this equipment, considered as nonlinear loads absorbs nonsinusoidal currents and consumes reactive power.

The passage of the harmonic current in the Impedance of the electrical supply network inevitably involves harmonic tensions and consequently, the consumers supplied pollute with the same network. then, a technical action to reduce the adverse effect of these harmonics became essential to ensure the desirable quality of the electric power.

On effect, this memorandum presents initially a study justifying the presence of the harmonic disturbances caused by the static inverters, then, average the existing techniques traditional and modern allowing their attenuation.

However, in the framework of the realization of this work, particular attention is reserved to the measurements, analyzes and methods of reduction or mitigation of harmonic disturbances at the level of the static converter (Inverter) of a Photovoltaic power station connected to the electrical network of distribution (Application at the Photovoltaic plant in HEDJIRA OUARGLA)..

Index Terms : Harmonics, pollution, electrical networks,

ملخص

استعمال محو لات الكترونات القدرة تزيد بصفة محسوسة درجة تلوث التوافقي في الشبكات الكهربائية، ولذلك هذه التجهيز ات تعتبر كحمو لات غير خطية تمتص تيار ات غير جيبيه و تستهلك القدرة المفعلة.

مرور التيار التوافقي في ممانعة الشبكة الكهربائية يؤدي حتما إلى خلق توترات توافقية وبالتالي تلوث الأنظمة التي تتغذى بنفس الشبكة، لذلك اصبح من الضروري اجراء تقنيات من أجل تخفيض التأثيرات الغير مر غوب فيها لهذه التوافقيات من أجل ضمان النو عية المطلوبة للطاقة الكهربائية.

لهذا الغرض، هذه المذكرة تعرض أولا دراسة مبررة لوجود هذه الاضطرابات للتوافقيات الناجمة عن المحولات الساكنة، ثم الوسائل التقنية التقليدية والحديثة الموجودة التي تسمح بتخفيضها.

ومع ذلك وفي إطار تقديم هذه المذكرة، اهتمام خاص أوليناه للقياسات، التحليلات وطرق الحد أو تخفيف الاضطرابات التوافقية على مستوى المحول الثابت (العاكس) لمحطة توليد الطاقة الكهربائية الضوئية المتصلة بشبكة التوزيع (تطبيق على محطة توليد الطاقة الكهربائية الضوئية بالحجيرة ولاية ورقلة)

كلمات مفتاحية : التوافقيات، والتلوث، والشبكات الكهربائية،