

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département d'Électrotechnique

Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
de Master en Électrotechnique

THÈME

*Modélisation et simulation en temps réel de la
mise en parallèle de « dix et de douze »
onduleurs*

Présenté et étudié par :

DAOU Hocine

Proposé et dirigé par :

T.ZEBBADJI

Promotion 2013

ENP-10 Avenue Hacén Badi, B.P 182, EL-Harrach, 16200, Alger, ALGERIE

*« Le succès c'est d'être capable d'aller d'échec en échec sans
en perdre espoir »*

Winston Churchill

*« Le savoir que l'on complète pas chaque jour diminue tout
les jours »*

*« Ce qui importe avant tout est de ne pas cesser de
s'interroger. La curiosité a sa raison d'être. On ne peut
s'empêcher d'éprouver un sentiment d'effroi mêlé
d'admiration lorsqu'on réfléchit aux mystères de l'éternité, de
la vie et de la merveilleuse structure de la réalité. Il suffit
d'essayer d'en comprendre un peu plus tous les jours. Il ne
faut jamais perdre une sainte curiosité. »*

Remerciements

Au terme de ce travail,

J'adresse mes remerciements à M. Mohamed MAHMOUDI professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse d'ingénieur, je le remercie aussi pour le savoir qu'il m'a transmis durant ma formation d'ingénieur en électrotechnique.

je remercie également Mme Houria SAHRAOUI enseignante à l'Ecole Nationale Polytechnique d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer la thèse d'ingénieur ainsi que pour les connaissances qu'elle m'a transmises.

Je remercie également l'ensemble du jury examinateur du Master, Professeur R.TAHMI, Professeur A.BOUBEKRUR, Professeur LNEZLI ainsi que tout enseignant présent et évaluateur de mon travail du Master.

Cette thèse n'aurait pas pu avoir lieu sans un encadrement de très grande qualité, celui de M. Taher ZEBBADJI enseignant au département d'Electrotechnique de L'Ecole Nationale Polytechnique pour avoir proposé et encadré ce sujet de thèse et pour son appui scientifique et sa disponibilité durant la préparation de notre projet de fin d'études. Ainsi que pour ses aptitudes pédagogiques dont il a fait preuve, et ses remarques constructives, la qualité des discussions qui ont ponctué ce travail. On le remercie également pour son aide précieuse et continue pendant la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à remercier l'ensemble des enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique pour leur encadrement tout au long de mes cinq années de formation.

Enfin, que ce mémoire soit pour moi l'occasion d'exprimer toute mes reconnaissances à mes parents pour leur patience et leur soutien réel qu'ils m'ont apporté.

*A ceux qui me sont les plus chers sur cette terre, ma raison de vivre,
mes sources de succès, ceux qui m'ont apporté une tendresse
incomparable et une affection inouïe « MES PARENTS », dont
l'affection est l'essence de ma réussite et l'éducation mon guide de
vie, sans eux je ne saurais pas comment je peux être la aujourd'hui.*

*À mes deux petits amours à moi, mes précieux, mes uniques, ceux qui
avaient, ont et auront toujours leur place intouchable dans mon
cœur ; Ma sœur Lydia, ma bien aimée à moi,
Mon frère Arras que j'adore*

A Toute ma famille

A Sami

A tous mes amis

ملخص

النمذجة المتوسطة للمحولات الثابتة موضوع العديد من الدراسات. وبالفعل، نهتم بتحويل النظام الأصلي إلى نظام مستمر يمثل ظاهريا السلوك الديناميكي و الدائم للدائرة من اجل دراسة استقراريتها في الحلقة المفتوحة. لذلك إشكالية مشاركة التيار الكهربائي الممون من طرف المموجات المتصلة بالتوازي مع شبكة الكهرباء تشكل موضوعا حاليا للباحثين في تكنولوجيا إلكترونيك القدرة. وفي وجهة النظر هذه، العديد من الباحثين يحاولون إيجاد حل لهذه المعضلة. لذا أهدافنا في هذه المذكرة تتمثل في النمذجة والمحاكاة الزمنية لربط "ن" مموج على التوازي مع الشبكة الكهربائية و أيضا تجربة فعالية المنظمات أثناء مرور بعض العيوب الكهربائية في الحلقة المغلقة. وهذا لم يكن ليصبح ممكنا لولا دراسة الاستقرارية في الحلقة المفتوحة التي سمحت باستنتاج شروطها. كلمات مفتاحية: قاطعة، ربط على التوازي، نمذجة، محاكاة زمنية، عيوب.

Résumé

La modélisation moyenne de convertisseurs statiques fait l'objet de nombreuses études. En effet, nous avons intérêt à transformer le système original en un système continu qui représente macroscopiquement au mieux les comportements dynamiques et statiques du circuit en vue d'une étude de stabilité en boucle ouverte. Cependant, la problématique du partage de courant de sortie d'une batterie d'onduleurs connectés en parallèle à un réseau est d'actualité pour la communauté de l'électronique de puissance. Dans cette optique, plusieurs auteurs ont essayé d'apporter une solution pour cette préoccupation.

Dans cette perspective, les objectifs de cette thèse visent à la modélisation et la simulation en temps réel de la connexion de « n » onduleurs en parallèle au réseau avec test de fiabilité des correcteurs en présence de quelques avaries électriques en boucle fermée. Et ceci n'a été possible qu'après le passage par l'étude de stabilité en boucle ouverte afin d'en tirer les paramètres de stabilité.

Mots clés :

Interrupteur, mise en parallèle, modélisation, simulation temps réel, défauts.

Abstract

The average modeling of static inverters is the subject of many studies. Indeed, we may find it beneficial to transform the original system into a continuous system which macroscopically represents at best the dynamic and static behaviors of the circuit for a study of stability in open loop. However, the problems of sharing the output current of the parallel connected inverters to a network are a real big scientific issue for Electrical Engineers, Scientists and Industrial Companies. Accordingly, several authors tried to bring a solution for this concern.

From this point of view, the goals of this thesis is to modeling and real time simulating of the connection of "N" inverters in parallel to the network with efficiency test of the correctors in the presence of some electric troubles. And this wouldn't be possible without the passage by the study of stability in open loop in order to find the stability parameters.

Key words:

Switch, parallel connection, modeling, real time simulation, defects.

<i>Table des figures</i>	viii
<i>Liste des tableaux</i>	ix
<i>Introduction Générale</i>	x
I. CHAPITRE I L'ETAT DE L'ART SUR LES ONDULEURS	17
I.1 <i>Types d'onduleurs</i> :.....	18
I.1.1 L'état de l'art de l'onduleur de tension	18
I.1.2 L'onduleur de courant CSI (Current Source Inverter)	20
I.1.3 Les onduleurs autonomes.....	20
I.1.4 Les onduleurs non autonomes	20
I.2 <i>Les interrupteurs en électronique de puissance</i>	21
I.3 <i>La conversion de l'énergie électrique en électronique de puissance</i>	21
I.4 <i>Utilisation des onduleurs</i>	21
I.5 <i>Les techniques de modulation</i>	22
I.6 <i>L'onde de sortie des onduleurs</i>	22
I.7 <i>L'interconnexion des onduleurs</i>	22
I.7.1 Type d'interconnexions d'onduleurs	22
I.7.2 Les onduleurs multiniveaux	24
I.8 <i>Conclusion</i>	26
II. CHAPITRE II INTRODUCTION A LA MODELISATION	27
II.1 <i>Les exigences de la modélisation</i>	28
II.1.1 Exigence d'ordre pratique	28
II.1.2 Exigences d'ordre théorique.....	28
II.2 <i>La modélisation en électronique de puissance</i>	28
II.2.1 L'intérêt de la modélisation en électronique de puissance	28
II.2.2 Les méthodes de modélisation en temps réels	28
II.3 <i>Hypothèses de modélisation</i>	28
II.3.1 Introduction	28
II.3.2 Les modèles existants.....	29
II.4 <i>Conclusion</i>	31
III. CHAPITRE III SIMULATION-RESULTATS ET DISCUSSIONS	32
III.1 <i>Simulation en temps réel de « dix onduleurs » connectés en parallèle à un réseau:</i>	33
III.1.1 Introduction	33
III.1.2 Présentation du bloc de simulation :	33
III.1.3 Simulation en temps réel sans anomalies sur le réseau	35
III.1.4 Simulation en temps réel en présence de défauts	39
III.1.5 Simulation de défauts d'harmoniques venants du réseau	41
III.2 <i>Petre de deux onduleurs pour un cas de la connexion en parallèle de douze onduleurs</i>	44
III.2.1 Présentation du circuit.....	44
III.3 <i>Conclusion</i>	47
IV. ANNEXE A	49

Table des matières

IV.1	Résumé des hypothèses.....	49
IV.2	Paramètres de filtrage.....	49
IV.3	Le D-statcom.....	49
IV.3.1	Le Statcom	49
IV.3.2	Le D-Statcom	50
IV.3.3	Le bloc de la transformation de Park associé à celle de Park :	50
IV.3.4	La transformée de Clark :.....	50
IV.4	Régulation	51
IV.4.1	PI de la boucle de courant	51
V.	ANNEXE B	51
VI.	LEXIQUES	53
	<i>Bibliographies</i>	55

Table des figures

Table des figures

Figure I-1 Circuit de l'onduleur de tension [15]	18
Figure I-2 Interface à base d'électronique de puissance pour la connexion d'une source primaire au réseau.	20
Figure I-4 Figure montrant la connexion en entrée série et en sortie parallèle de plusieurs onduleurs	23
Figure I-5 Tensions de sortie des onduleurs multiniveaux respectivement à trois, cinq et sept niveaux à la fréquence industrielle [47].....	25
Figure II-1 Schéma d'un interrupteur parfait [10]	29
Figure III-1 Système de dix onduleurs connectés à un réseau complet	34
Figure III-2 Forme du courant d'entrée total pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts.....	35
Figure III-3 Forme de la tensions d'entrée et établissement du régime permanent pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts.....	35
Figure III-4 Forme de courant d'entréesur chaque onduleur pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts.....	37
Figure III-5 Forme des courants et tensions de sortie sur les trois phases et établissement du régime permanent pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts.....	38
Figure III-6 Forme de l' amplitude de la tension de sortie sur une phase et établissement du régime permanent pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts.....	38
Figure III-7 Forme et partage des courants de sortie (modules 2, 3 et 6) pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts.....	39
Figure III-8 Forme des courants et les tensions de sortie sur les trois phases pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de perte d'un onduleur.....	40
Figure III-9 Partage du courant de sortie en temps réel pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de perte d'un onduleur.....	41
Figure III-10 Forme du courant total d'entrée pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de présence d'harmoniques	41
Figure III-11 Forme de courant total d'entrée sur chaque module pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de présence d'harmoniques	42
Figure III-12 Forme des courants et des tensions de sortie et établissement du régime permanent pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de présence d'harmoniques.....	43
Figure III-13 Partage du courant en temps réel pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de présence d'harmoniques	44
Figure III-14 Circuit de simulation pour le cas des douze onduleurs connectés en parallèle à un réseau comportant des charges non linaires et sans présence de défauts	45
Figure III-15 Partage des courants de sortie en niveau des modules 2,3,6,9 et 12 dans le cas de la connexion de douze onduleurs en parallèle à un réseau complet sans présence défauts	46
Figure III-16 Forme des courants de sortie des douze onduleurs connectés en parallèle avec un réseau comportant des charges non linaires avec simulation d'une perte de deux onduleurs simultanément.....	47
Figure IV-1 Distorsion de la tension d'un réseau avec et sans connexion d'un D-Statcom [43].....	50

Liste des tableaux

Tableau I-1 Type de connexion de l'onduleur de tension et applications associées.....	19
Tableau III-1 Intréprétation des résultats de la simulation des courants en aval de la batterie d'onduleurs pour le cas de la connexion de 10 onduleurs en parallèle avec un réseau sans défauts auquel sont connecté des éléments non linaires.....	36
Tableau III-2 Intréprétation des courants et des tensions de sortie et de leur amplitude et déphasage sur la phase pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts.....	38
Tableau IV-1 Paramètres du filtre passif passe haut	49
Tableau IV-2 Calcul des paramètres des régulateurs de courant.....	51
Tableau V-1 Paramètres de défauts d'harmonique de réseau pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle avec un réseau aquel lui sont connectés des charges non linaires (section V-2-5.....	51
Tableau V-2 Paramètres généraux de simulation.....	52

Introduction Générale

En cette dernière décennie, un accroissement considérable dans la production de l'énergie électrique depuis des sources d'énergie renouvelables a été constaté. Ce qui a engendré un grand développement dans la technologie d'électronique de puissance. En effet, à la sortie de chaque source d'énergie renouvelable comme le photovoltaïque et l'éolien, l'on trouvera une conversion d'énergie et ce afin de la rendre disponible au niveau du consommateur [1].

Dans le but de répondre à la demande de puissance de l'industrie qui ne cesse d'augmenter, la recherche en électronique de puissance n'arrête pas de prendre de l'ampleur pour trouver des solutions aux problèmes de la conversion de l'énergie électrique à haute puissance. Sachant que la conversion de l'énergie électrique fait appel à des composants de puissance tels que les IGBT, GTO, MCT...

Les convertisseurs à base de ces interrupteurs offrent de meilleures performances s'ils sont employés sous des hautes fréquences [2]. Néanmoins, les IGBT ne peuvent supporter que des valeurs de courant limitées (environ 2400A [1]) et plus la puissance qu'ils supportent augmente plus leur fréquences de commutation diminuent et donc leur performances se dégradent. Malheureusement, pour atteindre des fréquences de commutation supérieures à 20kHz, les onduleurs à base d'IGBT sont limités à 2MW [2]. L'un des remèdes à ce problème est la mise en parallèle ou en série des onduleurs ; et ce afin d'éviter la dégradation du facteur de puissance et d'augmenter la capacité de transfert d'énergie vers le consommateur [2].

L'objet de notre étude porte sur la mise en parallèle de plusieurs onduleurs car la mise en parallèle des onduleurs est souvent utilisée pour atteindre des niveaux de puissances au delà de la capacité de la plus grande puissance que peut fournir une structure classique. Dans les applications de forte puissance, nous devons utiliser des structures permettant d'une part d'obtenir un fort courant de sortie, et d'autre part être en mesure de le contrôler selon l'application désirée. [3; 4]

De ce fait, les systèmes parallèles sont devenus une solution souhaitable, particulièrement dans les endroits où on exige une demande d'énergie très grande avec des courants de charge très importants [5]. On en peut tirer les avantages suivants :

- La fiabilité du système ainsi obtenu ; La mise hors circuit d'un module permet toujours au reste du circuit de fonctionner tout en distribuant la puissance du module défaillant sur le reste des modules. Cela évitera ainsi toute interruption du transfert de puissance [6], cet avantage majeur de la mise en parallèle n'est pas offert par les onduleurs multiniveaux (si un module est défaillant tout le fonctionnement s'arrêtera).*
- La redondance des différents modules connectés en parallèle permet de réduire considérablement le cout de fabrication à la chaîne et rendre le circuit global plus flexible vu l'utilisation des composants standards de faible calibre [7].*
- Le cout de maintenance du système va être diminué du fait que la forte puissance transférée à la charge occasionnant de fortes contraintes sur les différents composants électroniques est ainsi divisée par un rapport égale au nombre d'onduleurs mis en parallèle.*
- Possibilité d'atteindre des puissances élevées avec des composants standards de plus faible calibre et donc plus performant (durée de vie, rapidité...etc.).*

- Partage de la puissance de la charge traitée qui se traduit par une réduction des contraintes de tension et de courant au niveau des différents interrupteurs.
- Le système global est redondant car l'on pourra toujours garder un nombre de modules en réserve et ce pour parer contre toute éventuelle demande supplémentaire de puissance [8]. Ces onduleurs de réserve seront commandés de la même manière ce qui est impossible dans le cas des onduleurs multiniveaux du fait que si on connecte un nouveau module (multiniveaux) il faudrait établir une loi de commande totalement différente de celle des autres.
- Avoir une meilleure stabilité et robustesse, normalisation et réduction du cout de la fabrication à la chaîne du module ainsi que sa disponibilité.
- Une habilité de commutation à de plus hautes fréquences sans contraintes (si l'on souhaite) et ce, du fait que les différents modules ne supportent qu'une fraction de la puissance totale demandée.
- Réduction des harmoniques du courant, des pulsations harmoniques du couple et de minimiser les pertes de commutation [9]
- Amélioration des formes d'ondes à l'entrée et à la sortie du convertisseur [7].
- Atteindre des puissances inaccessibles à des composants uniques.

De ce fait, une étude approfondie du comportement global du circuit est envisagée. Le passage par la modélisation s'avère plus que nécessaire pour prédire d'une manière rapide et méthodique le fonctionnement en régime permanent et dynamique. Plusieurs techniques de modélisation peuvent-être alors utilisées. La modélisation utilisée dans notre travail portera sur la modélisation par la moyenne dans l'espace d'état qui offre une bonne alternative pour modéliser macroscopiquement et fonctionnellement les convertisseurs statiques [10]. Le but alors, est de trouver un modèle moyen du circuit global du convertisseur. En effet, les modèles moyens prennent en compte les dynamiques macroscopiques et permettent de s'affranchir des éléments relatifs aux commutations. Ceci permet donc d'ignorer les contraintes liées à la simulation des instants de commutation et de ne conserver que les dynamiques macroscopiques de fonctionnement des convertisseurs statiques ainsi que l'étude de commande (fonctions de transfert) [10].

Dans le chapitre I de notre mémoire de projet de fin d'études, on a fait une brève introduction sur l'état d'art sur les onduleurs.

Le chapitre II introduit une technique de modélisation appelée moyenne dans l'espace d'état pour une commande donnée. Cette technique de modélisation va nous permettre de trouver un modèle mathématique de l'ensemble des « n » convertisseurs reliés en parallèle et par la suite, de trouver un schéma moyen équivalent représentant le comportement dynamique ainsi que statique de l'ensemble du circuit.

Dans le chapitre III, on verra l'application de la moyenne dans l'espace d'état à un système redondant de « n » onduleurs mis en parallèle et la simplicité qu'elle apporte à la résolution du système d'équations d'état. L'étude de stabilité du circuit global représenté par un système d'ordre $3n+2$ et ce quelque soit le nombre « n » de modules, revient à analyser les fonctions de transfert en boucle ouverte déterminées analytiquement. Les performances du circuit sont alors étudiées selon les différents paramètres du système à savoir la résistance de

Introduction Générale

synchronisme, le nombre « n » d'onduleurs et d'autres paramètres de commande. Pour des performances désirées l'on pourra alors concevoir une régulation de telle manière à positionner les différents pôles et zéros des différentes fonctions de transfert selon les exigences fixées par le cahier de charges.

Le chapitre IV est consacré à l'étude, la modélisation et l'asservissement de la chaîne : « Onduleur de tension-Ligne de transport-Réseau ». On présentera la modélisation vectorielle d'un onduleur triphasé en vue de sa commande. On citera les différents modèles d'onduleurs de tension triphasée. Ensuite on représentera l'ensemble « Onduleur de tension-Ligne de transport-Réseau » dans le référentiel de Park afin de mettre en œuvre l'asservissement du système global en boucle fermée en établissant les fonctions de transfert et les correcteurs appropriés.

Le chapitre V est dédié à la simulation de l'ensemble de la chaîne ainsi qu'à l'interprétation de quelques défauts qui peuvent surgir durant le fonctionnement ce qui pourra introduire la notion de diagnostique.

Chapitre I

L'état de l'art sur les onduleurs

Introduction

L'énergie électrique provenant des sources primaires doit nécessairement être convertie afin qu'elle soit accessible au niveau du consommateur. C'est là où l'on trouvera forcément des onduleurs pour remplir cette tâche. Ces derniers ont pour but de transformer la tension et/ou le courant continu en une tension et/ou courant alternatif et ce en commutant des interrupteurs en vue d'obtenir de bonnes performances. Dans le présent chapitre on présentera d'abord les différents types d'onduleur notamment l'onduleur de tension, ensuite on exposera les types d'interconnexions d'onduleurs, enfin on justifiera notre choix de l'onduleur de tension à un choix d'un onduleur multiniveaux.

I.1 Types d'onduleurs :

Il existe deux grandes catégories d'onduleurs : les onduleurs de tension et les onduleurs de courant. On distingue aussi : les onduleurs autonomes et les onduleurs non autonomes.

I.1.1 L'état de l'art de l'onduleur de tension

I.1.1.1 Onduleur de tension triphasé :(VSI pour Voltage Source Inverter)

Dans notre étude de simulation en temps réel, on choisira $n=4$ puis plus loin $n=10$ d'onduleurs de tension VSI en parallèle connectés à un réseau. Notre choix de ce type d'onduleur n'est pas fortuit, vu que moyennant une MLI appropriée, il permet de délivrer une source de tensions triphasées contrôlables en amplitude, phases et fréquence [11] en cherchant à minimiser au maximum le control en boucle fermée tel que :

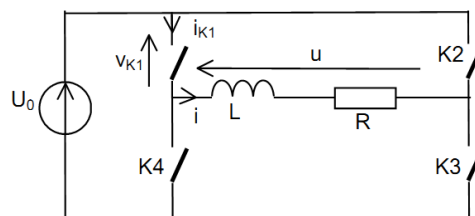
Le VSI (avec sa commande) doit réguler les courants correctement en permanent d'abord puis en dynamique,

Sa commande peut être à hystérésis, commande linéaire, MLI, MLI vectorielle [12], notre choix s'est porté sur cette dernière vu ses avantages.

Les VSI sont largement utilisés dans plusieurs applications ; énergies renouvelables, système de compensations active, améliorateurs de facteurs de qualité d'une installation [12] et système onduleurs pour les alimentations non interruptibles (en s'alimentant d'un système de batterie à hydrogène pour les installations de secours) [13].

On aura qu'à réaliser un asservissement robuste pour le courant, la tension ne dépend pas de la charge [14], le courant par contre, en dépend.

On considère le montage suivant :



FigureI-1Circuit de l'onduleur de tension [15]

Les interrupteurs sont parfaits et sont commandés par paire : tel que : [15]

- De 0 à $T/2$: K1, K3 passants
- De $T/2$ à T : K2, K4 passants

I.1.1.2 L'onduleur de tension pour le réseau

L'onduleur de tension est fortement sollicité dans les systèmes à électronique de puissance du fait que sa structure est généralement répandue pour l'utilisation d'interrupteurs bidirectionnels, sa capacité de changer son fonctionnement par une simple modification de sa commande pour l'utiliser soit comme un filtre de courant ou un compensateur réactif dans le cas de sa connexion shunt ou encore de compensateur de creux de tension dans le cas d'une connexion série, ou encore régulateur de l'impédance de la ligne, toutefois il est vivement conseillé de séparer entre ses application dites de compensation et celles dites d'interfaçage car l'onduleur de tension se connecte au réseau de deux manières :

- Connexion au réseau de distribution connu sous le nom D-fact
- Connexion au réseau des producteurs d'énergies décentralisées. (Interfaçage). [16; 10; 15; 17]

I.1.1.3 Onduleur de tension dans les systèmes de compensation

Tout dépend de sa connexion au réseau en shunt ou en série, l'onduleur de tension peut jouer différents rôles de compensations dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Tel que le tableau suivant le montre : [16]

Type de connexion	Applications
Série	<ul style="list-style-type: none"> • réduction des creux et déséquilibres de tensions • compensation des harmoniques de tension • réglage d'impédances de lignes et de flux de puissance
Shunt	<ul style="list-style-type: none"> • filtrage actif de courant, réglage de plan de tension, • compensation de réactif, soutien de réseau, • réduction de l'effet de Flicker, équilibrage de charge. • injection d'énergies primaires après leur conversion à un réseau conventionnel

Tableau I-1 Type de connexion de l'onduleur de tension et applications associées

Nos travaux se baseront sur l'utilisation de l'onduleur de tension dans les systèmes d'interfaçage donc la configuration Shunt qui en sera retenue.

I.1.1.4 Onduleur de tension dans le processus de l'interfaçage des puissances

Les systèmes d'interfaces permettent le raccordement d'une source d'énergie primaire¹ au réseau de distribution, entre le réseau et la source primaire on trouve fréquemment un convertisseur DC-DC pour l'adaptation de la source primaire à une entrée AC puis un deuxième convertisseur qui est de type DC-AC pour l'adaptation des grandeurs électriques (tension, courant, fréquence..) pour les injecter au réseau [16; 18].

Le tout devra être géré par des commandes solides pour une meilleure fiabilité ainsi que pour un bon rapport cout-rendement.

L'interface de puissance est impérative en cas d'un raccordement au réseau d'une source primaires isolée pour ce qui suit : [16]

- Respecter les contraintes liées à la connexion réseau : qualité des courants injectés, facteur de puissance.
 - Exploiter au mieux les possibilités du générateur ; rendement maximal avec l'extraction d'un maximum de puissance disponible de la source primaire « MPPT » (Maximum Power Point Tracking)
 - Respect des contraintes d'exploitation, compensation des faiblesses dynamiques du générateur et de son intermittence éventuelle..

Le modèle peut être présenté comme suit :

¹Les énergies primaires peuvent être : générateur éolien, micro-turbine, panneaux photovoltaïques, piles à combustible. (PAC)... [18]

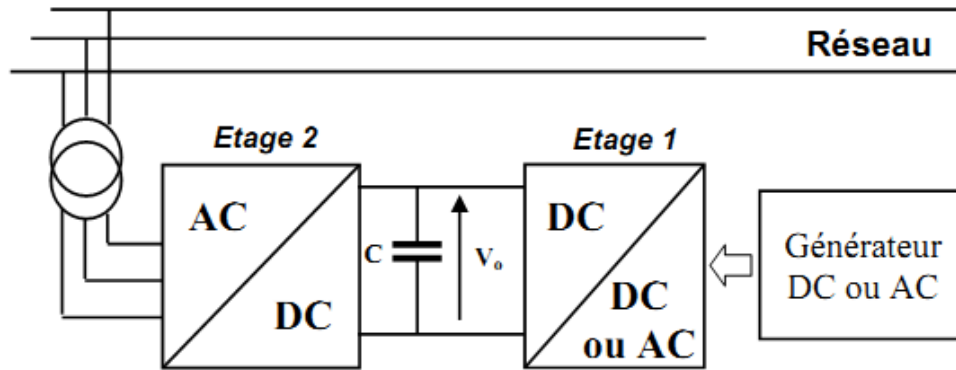


Figure I-2 Interface à base d'électronique de puissance pour la connexion d'une source primaire au réseau.

I.1.1.5 Les inconvénients notables des onduleurs de tension

Les échelons de tension provoquent des transitoires importants et des fonctionnements instables [19; 15; 14; 20].

I.1.2 L'onduleur de courant CSI (Current Source Inverter)

Dans le cas des onduleurs de courant, les diodes de récupération ne sont pas envisageables dans ce type de montages, par contre un filtre ou une capacité C est fortement recommandée [14].

L'onduleur de courant est le cas dual de celui de l'onduleur de tension tel qu'un circuit « Rp, Cp » parallèle attaqué par un courant rectangulaire est le circuit « dual » du circuit série « R, L » attaqué par une source de tension rectangulaire [4].

I.1.3 Les onduleurs autonomes

Un onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur [21]. Il suffit de disposer d'un interrupteur inverseur « K » électronique en générale et d'une source de tension continue « E » [22]. Il n'a pas toujours besoin de réseau électrique pour fonctionner; par exemple un convertisseur de voyage que l'on branche sur la prise allume-cigare d'une voiture utilise le 12 V continu du véhicule pour générer du 120 V, ou 230 V, alternatif en 50 Hz, ou 60 Hz ; ce types d'onduleurs sont notamment employés pour la réception de la TV en mode camping-car (~12 V) [21].

I.1.4 Les onduleurs non autonomes

Un onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors (pont de Graetz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur [21]. Il ne permet de fixer ni la fréquence ni la valeur efficace des tensions du réseau alternatif dans lequel il débite [22].

Ils sont en général utilisés pour : [22]

- Les alimentations de secours destinées à remplacer le réseau de distribution (monophasé ou triphasé) en cas de défaillance du réseau.
- Pour les installations qui nécessitent la continuité de l'alimentation : hôpitaux, centraux téléphoniques, circuits de sécurité,...
- Pour les appareils (ordinateurs, ...) qui exigent non seulement la continuité de leur alimentation, mais encore la protection contre les perturbations du réseau de distribution (variations de tension, parasites, coupures, ...)

- Ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO [21].

I.2 Les interrupteurs en électronique de puissance

Ils consistent à faire commuter des courants entre mailles adjacentes, ce qui nécessite l'emploi de composants permettant de réaliser la fonction interrupteur.

Idéalement, l'interrupteur fermé aura une tension pratiquement nulle à ses bornes alors que le courant sera fixé par le reste du dispositif. En revanche, l'interrupteur ouvert aura une tension imposée par le circuit externe, mais ne sera traversé par aucun courant [23].

La fonction de l'interrupteur, regroupe le composant lui même, la commande, les dispositifs de protection et de dissipation qui sont indispensables à cause des pertes, surtout à fréquence élevé [23].

I.3 La conversion de l'énergie électrique en électronique de puissance

L'énergie électrique utilisée dans l'industrie et chez les particuliers provient principalement du réseau triphasé. Or les dispositifs utilisant cette énergie ne fonctionnent que très rarement sous forme d'ondes sinusoïdales à 50 Hz.

Dans le cas de l'utilisation d'une batterie, il peut être intéressant de contrôler le niveau de tension en sortie et on aura là encore besoin d'un dispositif, entre source et charge, permettant d'effectuer cette opération.

Les convertisseurs statiques doivent donc permettre de transformer le spectre du signal en amplitudes, fréquences et phases. Cette transformation est, à l'heure actuelle, effectuée par des systèmes complexes, réalisés à partir de composants électroniques utilisés comme interrupteurs.

L'étude et la conception de ces dispositifs est souvent appelée électronique de puissance. En effet, si ces dispositifs comportent des composants qui fonctionnent à courant faible, leur fonction principale consiste à faire commuter des courants souvent importants [23].

I.4 Utilisation des onduleurs

Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles par exemple : variateur de vitesse des moteurs à courant alternatif, chauffage par induction, les alimentations de secours, les alimentations non interrompues. L'entrée d'un onduleur peut être une batterie, une tension continue issue des panneaux solaires, ou d'autres sources de courant continu obtenues à partir d'un redressement monophasé ou triphasé [24].

Ils sont utilisés principalement dans deux catégories d'appareils : [25]

- 1) Les alimentations sans coupures, qui sont conçues pour la stabilisation. La tension engendrée est souvent d'amplitude et de fréquence fixe. Les alimentations de secours sont constituées en général de trois parties : [22]
 - Un redresseur-chargeur, alimenté par le réseau, constitué soit d'un pont à diodes suivi soit d'un hacheur ou d'un pont commandé,
 - Une batterie d'accumulateurs,

- Un onduleur de fréquence 50Hz délivrant une tension parfaitement sinusoïdale.
- 2) Les variateurs de vitesse pour machine à courant alternatif. La source continue est obtenue à partir du redressement du réseau. La tension engendrée est de fréquence variable, ce qui fait varier la vitesse des machines à courant alternatif. Dans ce cas, il convient que l'amplitude de cette tension soit également variable.

I.5 Les techniques de modulation

La technique de modulation des largeurs d'impulsions ('pulse width modulation, MLI') qui est la plus répandue [5].

Il y en a plusieurs types de commande MLI [14], on peut citer :

- (a) Single-pulse modulation
- (b) Multiple-pulse modulation
- (c) Selected harmonic elimination (SHE) PWM
- (d) Minimum ripple current PWM
- (e) Sinusoidal-pulse PWM (SPWM)
- (f) Space vector-pulse PWM (SVPWM)

On ne retiendra la SVPWM vu ses avantages.

Notre model Smulink/Matlab en temps réel sera basée sur une commande SVPWM, (commande MLI vectorielle)

On note en général que les avantages communs de toutes ces technique MLI sont :

- Le control de tension qui peut être conçu sans la connexion, ajout ou utilisation d'aucun composant électrique [14].
- Elimination, ou diminution des harmoniques injectés au réseau, par conséquent, les contraintes de filtrage seront diminuées [14].

I.6 L'onde de sortie des onduleurs

La forme d'onde de la tension de sortie d'un onduleur idéal doit être sinusoïdale. Cependant, en pratique cette forme d'onde n'est pas sinusoïdale et contient des harmoniques qui peuvent être traités par une technique de modulation appropriée [26].

I.7 L'interconnexion des onduleurs

De nombreux équipements d'électronique de puissance utilisent des associations série ou parrèle de semi-conducteurs ou des convertisseurs pour le transport de l'énergie en courant continu et la traction maritime [3], les équipements d'électrolyse industrielle en fournissent des exemples prestigieux (TGV, etc. ...) [7].

I.7.1 Type d'interconnexions d'onduleurs

I.7.1.1 L'interconnexion série

Les modules sont connectés en série à l'entrée en partageant équitablement la tension d'entrée comme le montre la figure suivante :

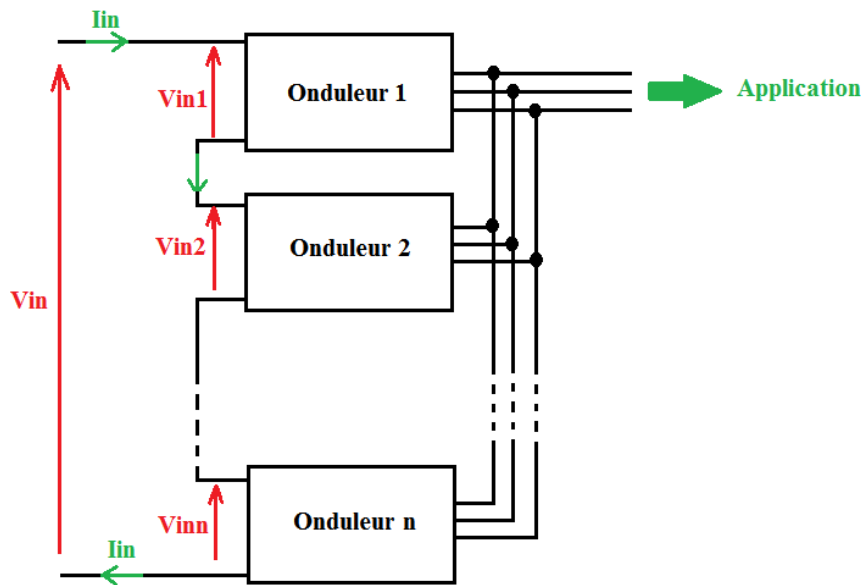


Figure I-3 Figure montrant la connexion en entrée série et en sortie parallèle de plusieurs onduleurs

$$\sum_{i=1}^n V_{in_i} = V_{in} \quad I-1$$

Dans le cas idéal où la tension d'entrée est également partagée sur les n modules alors :

$$V_{in_1} = V_{in_2} = \dots = V_{in_n} = \frac{V_{in}}{n} \quad I-2$$

I.7.1.2 L'interconnexion parallèle

La mise en parallèle des onduleurs est souvent utilisée pour atteindre des niveaux de puissances au delà de la capacité de la plus grande puissance que peut fournir une structure classique. Dans les applications de forte puissance, nous devons utiliser des structures permettant d'une part d'obtenir un fort courant de sortie, et d'autre part d'être en mesure de le contrôler selon l'application désirée [3; 4].

De ce fait, les systèmes parallèles sont devenus une solution souhaitable, particulièrement pour les applications de haute puissance avec des courants de charge très importants [5] grâce à ses avantages :

- Une grande fiabilité et continuité de transfert de puissance même en présence d'un module défectueux.
- Coût de fabrication très faible vu la redondance des différents modules [7] et l'utilisation des composants standards de faible calibre.
- Partage de puissance, chaque module ne supporte qu'une fraction de la puissance globale.
- Meilleure stabilité et robustesse.
- Utilisation des composants à des fréquences de commutation très élevées ce qui permet l'obtention de meilleures formes d'ondes de sortie.

I.7.1.2.1 Les contraintes techniques de la mise en parallèle

- Le déséquilibre des courants, l'instabilité due à l'interaction des différents modules.

- Les courants de circulations entre modules et détérioration du facteur de forme du courant², [27]
- Problème de synchronisation des courants de sortie.
- Partage de courant, et la gérance de la synchronisation.

La question que l'on pourra éventuellement se poser est la suivante :

Pourquoi envisager une mise en parallèle de n onduleurs identiques au détriment des onduleurs multiniveaux ?

I.7.2 Les onduleurs multiniveaux

Les onduleurs multiniveaux ont été introduits dès 1981 pour réduire l'amplitude des harmoniques injectés dans la charge, et ceci pour des applications de type alimentation de moteur [28]. On dit que l'onduleur multiniveaux est un cas particulier de l'onduleur standard, si les niveaux sont commandés de la même manière, on considère l'onduleur multiniveaux comme un onduleur de tension standard (U , $-U$ ou 0) [28].

Les onduleurs, comme ils étaient exposés dans la partie de « l'état de l'art des onduleurs », peuvent être soit à sortie alternative (sinusoïdale ou proche de la sinusoïde) non modifiable ou à sortie modifiable, quant au transfert de l'énergie se fait uniquement moyennant l'onduleur en question. Les onduleurs multiniveaux sont communément utilisés dans les applications industrielles, ils peuvent-être soit à sortie modifiable ou non, les onduleurs multiniveaux contiennent plusieurs séries de convertisseurs au lieu d'un seul dans le cas des onduleurs standards, ce qui induit une génération de la haute tension. Pour ce, le transfert de l'énergie, contrairement aux onduleurs standards, se fait alors via une commutation de plusieurs convertisseurs qui requièrent un circuit spécifique pour chacun d'eux. Vu l'importance du nombre des convertisseurs avec leurs circuits dans le cas des onduleurs multiniveaux, leur prix est assez souvent hors de portée même des industries les plus poussées [29]. Ils étaient développés dans le but d'atteindre la tension la plus élevée possible avec un nombre minimum de cellules, il faut construire un onduleur constitué de cellules identiques utilisant des interrupteurs de tension de blocage la plus élevée possible [30].

L'inconvénient principal des onduleurs multiniveaux est généralement la tension de sortie qui est de l'ordre de $\frac{U_{dc}}{2}$ (comme valeur max) tel que U_{dc} est la tension de entrée est ceci est du au point milieu caractérisant les niveaux de ce type d'onduleurs et ceci pour quelque soit le nombre de niveaux composant l'onduleur en question comme le montre la référence suivante : [30]

² Des hypothèses simplificatrices nous permettront de parer au problème de circulation de courant (ex : modules parfaitement identiques)

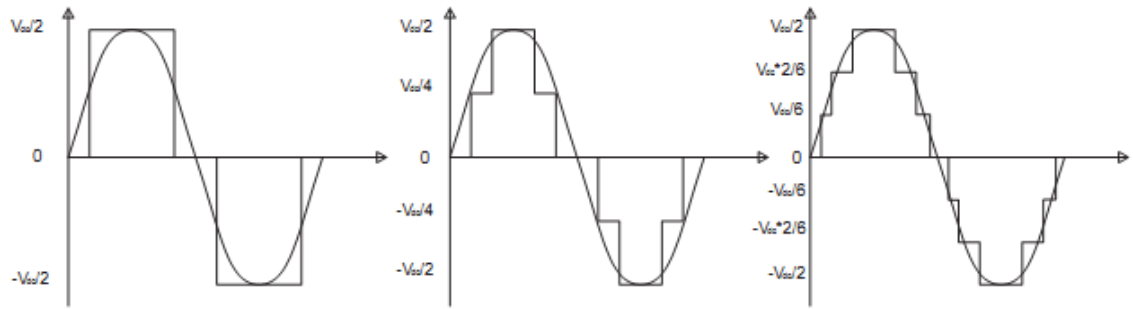


Figure I-4 Tensions de sortie des onduleurs multiniveaux respectivement à trois, cinq et sept niveaux à la fréquence industrielle [47]

L'autre inconvénient est celui du nombre de niveaux qu'il faut impérativement faire élever et ce pour : [30]

- 1) Avoir un signal de sortie lisse et plus proche de la sinusoïde.
- 2) Avoir un bas facteur de distorsion d'harmonique (THD)

Ce qui constitue (à notre niveau d'étude) un obstacle majeur pour la modélisation (vu le nombre élevé de niveau, interrupteurs et de paramètres) et les difficultés de régulation des niveaux vu le nombre de circuits qui seront mis en jeu.

Néanmoins, on peut citer quelques avantages : [30]

- Moins de distorsion des tensions de sortie.
- En augmentant le nombre de niveaux, on peut travailler avec de basses fréquences de commutation ce qui par conséquent réduit les pertes par commutation.

On note que les onduleurs multiniveaux connectés en cascades concurrent la mise en parallèle, pour les raisons suivantes: [31]

- Chaque niveau de l'onduleur est supporté par une capacité d'entrée propre à lui.
- Une grande fiabilité dans le processus de transfert de la puissance.
- Facilité de compensation, filtrage d'harmonique et de régulation de la tension dans le cas des énergies primaires connectées à un réseau conventionnel.

Notre choix des onduleurs en parallèle, et non une montée en cascade de plusieurs onduleurs multiniveaux est justifiée par ce qui suit :

- a) La simplicité des structures des onduleurs standards,
- b) La simplicité de la commande, maintenance régulation et puis modélisation, car les différents circuits et compartiment des onduleurs multiniveaux rend leur modélisation compliquée.
- c) Le cout des onduleurs de tension utilisés dans l'industrie
- d) Uniformiser le plan de maintenance, une fois qu'on a les mêmes structures de convertisseurs opérants au sein d'un processus industriel. L'opération de maintenance, de vérification, remplacement et de modification d'un ou de plusieurs onduleurs ne va pas engendrer, d'une part l'arrêt total de tout le processus de la conversion (ce qui va être le cas pour un convertisseur multiniveaux) et de l'autre la familiarisation et la maîtrise du personnel à ce type de connexion d'onduleurs. Ajoutant à cela la redondance qui rend plus facile le fonctionnement et la maintenance du circuit global.

I.8 Conclusion

L'onduleur joue un rôle très important en électronique de puissance grâce à ses nombreux avantages, la fluidité et la simplicité de commande qu'il offre. L'objet de notre étude est de mettre en parallèle plusieurs convertisseurs identiques afin d'atteindre de plus hauts niveaux de puissances. Contrairement aux onduleurs multiniveaux, la mise en parallèle d'onduleurs identiques est plus simple à analyser, à commander et à réaliser. Par conséquent, la modélisation qui est l'objet du chapitre suivant devient plus objective.

Chapitre II

Introduction à la modélisation

Introduction

Ce chapitre expose la modélisation en générale et la modélisation en électronique de puissance en particulier en passant par une description des modèles moyens.

Le chapitre est organisé comme ce qui suit :

Tout d'abord, nous allons commencer par des généralités sur la modélisation et ses exigences avec des hypothèses inspirées sur de solides travaux [10; 16; 12; 37; 18] , puis nous ferons une introduction à la modélisation en électronique de puissance, une vision sur les modèles déjà existants est à traiter, puis on passera au modèles à topologies variables afin d'extraire le modèle exacte qui est la base de notre travail concernant l'étude de stabilité en boucle ouverte ; ce qui facilitera le choix des paramètres de la chaine « Source continue-onduleurs-lignes triphasées-Réseau».

II.1 Les exigences de la modélisation

La question des rapports entre concret, formel et abstrait, celle de l'articulation entre expérimental et théorique, passe par la prise en compte des modèles, du rôle que nous voulons leur faire jouer, de la manière dont ils peuvent être appropriés [10].

La modélisation nécessite d'être accompagnée par des vérifications "in situ", et ceci en passant par la paramétrisation et le calibrage des « modèles » utilisés [32].

II.1.1 Exigence d'ordre pratique

Il s'agit de dégager la fonction technique de l'objet étudié et les conditions de son utilisation [33]. Et ce, pour mieux maîtriser son fonctionnement.

II.1.2 Exigences d'ordre théorique

Il s'agit d'expliquer par des théories (courbes, graphes...) la forme et/ou la caractéristique de l'objet étudié, ou en tout cas une de ses parties [33].

II.2 La modélisation en électronique de puissance

La modélisation d'un système est effectuée à l'aide de logiciels appropriés permettant une analyse rigoureuse, non seulement sur le plan statique, mais également dynamique (réponses transitoires, effets résonants, réponses à des perturbations externes... etc.) [34].

La simulation d'un équipement électrique passe d'abord par la mise en équation du système, puis une phase de programmation pour intégrer le modèle au simulateur informatique, enfin la simulation en question [16].

II.2.1 L'intérêt de la modélisation en électronique de puissance

- Le développement de prototypes, le dimensionnement des éléments
- Réglage et optimisation des paramètres [16].
- La spécification des contraintes électriques sur les composants d'un système.
- La validation des prototypes en fonctionnement normal et dans des modes perturbés (courts-circuits, creux de tensions ou perturbations harmoniques).
- Etudes d'interactions entre les systèmes.

II.2.2 Les méthodes de modélisation en temps réels

Pour modéliser un système de l'électronique de puissance on peut s'en approcher soit en utilisant des modèles topologiques (appelés commutants ou exacts) ou bien en utilisant des modèles moyens. D'autres représentations peuvent être déduites de ces modélisations : exemples, les modèles petits signaux et les modèles échantillonnés [16].

II.3 Hypothèses de modélisation

II.3.1 Introduction

Après plusieurs essais de simulation au dernier chapitre nous confirmons les deux hypothèses ci-dessous [16; 10] pour réduire la complexité et le temps de calcul sans nuire à la bonne représentation des phénomènes étudiés en cernant le domaine de validité ;

- 1) Les intercepteurs sont considérés parfaits et identiques comme suit : [10]

- L'état OFF : circuit ouvert
 - L'état ON : circuit fermé.
- 2) Les cellules d'interrupteurs placées en série ou en parallèle et commandées par les mêmes signaux sont considérées comme un seul interrupteur parfait [16].

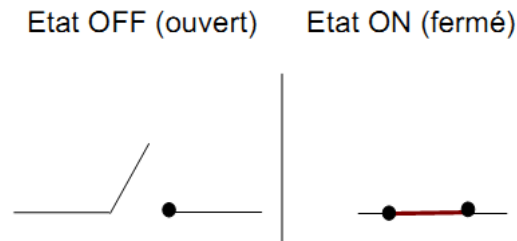


Figure II-1 Schéma d'un interrupteur parfait [10]

- 3) Les sources de tensions et celles de courant étant parfaites ; on néglige le courant qui traverse une source de tension et on néglige la tension aux bornes d'une source de courant [10].
- 4) Les sources de tensions et celle de courant sont considérées indépendantes des contraintes électriques [16].
- 5) Les éléments passifs de la structure du convertisseur sont invariants et linéaires [10].
- 6) Les charges présentant des caractéristiques similaires, connectées en série ou en parallèle, sont groupées et représentées par des équivalents [16].

Il est naturellement possible d'ajouter des éléments électriques passifs ou actifs pour modéliser les pertes ou traduire certains défauts. Toutefois, comme l'augmentation de la finesse de représentation va de pair avec l'augmentation du temps de calcul il faudra s'assurer que la contrainte temps-réel est bien respectée [16].

II.3.2 Les modèles existants

II.3.2.1 Les modèles petits signaux

Sont linéaires mais ne sont valables qu'autour d'un point de fonctionnement [16], ils sont suffisamment petits pour que les caractéristiques des composants ne varient pas trop et pour pouvoir rester dans la linéarité [35].

II.3.2.2 Les modèles grands signaux

Ils sont considérés non linéaires et indépendants du point de fonctionnement [16], les caractéristiques des composants varient et ne sont pas linéaires.

II.3.2.3 Les modèles moyens

II.3.2.3.1 Intérêt des modèles moyens

Le comportement moyen est bien évident pour une meilleure représentation du comportement dynamique et statique d'un circuit issu d'une transformation du système original en un système continu [17].

Le modèle moyen permet ce qui suit :

- Une simplicité de mise en œuvre et d'utilisation
- Une précision suffisante dans son domaine de validation
- Une étape d'une importance capitale dans le processus d'élaboration de la fonction de transfert du système en boucle ouverte.
- Une vision assez intéressante pour l'étude de la stabilité et par conséquent la détermination des conditions nécessaires pour les performances désirées [17; 6].
- Enfin, une représentation simplifiée des « n » onduleurs connectés en parallèle par une source de tension en série avec une impédance.

II.3.2.3.2 Le modèle moyen généralisé

Du moment où on considère le cas de la conduction continue, on ne va pas trop s'inspirer de ce modèle vu les raisons suivantes:

- Le modèle moyen classique n'est valable que dans le cas de la discontinuité des variables d'état qu'on ne va pas aborder dans notre travail.
- L'idée directrice de ce nouveau modèle moyen dit « généralisé » est de décrire les dynamiques des coefficients de Fourier complexes associés à une variable $x(t)$ considérée et ce, sur une période T donnée.
- Ce modèle est très utilisé pour l'étude lors de la prise en considération des harmoniques [17].

II.3.2.4 *Le modèle topologique*

Si un modèle de convertisseur d'électronique de puissance traduit, dans son comportement, les phénomènes liés à la commutation des interrupteurs, on le qualifie de modèle topologique [16].

La démarche de l'établissement d'un modèle à topologie variable est la suivante :

- Le choix des variables d'état qui sont les tensions dans les capacités et les courants dans les inductances ou une combinaison des deux.
- L'écriture des équations différentielles régissant le système on fonction de l'état des interrupteurs en passant par la loi des nœuds et celle des mailles.
- Mise sous forme d'un système d'équations différentielles à entrées discontinues en faisant apparaître les fonctions de commutation qui reflètent l'état des interrupteurs.

II.3.2.4.1 Systèmes à topologies variables des systèmes de l'électronique de puissance

Un convertisseur de l'électronique de puissance, du fait du jeu des interrupteurs, est un système à topologie variables car il change de configuration plusieurs fois durant une période de commutation [17].

Dans la vision du système dans laquelle nous nous positionnons, nous considérons les semi-conducteurs comme des interrupteurs parfaits, avec une résistance nulle à l'état passant et infini à l'état bloqué.

Un modèle à topologie variable de convertisseur statique se compose :

- D'un système d'équations (un par configuration envisagée du convertisseur).

- D'un test de changement de configuration (liés à la façon dont sont agencés les interrupteurs).

II.3.2.4.2 Choix du modèle pour l'étude de la stabilité

Dans le processus de l'étude en boucle ouverte, nous choisissons la technique du modèle moyen et « non pas » le modèle topologique pour ces raisons :

- C'est un modèle à entrée discontinues (alternatives) ce qui engendrera des dérivées de variables d'états discontinues [16].
- Le pas de temps doit être petit pour prendre en considération la commutation [16], or nous cherchons à ce que les temps de commutation n'apparaissent pas dans notre modèle ce qui est faisable avec la technique du modèle moyen qui est parfaitement adéquat avec les applications dont les commutations sont très fréquentes par rapport aux temps de simulation [17; 10].

En revanche, dans le processus de la modélisation en vue de la simulation en temps réel, on se servira des démarches d'établissement du modèle topologique pour en arriver aux deux modèles suivants

- 1) Modèle moyen.
- 2) Modèle moyen dans le référentiel de Park.

II.4 Conclusion

Vu la simplicité de l'étude qu'elle offre, la modélisation est une étape incontournable dans notre étude. Elle permettra d'une part de réduire l'ordre important du système et d'autre part d'avoir un schéma de fonctionnement assez simple pour l'étude. Ceci fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre III

Simulation-Résultats et Discussions

Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation en temps réel de la mise en parallèle de « n » onduleurs ainsi que le comportement global du circuit face à certains défauts qui seront détaillés dans la suite de notre travail.

La première partie de ce chapitre sera consacrée pour un model à quatre onduleurs, puis la deuxième partie l'extension de la simulation est faite pour dix onduleurs, ceci prouvera que le nombre « n » d'onduleurs mis en parallèle ne posera aucune difficulté quant à leur mise en œuvre si ce n'est le temps de simulation qui devient très important et l'espace mémoire requis pour la gestion des différents compartiments du Bloc de simulation.

III.1 Simulation en temps réel de « dix onduleurs » connectés en parallèle à un réseau:

III.1.1 Introduction

Pour l'étude faite dans la section précédente, le nombre d'onduleurs mis en parallèle était égal à quatre. Pour montrer que le nombre « n » ne poserait aucune restriction sur la simulation de défauts de la mise en parallèle des onduleurs (si ce n'est que le temps de simulation), on choisira un nombre assez conséquent (dix) d'onduleurs connectés en parallèle constituant un modèle formé de :

- 1 centrale de conversion « Source primaire-Dix onduleurs en parallèle ».
- Une ligne de transport aérien.
- Un utilisateur BT simulé en moteur asynchrone.
- Une génératrice synchrone entraînée par un moteur diesel régulée en vitesse.
- Un réseau donnant la main pour générer différents défauts.
- Un kit complet de toutes les instrumentations nécessaires allant d'un simple ampèremètre à l'estimateur d'amplitudes et de phases.

Les objectifs recherchés sont :

- Le comportement de la régulation dans un milieu agressif.
- Les temps de réponse.
- Répartitions des courants sur la batterie d'onduleurs.

Les régulateurs seront testés en présence de défauts suivants :

- Surtension
- Présence d'harmoniques aléatoires d'amplitude différentes
- Défaillance d'un onduleur

On rappelle qu'initialement les PI ont été dimensionnés pour le régime permanent avec un réseau parfaitement équilibré. Selon [37; 38; 39], une distorsion de la tension du côté réseau peut engendrer de sérieuses distorsions d'harmonique de courant. Nous avons introduit cette partie qui consiste à analyser une chaîne proche du cas d'une centrale « Source primaire-Réseau » innovante et innovatrice qui pourra faire l'objet de réalisation.

III.1.2 Présentation du bloc de simulation :

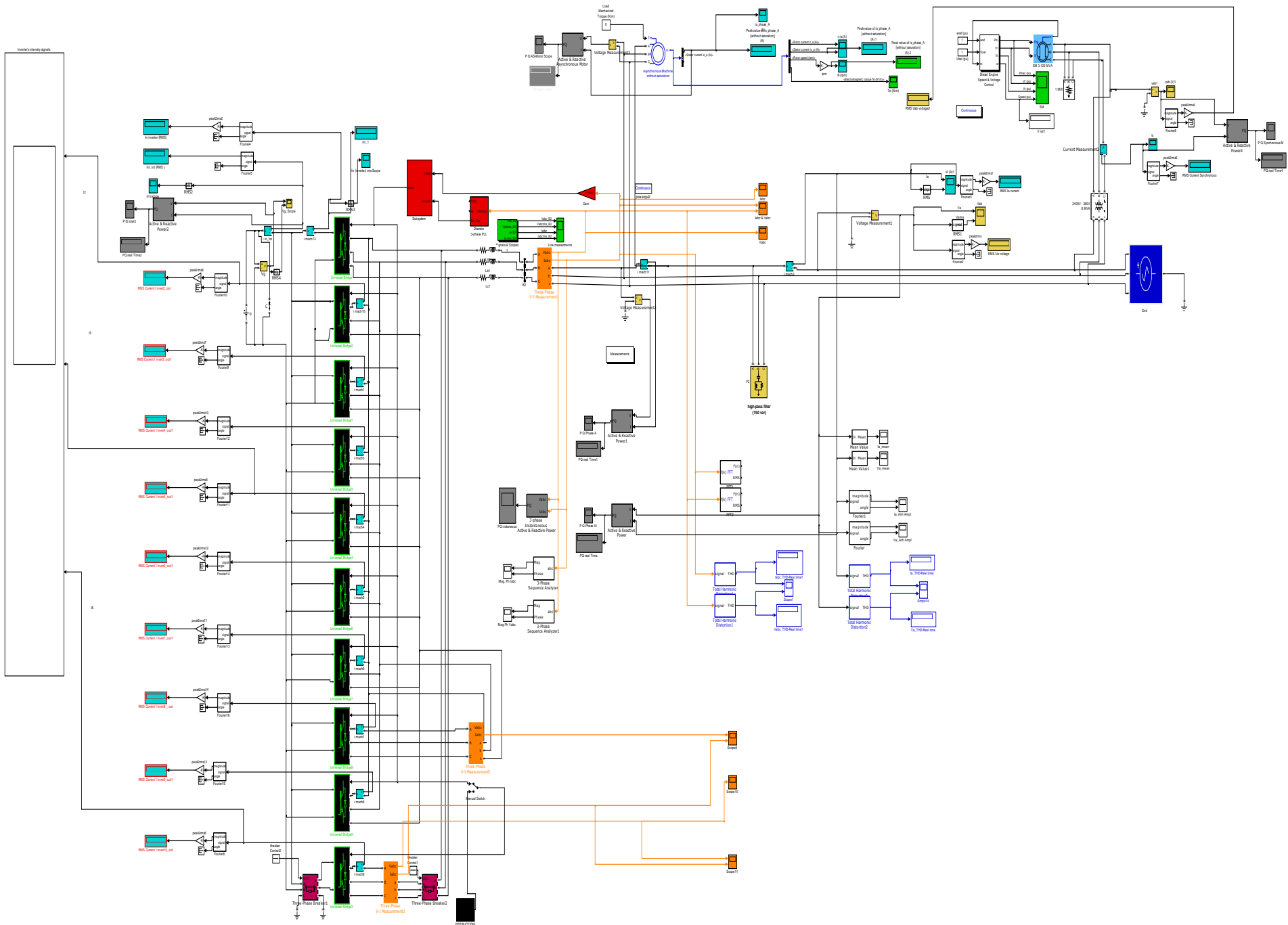


Figure III-1 Système de dix onduleurs connectés à un réseau complet

III.1.3 Simulation en temps réel sans anomalies sur le réseau

III.1.3.1 Le régime permanent

III.1.3.1.1 Forme des courants et des tensions à l'entrée du circuit

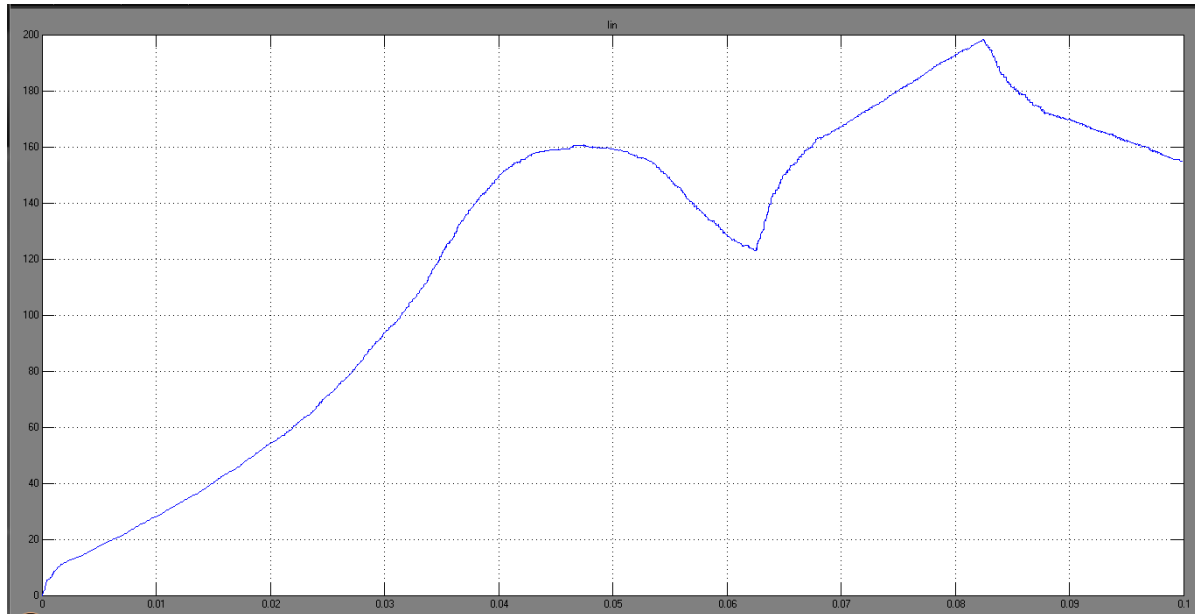


Figure III-2 Forme du courant d'entrée total pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts

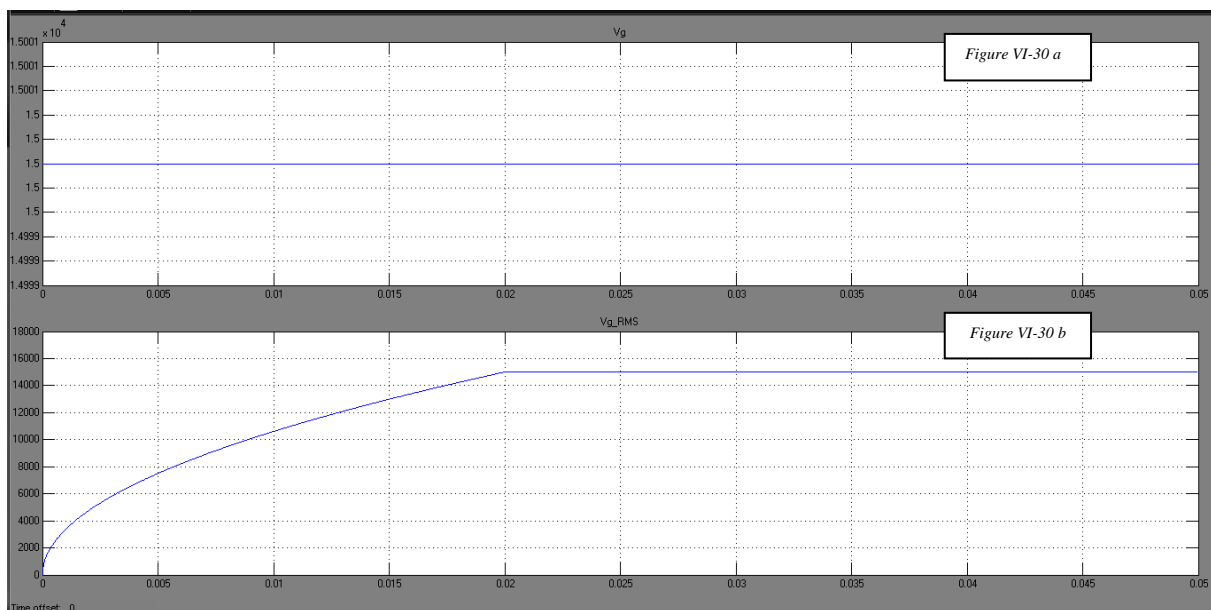


Figure III-3 Forme de la tensions d'entrée et établissement du régime permanent pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts

Interprétation

	Analyses	Interprétations
Courant d'entrée Total (Figure V-29)	<p>Avant que le courant n'atteigne son régime permanent, il passe par les régimes transitoires suivants:</p> <p>1) Au lancement de la simulation; une augmentation progressive du courant jusqu'à atteindre un courant d'entrée de 160A à l'instant 0.045s.</p>	<p>L'augmentation progressive du courant est un processus naturel pour amorcer la chaîne : « Onduleurs-Ligne-Réseau-Eléments non linéaire »</p>
	<p>2) Une fois le système est amorcé, le courant tend à atteindre un régime permanent.</p>	<p>Le régime permanent sous entend l'établissement du courant tout au long de la chaîne étudiée à l'instant 0.06s pour un courant d'entrée de 120A</p>
	<p>3) A l'instant 0.062s le courant augmente jusqu'à atteindre une valeur de 200A.</p>	<p>Une ré-augmentation du courant est essentiellement due au démarrage du moteur asynchrone à l'instant 0.045s engendrant l'appel de courant connu lors de démarrage des machines alternatives pour contrer la force d'inertie.</p>
	<p>4) Enfin, le courant tend à atteindre un autre niveau de régime permanent</p>	<p>Une fois le moteur asynchrone a démarré et la génératrice synchrone a atteint son régime permanent, le courant tend à atteindre un nouveau régime permanent difficilement visualisable et ce à cause des cas des « Out Of Memory ». En revanche on peut l'estimer à 140A.</p>
Tension d'entrée totale (Figure V-30)	<p>La tension d'entrée est une source continue. On constate que le régime permanent des tensions de la chaîne s'établit à partir de l'instant 0.02s comme prévu lors de la programmation des régulateurs PI.</p>	<p>Le temps de montée (0.02s) choisit lors de la construction du système de régulation apparaît bel et bien lors de l'établissement du régime permanent.</p>

Tableau III-1 Interprétation des résultats de la simulation des courants en aval de la batterie d'onduleurs pour le cas de la connexion de 10 onduleurs en parallèle avec un réseau sans défauts auquel sont connectés des éléments non linéaires

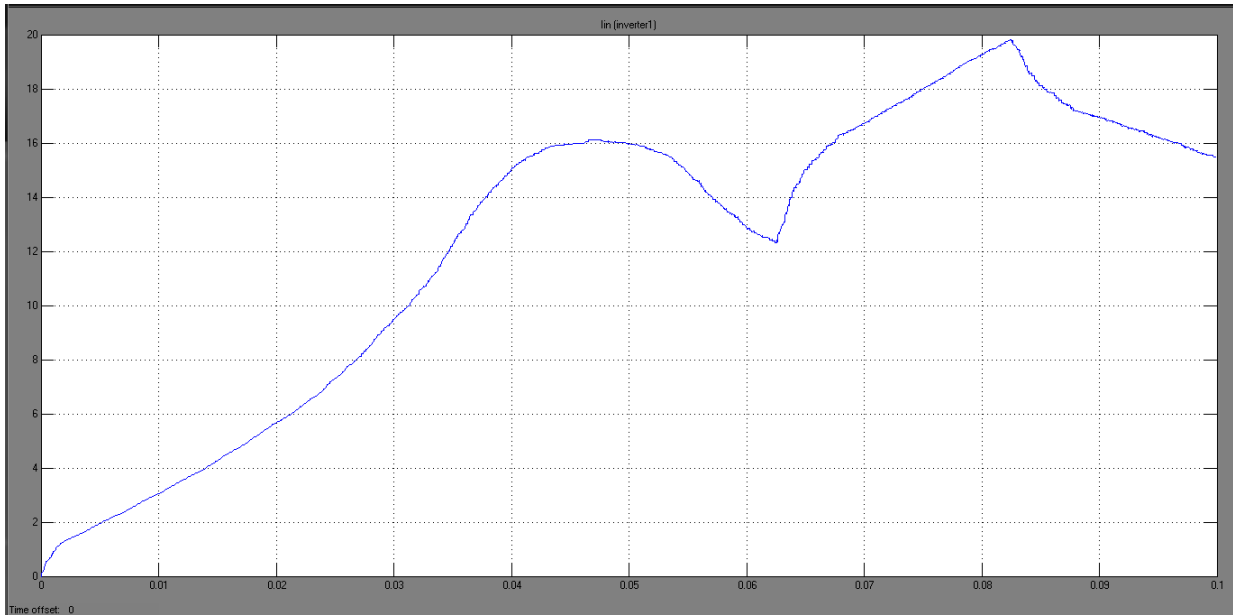


Figure III-4 Forme de courant d'entréesur chaque onduleur pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts

Un résultat d'une importance capital surgit à partir des deux figures (Figure V-29 et Figure V-31) :

On voit bien que les courant d'entrée sont bel et bien partagés équitablement sur l'ensemble des dix modules car la forme de courant d'entrée de la Figure V-31est la même que celle de la Figure V-29 à un facteur égale à 1/10.

III.1.3.1.2 **Forme des courants de sortie**

L'interprétation concernant les courants de sortie de la mise en parallèle de dix onduleurs est résumée dans le Tableau V-13

	Analyses	Conclusions
Courant de sortie i_{abc}	1) Courants de sortie parfaitement sinusoïdaux de fréquence 50Hz. (Figure V-32c) 2) Courants triphasés régulés selon le courant de référence 300A. (Figure V-32 c) 3) Régime permanent atteint à 0.02s. (Figure V-32 d)	La régulation des courants de sortie des dix onduleurs est bien réussie en fonctionnement normal sans défauts.
Tension de sortie V_{abc}	Tensions de ligne triphasées équilibrées d'amplitude $380V_{max}$ comme prévu. (Figure V-32 a)	La régulation de la tension est bien réussie.
	Pas d'harmoniques ni distorsion.	Le filtre est bien paramétré
	Il est bien clair que l'amplitude de la tension s'établit d'une façon permanente à l'instant 0.02s avec une amplitude de 220V ligne à neutre avec une phase de 120° . (Figure V-33)	La PLL à bien fonctionné, par conséquent on peut dire qu'on a réussi à bien la paramétrer.

Tableau III-2 Intréprétation des courants et des tensions de sortie et de leur amplitude et déphasage sur la phase pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts

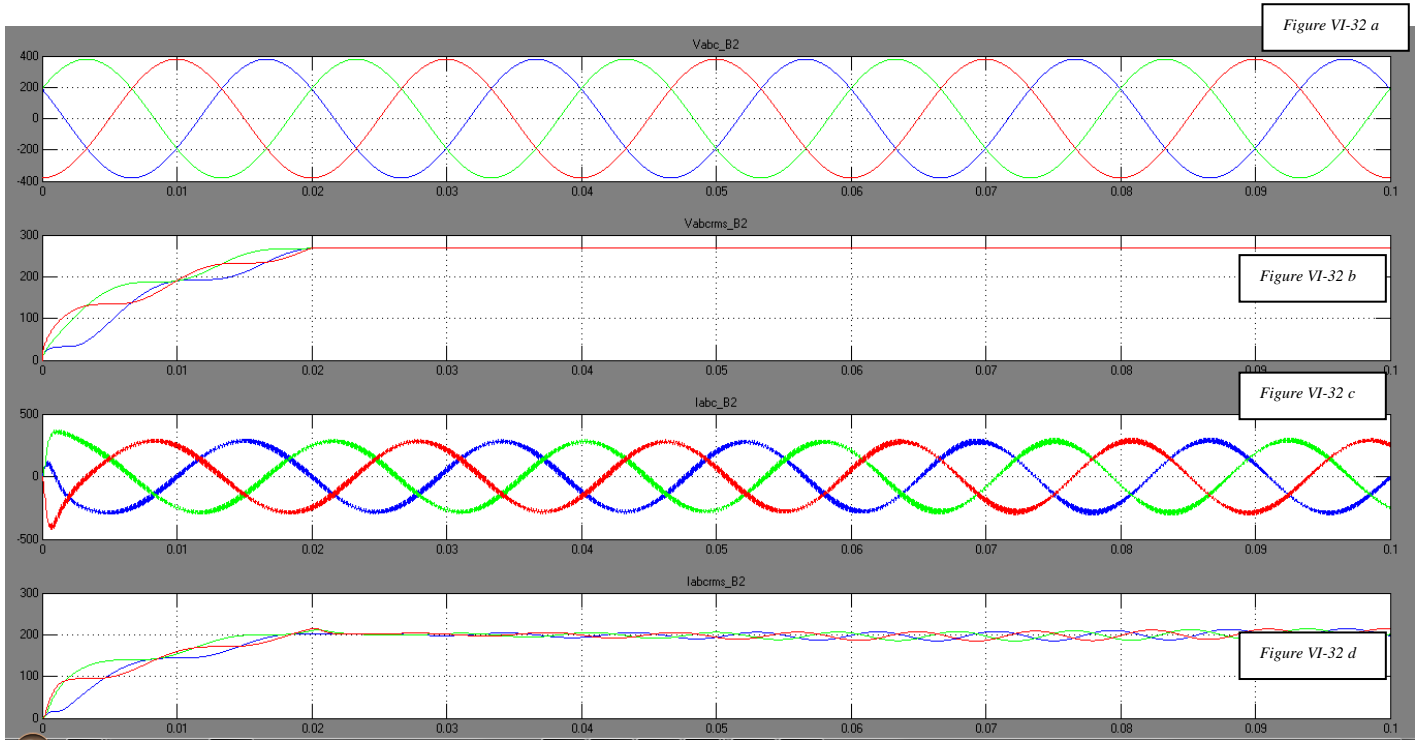


Figure III-5 Forme des courants et tensions de sortie sur les trois phases et établissement du régime permanent pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts

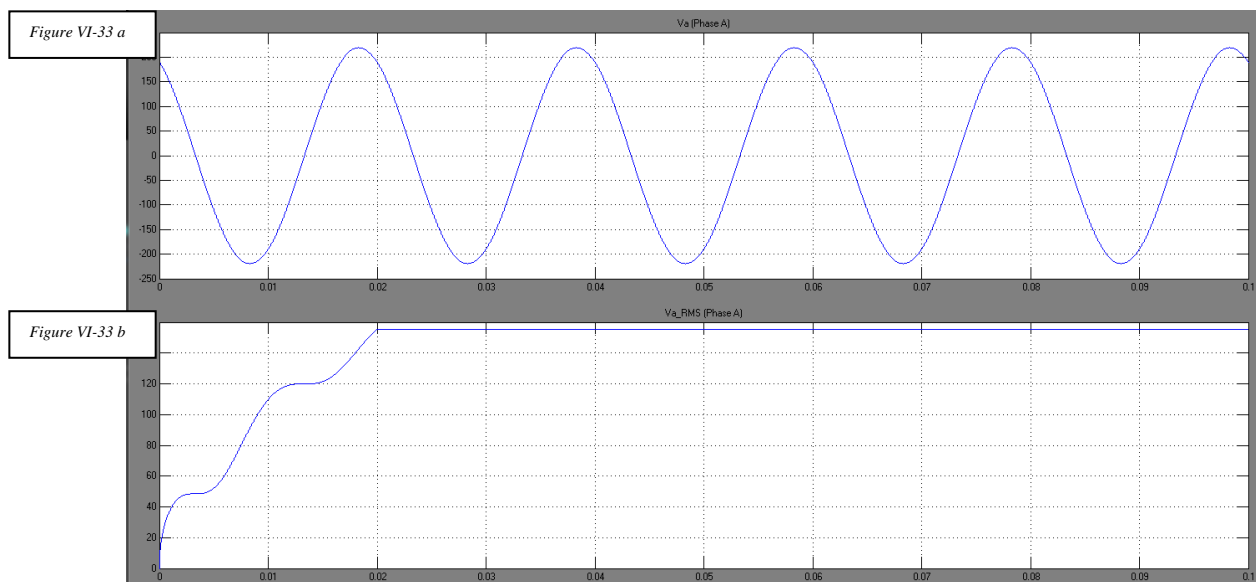


Figure III-6 Forme de l' amplitude de la tension de sortie sur une phase et établissement du régime permanent pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts

Un autre résultat très important concernant la mise en parallèle des dix onduleurs est le partage de courant de sortie. Sans cela, un courant de circulation [40] va être généré le long des dix onduleurs.

Dans notre cas, l'on remarque bien que le courant de sortie (300A) est bel et bien partagé (30A) le long des dix onduleurs (*Figure V-34*). Ceci nous permettra de vérifier que le partage de la puissance de sortie le long des dix onduleurs est parfaitement garanti.

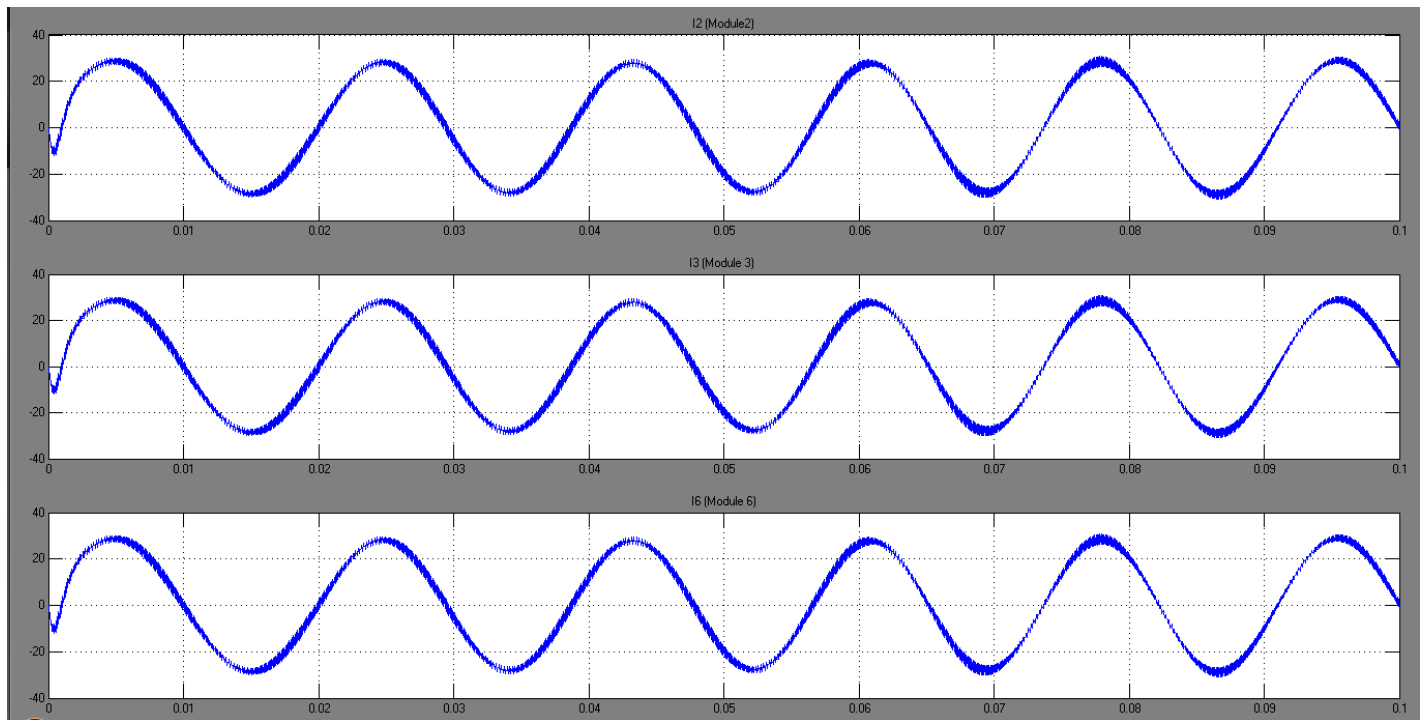


Figure III-7 Forme et partage des courants de sortie (modules 2, 3 et 6) pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de fonctionnement sans défauts

III.1.4 Simulation en temps réel en présence de défauts

III.1.4.1 Cas d'une perte d'un onduleur à l'instant 2.5ms

Coté alternatif

Après la perte d'un module et avant que le système n'atteigne son régime permanent (conditions sévères), le système conçu initialement avec un nombre de dix modules en parallèle se résume à un système de neuf onduleurs mis en parallèle.

On voit bien que la régulation agit correctement (*Figure V-35*)

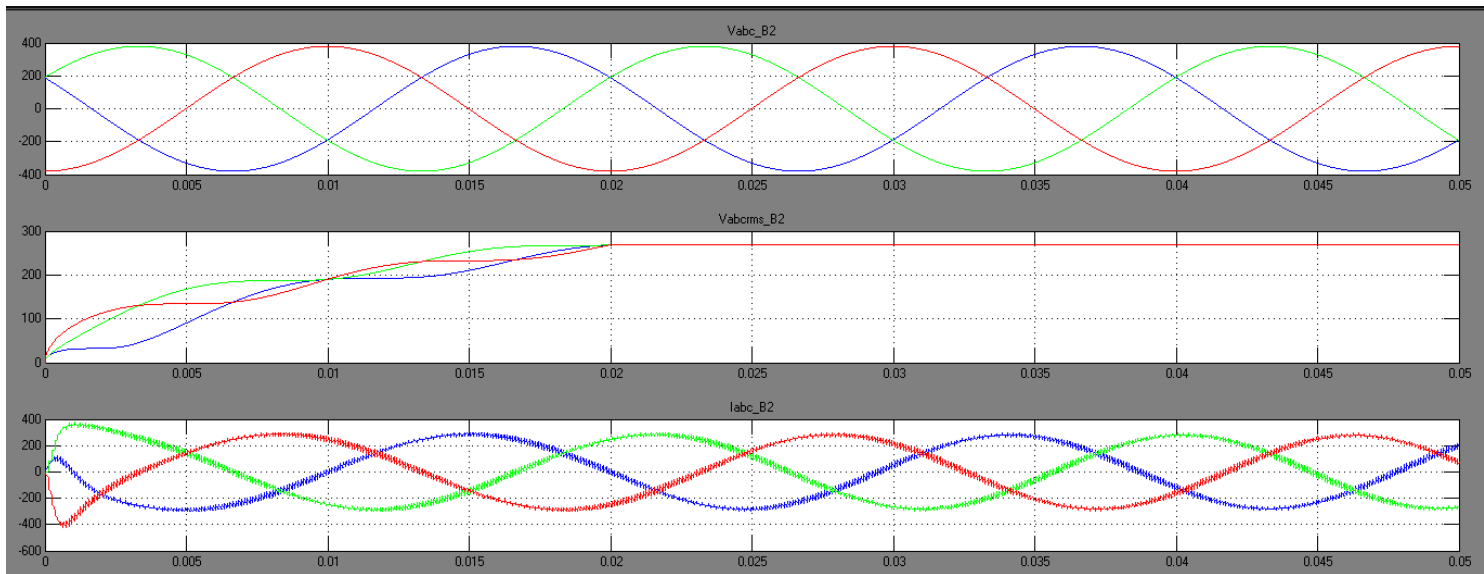


Figure III-8 Forme des courants et les tensions de sortie sur les trois phases pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de perte d'un onduleur

D'autre part, un résultat très important concerne le partage de courant de sortie et par la suite la puissance fournie au réseau. Le courant maximal de sortie pour chaque module qui était initialement égale à 30A ($n=10$), se voit maintenant augmenté à la valeur maximale de 33.33A (Figure V-36). Chaque onduleur devra supporter une augmentation de seulement 3.33A. Pour le cas de quatre onduleurs, cette augmentation serait de 25A sur chaque module. L'on notera bien l'intérêt de la mise en parallèle d'un nombre judicieux d'onduleurs.

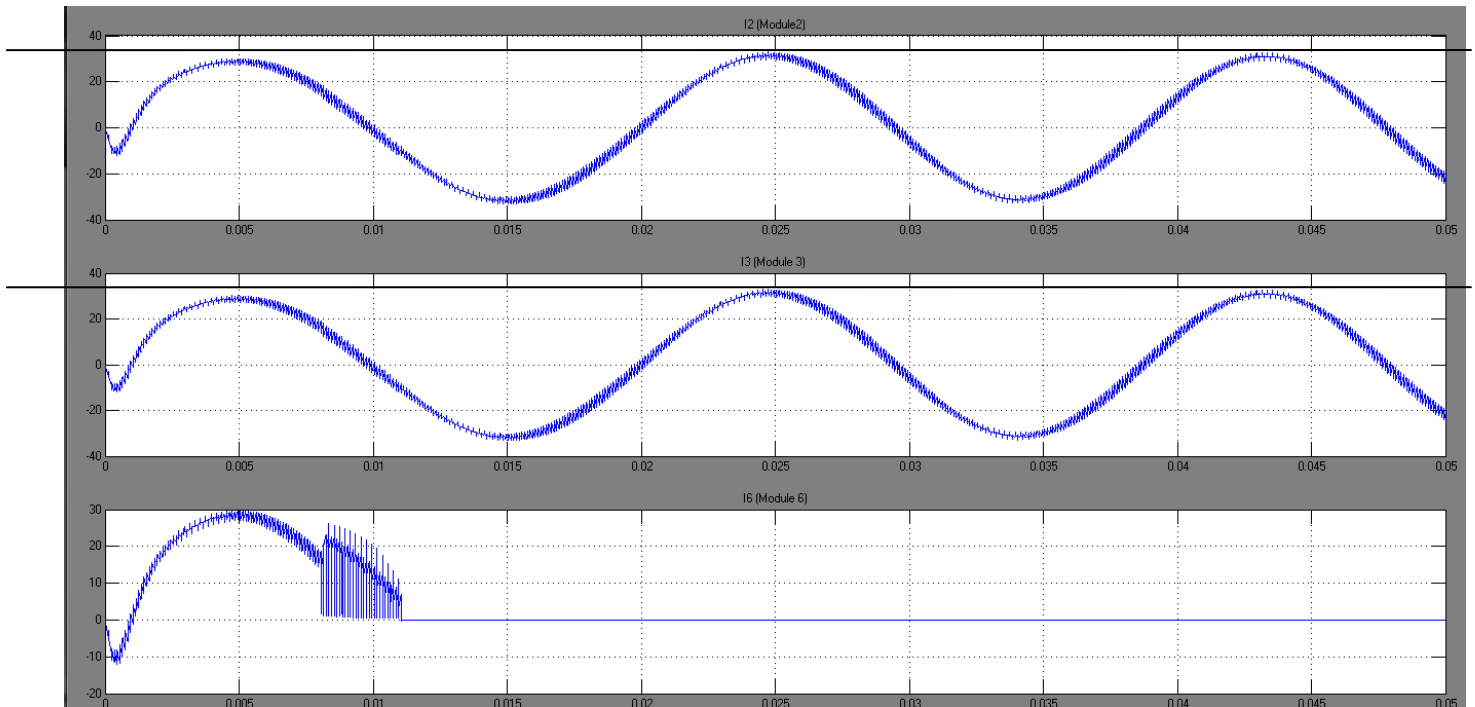


Figure III-9 Partage du courant de sortie en temps réel pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de perte d'un onduleur

III.1.5 Simulation de défauts d'harmoniques venants du réseau

III.1.5.1.1 Paramètres du défaut d'harmoniques

Les harmoniques injectées du côté réseau sont d'ordre trois et cinq avec des paramètres résumés dans le *Tableau VI-3* présenté en annexe.

L'on remarque bien que les harmoniques influent légèrement sur la forme des courants d'entrée en amont de la batterie d'onduleurs (*Figure V-37*) et ce comparativement au formes de courants d'entrée obtenues dans le cas de la connexion des dix onduleurs dans le cas de la non présence de défauts (*Figure V-29*).

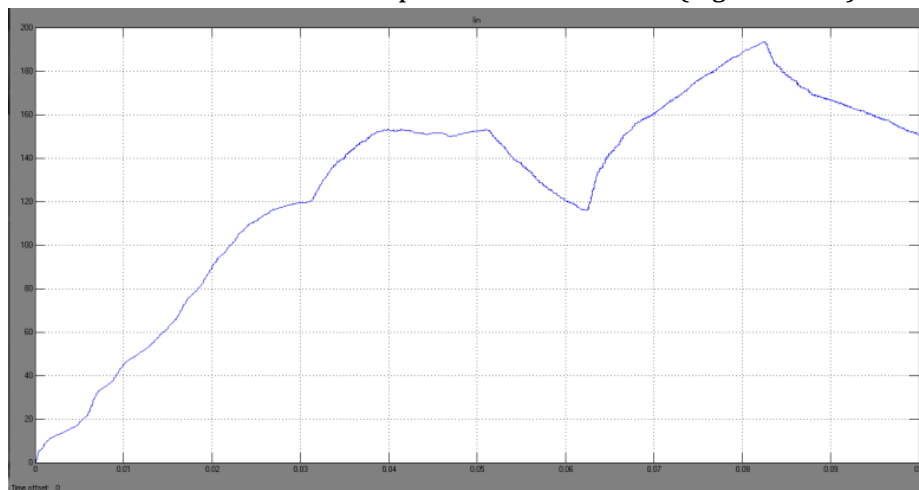


Figure III-10 Forme du courant total d'entrée pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de présence d'harmoniques

La Figure V-38 montre bien la fraction 1/10 du courant d'entrée sur chaque module par rapport au courant total d'entrée mais avec une légère influence des harmoniques.

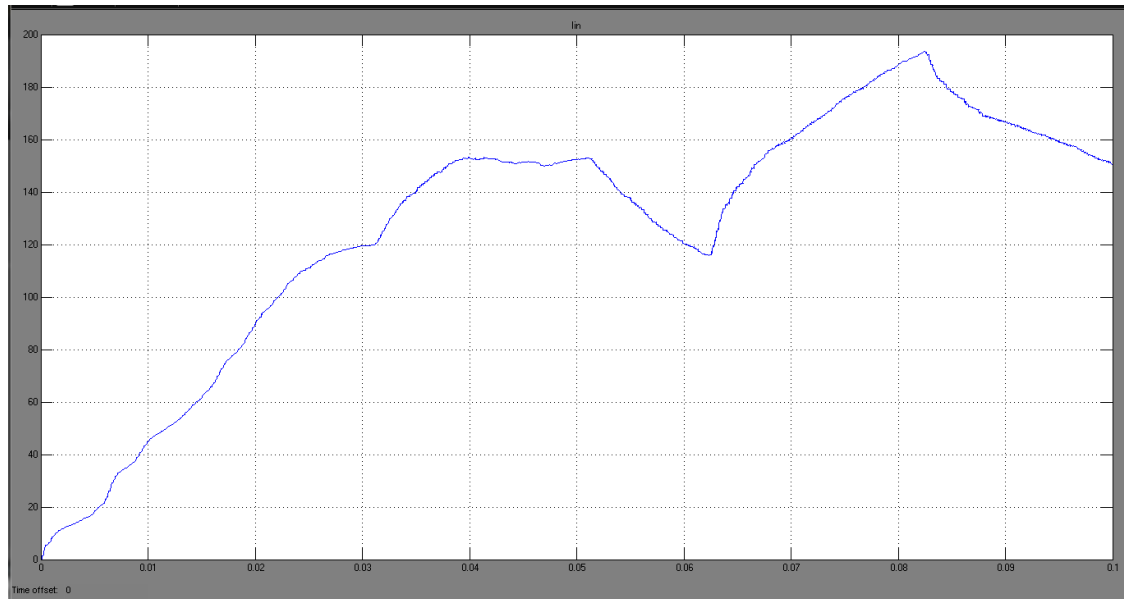


Figure III-11 Forme de courant total d'entrée sur chaque module pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de présence d'harmoniques

Lors de la présence de ces harmoniques de tension, un comportement presque identique est obtenu pour le courant de sortie total.

Une fois ces harmoniques disparaissent, le système revient vers son état d'équilibre. (*Figure V-39*)

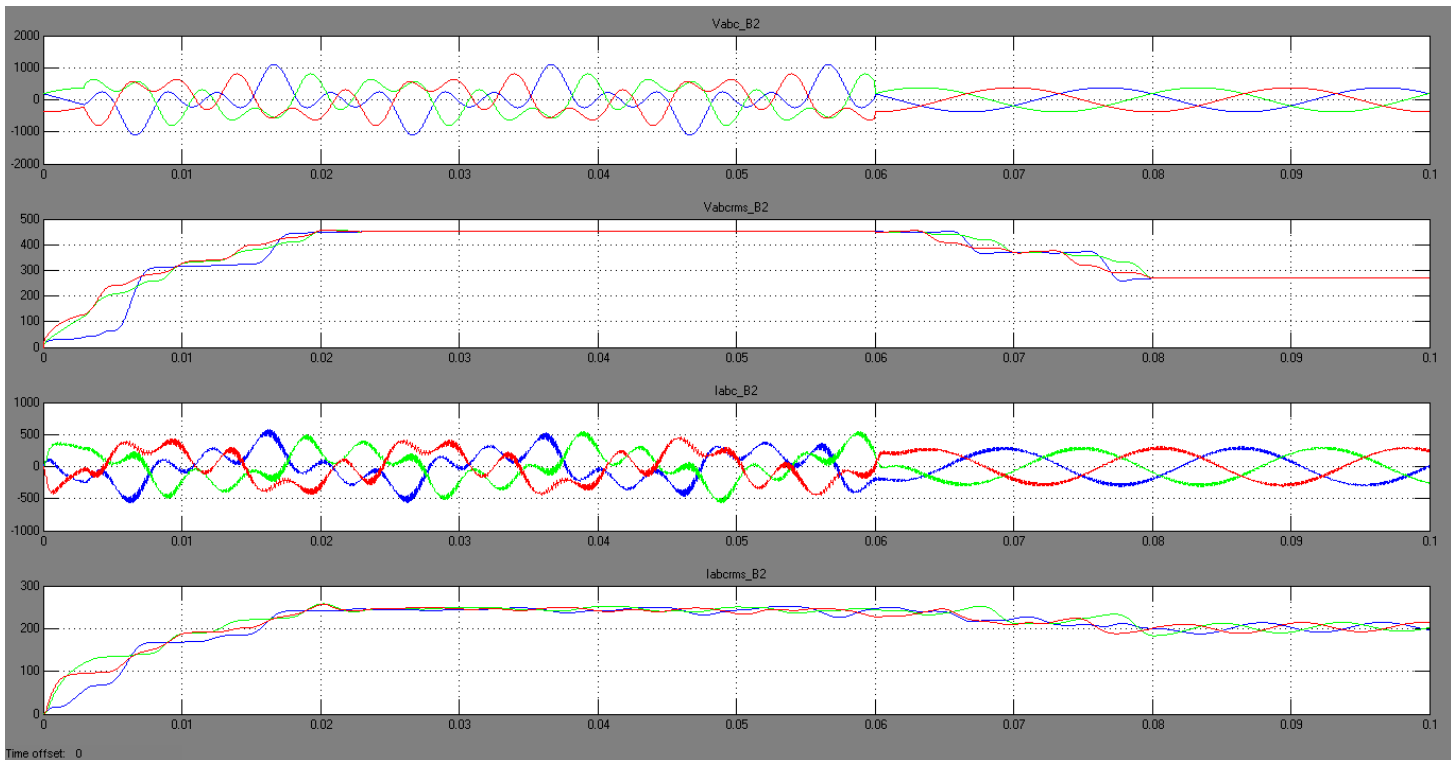


Figure III-12 Forme des courants et des tensions de sortie et établissement du régime permanent pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de présence d'harmoniques

Un résultat que nous jugeons très important est validé par la figure V-40 : On constate bien qu'après disparition des harmoniques, le système retrouve sa condition de fonctionabilité à savoir partage des courants de sortie (l'amplitude maximale du courant de sortie par onduleurs égale à l'amplitude maximale de courant de sortie total 300A divisé par dix).

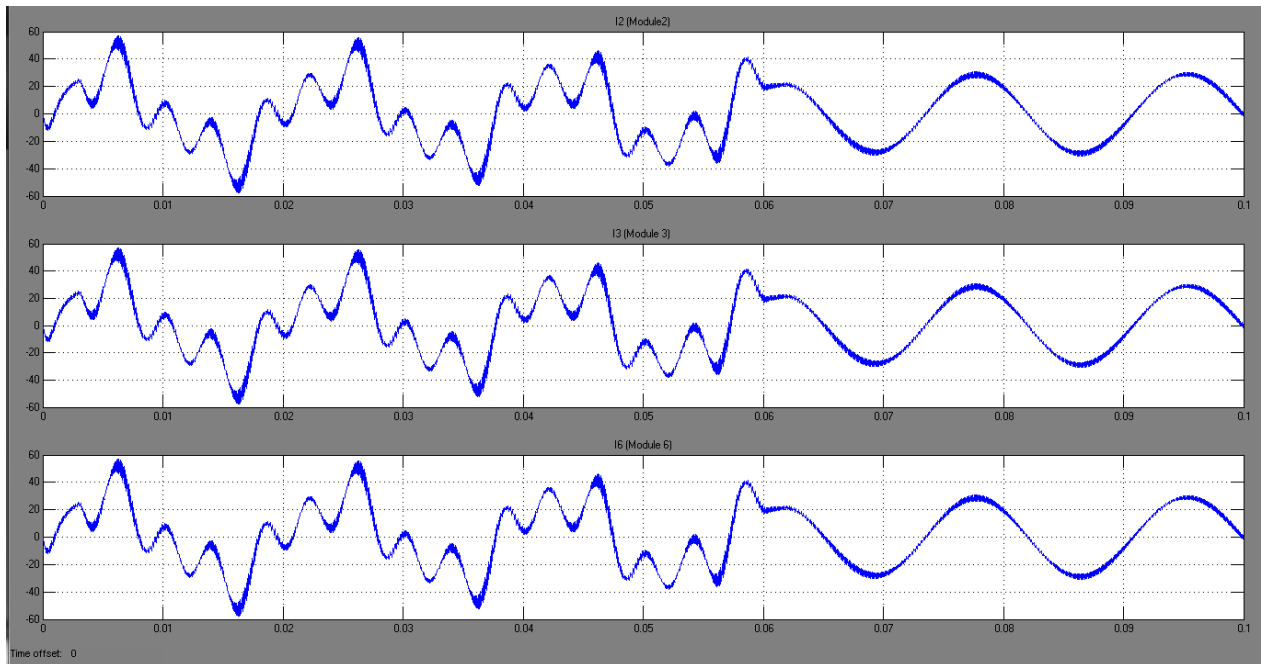


Figure III-13 Partage du courant en temps réel pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle à un réseau en situation de présence d'harmoniques

III.2 Partage de deux onduleurs pour un cas de la connexion en parallèle de douze onduleurs

III.2.1 Présentation du circuit

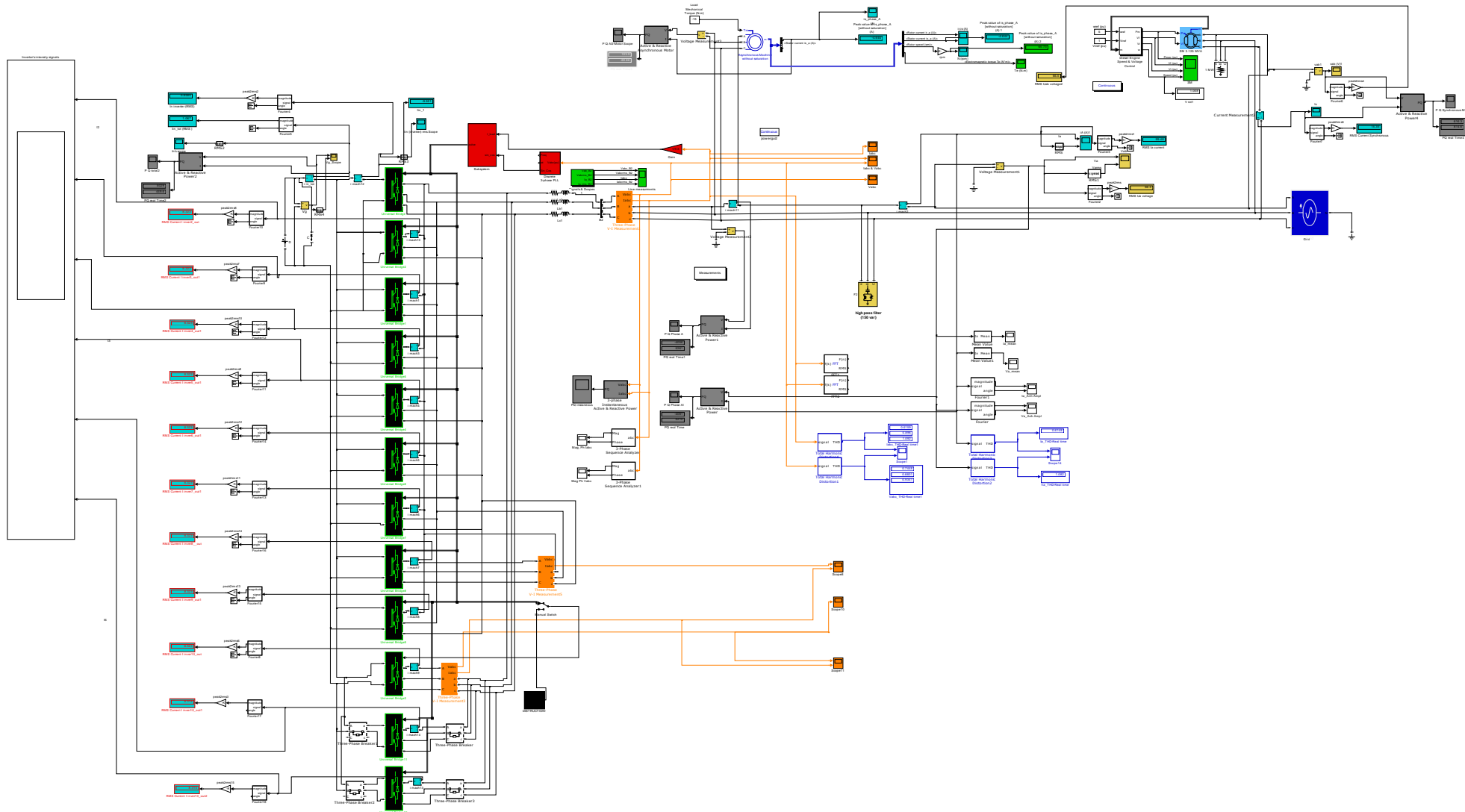


Figure III-14 Circuit de simulation pour le cas des douze onduleurs connectés en parallèle à un réseau comportant des charges non linéaires et sans présence de défauts

III.2.1.1 Partage de courant sur les douze onduleurs connectés en parallèle

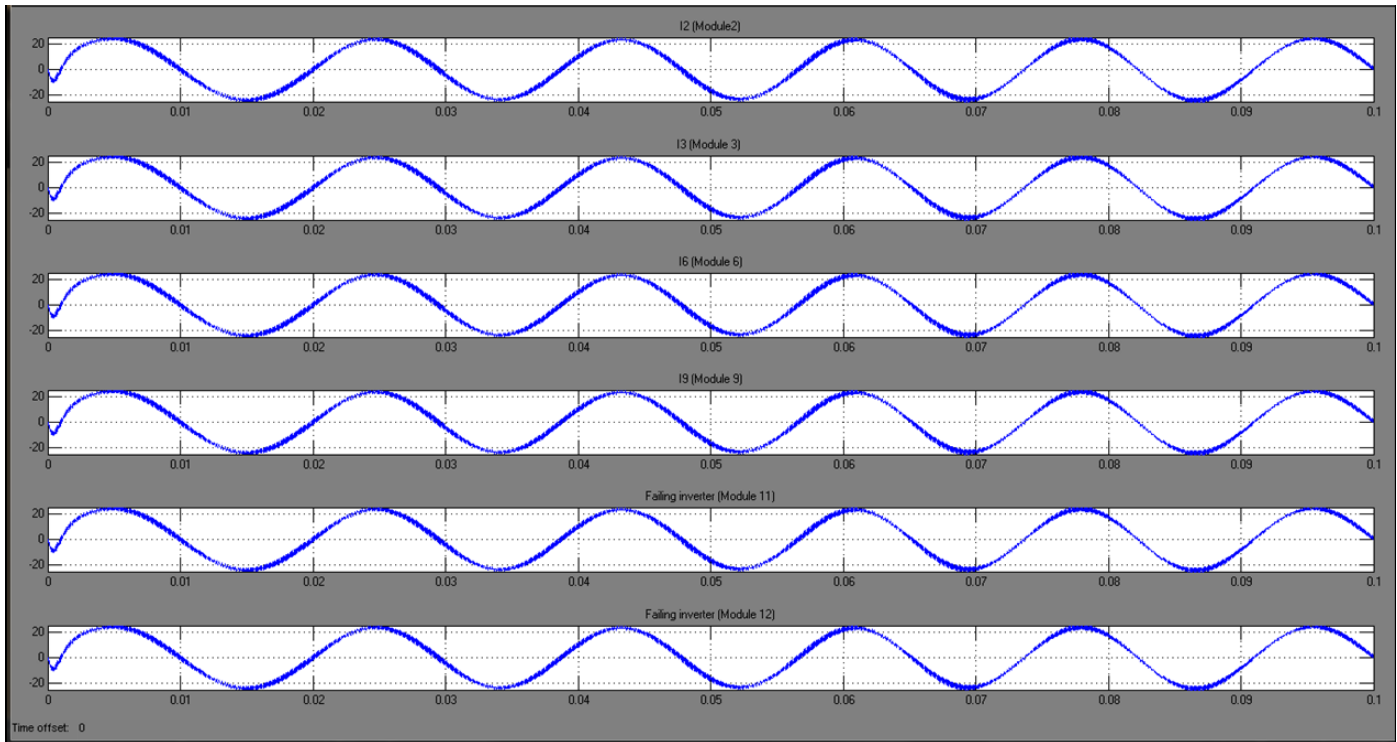


Figure III-15 Partage des courants de sortie en niveau des modules 2,3,6,9 et 12 dans le cas de la connexion de douze onduleurs en parallèle à un réseau complet sans présence défauts

III.2.1.2 Forme des courants de sortie sur chaque module dans le cas de la perte de deux onduleurs lors de la connexion de douze onduleurs connectés en parallèle

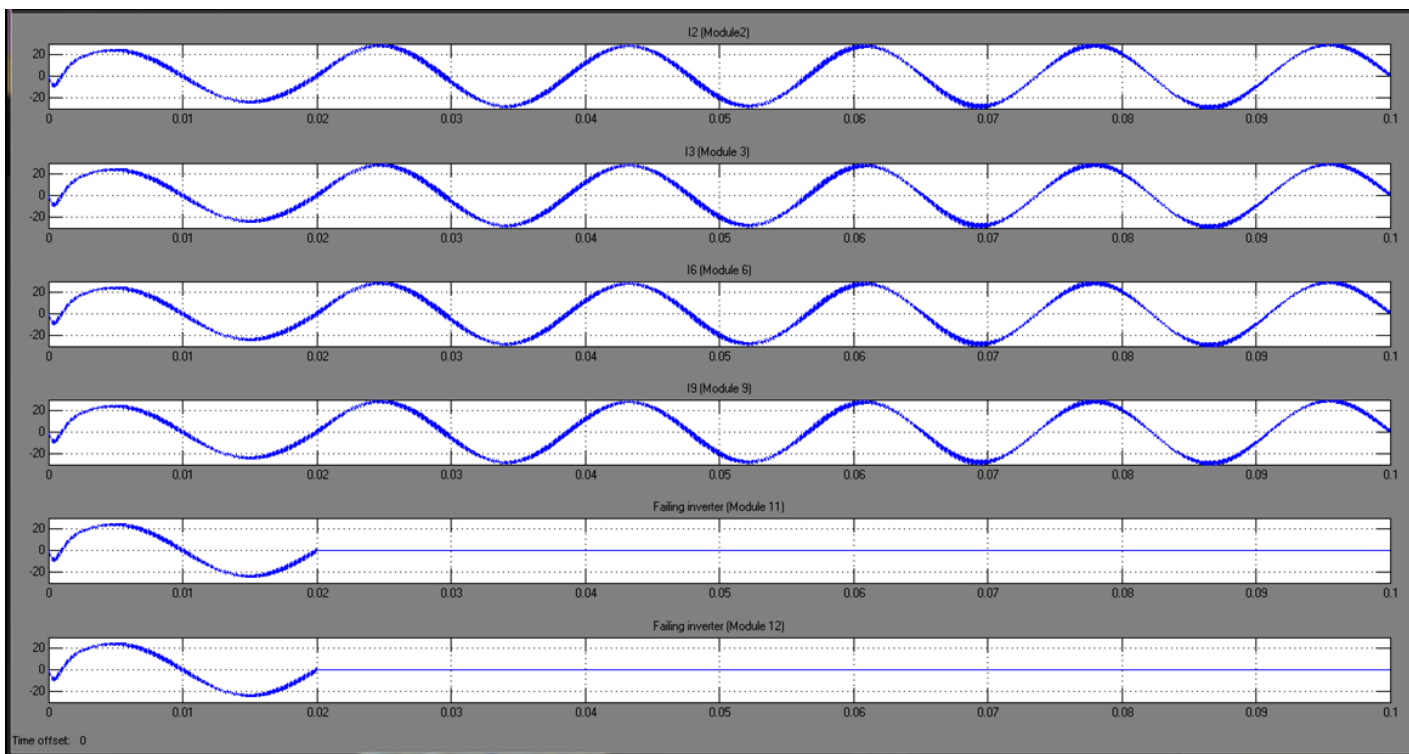


Figure III-16 Forme des courants de sortie des douze onduleurs connectés en parallèle avec un réseau comportant des charges non linéaires avec simulation d'une perte de deux onduleurs simultanément

De la figure III-16 l'on tire deux résultats de très grande importance :

- 1) Le partage de courant est assuré aussitôt les deux onduleurs se déconnectent.
- 2) Le courant délesté par les deux onduleurs (25A chacun) sera partagé équitablement sur les $n-2$ onduleurs ce qui fera un courant additionnel de 5A sur chaque module.
- 3) Si on étudie le cas de la connexion parallèle de 10 onduleurs, une défaillance simultanée de deux onduleurs fera délester un courant de 60 A alors chaque onduleur devra supporter un courant de 6.66A au lieu de 5A.
- 4) Cela montre bien l'importance de connecter un nombre judicieux d'onduleurs.

III.3 Conclusion

La simulation des différents défauts qui peuvent surgir pendant le fonctionnement du système a donné des résultats très satisfaisants vu que le système retrouve toujours son état d'équilibre après le passage des avaries. Néanmoins, le temps de simulation augmente d'une façon significative lors de la connexion de douze onduleurs en parallèle, et augmente encore plus lors de la simulation de la perte de deux onduleurs simultanément.

Conclusion générale

Les simulations temps-réel ont été réalisées en traitant le plus grand nombre possible de cas avec ou sans défauts. L'objectif a été de pouvoir juger la validité des méthodes théoriques adoptées et suivies soit en boucle fermée.

Dans le Chapitre I, on a montré l'importance des onduleurs en électronique de puissance et l'intérêt particulier de la mise en parallèle des blocs d'onduleurs par rapport aux onduleurs multiniveaux. On a bien effectivement mis en exergue les avantages de la mise en parallèle des onduleurs notamment le partage de puissance, la redondance, l'amélioration de la fiabilité et la continuité du transfert de puissance, l'habilité de commutation à hautes fréquences, l'amélioration des formes d'ondes à l'entrée et à la sortie du convertisseur et la simplicité de la modélisation de leur commande.

Ensuite au chapitre II, on a traité les avantages d'une modélisation. On a montré aussi que pour une modulation donnée, l'influence des différents paramètres sur la stabilité du système global.

Au chapitre IV, après avoir obtenu le modèle moyen dans le référentiel de Park de la chaîne « onduleur-ligne-réseau » de « n » (dix et douze) onduleurs connectés en parallèle à un réseau, une simulation de la fonctionnalité de toute la structure est vérifiée pour quelques défauts de réseau dont on a bien remarqué que la régulation choisie garantit le retour du système à son état d'équilibre après disparition du défaut. Autre résultat important obtenu est le partage du courant de sortie et par la suite le partage de la puissance fournie au réseau le long des « n » onduleurs.

Au bout des raisonnements adoptés et démarches suivies, on estime que les résultats obtenus sont encourageants et montrent clairement l'intérêt de la simulation en temps-réel.

Pour ce, d'éventuels travaux peuvent être envisagés dans le cadre de la mise en parallèle d'onduleurs, on peut citer :

- 1) Choisir une autre technique appropriée de commande pour le control des onduleurs.
- 2) Envisager des sources primaires (photovoltaïque ou éolienne) de différentes connections, avec leur éventuelle régulation ou leur programmation (hacheur élévateur ou abaisseur...).
- 3) Etudier d'autres types de défauts et leur influence sur le circuit total et par la suite élaborer une base de données fiable pour un bon diagnostic.
- 4) Envisager la connexion de toute une batterie de filtres (filtrage complet) et étudier leurs influences sur le système malgré la présence de la MLI connue pour son bon filtrage d'harmonique.
- 5) Etude de la fonction compensation du VSI qui sera désormais par abus de langage un VSC ou SVC (Static Var Compensator) et la chaîne global onduleurs-réseau sera appelée D-Statcom, d'où l'étude d'un double fonctionnement de l'onduleur : la conversion et la compensation réactive.

Annexe A

IV.1 Résumé des hypothèses

- 1) Les intercepteurs sont considérés parfaits et identiques (Donc une résistance de valeur nulle à l'état passant, infinie à l'ouverture et commutations instantanées)
- 2) Les cellules d'interrupteurs placées en série ou en parallèle et commandées par les mêmes signaux sont considérées comme un seul interrupteur parfait
- 3) Les sources étant parfaites
- 4) Les éléments passifs de la structure du convertisseur sont invariants et linaires et ne dépendent pas des autres contraintes électriques et ne peuvent pas se saturer
- 5) Toutes charges présentant des caractéristiques similaires, connectées en série ou en parallèle, sont groupées et représentées par des équivalents
- 6) Entre deux commutations, un seul interrupteur est passant
- 7) La commutation implique le changement simultané et complémentaire de deux interrupteurs et de deux seulement.
- 8) Tous les onduleurs reçoivent une même commande.
- 9) La non circulation du courant, en d'autre termes un régime de neutre complètement absent. [16].
- 10) Les tensions de sortie sont triphasées équilibrées sauf cas de défauts ou c'est nous qui générerons le déséquilibre voulu
- 11) Si le coefficient de connexion $U_i=1$ alors son complément $/U_i=-1$.
- 12) La fréquence de découpage de la MLI est assez importante devant la fréquence des fondamentaux des modulantes, alors les moyennes glissantes des fonctions de commutation peuvent être considérées comme égales aux modulantes des signaux MLI.

IV.2 Paramètres de filtrage

Tuningfréquence $f_n=11*50$, avec un facteur de qualité : $Q = 19$, alors de la section VI.2.1.9.1, on tire le tableau suivant :

Le taux de réduction des harmoniques	11	Réactance capacitive X_c	3.09m Ω
Puissance active(P)	7.96 W	Réactance inductive X_L	0.002m Ω
Puissance réactive de compensation Q_c	150 Var	Bande passante (β)	0.57

Tableau IV-1 Paramètres du filtre passif passe haut

IV.3 Le D-statcom

IV.3.1 Le Statcom

C'est un système de compensation utilisé pour les courants alternatifs dans les réseaux électriques de transmission. Généralement il se base sur des VSC, et ceci pour la consommation ou l'injection du réactif dans le réseau. C'est une source de puissance (machine synchrone dans notre cas) se connecte à se type de réseau, il pourra en effet produire de la puissance active. [41] On choisit juste d'étudier la fonction conversion.

Fonctionnement : Si la tension de sortie des VSC est plus grande que la tension du réseau au point de connexion, le Statcom génère un courant réactif, vice versa si la tension à la sortie du VSC est plus petite que celle au point de la connexion, il absorbe de la puissance réactive. .

Caractéristiques :

- Une très bonne et stable tension
- Amélioration du facteur de puissance pour les réseaux en ayant un mauvais. [41]
- Stabilise le réseau électrique et favorise l'intégration du renouvelable [42]

IV.3.2 Le D-Statcom

« On définit un réseau de distribution D-Statcom comme : (Distribution STATic COMPensator), c'est une application d'un onduleur de tension couplé en shunt à un réseau dans le but de le compenser et pour l'interfaçage des puissances, cela dit » »

C'est la connexion du réseau Statcom à un réseau de distribution d'où la naissance d'un réseau D-statcom, réseau de distribution amélioré pour en sortir avec les avantages suivants : [43]

- 1) Une compensation du réactif assez rapide
- 2) Une grande stabilité de la tension
- 3) La suppression des Flickers (oscillations)
- 4) Limiter les surchauffes des charges qui lui sont connectées durant les régimes transitoires.
- 5) Le réseau idéal pour les charges dynamiquement non linéaires sans même l'utilisation des batteries de condensateurs ou tout de moins limiter leur volumes
- 6) Connu pour son court temps de réponse et sa capacité de supporté jusqu'à 32,5% de la charge nominale pendant 1 à 3 secondes et puis sa stabilité, ce qui extrêmement intéressant lors de la connexion des sources primaires aux réseaux conventionnels puissant offrant ainsi une meilleure performance.
- 7) L'amélioration de la tension est tellement impressionnant que nous avons jugé de le montrer si dessous :

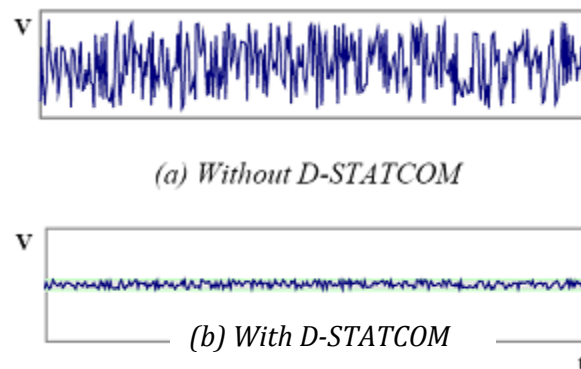


Figure IV-1 Distorsion de la tension d'un réseau avec et sans connexion d'un D-Statcom [43]

- 8) Diminuer le besoin d'en rajouter de nouvelles lignes de transmission ou même de besoins de génération. [44]

Donc

La transformée de utilisée dans la modélisation du l'onduleur

IV.3.3 Le bloc de la transformation de Park associé à celle de Park :

Le bloc est géré par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad VI1$$

Pas du homopolaire car on n'a pas connecté le neutre du coté alternatif de l'onduleur, alors la matrice inverse sera la suivante :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad VI2$$

IV.3.4 La transformée de Clark :

Le principe est simple, un système triphasé de bobines parcouru par des courants déphasés de $(2\pi/3)$ créera un champ tournant de vitesse ω , et puis un système diphasé constitué de 2 bobines perpendiculaires l'une par rapport à l'autre et parcourues par des courants permettent de créer un champ tournant de vitesse ω .

IV.4 Régulation

IV.4.1 PI de la boucle de courant

D'après les paramètres des PI suivants :

Erreur ! Source du renvoi introuvable.

Erreur ! Source du renvoi introuvable.

Et en prenant en considération les hypothèses simplificatrices de simulation suivantes :

- 1) On néglige les inductances de sortie des onduleurs en choisissant une injection directe sur un jeu de barre juste à la sortie de chaque onduleur
- 2) On considère que le caractère inductif du réseau l'emporte sur celui résistif.
- 3) En choisissant des paramètres les plus proches des cas réels et qui prennent en considération.
- 4) En prenant les valeurs d'asservissement suivantes.

temps de montée (t_m) (s)	2.10^{-2}	Coefficient d'amortissement (z)	0.7
Tension d'entrée V_o (V)= E_d	1500	Inductance de la ligne (H)	$0.5.10^{-3}$
Résistance de la ligne (Ω)	8.10^{-3}	Oscillations propre (après calculs) rad/s	1096.66
K_{ii}	0.801	K_{pi}	$1.101.10^{-3}$

Tableau IV-2 Calcul des paramètres des régulateurs de courant

Annexe B

Paramètres de défauts d'harmoniques (section V-2-5)

	Ordre de l'harmonique	Amplitude de l'harmonique de la tension (pu)	Phase de l'harmonique de tension(°)	Temps de l'application de l'harmonique
Harmonique I	3	0.9	60	[0.03, 0.06]s
Harmonique II	5	1	-120	[0.03, 0.06]s

Tableau V-1 Paramètres de défauts d'harmonique de réseau pour le cas de la connexion de dix onduleurs en parallèle avec un réseau auquel lui sont connectés des charges non linaires (section V-2-5)

Paramètres de simulation

Tension d'alimentation	15000 V									
Onduleurs	Résistance de décharge(Ω)	Capacité interne(F)	Nombre de phases	Résistance interne (Ω)	Temps de commutation	Type				
	10^5	Inf	3	10^{-3}	$[10^{-6}, 2.10^{-6}]$	IGBT à diodes de récupération				
ligne	Resistance/phase (Ω)				Inductance/phase(H)					
	8.10^{-3}				$0.5.10^{-3}$					
Réseau	U_{max}	Déphasage entre phases	Types de défauts possibles à générer (en rampe, en échelon, en rampe, en modulation défauts équilibrés et non équilibrés)							
	380	120°	Creux de tension- Bosses de tension-Baisse de fréquence-Sur fréquence-Déphasage-Génération d'harmoniques et défectueux défauts déséquilibrés							
Machine synchrone	Moteur diesel d'entraînement			Génératrice synchrone non saturée en rotor à pôles saillants						
	Module Matlab/Simulink, avec régulateur de couple			V_s (V)	P_n (W)	R_s (Ω)	J (kgm. ²)	Pôles	Conditions initiales	Saturation
				2400	$3,125.10^6$	0.0036	1.07	2	Mise à 0	Non
Transformateur Machine synchrone/réseau	$U1/U2$ (V)	P_n (W)	$R1$ (Ω)	$L1$ (H)	$R2$ (Ω)	$L2$ (H)		Inductance magnétisante(H)	Résistance magnétisante (Ω)	
	2400/380	6.10^6	0.00144	$9,1679.10^{-6}$	0.0001083	$6.8946 10^{-6}$		0.61	192	
Machine Asynchrone (laboratoire de machine département Electrotechnique à P=2 cage d'écureuil	P_n (W)	V/U (V)	R_s (Ω)		L_s (H)	R_r (Ω)		L_r (H)	L_m (H)	J (kgm. ²)
	3500	220/380	0.76		0.076	0.74		0.077	0.074	0.02

Tableau V-2 Paramètres généraux de simulation

Lexiques

AC	Alternative Current
DC	Direct Current
D-FACTS	Flexible AC Transmission Systems for Distribution power system
D-STATCOM	STATic COMPensator for Distribution power system
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI (Correcteur)	Correcteur Proportionnel Intégral
PLL	Phase Locked Loop
PWM	Pulse Width Modulation
RL	Résistance et Inductance placés en série
STATCOM	STATic COMPensator
SVC	Static Var Compensator
VSC	Voltage Source Converter
VSI	Voltage Source Inverter

Bibliographies

1. **Miłosz Mi'skiewicz, Arnstein Johannesen.** *Control of parallel inverters.* [PDF, CD-ROM]. SPRING SEMESTER 2009. pp. 1-6. PED4 - 1034.
2. **John G. Ciezki, Robert W. Ashton.** *The Control of Parallel-Connected Inverters for U.S. Navy Shipboard Applications.* [PDF]. April 18 2001 . pp. 1-6. NPS-EGO 1 -003 .
3. **F. Labrique, G. Seguiet, and R. Bausiere,.** *La conversion continu-alternatif.* Paris : TEC and DOC, - Lavoisier, 1995. pp. 55-58. Vol. 4.
4. **N. Mohan, T. Undeland, and W. Robbins.** *Power electronics - Converters, Applications and Design.* Power Electronics Product line, John Wiley and Sons Inc. New York, USA : s.n., 1995. Industrial intern's paper , 2nd ed.
5. **H.Rachid, Muhammad.** *Power Electronics, circuits, devices, and applications.* [ed.] Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey. USA : s.n., 1993.
6. **P.R.K, Chetty.** Current injected equivalent circuit approach to modelling and analysis of current programmed switching DC-to-DC converters (discontinuous inductor conduction mode) [PDF]. [ed.] IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. MAY/JUNE 1982, Vol. NO. 3, p. 295.
7. **Lee.et, Fred.C.** *Modeling, Analysis, and Design of Distributed Power Electronics System Based on Building Block Concept.* Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, USA : s.n., May 1999. Thèse .
8. **S. Luo, Z. Ye, R. Lin, F. Lee.** A Classification and Evaluation of Paralleling Methods for Power Supply Modules Proceedings. PESC 1999. : s.n.
9. **K. Matsui, Y. Murai, M. Watanabe, M. Kaneko, F. Ueda,.** *A pulsewidth-modulated inverter with parallel connected transistors using current-sharing reactors, on Power Electronics.* IEEE Transactions,. April 1993. pp. vol. 8, no. 2, pp. 186-191, IEEE conference.
10. **MERDASSI, Asma.** *Outil d'aide à la modélisation moyenne de convertisseurs et Outil d'aide à la modélisation moyenne de convertisseurs statiques pour la simulation de systèmes mécatroniques.* Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble . Grenoble, France : s.n., 11 Novembre 2009. THESE de Doctorat.
11. **Anupam Mishra, Sunil Panda, B. Srinivas.** *Control of Voltage Source Inverters using PWM/SVPWM or Adjustable Speed Drive Applications.* Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology Rourkela. Orissa_India : s.n., 2009. pp. 14-49.
12. **Holger Wrede, SEG GmbH & Co. KG.** *High dynamic control of a voltage source inverter in grid parallel operation with minimised current distortion even under harsh voltage conditions.* Krefelder Weg 47 47906 Kempen Germany : s.n. PhD Thesis.
13. **Hocine, Daou.** *Introduction aux systèmes de commandes ESD, DCS.* Station de Pompage du Petrol Brut Beni Mansour SBM. Bejaia : s.n., 2011. pp. 15-17, Rapport de Stage Pratique. <http://www.slideshare.net/enphoucine>.
14. **International Journal of Engineering and Technology, Google, Wikipedia, Power electronics- P. S. Bhimra.** inverters. Octobre 2011.
15. **Mahmoudi.M.** *Les onduleurs.* Département du Génie Electrique, Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique. Alger, ALGERIE : s.n., 2010. pp. 4-7, Cours.

16. **GOMBERT, Christophe.** *Simulation temps-réel des dispositifs d'Electronique de Puissance dédiés aux Réseaux d'Energie Electrique.* Laboratoire de l'"Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du signal", Ecole Doctorale de de Grenoble. Grenoble : s.n., le 29 Septembre 2005. Thèse de Doctorat.

17. **BAIUO Azzeddinne, BELALI Mohammed.** *Analyse de la mise en parallèle de « n » onduleurs selon la moyenne dans l'espace d'état.* Ecole Nationale polytechnique d'ALger. Alger, ALGERIE : s.n., 2011/2012. Projet de fin d'études.

18. **Yu Zhang, Zhenhua Jiang, and Xunwei Yu.** *Small-Signal Modeling and Analysis of Parallel-Connected Voltage Source Inverters.* Department of Electrical and Computer Engineering, University of Miami. Coral Gables, FL 33146 USA : s.n., 2009. PhD Thesis. 978-4244-3557-9/09/\$25.00.

19. **Wikipédia.** Onduleur. *Onduleur.* [Online] Wikipédia. [Cited: avril 02, 2013.] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Onduleur.](http://fr.wikipedia.org/wiki/Onduleur)

20. **Etxeberria-Otadui.** *les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique - Application à la qualité de l'énergie.* INPG. France : s.n., 2003. Thèse.

21. **Wikipédia.** les onduleurs. [Online] [Cited: Avril 02, 2013.] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Onduleur.](http://fr.wikipedia.org/wiki/Onduleur)

22. **Université de Savoie.** *Énergie et convertisseurs d'énergie, Onduleurs Autonomes.* Université de Savoie. 2003. Cours EEA.

23. **Mahmoudi.M.** *Convertisseurs statiques.* Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Alger,Algérie : s.n. pp. 01-07, Cours.

24. **M.Kéita.** *Technique de commande des convertisseurs. Maitrise en technologie des systèmes.* Québec, Montrial : Ecole de technologie supérieure université du Québec, 26 Aout 1999.

25. **Département de Génie Electrique et Informatique Industrielle de Grenoble.** *Polycopié DUT Génie électrique et informatique industrielle.* Electrotechnique & Electronique de Puissance, Université de Grenoble. 2005. Cours.

26. **Ortmeyer, A. M. Kamel and T. H.** *Harmonic reduction in singlephase inverter using a parallel operation technique.* 1989. IEEE Applied Power Electronics Conference and exposition, pp :101-108.

27. **Shah, Shahil.** *Design et Implementation of Parallel Operation of Inverters with Instantaneous Current Sharing Scheme Using Multiloop Control Strategy on FPGA Platform.* Kanpur : s.n., Juillet 2008. Thèse.

28. **MARIÉTHOZ, Jean-Sébastien.** *ÉTUDE FORMELLE POUR LA SYNTHÈSE DE CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX ASYMÉTRIQUES: TOPOLOGIES, MODULATION ET COMMANDE.* LA FACULTÉ SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR, Institut des sciences de l'énergie, SECTION DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉLECTRONIQUE. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE : s.n., 2005. Thèse de Doctorat. 3188 (2005).

29. **Mulch, Lawn & Garden Compost &.** *Difference Between Compost The Differences Between an Inverter and Multilevel Inverter.* eHow. [Online] 2013. [Cited: mai 10, 2013.] [http://www.ehow.com/.](http://www.ehow.com/)

30. **NORDVALL, ANDREAS.** *Multilevel Inverter Topology Survey.* Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, CHALMERS

UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Göteborg, Sweden : s.n., 2011. Master of Science, Thesis in Electric Power Engineering.

31. **College of Electrical Engineering, Zhejiang University**,. Applications of cascade multilevel inverters. *US National Library of Medicine National Institutes of Health*. [Online] Hangzhou 310027, China., 2003. [Cited: mai 4, 2013.] http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed?term=Peng%20FZ%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=14566981.

32. **Wikipédia**. *La modélisation*. [Online] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A9lisation>.

33. **Martinand, Jean-Louis**. INTRODUCTION À LA MODÉLISATION. *LA MODÉLISATION*. 2005.

34. **Systems, Power Electronics**. Modélisation, simulation et réglage de systèmes d'électronique de puissanc. *DEP Sys*. [Online] Power Electronics Systems. [Cited: avril 02, 2013.] <http://www.depsys.ch/services/modeling/>.

35. **futura-sciences.com**. Petits et Grands signaux, variables rapides et lentes. *forums.futura-sciences.com*. [Online] Mars 2008. [Cited: Avril 03, 2013.] <http://forums.futura-sciences.com/physique/295823-signifient-termes-petits-signaux-grands-signaux.html>.

36. **Holmes, Erika Twining & Donald Grahame**. *MODELLING GRID-CONNECTED VOLTAGE SOURCE INVERTER OPERATION*. Power Electronics Group, Department of Electrical and Computer Systems Engineering, Monash University. Clayton, USA : s.n. pp. 2-6, IEEE publication.

37. **Schneider-Electric**. Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement. [book auth.] J.M. Lupin, J. Schonek C. Collombet. [ed.] - 100 FF - Imprimerie du Pont de Claix - Claix - France - 1500. AXESS - Saint-Péray (07) : s.n., Vol. Cahier technique n° 152.

38. **Joseph Seymoure, Terry Horsley**. *Les sept types de problèmes d'alimentation*, APC, Shneider Electric. France : s.n., 2011. Livre Blanc 18 (Révision 1).

39. **Itkonen, Toni**. *PARALLEL-OPERATING THREE-PHASE VOLTAGE SOURCE INVERTERS – CIRCULATING CURRENT MODELING, ANALYSIS AND MITIGATION*. [PDF]. 389.

40. **Wikipédia**. STATCOM. *Wikipédia, the free Encyclopedia*. [Online] April 10, 2013 at 16:22. [Cited: Avril 20, 2013.] <http://en.wikipedia.org/wiki/STATCOM>.

41. **Actualités technologiques du Groupe ABB**. Les réseaux électriques de futurs. [ed.] ABB. France : ABB revue, 2011, Vol. 1, 2, pp. 16-25.

42. **VIGO SPAIN**. STATCOM APPLICATIONS AND THE D-STATCOM. Barcelona : VIGO REVIEW, 24/08/2007.

43. **ALSTOM Grid Worldwide Contact Centre** . FACTS, Solutions to optimise network performance. *Grid Alstom*. [Online] Aout 2010. [Cited: Avril 17, 2013.] www.grid.alstom.com/contactcentre. Tel: +44 (0) 1785 250 070.

44. **Suppanz, Brad**. State-Space Averaging. *geocities.com*. [Online] 7 20, 2004 . [Cited: Avril 6, 2013.] <http://www.geocities.com/capecanaveral/lab/9643/ssa.htm>.

45. **T. Abdelkrim, E.M. Berkouk, K. Aliouane, K. Benamrane, T. Benslimane**. *Etude et réalisation d'un onduleur à trois niveaux commandé par MLI vectorielle*. Revue

des Energies Renouvelables. s.l. : Revue des Energies Renouvelables, 2011. p. Vol. 14 . N°2 (2011) 211 – 217.

46. **MathWorks**. PLL (3ph). *MathWorks help*. [Online] Matlab Documentation center, 2013. [Cited: Mai 12, 2013.] http://www.mathworks.com/help/physmod/powersys/ref/rmvd_matlablink_89004941f089c93e44df7e10cf4444e3.html.

47. **Matlab, Blocks (SimPowerSystems™)**. Three-Phase Harmonic Filter. *Matlab Help*. 2009.

48. **Pierre Giroux, Gilbert Sybille, Hoang Le-Huy**. *Modeling and simulation of Distribution Statcom using Matlab/Simulink's Power System*. Industrial Electronics Society. Canada : s.n., 2005. pp. 13-15, The 27th Annual conference of IEEEI industrial Electronics Society.

49. **Matlab/help**. *VSC Control System*. s.l. : Matlab, 2007. Help section of Matlab software.

50. **Electric Power Systems Research**. *A fault analysis of DC electric arc furnaces with SVC harmonic filters in a mini-mill plant*. 2010. pp. 2-4, Contents lists available at ScienceDirect. journal homepage: www.elsevier.com/locate/epsr. 80-807–814.

51. **Iftikhar A. Khan, Member, Robert W. Erickson, Member,**. *Synthesis and Analysis of Harmonic-Free Three-phase Inverters*. NOVEMBER 1994. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. volume 6 of 9.

52. **D. Roye, C.Canudas**. *Le moteur asynchrone et son alimentation", Contribution à l'ouvrage collectif "Commande des moteurs asynchrones, Modélisation, contrôle vectoriel et DTC"*. s.l. : Hermès Science, Mai 2000. pp. 53-54.

53. **Atif Iqbal, Adoum Lamine, Imtiaz Ashraf, Mohibullah**. *MATLAB/SIMULINK MODEL OF SPACE VECTOR PWM FOR THREE-PHASE VOLTAGE SOURCE INVERTER*. Aligarh Muslim University, India, Liverpool John Moores University, UK. India, Liverpool and UK : s.n., 2005. PhD Thesis.

54. **P.PETITCLAIR, S.BACHA, J.P.ROGNON**. *AVERAGED MODELILING AND NONLINEAR CONTROL OF AN ASVC (Advanced Static VAR Compensator)*. Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble. Saint Martin d'Herès : s.n., 2008. Phd Thesis.

55. **BISKER Asma, CHIRI Meriem**. *Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau*. Département de Génie Electrique, Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique. Alger, ALGERIE : s.n., Juin 2012. p. 45, Projet de fin d'études.

56. **M.Khalfallah, A.EL Afia A.Saad**. *Etude comparative des performances de la modulation sinusoidale et la modulation vetorielle d'un onduleur à MLI*. Mai 2005. IEEE transactions on Power Electronics .