

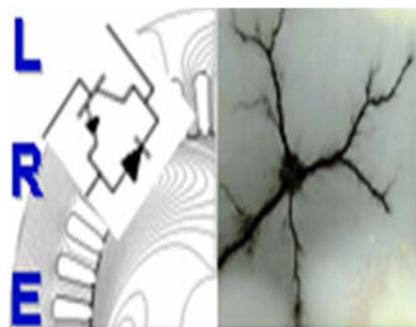
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire
pour l'obtention du diplôme de
Master en Electrotechnique

Intitulé

**Etude du délestage d'un ou de plusieurs modules d'une mise en
série de n onduleurs**

Présenté par

Allaa-Eddine BOUMESBAH

Sous la direction de Dr. T.Zebbadji
soutenu publiquement le 20 juin 2016

Membres du Jury

Président :

R. Tahmi, Professeur à l'ENP

Rapporteur :

T. Zebbadji, Professeur à l'ENP

Examineur :

K. Boughrara, Professeur à l'ENP

ENP 2016

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

Remerciements

*U*ne occasion pour moi d'exprimer ma forte gratitude pour tous ceux qui m'ont accompagné de près ou de loin dans mes études et mes recherches, à ceux qui ont répondu toujours favorablement à mes sollicitations, notamment à mes professeurs et corps administratif de l'école national polytechnique d'Alger qui mènent toujours un combat de titan pour nous inculquer les principes et l'amour de la recherche scientifique.

Je tiens à exprimer ma totale reconnaissance pour mon encadreur Mr. ZEBBADJI pour sa disponibilité à travers ses remarques, ses précieux conseils, ses orientations et sa disponibilité à répondre à mes questions.

Je dois beaucoup aux encouragements et à la compréhension de ma famille qui reste toujours la clef de toutes mes réussites.

Enfin, un grand merci à tous mes amis qui ont pu m'aider de la moindre façon qu'elle puisse être.

Merci au Bon Dieu

ملخص

نظرا للتحديات التي يفرضها استغلال الطاقات المتجددة، على مجال الإلكترونيات الصناعية أن يلبي العديد من المتطلبات، التي تتعلق على وجه الخصوص بتحويل متغيرات دخول ذات قيم عظيمة. في هذا السياق، نقدم في إطار هذا العمل، دراسة للتخلي عن أحد العناصر أو العديد من العناصر في حالة ربط عدد n من المموجات على التسلسل. يتضمن هذا العمل دراسة للسلوك العادي لربط عدد n من المموجات على التسلسل موصولين بالشبكة الكهربائية عن طريق محاكاة للدائرة المكافئة. متبوعة بتقييم لتأثير التخلي عن أحد أو العديد من العناصر.

كلمات مفتاحية: ربط المموجات على التسلسل، الدائرة المكافئة، التخلي.

Abstract

Due to the challenges revealed by the exploitation of renewable energy, the discipline of power electronics must now meet many requirements, linked in particular to the conversion of important input variables. In this context, in this work, a study of the shedding of one or many elements of an input series modular inverter with n modules is performed. This work includes a study of the normal behavior of an input series modular inverter with n modules connected to the network, achieved by the simulation of the equivalent circuit. The impact of the shedding of one or many elements of the converter will be then evaluated.

Keywords: input series modular inverter, equivalent circuit, shedding.

Résumé

Vue les défis lancés par l'exploitation des énergies renouvelables, la discipline d'électronique de puissance doit aujourd'hui répondre à de nombreuses exigences, liées notamment à la conversion d'importantes grandeurs d'entrée. Dans ce contexte, on présente, dans le cadre de ce travail, une étude du délestage d'un ou de plusieurs modules d'une mise en série de n onduleurs. On étudie le comportement normal de la mise en série de n onduleurs couplés au réseau en procédant par des simulations sur le circuit équivalent. L'influence du délestage d'un ou de plusieurs modules sera ensuite évaluée.

Mots clés : mis en série des onduleurs, circuit équivalent, délestage.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	7
CHAPITRE I INTRODUCTION	9
I.1. EOLIENNES OFF-SHORE	11
I.2. DIFFICULTES DES EOLIENNES OFF-SHORE	13
I.3. MODES D'ACHEMINEMENT DE PUISSANCE	14
I.4. APPROCHE MODULAIRE	14
I.5. HACHEURS MODULAIRES	16
<i>I.5.1. Connexion ISOS</i>	16
<i>I.5.2. Connexion ISOP</i>	16
<i>I.5.3. Connexion IPOP</i>	17
<i>I.5.4. Connexion IPOS</i>	17
I.6. REDRESSEURS MODULAIRES	17
I.7. GRADATEURS MODULAIRES	17
I.8. ONDULEURS MODULAIRES	18
<i>I.8.1. Architecture IPOP</i>	18
<i>I.8.2. Architecture ISOP</i>	18
CHAPITRE II ETUDE DU COMPORTEMENT NORMAL DE LA MISE EN SERIE D'ONDULEURS COUPLES AU RESEAU	19
II.1. INTRODUCTION	19
II.2. MODELE ELECTRIQUE EQUIVALENT	19
II.3. SIMULATIONS :	21
<i>II.3.1. Analyse du comportement d'un onduleur à trois modules</i>	21
<i>II.3.2. Variation du nombre d'éléments du convertisseur</i>	24
II.4. CONCLUSION	27
CHAPITRE III INFLUENCE DU DELESTAGE SUR LA MISE EN SERIE DES ONDULEURS	28
III.1. INTRODUCTION	28
III.2. PRINCIPE DU DELESTAGE	28
III.3. DELESTAGE D'UN ELEMENT SUR TROIS	29
III.4. DELESTAGE D'UN ELEMENT SUR DIX	32
III.5. DELESTAGE DE DEUX ELEMENTS SUR DIX MIS EN SERIE	34
III.6. GENERALISATION	35
III.7. SIMULATION DU REMPLACEMENT D'UN MODULE PAR UN AUTRE	36
III.8. CONCLUSION	37
CONCLUSION GENERALE	38
BIBLIOGRAPHIE	39

Liste des figures

FIGURE I-1 EVOLUTION DE LA PRODUCTION MONDIALE D'ÉNERGIE ELECTRIQUE D'ORIGINE RENOUELABLE [3]	9
FIGURE I-2 EVOLUTION DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ELECTRIQUE D'ORIGINE EOLIENNE [3]	10
FIGURE I-3 EVOLUTION DE LA PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ELECTRIQUE D'ORIGINE RENOUELABLE A L'ECHELLE MONDIALE ET LA PART DE L'ÉOLIEN DANS CETTE PRODUCTION [3]	11
FIGURE I-4 CHAMPS EOLIEN DE VINDEBY [4]	12
FIGURE I-5 PARTIE DU CHAMP EOLIEN DE LONDON ARRAY [5]	12
FIGURE II-1 MODELE ELECTRIQUE EQUIVALENT DU CONVERTISSEUR	20
FIGURE II-2 MODELE DE LA CHARGE	20
FIGURE II-3 (A) TENSION ET COURANT D'ENTREE REEL, (C) COURANT DE SORTIE REEL, POUR DES CONDENSATEURS NON CHARGES, (B) TENSION ET COURANT D'ENTREE REEL, (D) COURANT DE SORTIE REEL, POUR DES CONDENSATEURS CHARGES	22
FIGURE II-4 (A) TENSION D'ENTREE POUR N=5, (B) TENSION D'ENTREE POUR N=10, (C) TENSION D'ENTREE N=15	24
FIGURE II-5 COURANT D'ENTREE (A) N=5, (B) N=10, (C) N=15	25
FIGURE II-6 COURANT DE SORTIE POUR (A) N=5, (B) N=10, (C) N=15	26
FIGURE III-1 (A) TENSION D'ENTREE, (B) COURANT D'ENTREE, (C) COURANTS DE SORTIE, POUR LE CAS D'UN DELESTAGE D'UN ONDULEUR PARMIS LES TROIS MIS EN SERIE.	29
FIGURE III-2 (A) TENSION ET COURANT D'ENTREE, (B) COURANT DE SORTIE POUR UN FONCTIONNEMENT NORMAL A DEUX ELEMENTS, (C) TENSION ET COURANT D'ENTREE, (D) COURANT DE SORTIE POUR LE CAS D'UN ELEMENT DELESTE PARMIS TROIS MIS EN SERIE	31
FIGURE III-3 (A) TENSION D'ENTREE, (B) COURANT D'ENTREE, (C) COURANTS DE SORTIE, LORS D'UN DELESTAGE D'UN ELEMENT PARMIS DIX EN SERIE.	33
FIGURE III-4 (A) TENSION D'ENTREE, (B) COURANT D'ENTREE, (C) COURANTS DE SORTIE, LORS D'UN DELESTAGE DE DEUX ELEMENTS PARMIS DIX EN SERIE	34
FIGURE III-5 (A) TENSION D'ENTREE, (B) COURANT D'ENTREE, (C) COURANTS DE SORTIE, LORS DU REMPLACEMENT D'UN MODULE PAR UN AUTRE	36

Liste des tableaux

TABLEAU II.1 PARAMETRES DE LA SIMULATION	21
--	----

Introduction générale

L'univers est composé de particules élémentaires qui assemblées les unes aux autres forment des corps ayant des modes de fonctionnement extrêmement complexes. Il est difficile de croire que les éléments qui ont permis le passage de l'humanité vers l'aire numérique sont composés de sable. Les semi-conducteurs à base de silice ont révolutionné l'électronique, mais aussi l'électrotechnique, leur découverte a permis la naissance d'une nouvelle discipline aussi vaste qu'importante dite l'électronique de puissance.

Le principe de l'électronique de puissance a l'air tout simple à première vue. Il est basé sur la connexion d'interrupteurs ayant la particularité de s'ouvrir et de se fermer à une certaine fréquence.

Pour répondre aux exigences de la transition énergétique dues à la nécessité d'exploiter de nouvelles sources d'énergie non conventionnelles, l'électronique de puissance doit s'adapter aux contraintes qu'imposent les nouvelles formes d'énergie. La contrainte principale est le niveau élevé de puissance à la sortie des lieux de production qui devra transiter par la chaîne de conversion d'énergie. La non disponibilité d'interrupteurs capables de surmonter un tel déficit a laissé la voie à la combinaison série/parallèle des commutateurs électroniques. Cette configuration a comme inconvénient la nécessité de la mise en œuvre de circuits auxiliaires capables de synchroniser leurs ouvertures et fermetures.

Une sérieuse alternative aux convertisseurs classiques moins adaptés aux importantes grandeurs d'entrée et de sortie introduit un nouveau concept basé sur l'utilisation des convertisseurs modulaires où plusieurs modules standards à base d'interrupteurs matures sont connectés en série ou en parallèle. La production décentralisée des énergies renouvelables (les éoliennes off-shore), qui est transportée sur de longues distances avec des niveaux de tension élevés, impose la mise en série de convertisseurs modulaires. L'optimisation des pertes dans les lignes de transport à longues distances requière l'utilisation de l'énergie sous sa forme continue. Cela se traduit par la mise en série de plusieurs onduleurs. La question majeure qu'on devrait se poser est la suivante : est-ce qu'un tel système peut fonctionner correctement avec un partage uniforme de la tension d'entrée ? La réponse à cette question fera l'objet de ce travail et qui sera structuré comme suit :

Le premier chapitre est une introduction, présentant le concept des convertisseurs modulaires, notamment l'onduleur modulaire à entrée série concerné par l'étude, ainsi que la problématique qui a poussé à la conception de ce type de convertisseurs.

Dans le deuxième chapitre, une étude du comportement normale d'une mise en série de n onduleurs couplés au réseau sera effectuée, en procédant par des simulations sur le circuit équivalent du système régi par une MLI sinusoïdale.

Le troisième et dernier chapitre comporte des simulations du délestage d'un ou de plusieurs modules de l'onduleur modulaire, en vue de l'analyse de l'influence du délestage sur la stabilité du système, ainsi que sur le partage de la tension d'entrée sur les modules de l'onduleur.

Chapitre I Introduction

Depuis des millénaires l'homme a tenté d'appriivoiser les forces de la nature pour différents usages dans le but de simplifier son existence. La force du vent était parmi les premiers éléments de la nature à être exploité pour propulser les radeaux à voiles (qui ont évolué avec le temps pour devenir d'imposants voiliers sillant les mers et les océans). Le concept de turbine a été ensuite utilisé à des fins agricoles et industrielles. Ces turbines tournaient soit à la force de l'eau, soit à celle du vent ; elles permettaient de faire tourner les moulins ou les scieries. Depuis l'avènement de l'énergie électrique, l'homme a réussi à asservir ces ressources naturelles au profit de la production électrique. Les contraintes économiques et écologiques ont poussé l'humanité à se tourner vers ce type de production d'énergie qui est devenu plus connu sous le nom d'énergie renouvelable.

Actuellement, la proportion des énergies renouvelables dans la production totale d'énergie à l'échelle mondiale dépasse les 20% [1]. La part de la production de l'énergie éolienne a atteint 11.4% du total des énergies renouvelables produites en 2012, ce qui a fait d'elle la deuxième plus importante source d'énergie renouvelable après l'énergie hydraulique [2].

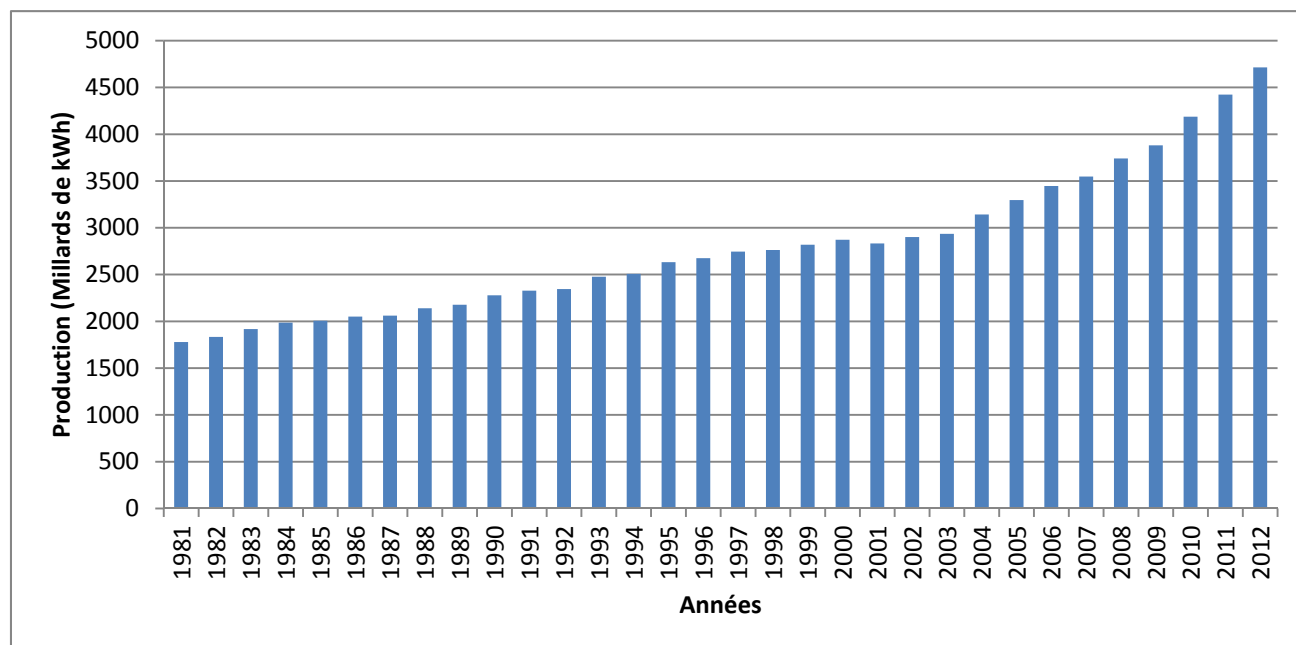


Figure I-1 Evolution de la production mondiale d'énergie électrique d'origine renouvelable [3]

La production d'électricité d'origine renouvelable à l'échelle mondiale est passée de 2960.1TWh en 2002 à 4699.2TWh en 2012, progressant ainsi d'une croissance annuelle moyenne de 4.7%. Dans cette même période la part de l'énergie électrique renouvelable dans la production totale de l'énergie électrique est passée de 17.9% à 20.8%. L'éolien a connu une progression spectaculaire en l'espace de dix ans, la production qui était de 52.5 TWh en 2002 a atteint 534.3TWh en 2012, avec une croissance annuelle moyenne de 26.1% [2].

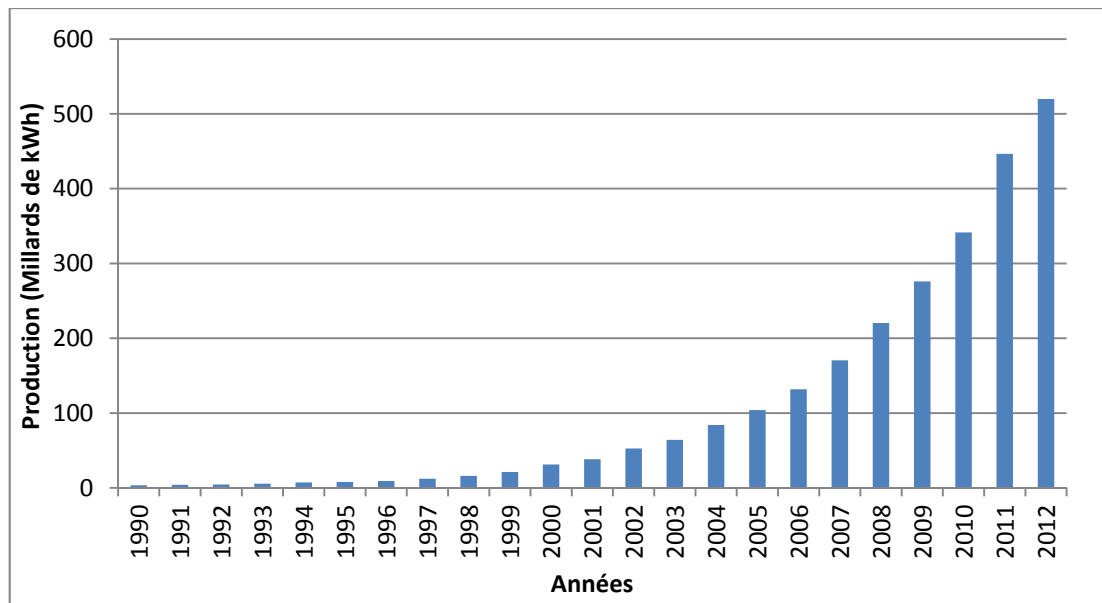


Figure I-2 Evolution de la production d'énergie électrique d'origine éolienne [3]

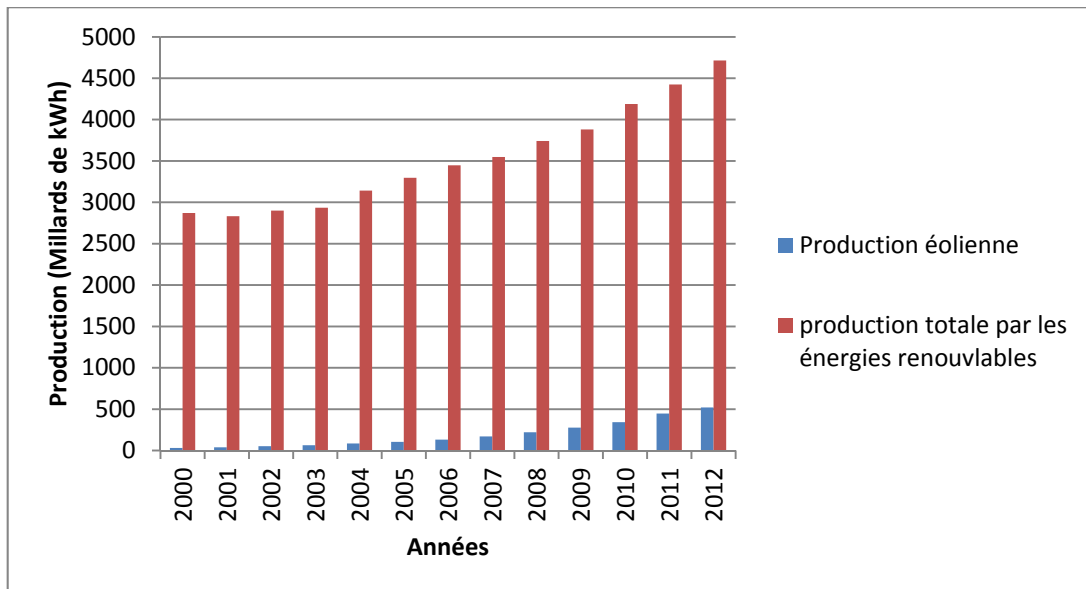


Figure I-3 Evolution de la production de l'énergie électrique d'origine renouvelable à l'échelle mondiale et la part de l'éolien dans cette production [3]

I.1. Eoliennes off-shore

L'expansion démographique mondiale ainsi que les besoins agricoles croissants ont fait que les terres susceptibles d'accueillir des fermes éoliennes soient rares. D'autres facteurs, tels que les nuisances sonores produites par les éoliennes et la présence d'importants couloirs venteux dans les mers et les océans, ont favorisé la délocalisation des fermes éoliennes en off-shore.

L'installation des éoliennes en off-shore est devenue techniquement possible suite au développement des exploitations des gisements pétroliers sous-marins, motivés par les profits faramineux des industries pétrolières, les industriels du milieu ont développé des techniques d'exploitation (plateformes off-shore) permettant d'atteindre les gisements pétroliers sous-marins. Ces innovations structurelles et logistiques ont été une source d'inspiration pour le montage et pour l'exploitation des champs éoliens off-shore.

La première ferme éolienne a été mise en service en 1991 à Vindeby, à 2 km au large des côtes danoises. Ce parc éolien, développé par DONG Energie, est constituée de 11 éoliennes de 450 kW chacune, ce qui fait que la capacité totale de la ferme est de 4.95 MW[1].



Figure I-4 Champs éolien de Vindeby [4]

Depuis la puissance des parcs éoliens offshore ainsi que leur taille n'a cessé d'augmenter pour atteindre des puissances dépassant les 500 MW. La plus grande ferme éolienne off-shore est « London Array » qui se trouve à 11 Km au large des côtes anglaises ; cette ferme cumule une puissance de 630 MW [5].



Figure I-5 Partie du champ éolien de London Array [5]

Le cumul total des puissances installées de l'intégralité des parcs éoliens off-shore est passé de 8 724 MW, en 2014, à 12 107 MW en 2015, d'après la GWEC (Global Wind Energy Council). Ceci représente 2.8% de la totalité de la puissance éolienne installée [6].

I.2. Difficultés des éoliennes off-shore

L'exploitation de l'énergie éolienne off-shore n'a débuté que dans les années 1990s [1], aujourd'hui encore l'exploitation de cette forme d'énergie rencontre plusieurs difficultés, dont on cite :

- Absence de relevés topographiques sous-marins, ce qui augmente la complexité technique et le coût de l'étude [1]. La nature du sol marin étant très différente de celle du sol terrestre, d'où la nécessité de développer de nouvelles techniques plus appropriées aux différents environnements rencontrés.
- Les difficultés des conditions naturelles marines, telles que les turbulences, la houle, les marées. Sachant que les installations éoliennes off-shore sont généralement situées dans les régions les plus venteuses, où les conditions naturelles sont les plus défavorables, les installations doivent avoir un certain niveau de robustesse pour pallier à ces difficultés.
- En plus des phénomènes naturels cités ci-dessus, l'érosion due au sel marin provoque une accélération du vieillissement des installations.
- L'imposante taille des éoliennes pose un défi technique pour le montage dans des conditions naturelles extrêmes.
- La distance des fermes éoliennes par rapport au sol est en constante augmentation. Cela pose non seulement des problèmes liés à la maintenance des structures en haute mer mais introduit aussi des pertes électriques dans les lignes entre les fermes et le réseau.

Au début de l'exploitation de l'énergie éolienne, notamment celle off-shore, les unités de production étaient plutôt expérimentales. Plusieurs recherches et travaux ont été faits pour rentabiliser la production. Aujourd'hui encore, la production des énergies renouvelables reste peu concurrentielle par rapport aux énergies fossiles. L'optimisation de la production de ces énergies est devenue un sujet de recherche d'actualité, motivée par une volonté de diriger la production d'énergie vers les énergies alternatives sur l'échelle internationale.

I.3. Modes d'acheminement de puissance

L'optimisation du rendement des champs éoliens nous pousse à faire un choix entre le mode de transport du courant entre la centrale et le rivage en alternatif ou en continu. Le transport en alternatif est actuellement le plus utilisé [7]. Mais vu la constante augmentation des distances des fermes éoliennes au rivage, une étude comparative est nécessaire pour déterminer le choix du système de transport le plus approprié. Une étude effectuée par R. Sharma et al. [7], a abouti aux résultats suivants :

- Les principaux désavantages de la transmission en continu sont les convertisseurs qui engendrent d'importantes pertes. Il est donc utile de songer à l'utilisation des convertisseurs modulaires qui certes sont onéreux mais qui ont un bon rendement.
- La transmission en alternatif nécessite au moins un câble supplémentaire par rapport à la transmission en continu. Cela est un désavantage vu le pourcentage élevé de la part des pertes dans les câbles par rapport aux pertes totales.
- Hormis les faibles distances, la transmission en alternatif engendre plus de pertes que celle en continu. En effet, pour chaque puissance transmise, on peut calculer la distance critique pour laquelle la transmission en continu devient la plus efficace. Néanmoins la transmission en continu engendre des coûts plus élevés (notamment à cause des convertisseurs), mais comme les distances entre les fermes éoliennes et le rivage sont de plus en plus grandes, il sera plus utile d'utiliser la transmission en continu.

I.4. Approche modulaire

Les convertisseurs modulaires séries/parallèles, dans lesquels des modules sont connectés en série ou en parallèle à l'entrée ou à la sortie, ont attiré de plus en plus d'attention dans les dernières décennies.

Dans le cas des convertisseurs qui possèdent d'importantes grandeurs d'entrées (courant ou tension), l'approche modulaire se présente comme une sérieuse alternative aux convertisseurs classiques pour les avantages suivants :

- Une amélioration significative de la fiabilité.
- La fabrication en série des éléments, ce qui contribue à baisser d'une manière significative les coûts et le temps de production.
- L'augmentation de l'efficacité et de la puissance totale du système.
- Le partage des grandeurs d'entrée entre les éléments.
- La possibilité d'utiliser des interrupteurs de faible puissance, car les modules ne prennent en charge qu'une partie de la puissance totale.
- La possibilité d'augmenter les fréquences de commutation.
- Une étude plus facile et un coût moins élevé à travers la standardisation des modules.
- La facilité de l'expansion de la capacité du système en puissance.
- La possibilité du délestage d'un module défaillant avec continuité de service.

En fonction des combinaisons possibles, les convertisseurs modulaires peuvent être classifiés en quatre architectures possibles [8] :

- Entrée parallèle sortie parallèle (IPOP).
- Entrée parallèle sortie série (IPOS).
- Entrée série sortie parallèle (ISOP).
- Entrée série sortie série (ISOS).

Chacune de ces architectures de connexion est adaptée à des applications spécifiques, l'architecture IPOP est bien adaptée pour les applications à haute tension d'entrée et haut courant de sortie, l'architecture IPOS est bien adaptée pour les applications à haute tension d'entrée et haut courant de sortie. Les modules basiques constituant le système peuvent être des hacheurs (DC-DC), des onduleurs (DC-AC), des redresseurs (DC-DC) ou bien des gradateurs (AC-AC).

Actuellement, les convertisseurs modulaires sont largement utilisés pour la conversion DC-DC. Pour les convertisseurs DC-AC, l'approche modulaire reste un sujet de recherche

bien que les onduleurs DC-AC entrée parallèle sont déjà utilisés dans les systèmes photovoltaïques [8].

I.5. Hacheurs modulaires

Dans le cas des convertisseurs DC-DC entièrement modulaires de faible puissance, les blocs peuvent être connectés dans toutes les combinaisons (série ou parallèle) à l'entrée ainsi qu'à la sortie [9].

I.5.1. Connexion ISOS

La connexion ISOS est bien adaptée pour les applications, où à la fois la tension d'entrée ainsi que la tension de sortie sont élevées [9].

En l'absence de commande de partage de la tension d'entrée, toute petite perturbation provoque un emballement de l'entrée du convertisseur de tensions, en raison de la propriété de résistance négative d'entrée des convertisseurs DC-DC [9].

I.5.2. Connexion ISOP

La connexion à entrée série, sortie parallèle est adaptée pour des applications à tension d'entrée et courant de sortie élevées. Pour la connexion (ISOP), les différents convertisseurs ne sont pas contrôlés de façon indépendante, mais par un rapport cyclique commun [9].

Des résultats pour la commande des convertisseurs modulaires (ISOP) de moyenne puissance destinée à l'alimentation des trains à grande vitesse a été présenté dans [10]. D'autres approches de commande ont été présentées pour l'architecture (ISOP) tel que la nécessité de commande de la tension d'entrée [11]. Une commande par variation du rapport cyclique était proposée dans [12]. Une analyse complète de la stabilité d'un convertisseur ISOP a été présentée dans [13]. Une analyse de la relation entre le partage de tension d'entrée et le partage du courant de sortie du système (ISOP) a été faite, et une nouvelle stratégie de commande du partage de la tension d'entrée indépendamment de la régulation de la tension de sortie a été proposée dans [14]. L'architecture (ISOP) a été implémentée avec succès dans une application pour une conversion de 10 kV à 400 V dans [15].

I.5.3. Connexion IPOP

La connexion à entrée parallèle, sortie parallèle est bien adaptée pour les applications où à la fois le courant d'entrée ainsi que la tension de sortie sont élevées. L'architecture (IPOP) dotée de modules standardisés a été largement utilisée dans la production décentralisée, et plusieurs approches de partage de courant de sortie ont été proposées, comme la méthode maître-esclave [16]. Une classification des structures ainsi que les configurations de commande des méthodes pour le partage du courant de sortie pour cette architecture ont été présentées dans [17].

I.5.4. Connexion IPOS

La connexion à entrée parallèle, sortie série est adaptée pour des applications à courant d'entrée et tension de sortie élevées. Ce type de convertisseurs peut aussi alimenter plusieurs charges à faible tension d'entrée associé en série, une étude théorique suivie d'une étude expérimentale a validé le bon fonctionnement de cette topologie qui se traduit par la bonne répartition de la tension de sortie sur les éléments du convertisseur. Ces résultats ont été présentés dans [18].

I.6. Redresseurs modulaires

Pour la conversion AC/DC, une application de l'architecture (IPOP) a été proposée dans [19].

Une architecture (ISOP) permettant un redressement pour des applications à forte puissance notamment pour l'alimentation des moteurs des trains électriques [20]. Une application qui consiste à mettre en parallèle douze éléments permettant d'avoir un fort courant de sortie à partir d'une haute tension d'entrée a été proposée dans [20].

I.7. Gradateurs modulaires

Pour la conversion AC/AC, une application en moyenne tension des gradateurs modulaires pour la variation de fréquence a été proposée dans [21].

I.8. Onduleurs modulaires

I.8.1. Architecture IPOP

C'est l'architecture la plus utilisée pour la conversion DC/AC, elle est notamment utilisée dans l'alimentation sans interruption (ASI) en raison de sa fiabilité par rapport à sa redondance parallèle [8]. Une approche de commande visant à assurer la bonne répartition du courant d'entrée a été présentée dans [22]. Une commande de partage de charge ainsi qu'une étude de stabilité ont été présentées dans [23]. Une autre approche de commande de partage de charge pour une alimentation sans interruption a été présentée dans [24].

I.8.2. Architecture ISOP

Peu de travaux existent sur les recherches des architectures (ISOP), deux approches de commande du partage de la tension d'entrée ainsi que le partage du courant de sortie ont été proposées dans [8], avec comme exemple d'application un onduleur à deux modules de 2 kVA.

Chapitre II Etude du comportement normal de la mise en série d'onduleurs couplés au réseau

II.1. Introduction

En ce qui concerne la production délocalisée, l'énergie est soit produite en continu notamment dans la production photovoltaïque, ou transportée en continu à cause de certaines contraintes liées aux pertes dues à la nature des câbles. Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'utiliser des onduleurs non seulement capables de supporter de hautes tensions d'entrée, mais aussi d'avoir un comportement stable vis-à-vis du réseau.

Le convertisseur étudié est un onduleur modulaire à n modules connectés en série, sa principale utilité est la conversion des importantes tensions continues à l'entrée, en utilisant la faculté du partage équitable de la tension d'entrée sur l'ensemble des modules.

Dans ce chapitre, un circuit équivalent de l'onduleur modulaire couplé au réseau sera établi, puis exploité par des simulations visant à visualiser le comportement du système et de vérifier le partage de la tension d'entrée.

II.2. Modèle électrique équivalent

Le convertisseur proposé est composé de n modules mis en série. Chaque module est un onduleur en parallèle avec une capacité C_i . Dans le but de simplifier l'étude, nous supposons dans tout ce qui suit que les interrupteurs sont idéaux.

L'entrée du circuit du convertisseur est modélisée par une source de tension continue V_g en série avec une inductance L_{in} . L'inductance d'entrée peut représenter l'impédance de la ligne de transport pour la transmission de l'énergie électrique en continu.

Le convertisseur est connecté à sa sortie au réseau (modélisé par une charge triphasée), via un transformateur de n enroulements par phase au primaire. En supposant que le transformateur est idéalement équilibré, chaque élément du convertisseur alimente la même portion de charge. Donc du point de vue modélisation, tous les éléments alimentent des charges identiques.

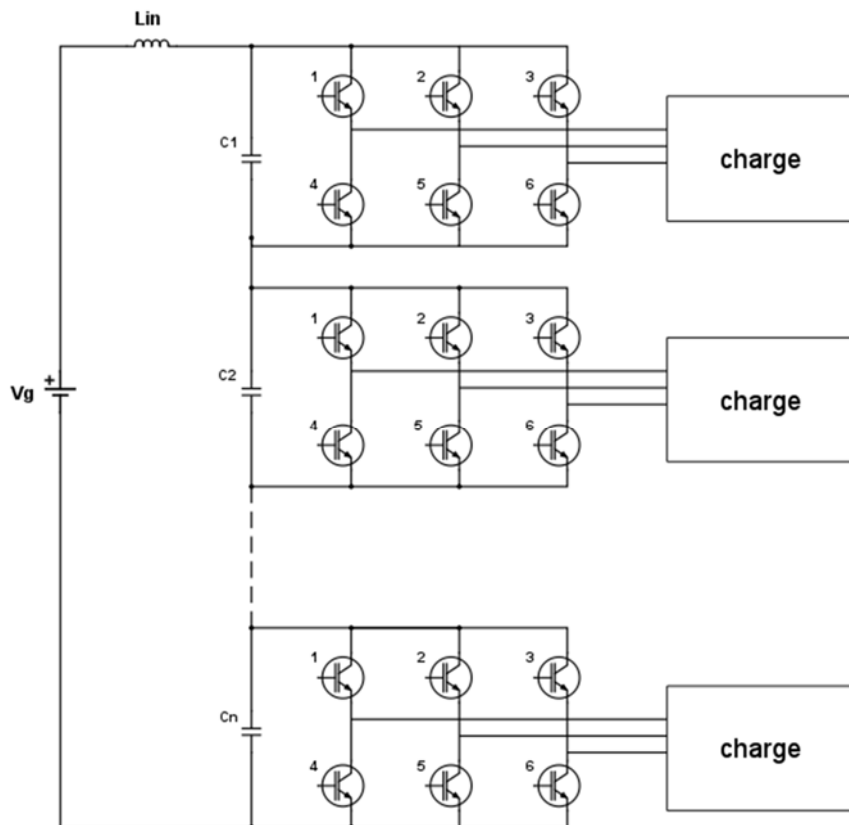


Figure II-1 Modèle électrique équivalent du convertisseur

Chaque branche de la charge est composée d'une source de tension sinusoïdale représentant la tension imposée par le réseau, et une impédance de ligne caractérisé par sa résistance R_L ainsi qu'une inductance L .

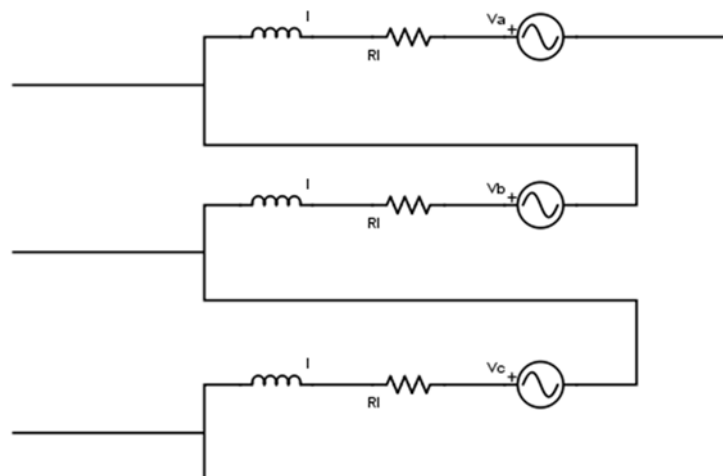


Figure II-2 Modèle de la charge

Le choix de la configuration triangle est fait dans le but d'éliminer la tension du mode commun qui peut être présente dans une configuration en étoile.

II.3. Simulations :

II.3.1. Analyse du comportement d'un onduleur à trois modules

Sous l'environnement Matlab/Simulink on simule le comportement normal de l'onduleur commandé par une (MLI). Les paramètres utilisés pour la simulation sont donnés par le tableau II.1.

Tableau II.1 Paramètres de la simulation

Paramètres	Valeurs
Inductance d'entrée	$L_{in} = 0.2H$
Inductance de charge	$L = 5 \cdot 10^{-4}$
Capacité d'entrée	$C = 0.05F$
Nombre d'éléments	$n = 3$
Résistance	$R = 0.05\Omega$
Fréquence de sortie	$f = 50 Hz$
Fréquence de commutation	$f_c = 5000 Hz$
Tension d'entrée	$V_g = 1500 V$
Dm	1
φ	$-\pi/6$

Les modules du convertisseur sont des ponts triphasés de six interrupteurs idéaux. La commande (MLI) est réalisée à partir d'une comparaison de deux signaux :

La porteuse : c'est un signal à dent de scie d'une fréquence égale à la fréquence de commutation $f_c = 5000 Hz$ et d'amplitude égale à 1.

La modulante : c'est un signal sinusoïdal d'une fréquence égale à la fréquence du réseau $f = 50Hz$ et d'une amplitude inférieure à celle de la porteuse. Le rapport entre l'amplitude de la modulante et celle de la porteuse est l'indice de modulation m .

• **Résultats de la simulation**

Les résultats de la simulation sont représentés par la figure II.3, où les graphes de la colonne de gauche sont obtenus pour la simulation avec les capacités d'entrée non chargées, et ceux de droite sont obtenus pour la simulation avec les capacités d'entrées chargées au préalable.

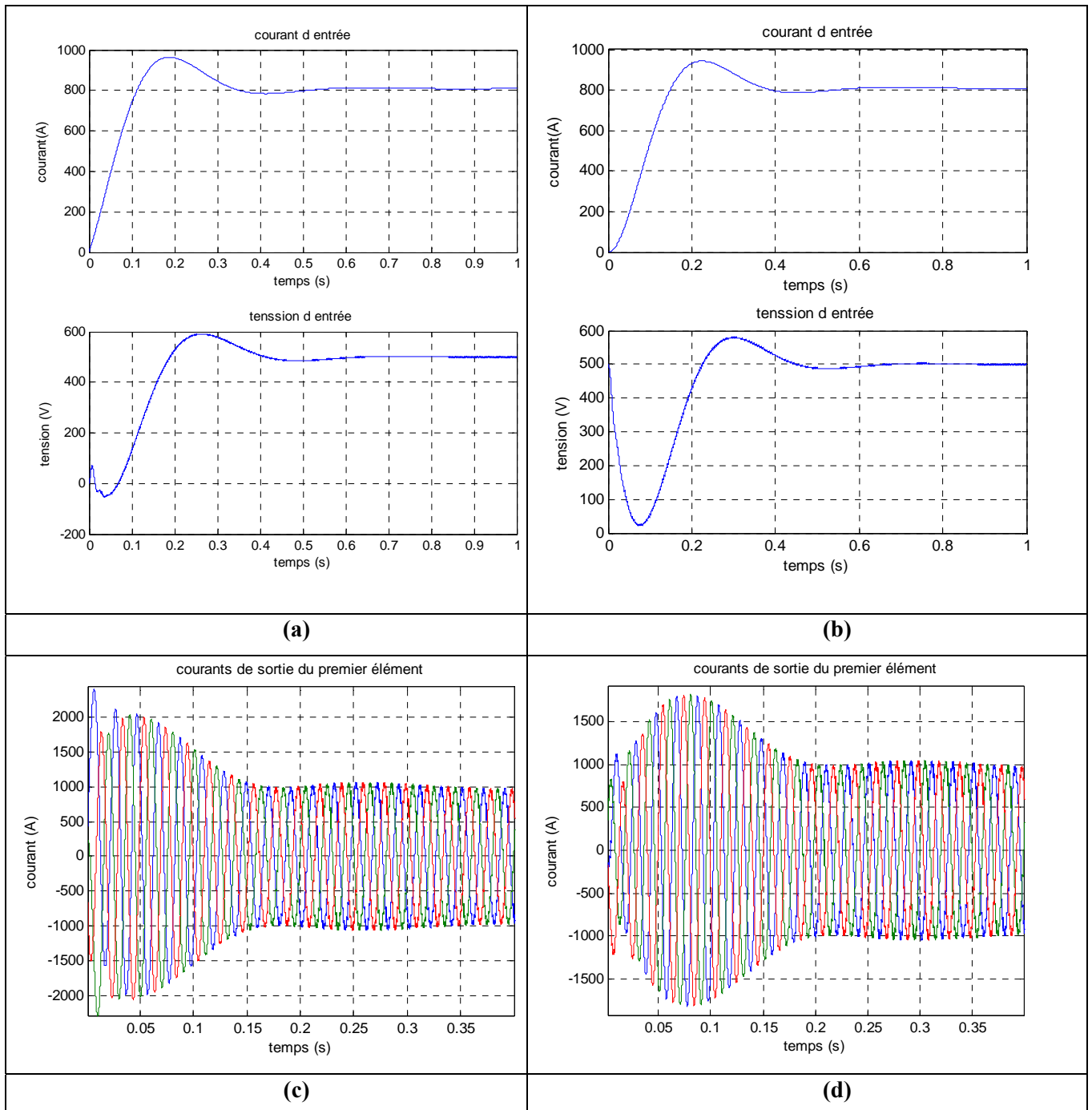


Figure II-3 (a) tension et courant d'entrée réel, (c) courant de sortie réel, pour des condensateurs non chargés , (b) tension et courant d'entrée réel, (d) courant de sortie réel, pour des condensateurs chargés

- **Cas où les condensateurs d'entrée sont chargés**

Les condensateurs d'entrées sont initialement chargés avec une tension $V_{ci} = V_g/n$.

La tension d'entrée de chaque élément est initialement égale à la valeur de V_g/n . On remarque une diminution de la tension sans pour autant atteindre les zéros volts. Suivra une augmentation jusqu'à la valeur V_g/n .

Le courant d'entrée atteint sa valeur permanente après un régime transitoire qui dure 0.4s, durant lequel on note un faible dépassement.

Le courant de sortie subit une augmentation puis une diminution d'amplitude avant de se stabiliser au régime permanent où les courants forment un système triphasé équilibré.

- **Cas où les condensateurs ne sont pas chargés**

Pour la variation de la tension d'entrée, on remarque une phase où celle-ci diminue atteignant des valeurs négatives puis une deuxième phase marquée par une croissance pour enfin atteindre un régime permanent avoisinant une tension égale à V_g/n . Le courant d'entrée se stabilise après une période transitoire qui dure 0.4 seconde durant laquelle il subit un faible dépassement.

Le comportement de la tension d'entrée indique que c'est un système à phase minimale ce qui dévoile la présence de zéros dans le demi-plan droit du plan complexe. Pendant un faible instant le convertisseur recevra de la puissance du réseau et se comportera donc comme un redresseur.

En régime permanent la tension se stabilise à V_g/n ce qui indique que la tension d'entrée est équitablement partagée sur les différents modules du convertisseur.

Les capacités d'entrées étant préalablement vides, les valeurs maximales atteintes par le courant d'entrée sont fortement accentuées par rapport au premier cas étudié où les capacités étaient préalablement chargées.

II.3.2. Variation du nombre d'éléments du convertisseur

Tout l'intérêt du convertisseur étudié est de pouvoir mettre autant d'éléments nécessaires selon la tension du bus continu d'entrée. En prenant la tension d'entrée de chaque élément égale à 500V, on étudiera l'influence du nombre d'éléments sur le courant, la tension d'entrée et les courants de sortie de chaque élément.

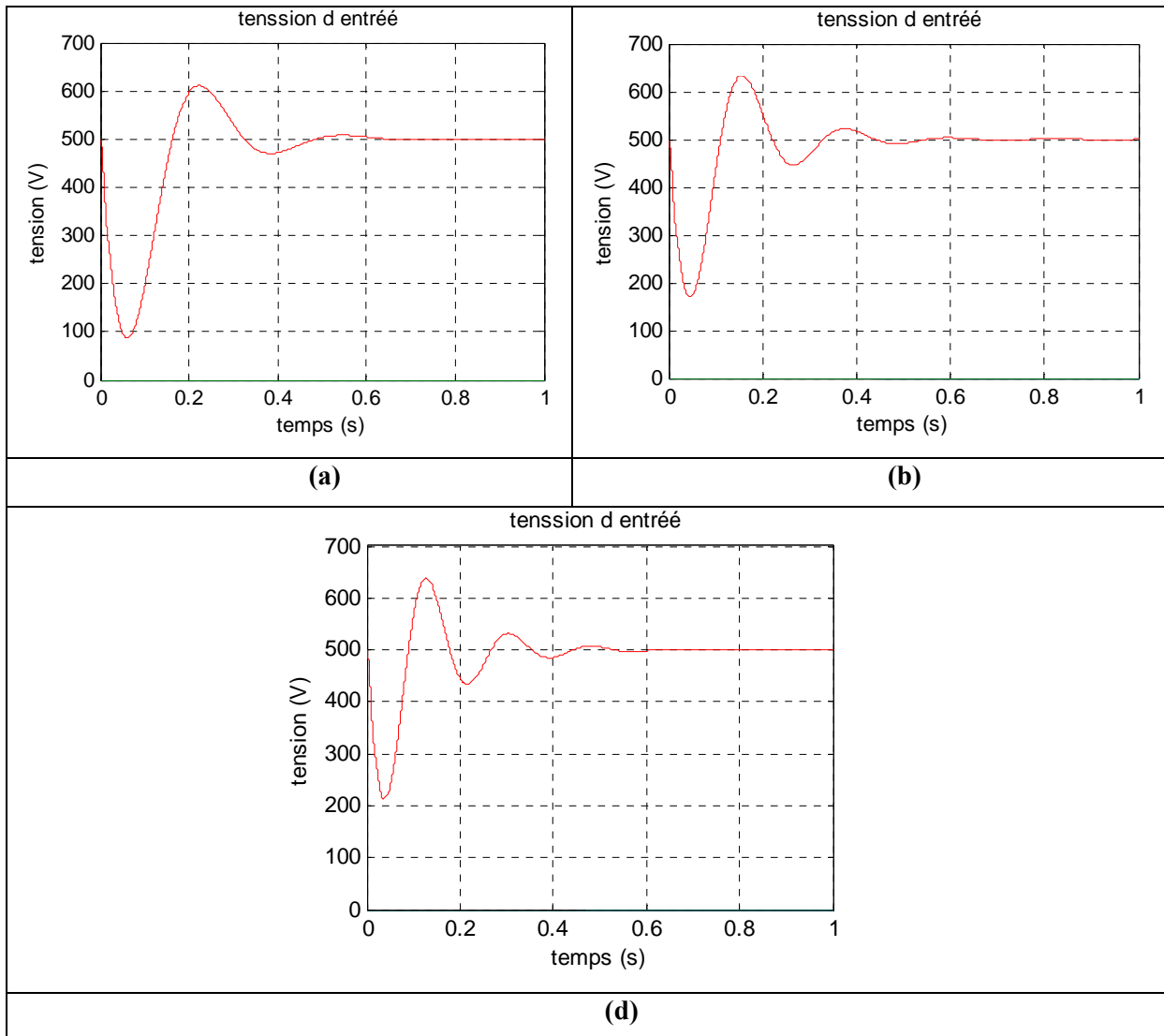


Figure II-4 (a) tension d'entrée pour $n=5$, (b) tension d'entrée pour $n=10$, (c) tension d'entrée $n=15$

On remarque que l'enveloppe du signal de la tension d'entrée diminue en augmentant le nombre d'éléments mis en série dans l'onduleur. En contrepartie, le nombre d'ondulations autour de la valeur moyenne augmente. La tension d'entrée est donc plus amortie et de meilleure qualité.

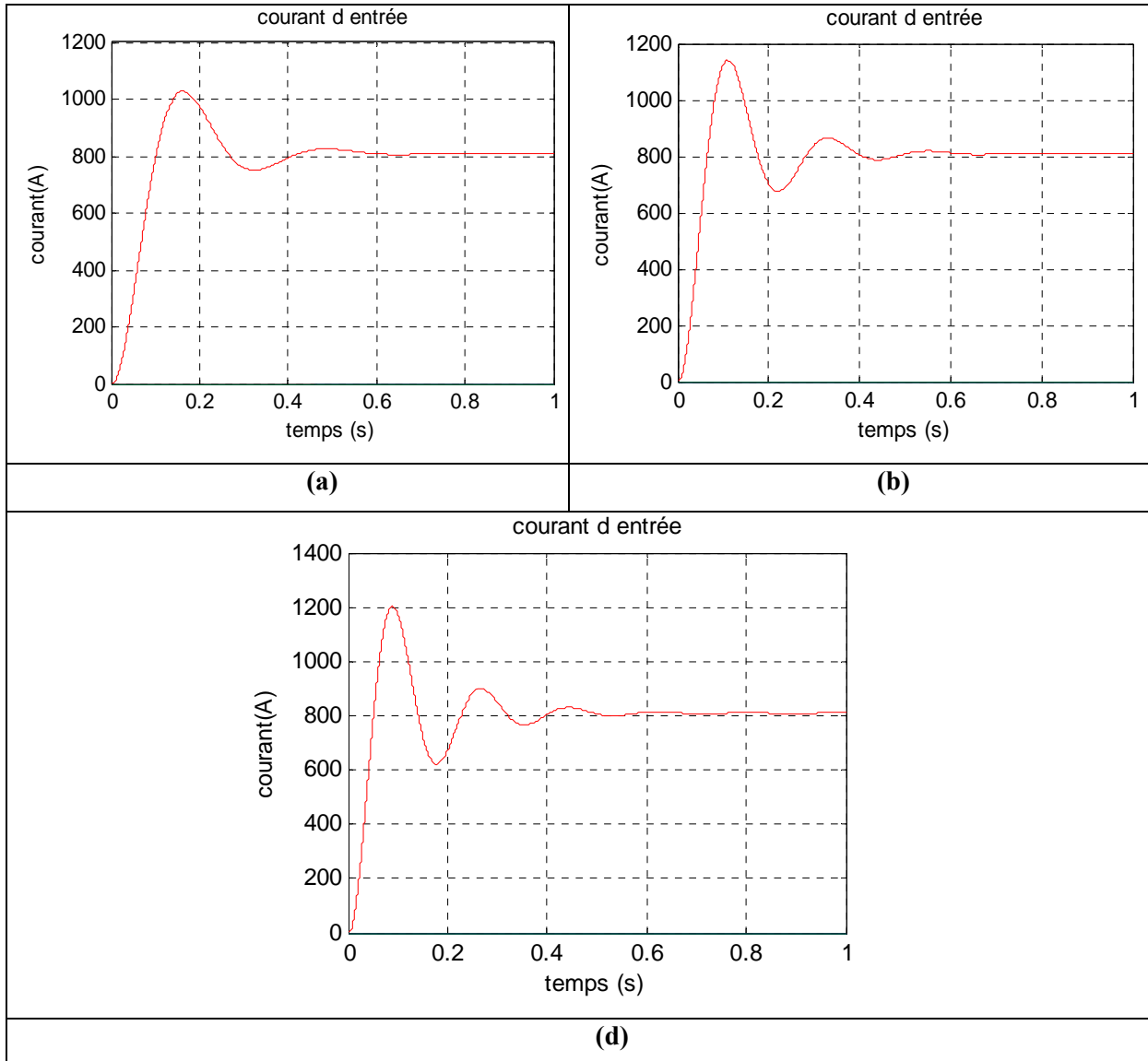


Figure II-5 Courant d'entrée (a) n=5, (b) n=10, (c) n=15

En ce qui concerne le courant d'entrée, le nombre d'ondulations augmente de la même manière que la tension d'entrée. Cependant, le système est moins amorti on se retrouve ainsi avec d'importants pics de courant durant le régime transitoire.

On note que la valeur finale du courant d'entrée ne change pas quel que soit le nombre d'éléments ce qui indique que le courant d'entrée en régime permanent est proportionnel à $\frac{V_g}{n}$.

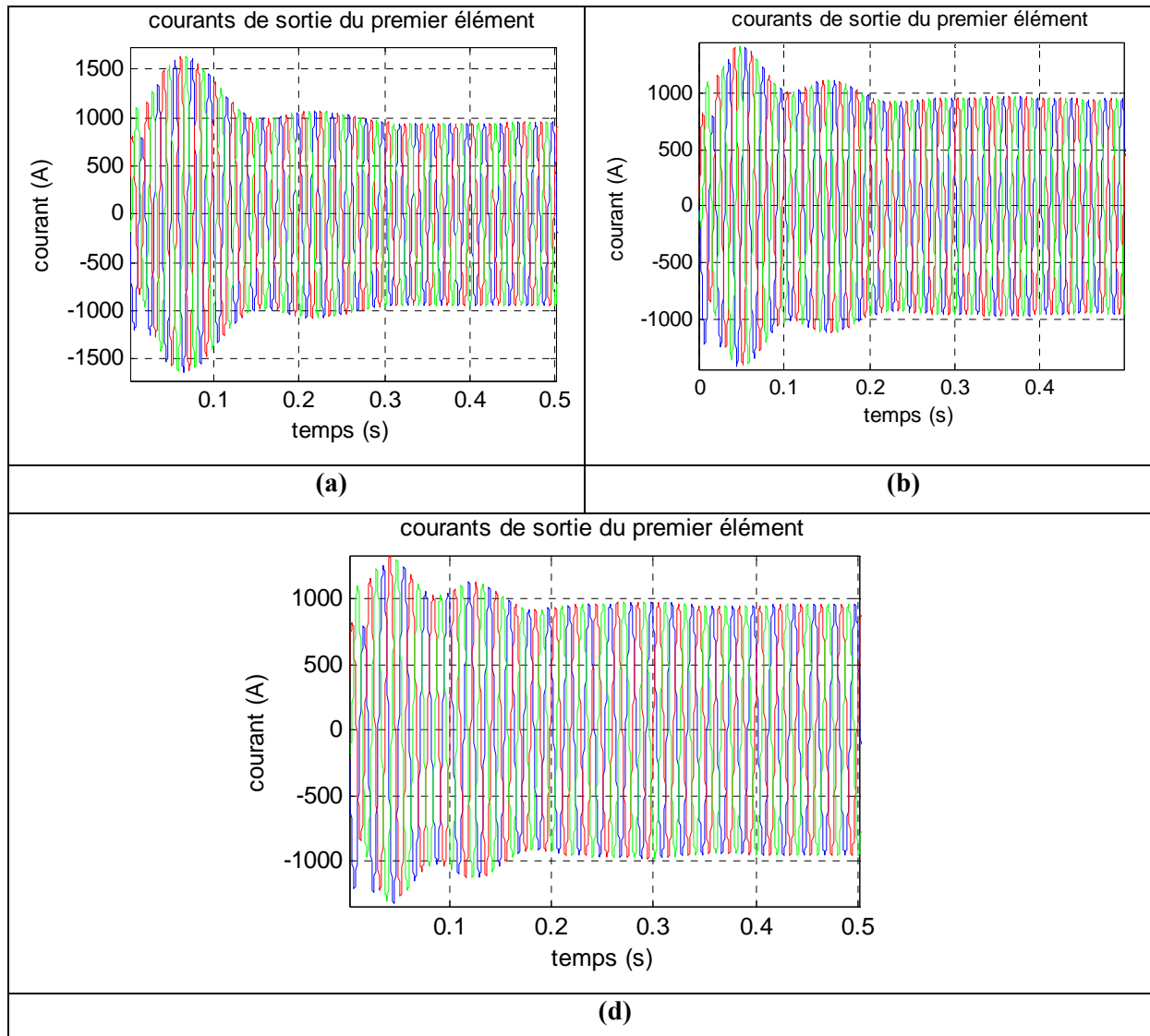


Figure II-6 courant de sortie pour (a) $n=5$, (b) $n=10$, (c) $n=15$

L'augmentation du nombre d'élément diminue l'amplitude du transitoire et assure un système triphasé équilibré des courants de sortie en régime permanent.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a visualisé le comportement normal du convertisseur modulaire à entrée série couplé au réseau, à partir du circuit électrique équivalent régi par une MLI sinusoïdale et simulé sous l'environnement Matlab/Simulink.

Au régime permanent, la tension d'entrée de chaque module est égale à V_g/n . Ceci est valable dans le cas où les capacités d'entrée sont préalablement chargées, comme dans le cas extrême où l'onduleur modulaire est mis en service sans charger les capacités d'entrée au préalable.

L'onduleur modulaire étudié remplit son rôle principale du partage équitable de la tension d'entrée sur les différents modules, et ceci pour n'importe quelles conditions initiales (capacités d'entrée chargées ou vides).

Chapitre III Influence du délestage sur la mise en série des onduleurs

III.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, la possibilité de coupler le convertisseur étudié au réseau a été prouvée dans un point de fonctionnement donné. Néanmoins, les paramètres choisis pour l'étude ne reflètent pas toutes les conditions auxquelles le convertisseur peut faire face en pratique. Des défauts divers peuvent survenir lors du fonctionnement du convertisseur, comme la défaillance d'un des modules.

La défaillance d'un ou de plusieurs modules lors du fonctionnement du convertisseur modulaire, est l'un des défauts les plus récurrents en pratique et qui peuvent surgir à n'importe quel moment.

L'un des principaux avantages de l'utilisation des convertisseurs modulaires est leur redondance, les modules des convertisseurs modulaires doivent être identiques et peuvent être donc standardisés. La défaillance d'un des modules ne devra pas interrompre la continuité de service du système.

Dans ce chapitre, nous allons étudier la robustesse du système vis-à-vis de la défaillance d'un ou plusieurs modules du convertisseur.

III.2. Principe du délestage

Le convertisseur modulaire est composé de modules standards qui peuvent être produits en série, il est donc conçu d'une manière à faciliter le remplacement d'un module défaillant par un autre. L'onduleur étudié devra fonctionner même dans le cas d'un dysfonctionnement de l'un des éléments. Une procédure devra isoler l'élément défaillant en le court-circuitant : la tension d'entrée devra se partager entre les $(n-1)$ éléments restants.

Le dimensionnement et le nombre d'éléments présents dans le convertisseur donneront la possibilité de délester un ou plusieurs éléments assurant ainsi l'affection uniforme de la tension du module isolé sur l'ensemble des modules restants.

III.3. Délestage d'un élément sur trois

Sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, on isole un élément lors d'un fonctionnement normal de trois éléments mis en série. Dans tout ce qui suit on procède à la simulation avec les paramètres donnés par le tableau II-1 en variant uniquement le nombre des modules mis en série.

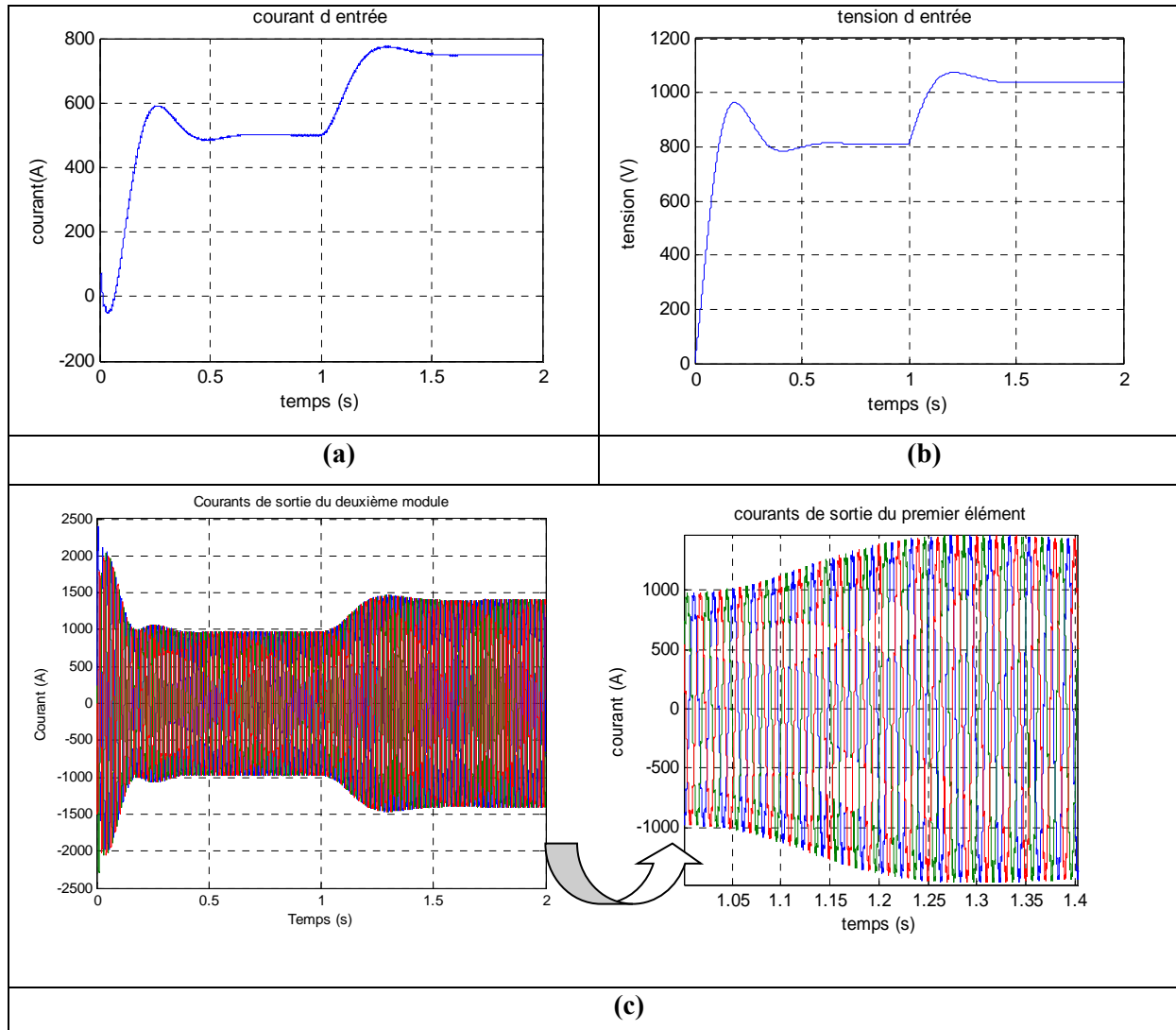


Figure III-1 (a) tension d'entrée, (b) courant d'entrée, (c) courants de sortie, pour le cas d'un délestage d'un onduleur parmi les trois mis en série.

Pour les mêmes paramètres utilisés lors des simulations précédentes, on isole le premier module du convertisseur à l'instant $t=1$ s, et on relève les grandeurs d'entrée et de sortie d'un des modules restants.

Le court-circuit d'un des modules provoque une certaine dynamique du système qui se manifeste par un régime transitoire d'une durée de 0.6 s au terme duquel le système atteint

son nouveau point d'équilibre. On constate que la durée du transitoire provoquée par le délestage est égale à la durée du régime transitoire du système, ceci est lié à la dynamique propre du système.

La valeur qu'atteint la tension d'entrée de chaque module après stabilisation du système est égale à $\frac{V_g}{n-1}$. On peut dire que la tension que supportait le module délesté, se partage équitablement le long les modules restants.

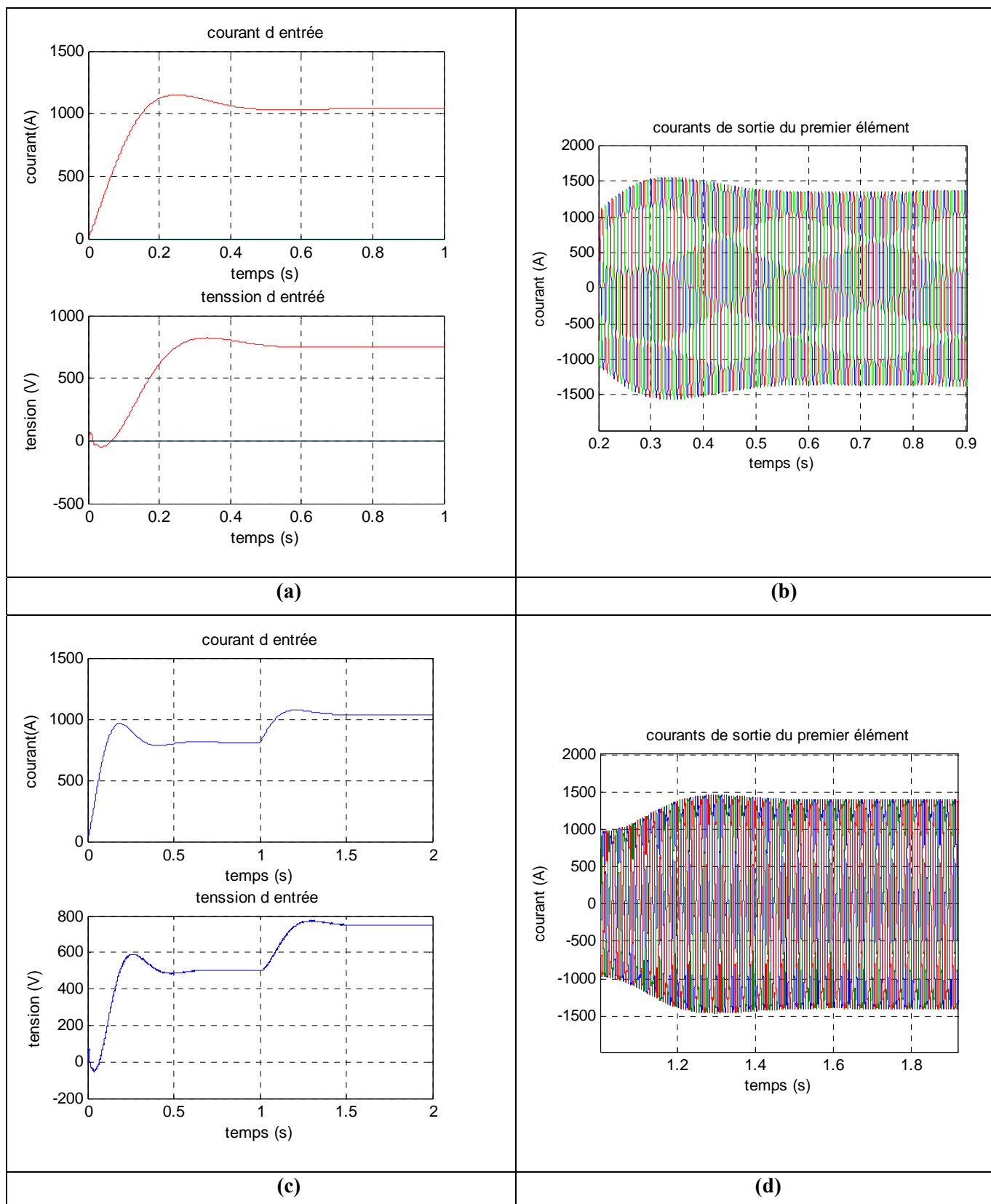


Figure III-2 (a) tension et courant d'entrée, (b) courant de sortie pour un fonctionnement normal a deux éléments, (c) tension et courant d'entrée, (d) courant de sortie pour le cas d'un élément délesté parmi trois mis en série

Les figures III.2 (a) et (b) présente les résultats de simulation d'un onduleur à deux éléments mis en série et les figures III.2 (c) et (d) les résultats pour un onduleur à trois éléments dont un est délesté a $t=1s$. Les courants d'entrée et de sortie en régime permanent lors de l'essai atteignent les mêmes valeurs qu'ils auraient eues dans le cas d'un convertisseur à deux modules. Lorsqu'on isole un des modules d'un convertisseur à n modules, ce dernier poursuit son fonctionnement comme étant un convertisseur à $n-1$ modules.

III.4. Délestage d'un élément sur dix

Les résultats de la simulation précédente ont montré que lors du délestage d'un des modules du convertisseur la tension d'entrée supportée auparavant par le module isolé, se repartage sur les modules restants après le délestage. Celui-ci se manifeste aussi par une augmentation des courants d'entrée et de sortie. Pour le cas d'un onduleur à 3 modules la tension supplémentaire que doit supporter chaque module après le court-circuit est de $\frac{V_g}{6}$. sachant que le convertisseur est conçue pour des applications à hautes tensions d'entrée, cette valeur constitue un grand surplus de tension (plus de 250 V pour nos paramètres), ainsi qu'un surplus de courant d'entrée (qui dépasse 230 A). Pour assurer la continuité de service, un important surdimensionnement des composants doit être envisagé, ce qui engendra par la suite une augmentation du cout.

Afin d'évaluer l'influence du délestage en fonction du nombre de modules du convertisseur, on simule le cas d'un module isolé dans une configuration de dix modules en série à l'instant $t = 1 s$ pour les mêmes paramètres des simulations précédentes ($V_g = 5000 V$ afin que la tension d'entrée de chaque module soit toujours égale à 500V).

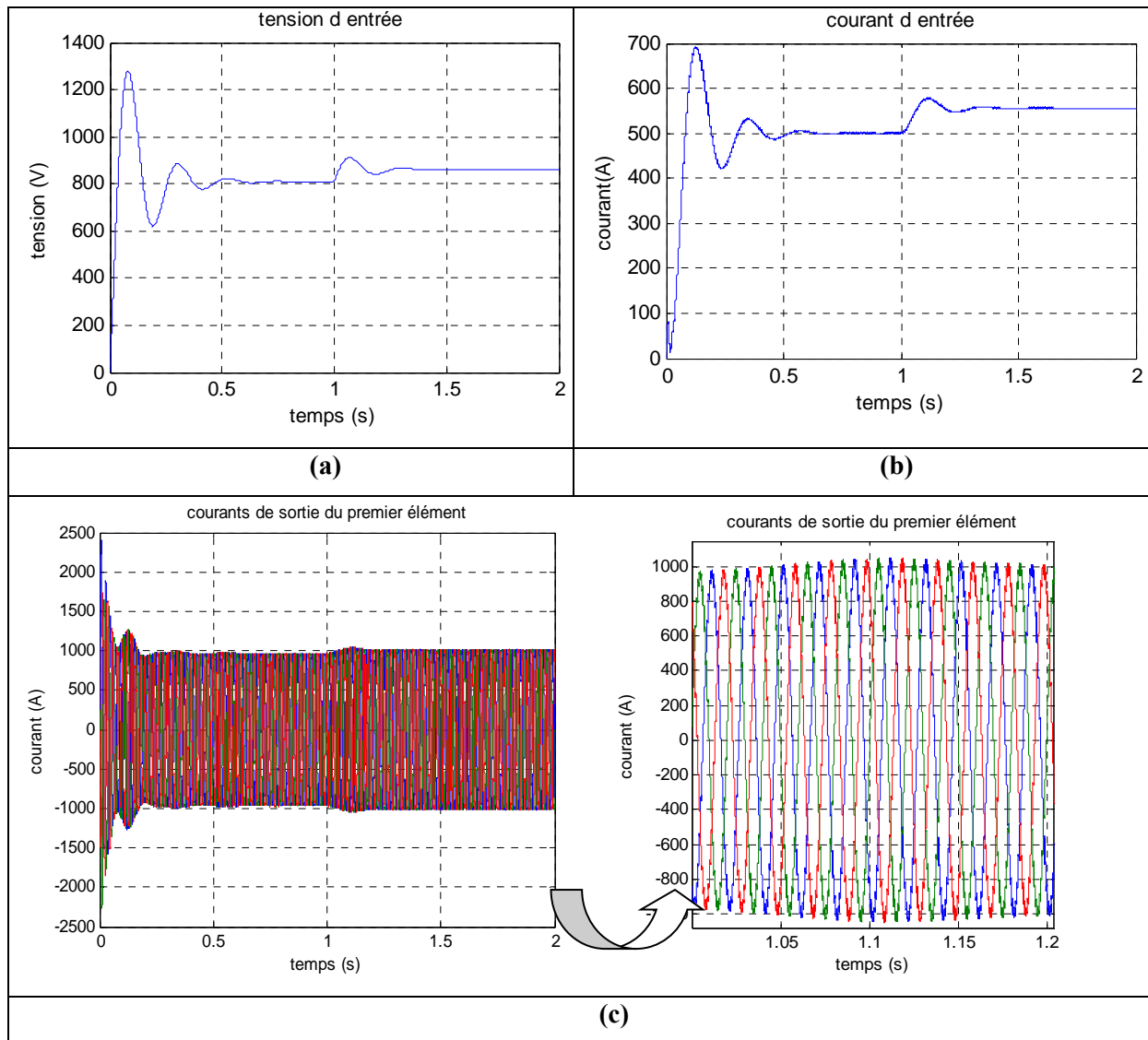


Figure III-3 (a) tension d'entrée, (b) courant d'entrée, (c) courants de sortie, lors d'un délestage d'un élément parmi dix en série.

Au terme du régime transitoire causé par le délestage, le convertisseur poursuit son fonctionnement d'une manière identique à celle d'un convertisseur à 9 modules. L'influence du délestage est beaucoup moins prononcée que pour le cas d'un convertisseur à 3 modules. Le surplus de tension d'entrée des modules restants n'est que de $\frac{V_g}{90}$, ce qui constitue un surplus d'environ 55 V pour des modules qui supporte normalement 500 V : cette augmentation peut être considéré comme acceptable. De plus, les valeurs qu'atteignent les courants et les tensions après le délestage ne dépassent pas les pics atteints pendant le premier régime transitoire du système. Ceci implique que si les composants du convertisseur sont dimensionnés pour supporter le courant et la tension du régime transitoire, ils pourront facilement supporter le surplus de courant et de tension due au délestage. Il faut noter que ces observations ne sont valables qu'à partir d'un certain nombre d'éléments mis en série.

III.5. Délestage de deux éléments sur dix mis en série

Après avoir analysé les performances du système vis-à-vis du délestage d'un de ses modules en plein fonctionnement, nous voulons étudier le comportement du système pour le cas extrême de deux modules isolés au même temps.

On procède à une simulation du délestage de deux modules du convertisseur à dix modules à l'instant $t = 1$ s, pour les mêmes paramètres de la simulation précédente.

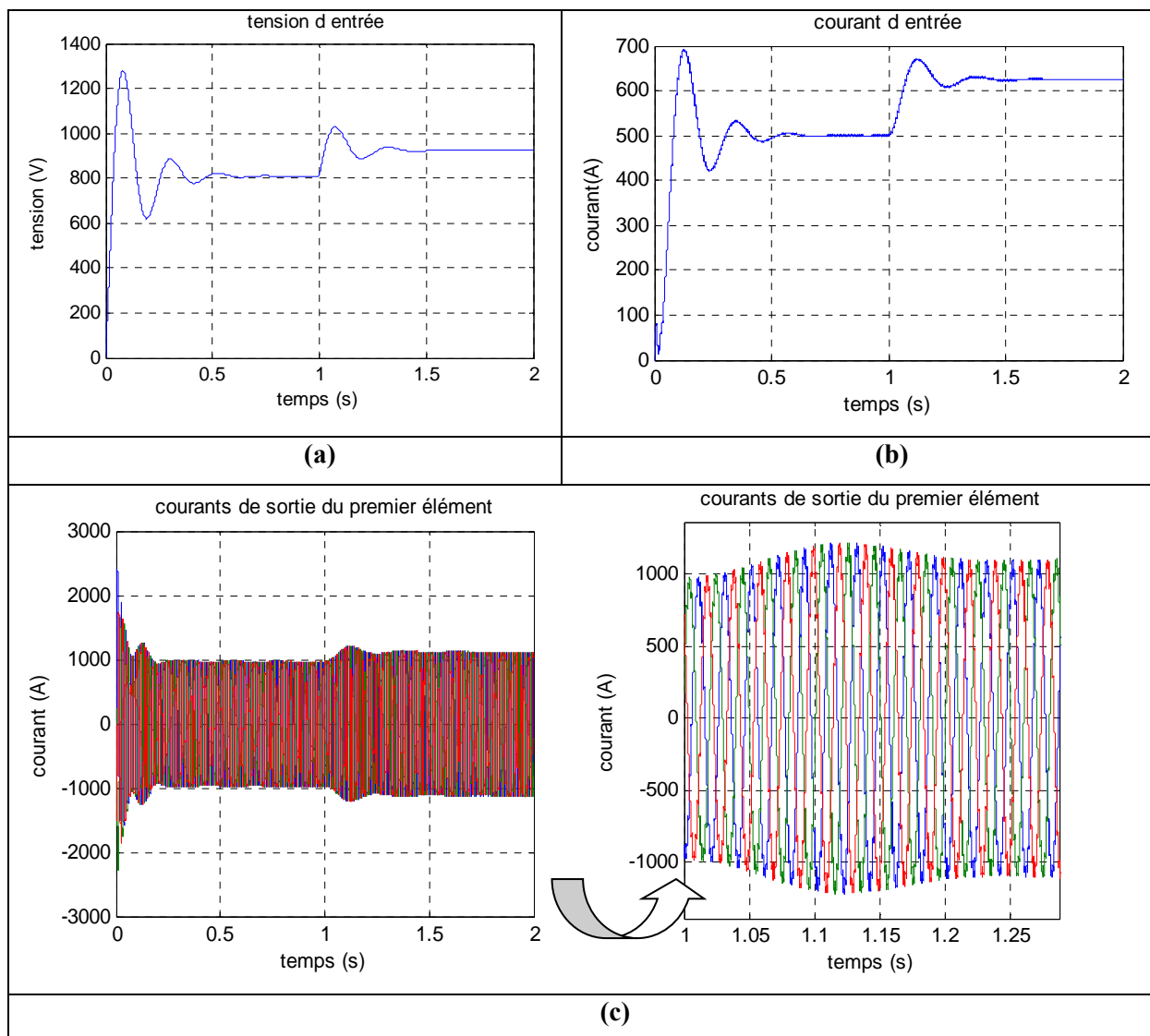


Figure III-4 (a) tension d'entrée, (b) courant d'entrée, (c) courants de sortie, lors d'un délestage de deux éléments parmi dix en série

Le surplus des courants d'entrée et de sortie est assez faible et ne dépasse pas les valeurs qu'atteignent ces courants au régime transitoire. La tension d'entrée que supportait les modules isolés se partage sur les modules restants, qui subissent ainsi un surplus de tension

égal à $\frac{V_g}{40}$. Après le délestage le système se comporte d'une manière identique à celui d'un convertisseur à huit modules.

Pour un dimensionnement adéquat, la pérennité du fonctionnement pour le délestage d'un ou de plusieurs élément est assurée si le nombre de modules mis en série est convenablement choisi.

III.6. Généralisation

A partir des simulations des délestages on établit la relation qui donne le surplus de tension en fonction du nombre d'éléments du convertisseur et le nombre d'éléments délestés :

$$\Delta V_i = \frac{mV_g}{n(n-m)} \quad (\text{III.1})$$

Avec m : le nombre d'éléments affectés par le délestage.

Le surplus de courant d'entrée au régime permanent est donné par l'équation suivante:

$$\Delta I_{in} = \frac{6RK^2V_g}{|Z|^2} \left(\frac{m}{n(n-m)} \right) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$$K = \frac{\sqrt{3}}{4} dm \quad (\text{III.2.a})$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} \quad (\text{III.2.b})$$

dm : indice de modulation de la MLI sinusoïdale.

Le surplus des amplitudes des courants de sortie :

$$\Delta i_i = \frac{2KV_g}{|Z|} \left(\frac{m}{n(n-m)} \right) \quad (\text{III.3})$$

Comme l'indique les équations établies, le délestage d'un nombre m de modules d'un convertisseur à n module en série ne perturbe pas le partage équitable de la tension d'entrée. Les modules restants vont supporter un surplus de tension, et le convertisseur poursuit son fonctionnement comme un convertisseur à $n-m$ module.

III.7. Simulation du remplacement d'un module par un autre

Un des plus importants avantages du convertisseur modulaire, est la possibilité d'isoler un module défaillant et de le remplacer sans interrompre le fonctionnement du système.

Les résultats de la simulation du délestage puis du remplacement d'un module défaillant parmi dix en série sont présentés par la figure III-5.

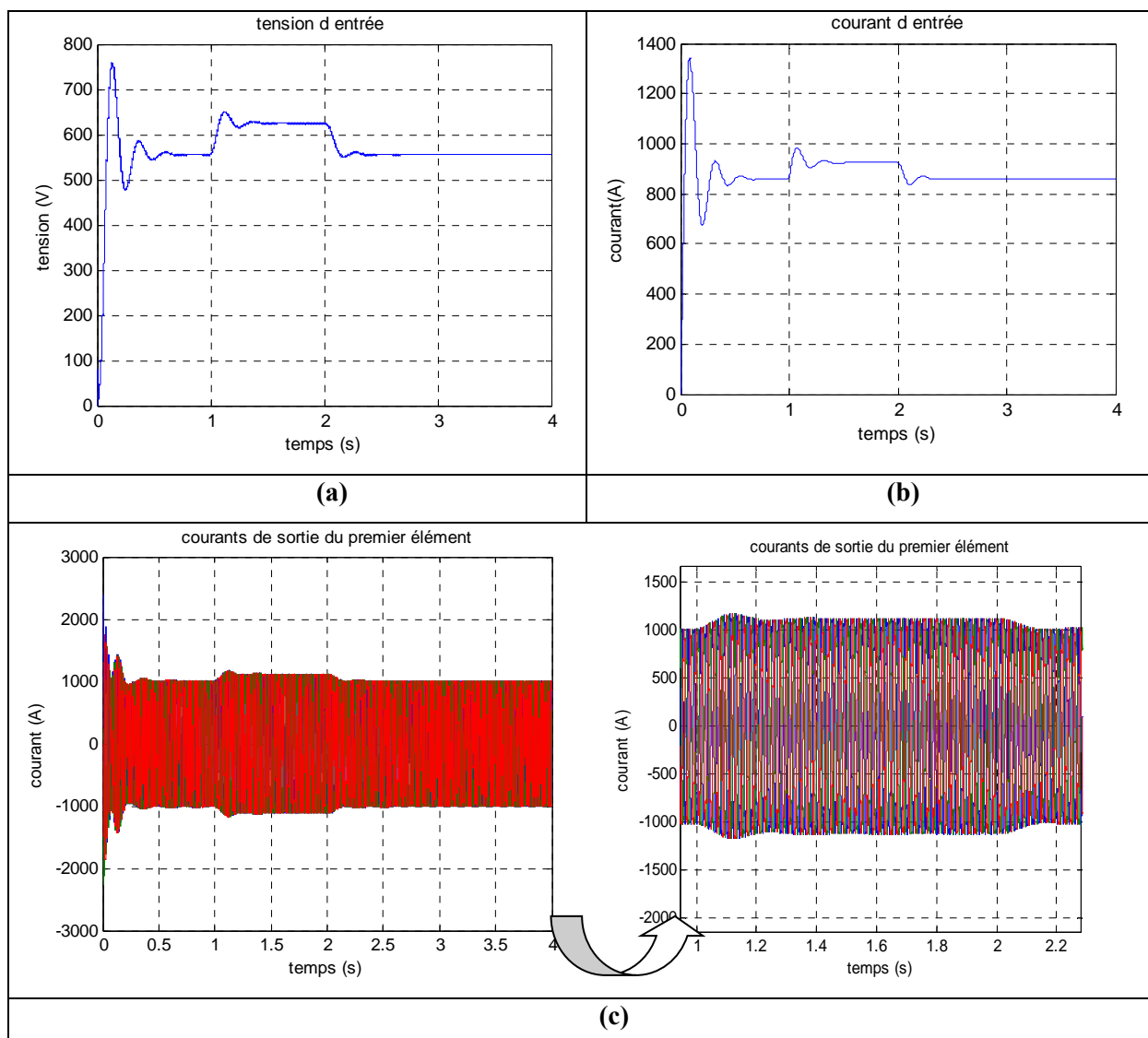


Figure III-5 (a) tension d'entrée, (b) courant d'entrée, (c) courants de sortie, lors du remplacement d'un module par un autre

Le délestage d'un des modules est effectué à l'instant $t=1s$, à partir de cet instant, le système subit un régime transitoire avant de retrouver son régime permanent où il adopte le fonctionnement d'un onduleur à neuf modules. Le surplus remarqué dans les tensions d'entrée des modules restants est dû au partage de la tension que supportait le module délesté, et indique le partage équitable de la tension d'entrée.

Le remplacement du module défaillant est effectué à l'instant $t=2s$, après un court régime transitoire, le surplus de tension d'entrée (et de courant d'entrée) disparaît, le système revient à son état initial comme étant un onduleur à dix modules. Le partage équitable de la tension d'entrée sur les dix modules est assuré.

L'action de l'isolement et du remplacement d'un module défaillant, est primordiale pour assurer la continuité de service de l'onduleur modulaire. La simulation prouve que cette action ne déstabilise pas le système, et ne perturbe pas le partage équitable de la tension d'entrée sur l'ensemble des modules mis en série.

III.8. conclusion

Dans ce chapitre, on a réalisé une étude de robustesse pour vérifier si le système est imperturbable face aux défauts qui peuvent surgir à tout moment du fonctionnement du convertisseur.

Le délestage d'un des modules en plein fonctionnement du convertisseur ne cause pas de problème majeur quant aux performances ou à la continuité de service. L'onduleur continue à fonctionner comme un convertisseur à $n-1$ modules après avoir perdu un de ses modules, et la tension d'entrée du module délesté se partagera équitablement sur les modules restants.

Lorsque le convertisseur possède un grand nombre de modules, l'influence du délestage sur le comportement du système devient moindre, et le système pourra même supporter le délestage de plusieurs de ses modules au même temps. Le partage équitable de la tension d'entrée sera toujours assuré.

Conclusion générale

Le virement de philosophie causé par la transition énergétique de l'énergie fossile vers les énergies renouvelables a lancé plusieurs défis techniques concernant l'optimisation de l'exploitation de ces dernières. L'un de ces défis consiste à acheminer l'énergie électrique des centrales de production décentralisée avec le moins de pertes possibles. Une des solutions consiste à transporter l'énergie en continu puis la convertir par le biais d'onduleur avant de l'injecter au réseau. L'étude faite dans ce travail, porte sur un onduleur modulaire à entrée série pouvant supporter des hauts niveaux de tension exigés par le transport en continu.

La simulation du délestage d'un ou de plusieurs modules du convertisseur en plein fonctionnement, a prouvé l'aptitude du convertisseur à supporter ce genre de défaillances tout en préservant sa plus importante caractéristique de partage équitable de la tension d'entrée. Le fait que le système soit stable vis-à-vis du délestage d'un ou plusieurs modules, est d'une importance primordiale dans la pratique, car il offre la possibilité de changer un module défaillant sans interrompre le fonctionnement du système.

L'onduleur modulaire pourra supporter la défaillance d'un ou de plusieurs modules, ces derniers peuvent être délestés et échangés, sans affecter le fonctionnement normal et la continuité de service du convertisseur, ni sa propriété de partage uniforme de la tension d'entrée.

Bibliographie

- [1] A. Sarmento, A. Barata, T. Morais, “Offshore renewable energy current stats-future perspectives for Portugal”, INEGI, Mars 2014.
- [2] www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap01-Fr.pdf, février 2016.
- [3] *U.S. Energy Information Administration (EIA)*
www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=6&pid=29&aid=12&cid=ww,&syid=1981&eyid=2012&unit=BKWH, février 2016.
- [4] www.offshorewind.biz/2016/02/09/second-offshore-wind-farm-decommissioning-on-the-way/, février 2016.
- [5] www.londonarray.com/the-project/, février 2016.
- [6] Global Wind Energy Council (GWEC), “Global wind report annual market update 2015”, Avril, 2016.
- [7] R. Sharma, W. Rasmussen, K. Høj Jensen, V. Akamatov “Modular VSC Converter Based HVDC Power Transmission from Offshore Wind Power Plant: Compared to the Conventional HVAC System”, In : Electric Power and Energy Conference (EPEC), IEEE. pp. 1-6, 2010.
- [8] W. Chen, K. Zhuang, X. Ruan, “A Input-Series- and Output-Parallel-Connected Inverter System for High-Input-Voltage Applications,” IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 9, SEPTEMBER 2009.
- [9] R. Giri, R. Ayyanar, and E. Ledezma, “Input-series and output-series connected modular dc-dc converters with active input voltage and output voltage sharing,” in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. (APEC’04), pp. 1751–1756, 2004.
- [10] W. Kim, S. You, and B. Cho, “Modeling, control, and design of input-series-output-parallel-connected converter for high-speed-train power system,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 48, no. 3, pp. 536–544, June. 2001.

- [11] R. Ayyanar, R. Giri, N. Mohan, "Active input-voltage and load-current sharing in input-series and output-parallel connected modular DC-DC converters using dynamic input-voltage reference scheme," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 6, pp. 1462–1473, Nov. 2004.
- [12] R. Giri, V. Choudhary, R. Ayyanar, N. Mohan, "Common-duty-ratio control of input-series connected modular dc-dc converters with active input voltage and load-current sharing," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 4, pp. 1101–1111, Jul. 2009.
- [13] J. W. Kimball, J. T. Mossoba, P. T. Krein, "A stabilizing, highperformance controller for input series-output parallel converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 3, pp. 1416–1427, May 2008.
- [14] X. Ruan, L. Cheng, T. Zhang, "Control strategy for input-series output-parallel converter," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC'06)*, pp. 238–245, 2006.
- [15] V. Vorperian, "Synthesis of medium voltage dc-to-dc converters from low voltage, high-frequency PWM switching converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 5, pp. 1619–1635, Sep. 2007.
- [16] S. K. Mazumder, M. Tahir, K. Acharya, "Master-slave current-sharing control of a parallel DC-DC converter system over an RF communication interface," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 1, pp. 59–66, Jan. 2008.
- [17] Y. Huang and C. K. Tse, "Circuit theoretic classification of parallel connected dc-dc converters," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Regular Papers*, vol. 54, no. 5, pp. 1099–1108, May 2007.
- [18] K. Siri, K. A. Conner, C. H. Truong, "Uniform voltage distribution control for parallel-input, series-output connected converters," in *Proc. IEEE Aerosp. Conf.*, Mar. pp. 1–11. December 2005.
- [19] L. Huber, B. T. Irving, M. M. Jovanovic, "Open-loop control methods for interleaved DCM/CCM boundary boost PFC converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 4, pp. 1649–1657, Jul. 2008.
- [20] L. Heinemann, "An actively cooled high power, high frequency transformer with high insulation capability," in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. (APEC'02)*, pp. 352–357.

- [21] S. Inoue, H. Akagi, "A bidirectional isolated dc-dc converter as a core circuit of the next-generation medium-voltage power conversion system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 535–542, Mar. 2007.
- [22] Z. He, Y. Xing, and Y. Hu, "Low cost compound current sharing control for inverters in parallel operation," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC'04)*, pp. 222–227, 2004.
- [23] J. M. Guerrero, L. Garcia de Vicuna, J. Matas, M. Castilla, J. Miret, "A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1205–1213, Sep. 2004.
- [24] J. M. Guerrero, L. Garcia de Vicuna, J. Matas, M. Castilla, J. Miret, "Output impedance design of parallel-connected ups inverters with wireless load-sharing control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 4, pp. 1126–1135, Aug. 2005.