

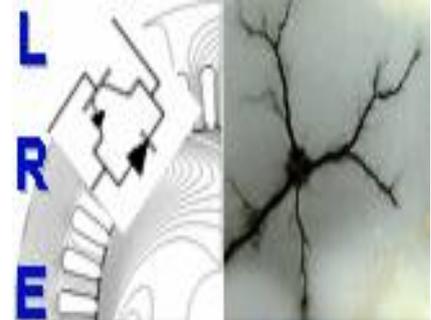
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

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 courant de circulation lors de la mise en parallèle  
des onduleurs avec la commande SPWM**

Présenté par  
**ZEHIOUA Youcef Ibrahim**

Sous la direction de Dr.T.ZEBBADJI  
Soutenu publiquement le 20 juin 2016

**Membres du Jury**

Président : K.BOUGHRARA, Docteur à l'ENP  
Rapporteurs : T.ZEBBADJI, Docteur à l'ENP

Examineur : R.TAHMI, 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

يتزايد استهلاك الطاقة الكهربائية في العالم بشكل مستمر أين أخذ استعمال الطاقات المتجددة في توليد هذه الأخيرة حيزا أكبر. وضع هذه الطاقة تحت تصرف المستهلك يتطلب الربط على التوازي للموجات, و بالتالي عملية نمذجة أكثر من مهمة من اجل فهم التفاعلات بين مختلف الأجزاء و الإعدادات حول مردود هذه البنية. لذلك في دراستنا هذه, ركزنا على توزيع التيار الداخل ثم على التحكم بالتيار المار بين الموجهات في حالة ربطهم على التوازي و اتصالهم بشبكة التوزيع الكهربائي. ثم أجرينا دراسة حول التيار المار بين الوحدتين من اجل قيم مختلفة لإعدادات الدارة بالاعتماد على تقنيات للتعديل ( SPWM ). كما تمت عملية تنظيم وتحكم لهذا التيار من اجل تقليله. في الأخير أدخلنا آلية التحكم النشط للتيار بهدف تسيير توزيع الطاقة بالإضافة إلى المقارنة بين التيارات المتولدة بالاعتماد على كلتا التقنيتين.

**الكلمات المفتاحية:** الربط على التوازي للموجات, التحكم النشط للتيار, تيار ما بين الموجهات توزيع التيار, التنظيم, SPWM.

## Abstract

The consumption of energy in the world is increasing. The share of renewable energy in the energy production process is becoming more and more important. Its availability to the consumer requires the parallel connection of inverters. Modeling is more than necessary for a better understanding of the different parameters interaction on the performance of the structure. Special interest is given to the input current distribution along the units and the control of the circulating current flow generated by the two parallel inverters connected to the network. Then, a study of these circulating currents for different values of the circuit parameters with the modulation techniques (SPWM) is developed. Current control procedure is investigated to minimize the circulating current among the inverters. Finally, the current active control has been introduced to manage the power sharing.

**Key Words:** SPWM, Actif control, regulation, circulating current, inverter connected in parallel, current sharing.

## Résumé

La consommation des énergies dans le monde ne cesse d'augmenter. La part des énergies renouvelables dans le processus de production de l'énergie prend de plus en plus d'ampleur. La mise à la disposition du consommateur de cette énergie requiert la mise en parallèle d'onduleurs. Une modélisation est plus que nécessaire pour une compréhension de l'interaction des différents paramètres sur les performances de la structure. On s'est intéressé alors au partage du courant d'entrée puis à la commande du courant de circulation généré par une mise en parallèle d'onduleurs connectés au réseau. Puis, une étude des courants de circulation pour différents valeurs des paramètres du circuit avec la technique de modulation (SPWM) est élaborée. Une régulation de ce courant est entreprise afin de le minimiser. Finalement, on introduit une commande active du courant afin de gérer le partage de puissance.

**Mots clés :** SPWM, commande active, régulation, courant de circulation, mise en parallèle d'ondeur, partage de courant.

*A la mémoire de ma mère*

*A mon père*

*A mes sœurs*

*A toute ma famille et mes amis*

*Yucef*

## *Remerciement*

Au terme de ce travail,

Nous adressons nos remerciements à Monsieur Tahar ZEBBADJI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour l'appui scientifique et pour leur disponibilité durant la préparation de notre projet fin d'étude.

Nous tenons également à remercier Monsieur K.Bouhrara, enseignant à l'Ecole Nationale Polytechnique, de nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Nous remercions aussi Monsieur R.Tahmi, enseignant à l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir accepté d'examiner et évaluer ce travail.

Nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants de l'École Nationale Polytechnique spécialement ceux du département d'Électrotechnique, pour leur encadrement tout au long de notre formation.

## LISTE DES FIGURES

Figure I - 1 : Structure de la production électrique en 2012.....	15
Figure I - 2 : Structure de la production électrique d'origine renouvelable (2012).....	16
Figure I - 3 : Evolution de la production hydraulique par région (TWh).....	17
Figure I - 4 : Evolution de la production éolienne par an (TWh).....	18
Figure I - 5 : Evolution de la production solaire par région (TWh).....	19
Figure I - 6 : Les différents types de convertisseurs.....	20
Figure I - 7 : Principaux interrupteurs de puissance en fonction de la puissance et de la fréquence de commutation du convertisseur .....	23
Figure I - 8 : Onduleur monophasé avec transformateur de sortie à pont milieu.....	24
Figure I - 9 : Onduleur monophasé avec diviseur capacitif.....	25
Figure I - 10 : Onduleur monophasé en pont.....	25
Figure I - 11 : Onduleur de tension triphasé .....	25
Figure I - 12 : Modulation à largeur d'impulsions multiples .....	26
Figure I - 13 : Modulation à largeur d'impulsion.....	27
Figure I - 14 : Modulation à largeur d'impulsion modifiée .....	27
Figure I - 15 : Modèle utilisé pour l'étude de l'association de n semi-conducteurs en parallèle .....	29
Figure II - 1 : Principe de la MLI Sinus-Triangle .....	32
Figure II - 2 : La création des signaux des impulsions et des tensions.....	33
Figure II - 3 : Structure parallèle des onduleurs avec commande MLI .....	34
Figure II - 4 : Schéma de la mise en parallèle de deux onduleurs connectés au réseau.....	35
Figure II - 5 : Simulation des courants et des tensions pour un système équilibré .....	40
Figure II - 6 : Simulation de la commande MLI avec $\Delta Z \neq 0$ .....	41
Figure II - 7 : Simulation des courants et des tensions lors d'une perturbation de système ..	42
Figure II - 8 : Simulation d'une commande MLI avec $\Delta r \neq 0$ .....	44
Figure II - 9 : Simulation de la commande MLI avec $\Delta \phi \neq 0$ .....	45
Figure II - 10 : Minimisation du courant de circulation.....	46
Figure II - 11 : Les courants $I_{d1}$ et $I_{q1}$ .....	46
Figure II - 12 : Les courants $I_{a1}$ , $I_{a2}$ et $I_{cr}$ .....	47

*LISTE DES FIGURES*

Figure II - 13 : Le courant de charge.....	47
Figure II - 14 : Les courants $I_{d1}$ et $I_{q1}$ .....	47
Figure II - 15 : Les courants $I_{d2}$ et $I_{q2}$ .....	47
Figure II - 16 : Les courants $I_{a1}$ et $I_{a2}$ .....	48
Figure II - 17 : Le courant de circulation.....	48
Figure II - 18 : Le courant de charge.....	48

## LISTE DES SYMBOLES

- R1 : la résistance de ligne du premier onduleur  
R2 : la résistance de ligne du deuxième onduleur  
L1 : L'inductance du premier onduleur  
L2 : L'inductance du deuxième onduleur  
Z1 : l'impédance de ligne du premier onduleur  
Z2 : L'impédance de ligne du deuxième onduleur  
R<sub>L</sub> : La résistance de ligne du réseau  
L<sub>L</sub> : l'inductance e ligne du réseau  
Z<sub>L</sub> : L'impédance de ligne du réseau  
V<sub>DC</sub> : La tension du bus continue  
DC : courant continu  
AC : courant alternatif  
V<sub>r</sub> : La tension du réseau  
S : Fonction de commutation  
dφ : rapport cyclique  
I<sub>cr</sub> : Courant de circulation  
U<sub>r</sub> : Tension de référence  
U<sub>p</sub> : Tension de porteuse  
I<sub>0,1</sub> : Courant homopolaire de la ligne 1  
I<sub>0,2</sub> : Courant homopolaire de la ligne 2  
F<sub>p</sub> : Fréquence de la porteuse  
φ : Déphasage de modulante  
SPWM : La modulation triangulaire à largeur d'impulsion  
L<sub>a1</sub> : Inductance de la phase 'a' de la ligne '1'  
PI : Régulateur proportionnel intégral  
I<sub>a1</sub> : le courant de la phase « a » du premier onduleur  
I<sub>a2</sub> : le courant de la phase « a » du deuxième onduleur

# TABLES DES MATIERES

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>12</b>
-----------------------------------	-----------

## Chapitre I : Etat de l'art

<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>15</b>
I.1.1. La production d'électricité d'origine hydraulique .....	16
I.1.2. La production d'électricité d'origine éolienne .....	17
I.1.3. La production d'électricité d'origine solaire.....	18
<b>I.2. La conversion d'énergie .....</b>	<b>19</b>
I.2.1. Le convertisseur DC/DC (HACHEUR).....	20
I.2.2. Le convertisseur AC/AC (Gradateur).....	21
I.2.3. Le convertisseur DC/AC (Onduleur).....	21
I.2.4. Le convertisseur AC/DC (Redresseur).....	21
I.2.5. Les interrupteurs de puissance.....	21
<b>I.3. Les onduleurs .....</b>	<b>23</b>
I.3.1. Classification des onduleurs .....	23
I.3.1.1. Onduleur non autonome .....	23
I.3.1.2. Onduleur autonome.....	24
I.3.2. Types d'onduleurs autonomes de tension .....	24
I.3.2.1. Les onduleurs monophasés.....	24
I.3.2.2. Les onduleurs triphasés .....	25
I.3.2.3. Les onduleurs multi niveaux .....	26
I.3.4. Types de Modulations .....	26
I.3.4.1. La modulation linéaire multiple (UPWM).....	26
I.3.4.2. La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM).....	27
I.3.4.3. La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée) (MSPWM) .....	27
I.3.4.4. La Modulation vectorielle (SVPWM).....	28

<b>I.4. L'association en parallèle des semi-conducteurs .....</b>	<b>28</b>
<b>I.5. La mise en parallèle des onduleurs .....</b>	<b>29</b>
<b>I.6. Courant de circulation .....</b>	<b>30</b>
<b>I.7. Conclusion .....</b>	<b>30</b>
<b>Chapitre II : Commande de la mise en parallèle des onduleurs par une MLI sinusoïdal</b>	
<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>32</b>
<b>II.2. Définition de la modulation SPWM.....</b>	<b>32</b>
<b>II.3. Modélisation de la mise en parallèle des deux onduleurs.....</b>	<b>33</b>
II.3.1. Hypothèses .....	34
II.3.2. Équations électriques pour une mise en parallèle de deux onduleurs .....	34
<b>II.4. Courant de circulation.....</b>	<b>35</b>
<b>II.5. Simulation de la mise en parallèle de deux onduleurs.....</b>	<b>37</b>
II.5.1. Cas où le courant de circulation est nul .....	37
II.5.1.1. Cas des deux onduleurs identiques .....	37
II.5.1.2. Cas où les impédances de ligne sont différentes.....	39
II.5.2. Cas de la présence d'un courant de circulation.....	41
II.5.2.1. Cas de l'impédance d'une phase différente de celles des autres phases .....	41
II.5.2.2. Cas où le taux de modulation est différent .....	42
II.5.2.3. Cas où $\Delta\phi \neq 0$ .....	43
<b>II.6. Optimisation du courant de circulation .....</b>	<b>44</b>
<b>II.7. Simulation de la commande active .....</b>	<b>46</b>
II.7.1. Cas où $I_{d1}=I_{d2}$ et $I_{q1}=I_{q2}$ .....	46
II.7.2. Cas où $I_{d2}=1/2 I_{d1}$ et $I_{q2}=1/2 I_{q1}$ .....	47
<b>II.8. Conclusion.....</b>	<b>48</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>51</b>

---

# INTRODUCTION GENERALE

---

Face à une demande croissante d'énergie et à l'épuisement à plus ou moins long terme des énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Suite aux crises pétrolières, certains pays ont mené une politique orientée vers le nucléaire alors que d'autres ont massivement utilisé les énergies renouvelables avec l'adoption de l'éolien et le photovoltaïque.

Les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente. De surcroît, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution, des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel. Pour subvenir aux besoins énergétiques de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et d'augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième alternative consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : les énergies renouvelables d'origines : mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques), ou encore, l'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire thermique,...).

Les sources d'énergie renouvelables permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant, ainsi, satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie.

Les sources d'énergie renouvelables nécessitent une installation particulière dont on aura besoin de l'électronique de puissance « redresseurs, onduleurs, transformateur, ....etc. » ; Mais cela pose plusieurs défis quant aux niveaux de la régulation des courants et des tensions générées à la sortie du côté AC lorsqu'on est connecté aux réseaux.

Dans les applications de fortes puissances générées par les centrales d'énergie, des dispositifs à base de commutateurs individuels ne peuvent, à eux seuls, faire transiter cette énergie et la mettre à la disposition des consommateurs. Les structures en charge de cette conversion d'énergie devront supporter des contraintes tensions et ou courant qui dépassent

largement les contraintes admissibles de commutateurs individuels : d'où l'idée de combinaison d'interrupteurs ou de modules. 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.

Lorsque plusieurs onduleurs sont mis en parallèle, il est impératif de veiller à la distribution du courant de charge le long des onduleurs. Avec les tolérances des éléments, des onduleurs sans que l'on tienne compte du contrôle du partage de courant peut engendrer un flux de courant asymétrique dans les modules. Cela affecte sérieusement l'efficacité du système en augmentant ainsi la surcharge d'un ou plusieurs modules. Le fonctionnement ainsi que la durée de vie de la structure se trouve compromise.

Dans une première étape de ce travail, nous ferons une synthèse de l'utilité de la mise en parallèle des onduleurs pour des applications liées aux énergies renouvelables. Dans le second chapitre, on introduit la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale et l'on applique à la mise en parallèle d'onduleurs connectés au réseau. L'étude du courant de circulation et sa variation en fonction des paramètres du circuit et ceux de la modulation est entreprise.

---

# CHAPITRE I

## ETAT DE L'ART

---

## I.1. Introduction

Les besoins en énergie électrique de l'humanité sont toujours en progression. Pour y faire face, l'évolution de la capacité de production d'électricité doit suivre cette croissance.

La production d'électricité mondiale à partir de combustibles fossiles est la plus courante, elle représente environ deux tiers de production mondiale. Sur le plan régional, d'autres sources d'énergie peuvent fournir la majorité de l'électricité. La production d'électricité renouvelable fait partie intégrante du système de production d'électricité mondiale.

Devant la hausse du prix du pétrole et le souci de préserver l'environnement, la promotion des énergies renouvelables constitue un des grands axes de la politique énergétique et environnementale de la plupart des pays. Cette politique énergétique vise à maintenir la sécurité d'approvisionnement tout en prenant en compte les préoccupations environnementales.

La production mondiale d'énergie électrique d'origine renouvelable a atteint 4699,2 TWh en 2012, ce qui représente plus de 20% de la production d'électricité mondiale [1]. La Figure I-1 montre la structure de la production mondiale. Tel qu'on remarque, le taux des énergies renouvelables a augmenté. L'énergie Hydraulique présente plus de 60% des énergies renouvelables (Figure I-2).

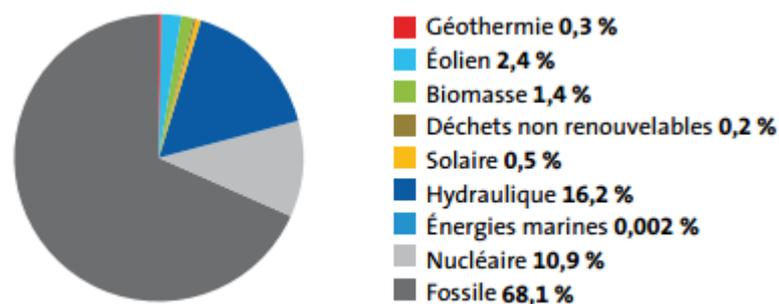
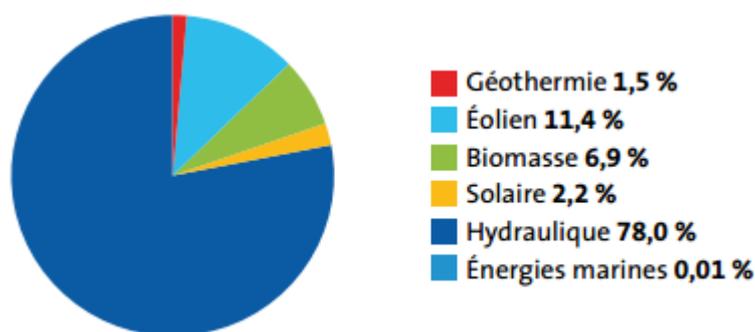


Figure I - 1 : Structure de la production électrique en 2012, [1]



**Figure I - 2 : Structure de la production électrique d'origine renouvelable (2012), [1]**

L'électricité renouvelable provient de six sources distinctes : l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, Biomasse, énergie Solaire, la géothermie et les énergies marines qui restent une filière en phase de démonstration.

### **I.1.1. La production d'électricité d'origine hydraulique**

Le principe de l'hydroélectricité (La formation d'électricité produite par un système de turbines installées dans les cours d'eau) est d'utiliser la force de l'eau créée grâce à une hauteur de chute pour qu'elle entraîne une turbine reliée à un générateur d'électricité. Certains barrages hydroélectriques sont équipés d'une centrale de pompage-turbinage. Celle-ci dispose obligatoirement d'un bassin inférieur. Ce type de centrale peut, au choix, turbiner l'eau en cas de forte demande d'électricité [2].

L'hydroélectricité est de loin la première source d'électricité renouvelable, occupant à elle seule 78% du bouquet renouvelable. La filière est également la seconde source d'électricité mondiale avec un total de 3 663,4 TWh, soit une part de 16.2% de la production d'électricité mondiale en 2012 [1].

Comme l'illustre la Figure I-3, l'Asie de l'est et du sud ont connu une évolution dans la production d'énergie hydraulique durant les dernières années.

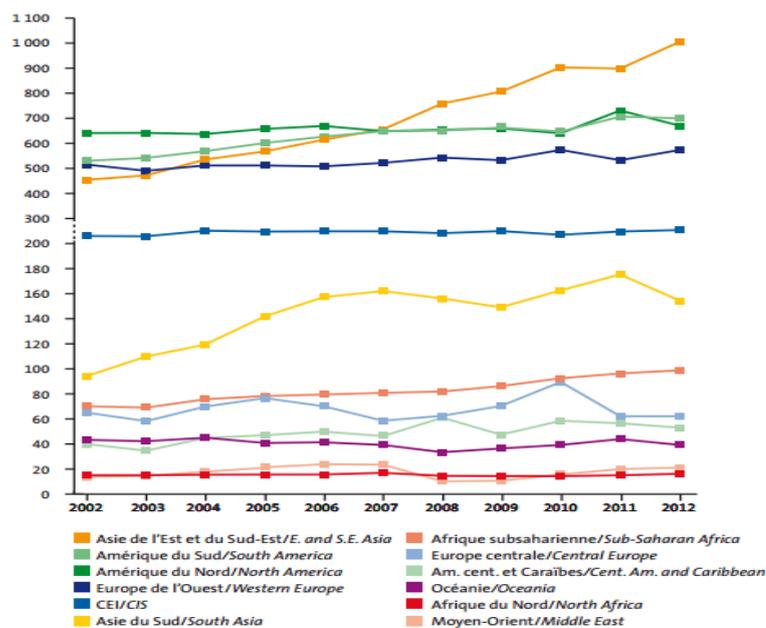


Figure I - 3 : Evolution de la production hydraulique par région (TWh), [1]

### I.1.2. La production d'électricité d'origine éolienne

L'énergie éolienne a confirmé en 2012 son statut de deuxième source de production d'électricité renouvelable (534.3 TWh). Elle représente désormais 11.4% de la production mondiale d'électricité renouvelable et 2.54% de la production totale d'électricité [1] [2].

La puissance éolienne installée dans le monde fin 2012 s'élève à 282.7 GW. L'union européenne est la région qui détient le plus vaste parc éolien au monde, avec une puissance cumulée s'élève à 106,2 GW. La chine dispose quant à elle de la plus vaste filière éolienne (75,3 GW en 2012), devant les états unis (60 GW). Elle devrait logiquement prendre la première place mondiale au niveau de la production grâce au développement de ses infrastructures réseaux qui amélioreront les capacités d'intégration de sa puissance éolienne [1].

Comme l'illustre la Figure I-4, la production d'énergie éolienne a évolué, et le taux annuel de production augmente, ce qui justifie le développement de cette énergie.

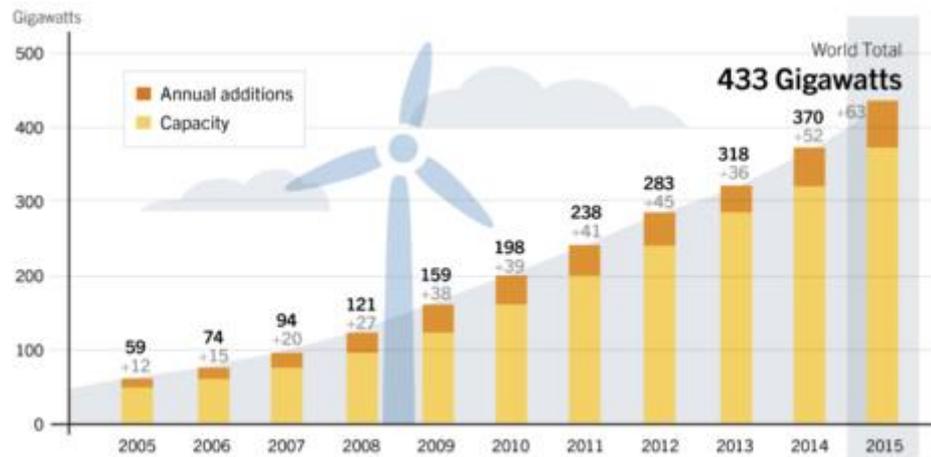


Figure I - 4 : Evolution de la production éolienne par an (TWh), [3]

### I.1.3. La production d'électricité d'origine solaire

Le soleil constitue une réserve d'énergie renouvelable inépuisable, Verte et gratuite. L'énergie solaire photovoltaïque offre une réponse durable aux enjeux énergétiques actuels. Elle contribue à limiter les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et constitue une alternative aux énergies fossiles [1] [2].

La filière a franchi le cap des 100 TWh en 2012 (104,5 TWh exactement). La part de l'électricité solaire dans la production d'électricité mondiale est désormais de 0,5% et 2,2 % dans la production d'électricité renouvelable [1].

L'Allemagne est leader mondial en termes de production d'électricité solaire. En 2012, le pays a produit 28TWh, soit à lui seul 26,8% de la production mondiale [1].

Comme l'illustre la Figure I-5, la production d'énergie solaire a évolué dans les dernières années, et le taux annuel de production augmente, ce qui justifie le développement de cette énergie.

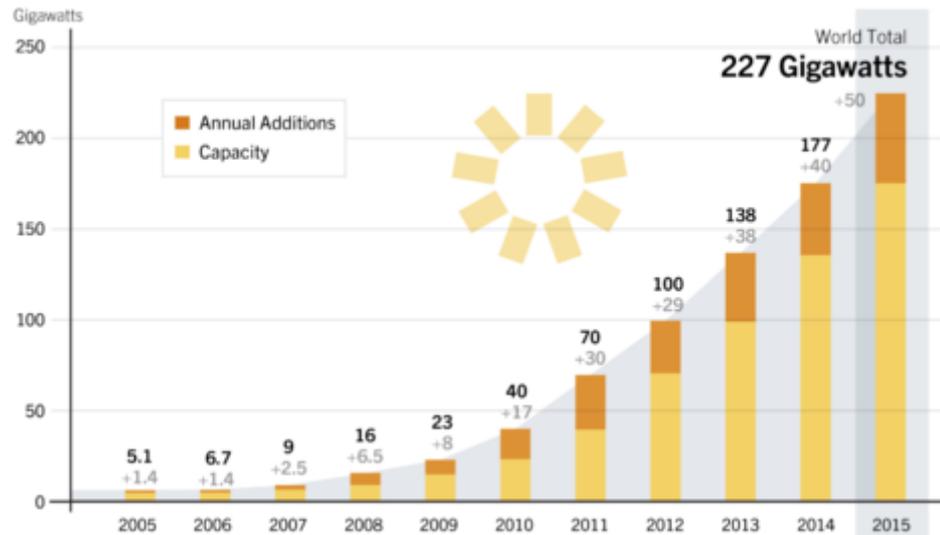


Figure I - 5 : Evolution de la production solaire par région (TWh), [3]

L'exploitation de ces différentes ressources d'énergie nécessite un système de conversion à base de composants d'électronique de puissance afin d'effectuer une conversion d'énergie nécessaire pour que celle-ci soit mise à la disposition du consommateur.

## I.2. La conversion d'énergie

Historiquement, les mises en forme d'énergie électrique étaient réalisées à l'aide de montages complexes à base de machines tournantes (convertisseurs dynamiques). L'essor des semi-conducteurs de puissance au début des années 60 a permis un développement rapide des convertisseurs statiques d'énergie électrique (par opposition aux convertisseurs dynamiques). Les convertisseurs statiques sont donc désormais utilisés pour mettre en forme l'énergie électrique et permettre ainsi d'adapter les différentes sources d'énergies aux différentes charges. Ces convertisseurs statiques sont constitués d'interrupteurs électroniques à base de semi-conducteurs et d'éléments passifs. Ils permettent le transfert d'énergie tout en garantissant un rendement correct. En effet, les semi-conducteurs sont utilisés en régime de commutation de façon à mettre en forme l'énergie électrique [4]. Les différents types de convertisseurs sont illustrés dans la Figure I-6.

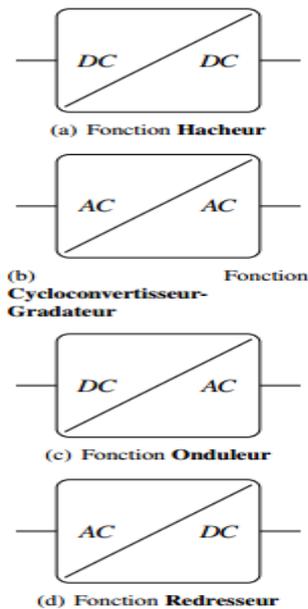


Figure I - 6 : Les différents types de convertisseurs [4].

### I.2.1. Le convertisseur DC/DC (HACHEUR)

Les hacheurs ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Ils peuvent être isolés, et comportent un transformateur assurant l'isolation galvanique, ou non isolés [4]. Les convertisseurs non isolés peuvent être partagés en deux types en fonction de leur comportement et du sens de l'énergie qu'ils transfèrent, on distingue ainsi : les hacheurs non réversibles qui permettent le transfert d'énergie de la source vers la charge seulement, Les hacheurs réversibles où la source peut fonctionner en charge et inversement, Il est donc possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie. Il existe trois types de hacheurs réversibles selon le type de conversion :

- Les hacheurs réversibles en courant
- Les hacheurs réversibles en tension
- Les hacheurs réversibles en courant et en tension.

### I.2.2. Le convertisseur AC/AC (Gradateur)

Un gradateur est un dispositif de l'électronique de puissance destiné à modifier un signal électrique dans le but de faire varier sa tension et son intensité efficace de sortie et de modifier ainsi la puissance dans la charge. Ce dispositif est utilisé sur des tensions alternatives (souvent sinusoïdales) : c'est un convertisseur direct alternatif-alternatif [4].

Le gradateur utilise un triac variant la tension efficace en sortie du montage. Pour les équipements de forte puissance les gradateurs peuvent être réalisés par des groupes de thyristors montés en anti-parallèle, ou bien éventuellement, par association thyristor-diodes dans le cas de raccordement à des réseaux polyphasés.

Les gradateurs sont utilisés pour réaliser des variateurs pour certains appareils fonctionnant sur le réseau, pour la régulation de chauffage électrique, ainsi que de nombreux processus industriels.

### **I.2.3. Le convertisseur DC/AC (Onduleur)**

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de fournir des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue. C'est la fonction inverse d'un redresseur. L'onduleur est un convertisseur statique de type continue/alternatif [5] [6].

L'onduleur est l'un des montages les plus répandus de l'électronique de puissance, il a de multiples applications :

- Les alimentations sans interruption.
- Le raccord des panneaux solaires au réseau électrique.
- Les variateurs de vitesse des machines alternatives : la tension du réseau est redressée puis un onduleur la transforme à une tension dont la fréquence et la forme sont réglable.

### **I.2.4. Le convertisseur AC/DC (Redresseur)**

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu, est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite de l'être par une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. L'alimentation est, la plupart du temps, un générateur de tension [4].

Les redresseurs non commandés, essentiellement réalisés à partir de diodes, sont utilisés lorsque la tension de sortie n'a pas besoin d'être ajustée.

Les redresseurs commandés dont la tension de sortie peut être variable comportent des thyristors ou des ensembles de diodes et de thyristors. Ces redresseurs sont toujours utilisés en forte puissance et lorsqu'il est nécessaire de réguler ou de faire varier les grandeurs

électriques en sortie. En faible et en moyenne puissance, les redresseurs commandés à thyristors sont en voie d'obsolescence et sont avantageusement remplacés par la mise en cascade d'un redresseur non commandé et d'un convertisseur continue/continue. Dans les petites puissances, la commande d'un IGBT est plus simple que celle d'un thyristor [4].

### **I.2.5. Les interrupteurs de puissance**

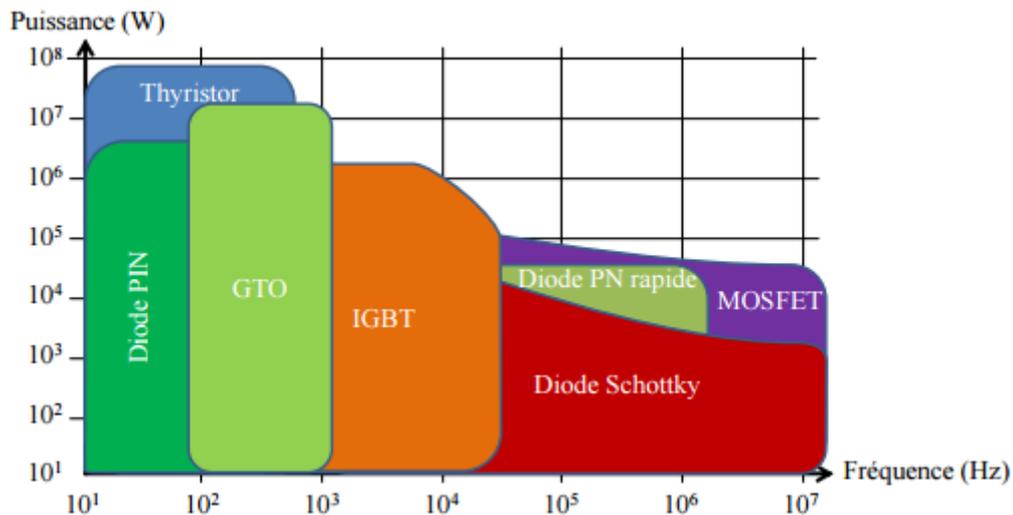
Le convertisseur de puissance est principalement constitué de deux types de composants : les composants passifs et les composants actifs. Le composant actif élémentaire de l'électronique de puissance est l'interrupteur de puissance au sens large. Cet interrupteur est constitué d'un matériau semi-conducteur qui lui permet d'être soit passant, soit bloqué. Bien que cette fonction de base soit partagée par tous les interrupteurs, il n'existe pas moins un nombre important de composants différents [7]. Ces interrupteurs sont différenciables en fonction de nombreux critères dont les principaux étant :

- Leur mode de conduction du courant et leur tenue de la tension.
- Leur type d'amorçage : ouverture et fermeture spontanées, ouverture et fermeture commandées ou un amorçage commandé et l'autre spontané.
- Leur type de commande : commande en courant ou en tension, par signaux continus ou par impulsion.

Chaque composant est ensuite défini par un ensemble de données et caractéristiques techniques :

- Leur tenu en tension.
- Leur tenu en courant.
- Leur fréquence maximale de fonctionnement
- Leur performance statique à l'état passant : résistance à l'état passant  $R_{on}$  et à l'état bloqué : courant de fuite  $I_f$ .
- La puissance maximale que le composant peut dissiper.
- Leur prix.

La figure I-7 montre la répartition par domaine de puissance et fréquence de commutation des principaux types d'interrupteur de puissance.



**Figure I - 7 : Principaux interrupteurs de puissance en fonction de la puissance et de la fréquence de commutation du convertisseur [7]**

La limitation de la puissance transférée par un interrupteur donnée est d'autant plus réduite si la fréquence de commutation est élevée. Le transfert de grande puissance produite par des centrales d'énergie requiert une combinaison d'interrupteurs pour une conversion d'énergie qui doit être mise à la disposition des consommateurs.

Dans notre étude, on s'intéresse au transfert de cette grande puissance de sa forme continu vers sa forme alternative. L'élément nécessaire à cette transformation est l'onduleur qui était constitué de bras constitué d'une combinaison série et ou parallèle de commutateurs.

### **I.3. Les onduleurs**

#### **I.3.1. Classification des onduleurs**

Une première classification peut être faite en distinguant : onduleurs non autonome et onduleur autonome.

##### **I.3.1.1. Onduleur non autonome**

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif [5].

### I.3.1.2. Onduleur autonome

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continue-alternatif. Alimenté en continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie. Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer [5]:

- les onduleurs de tensions.
- Les onduleurs de courant.

### I.3.2. Types d'onduleurs autonomes de tension

#### I.3.2.1. Les onduleurs monophasés

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continue, cela correspond à :

- l'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur pushpull (Figure I-8).
- l'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi-pont. (Figure I-9).
- Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont (figure I-10). [8]

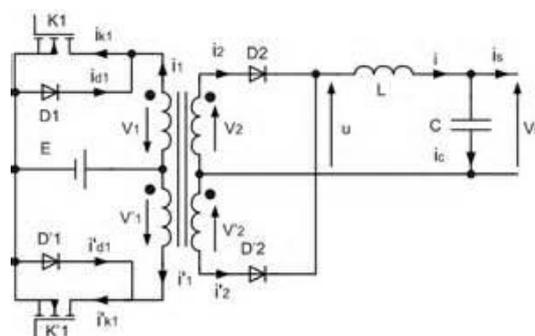


Figure I - 8 : Onduleur monophasé avec transformateur de sortie à pont milieu [8]

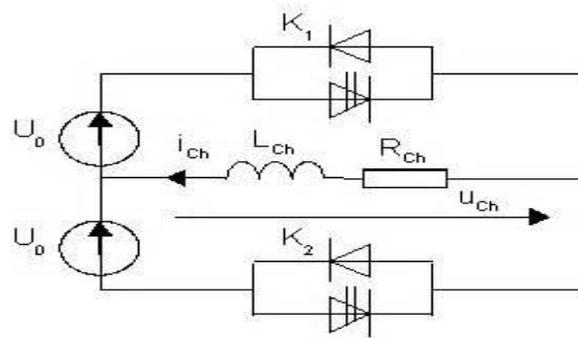


Figure I - 9 : Onduleur monophasé avec diviseur capacitif [8]

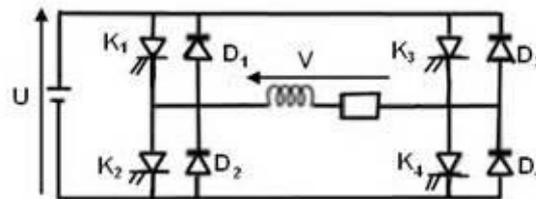


Figure I - 10 : Onduleur monophasé en pont [8]

### I.3.2.2. Les onduleurs triphasés

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs (figure I-11). Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode .la source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur. Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ , les interrupteurs  $K_1$ ,  $K'1$  et  $K_2$ ,  $K'2$ ,  $K_3$  et  $K'3$  doivent être complémentaires deux à deux.

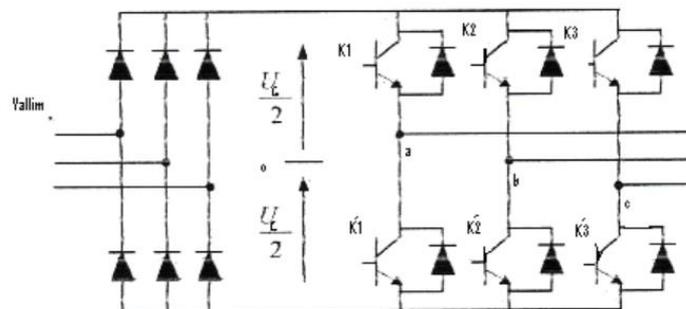


Figure I - 11 : onduleur de tension triphasé [8].

### I.3.2.3. Les onduleurs multi niveaux

Les onduleurs multi niveaux permettent d'augmenter la tension de sortie des convertisseurs statiques au-delà des limites des semi- conducteurs. Pour les réaliser on doit disposer de plusieurs sources de tension continue (obtenue par exemple à partir d'un diviseur capacitif) [5]. On peut faire apparaître autant de cellules de commutation élémentaires et les associer en les superposant ou en les mettant en cascade. Cela permet de multiplier le nombre de niveau que l'on peut donner à la tension de sortie. Cette dernière est souvent obtenue par une modulation de largeur d'impulsions (MLI). Ces onduleurs sont utilisés pour l'entraînement des moteurs asynchrones de grande puissance, d'autres applications sont possibles pour des moteurs qui tournent à vitesse élevée ( $> 5000$  tr/mn) [8].

### I.3.4. Types de Modulations

Plusieurs techniques de modulations ont été adoptées afin d'améliorer la qualité de la tension à la sortie de l'onduleur, parmi lesquelles on peut citer :

#### I.3.4.1. La modulation linéaire multiple (UPWM)

Dans cette technique on compare une porteuse triangulaire avec un signal de référence linéaire. L'onde de sortie est sous la forme d'un train d'impulsion en créneaux de largeurs égales (Figure I.11). Si l'indice de modulation est égal à un, on obtient la modulation singulière, dans laquelle le signal de sortie est formé d'une seule impulsion par demi- période. [8].

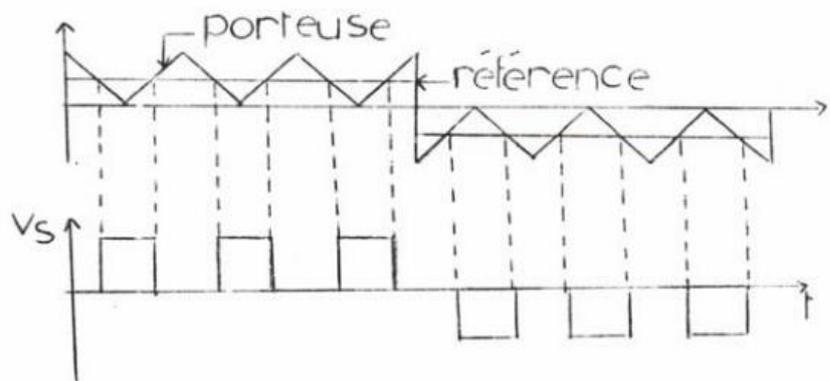


Figure I - 12 : modulation à largeur d'impulsions multiples [8].

### I.3.4.2. La modulation sinusoidale triangulaire unipolaire (SPWM)

Dans ce cas, le signal de référence est sinusoidal, on obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable (figure I.13). Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [8].

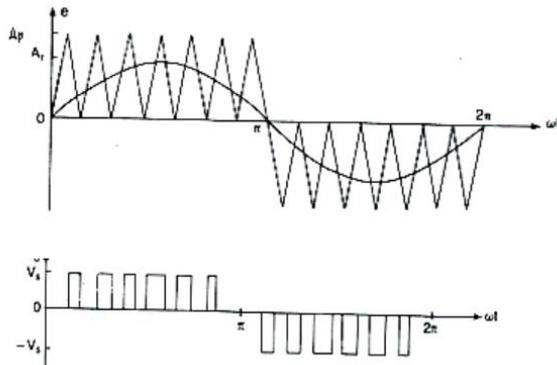


Figure I - 13 : modulation à largeur d'impulsion, [8]

### I.3.4.3. La modulation sinusoidale partielle (ou modifiée) (MSPWM)

Le signale référence est toujours sinusoidal, sauf que dans cette technique la porteuse n'est pas appliquée au milieu des alternances de la sinusoïde (Figure I.14).

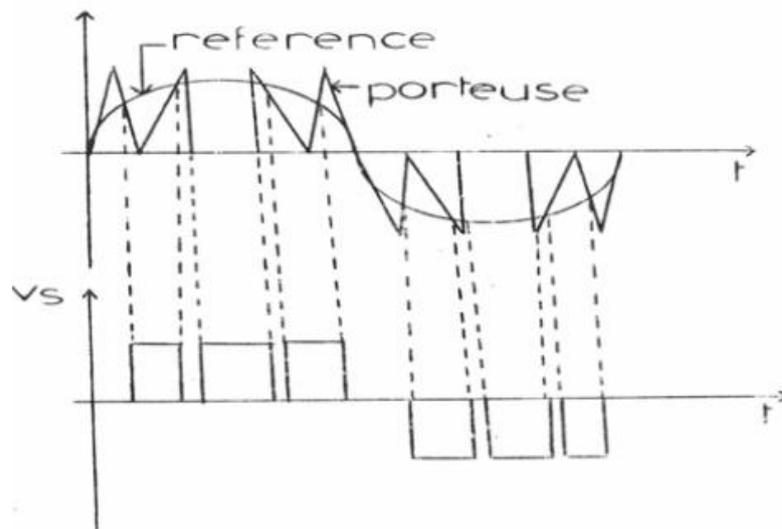


Figure I - 14 : modulation à largeur d'impulsion modifiée, [8].

#### **I.3.4.4. La Modulation vectorielle (SVPWM)**

La MLI vectorielle est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones. Contrairement à d'autres méthodes, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Cette technique de MLI suit les principes suivants ([8], [9]) :

- Un vecteur de tension de référence  $V_{ref}$  est calculé globalement et approximé sur une période de modulation «  $T_m$  » par une vectrice tension moyen.
- Pour chaque phase réalisation d'une impulsion de largeur  $T$  centrée sur la période dont la valeur moyenne est égale à la tension de référence à l'instant d'échantillonnage.
- Tous les interrupteurs d'un même demi-pont ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période.

L'évolution de la puissance fournie par les énergies renouvelables a besoin de nouvelles techniques pour le transfert d'énergie du bus continu au réseau électrique. Des techniques ont été élaborées. Parmi ces dernières, on peut citer : la mise en parallèle de plusieurs interrupteurs dans une cellule de commutation, et la mise en parallèle des onduleurs.

#### **I.4. L'association en parallèle des semi-conducteurs**

La mise en parallèle de semi-conducteurs est utilisée depuis de nombreuses années afin de transférer le maximum de puissance [10]. La principale contrainte lors de l'association en parallèle des composants est de maintenir les semi-conducteurs dans leur aire de sécurité et donc de ne pas dépasser leur courant et tension maximales admissibles. Par conséquent, leur étude est très complexe. La Figure I-15 illustre un modèle de l'association en parallèle des composants.

La réalisation des circuits auxiliaires aidant l'ouverture et la fermeture simultanée des différents interrupteurs mis en parallèle est complexe. Le non-respect de cette consigne met en péril tout le processus de la conversion.

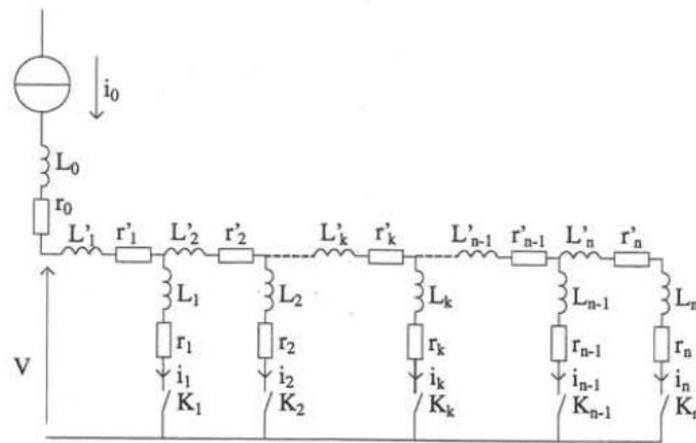


Figure I-15 : modèle utilisé pour l'étude de l'association de n semi-conducteurs en parallèle [10].

### I.5. La mise en parallèle des onduleurs

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 [11] [12] [13] [14] [15].

Le fonctionnement des onduleurs parallèles selon une configuration modulaire, donne beaucoup d'avantages, et on peut citer :

- Haute fiabilité.
- Puissance élevée.
- Haute performance.
- Continuité de service en cas de délestage d'un module.
- Utilisation de composants matures.
- Flexibilité et redondance.
- Possibilité d'augmenter la fréquence de commutation

La mise en parallèle des onduleurs triphasés présente des avantages intéressants tel que la simplicité, facilité de maintenance..., mais un déséquilibre des courants peut provoquer un courant de circulation entre modules qui nuira énormément au partage de la puissance fournit à la charge le long des onduleurs mis en parallèle [4].

## **I.6. Courant de circulation**

Le courant de circulation décrit la différence de courant partagé entre les onduleurs. Ceci mène à la déformation de courant et l'instabilité du système, ce qui peut endommager les onduleurs. Les courants de circulations peuvent se produire si la modulation des onduleurs n'est pas identique. Par conséquent, la référence de la modulante et les formes d'ondes devraient avoir la même amplitude, phase et fréquence pour éviter ce problème. Les paramètres physiques des convertisseurs et le retard entre les signaux de commutation supérieur et inférieur dans chaque bras de convertisseurs devrait également être identiques. Cependant, ce n'est pas possible dans la pratique. Pour cette raison, des méthodes de contrôle sont nécessaires pour limiter le courant de circulation [16] [17] [18] [19].

Afin d'éliminer ou minimiser ce courant de circulation, plusieurs techniques ont été élaborés. Parmi ceux, on peut citer :

- L'utilisation des transformateurs pour briser le chemin du courant de circulation
- L'utilisation de plusieurs sources tensions d'entrer pour éliminer le chemin du courant de circulation.
- L'utilisation des inductances entre les lignes, afin de créer des impédances d'ordre élevé. Mais cette technique fonctionne seulement dans le cas de grande fréquence.

Dans ces approches, le système devient volumineux et coûteux. Par conséquent, ces techniques ne sont pas les bonnes solutions à ce problème.

Notre travail consiste à effectuer une mise en parallèle directe de deux onduleurs, et d'aborder le problème des courants de circulation et de celui du partage de puissance entre les onduleurs afin de maintenir le bon fonctionnement.

## **I.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a introduit la mise en parallèle des onduleurs utilisée pour le transfert de forte puissance. Cette dernière engendre un chemin du courant de circulation qui diminue l'efficacité du système ainsi le rendement.

Une étude de ce courant de circulation ainsi une régulation sera détaillée dans le prochain chapitre.

---

## **CHAPITRE II**

# **COMMANDE DE LA MISE EN PARALLELE DES ONDULEURS PAR UNE MLI SINUSOIDALE**

---

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre on va étudier la commande MLI sinusoidale (SPWM) appliquée à la mise en parallèle de deux onduleurs connectés au réseau. Une modélisation du système sera présentée, et ce, pour analyser l'influence des paramètres de système sur le courant de circulation.

## II.2. Définition de la modulation SPWM

La modulation SPWM est réalisée par la comparaison d'une onde modulée basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [20].

Pour les systèmes triphasés, trois modulantes sinusoidales déphasées de  $2\pi/3$  de fréquence  $f$  sont comparées à un signal triangulaire. Les signaux ainsi générés commandent l'état des interrupteurs. La tension de sortie de l'onduleur est, en fait, une série de créneaux de tensions continues. Les tensions ainsi obtenues présentent un fondamental sinusoidale superposé à des harmoniques. Les avantages de la SPWM sont :

1. Variation de la fréquence de la tension de sortie.
2. Elimination de certaines harmoniques de tensions (SHPWM).

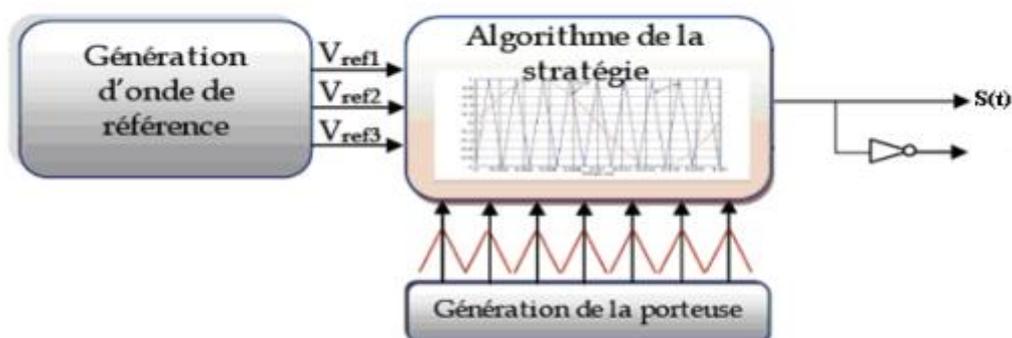


Figure II- 1 : Principe de la MLI Sinus-Triangle [20]

Le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant :

$U_r \geq U_p \rightarrow S(t)=1$  sinon  $S(t)=0$  Avec :  $S(t)$  = le signale MLI résultant.

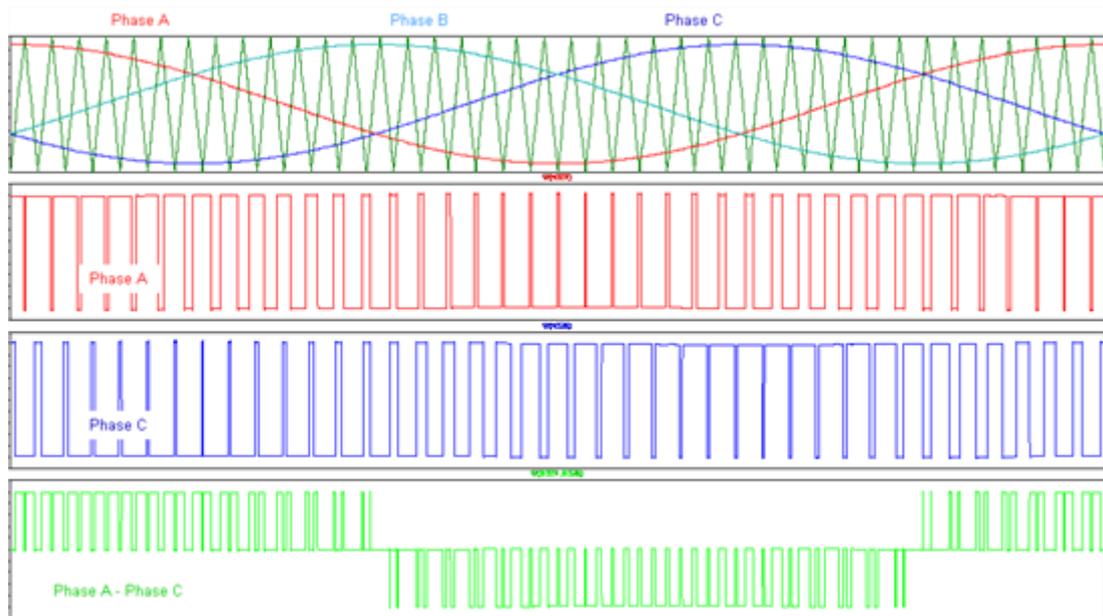


Figure II- 2 : La création des signaux des impulsions [20]

Si la référence est sinusoïdale, on utilise deux paramètres caractérisant la MLI :

♣ L'indice de modulation « m » qui est l'image du rapport de fréquence de la porteuse sur la fréquence de référence.

$$m = \frac{f_p}{f} = \frac{T_{ref}}{T} \quad (II.1)$$

♣ Le taux de modulation (le coefficient de réglage) « r » qui est l'image du rapport des amplitudes de tensions de la référence  $V_{mref}$  sur la tension de la porteuse  $V_{mp}$

$$r = \frac{V_{mref}}{V_{mp}} \quad (II.2)$$

Pour la commande des interrupteurs des deux onduleurs mis en parallèle, une SPWM est dédié pour chaque onduleur.

### II.3. Modélisation de la mise en parallèle des deux onduleurs

Notre système d'étude est illustré par la Figure II-3, tel que les onduleurs partagent la même source de tension continue  $V_{dc}$ , et les sorties de chaque onduleur sont connectées au réseau triphasé par l'intermédiaire d'impédances de lignes  $Z_i$  tel que  $\{i= 1,2\}$ .

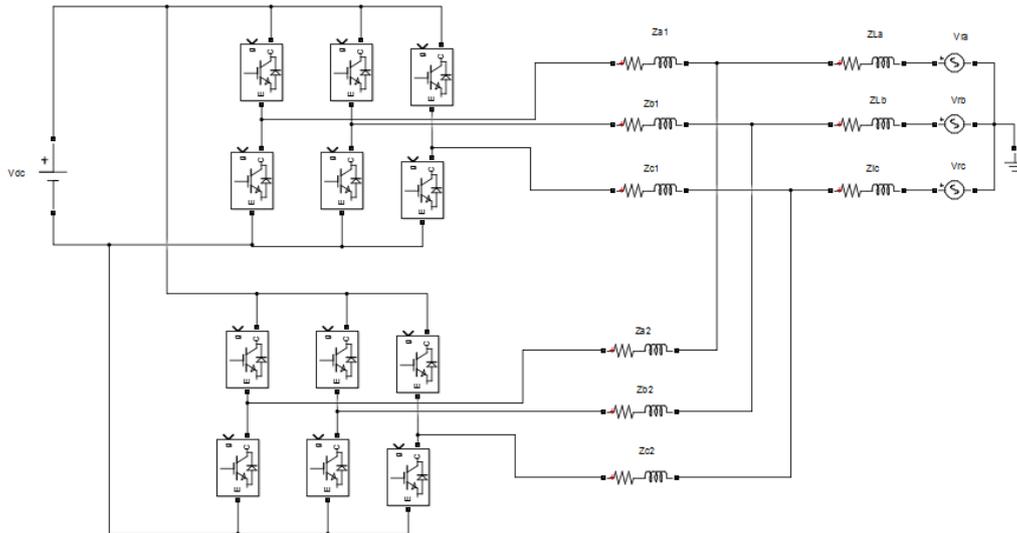


Figure II-3 : Schéma de la mise en parallèle de deux onduleurs connectés au réseau

### II.3.1. Hypothèses

Pour simplifier l'analyse et la modélisation de la mise en parallèle des onduleurs, un certain nombre d'hypothèses devra être pris en considération

- La fréquence délivrée par chaque un des deux onduleurs devra être parfaitement égale à la fréquence de réseau.
- La tension d'entrée du bus continu est constante.
- Les interrupteurs des onduleurs sont considérés comme parfaits.

### II.3.2. Équations électriques pour une mise en parallèle de deux onduleurs

En utilisant les lois de Kirchhoff à la Figure II-5, on obtient les équations suivantes [21], [22]:

$$\begin{cases} -V_{a1} + L_1 \frac{d}{dt} i_{a,1} + R_1 i_{a,1} + R(i_{a,1} + i_{a,2}) + L \frac{d}{dt} (i_{a,1} + i_{a,2}) + V_{a,r} + V_{no} = 0 \\ -V_{b1} + L_1 \frac{d}{dt} i_{b,1} + R i_{b,1} + R(i_{b,1} + i_{b,2}) + L \frac{d}{dt} (i_{b,1} + i_{b,2}) + V_{b,r} + V_{no} = 0 \\ -V_{c1} + L_1 \frac{d}{dt} i_{c,1} + R_1 i_{c,1} + R_L(i_{c,1} + i_{c,2}) + L_L \frac{d}{dt} (i_{c,1} + i_{c,2}) + V_{c,r} + V_{no} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

$$\begin{cases} -V_{a1} + L_1 \frac{d}{dt} i_{a1} + R_1 i_{a1} - L_2 \frac{d}{dt} i_{a2} - R_2 i_{a2} + V_{a2} = 0 \\ -V_{b1} + L_1 \frac{d}{dt} i_{b1} + R_1 i_{b1} - L_2 \frac{d}{dt} i_{b2} - R_2 i_{b2} + V_{b2} = 0 \\ -V_{c1} + L_1 \frac{d}{dt} i_{c1} + R_1 i_{c1} - L_2 \frac{d}{dt} i_{c2} - R_2 i_{c2} + V_{c2} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Ces équations peuvent être exprimées sous la notation vectorielle comme suit :

$$-\vec{V}_{abc,1} + L_1 \frac{d}{dt} \vec{i}_{abc,1} + R_1 \vec{i}_{abc,1} + R_L (\vec{i}_{abc,1} + \vec{i}_{abc,2}) + L_L \frac{d}{dt} (\vec{i}_{abc,1} + \vec{i}_{abc,2}) + \vec{V}_{abc,r} + \begin{bmatrix} V_{no} \\ V_{no} \\ V_{no} \end{bmatrix} = \vec{0} \quad (\text{II. 5})$$

$$-\vec{V}_{abc,1} + L_1 \frac{d}{dt} \vec{i}_{abc,1} + R_1 \vec{i}_{abc,1} - L_2 \frac{d}{dt} \vec{i}_{abc,2} - R_2 \vec{i}_{abc,2} + \vec{V}_{abc,2} = \vec{0} \quad (\text{II.6})$$

Tel que :  $\vec{i}_{abc,1} = [i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}]^T$  et  $\vec{V}_{abc,1} = [V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}]^T$

Dans le cas où un seul onduleur est connecté au réseau, aucun chemin possible ne sera disponible pour qu'un courant de circulation puisse prendre naissance. Par contre, si un certain nombre d'onduleurs est mis en parallèle, plusieurs chemins possibles sont envisageables pour qu'un courant de circulation puisse apparaître.

#### II.4. Courant de circulation

Lorsqu'on change les paramètres d'une des deux SPWM tout en gardant les autres paramètres du circuit fixes, un courant de circulation entre les modules onduleurs prend naissance. Cela est dû au fait que les intervalles de commutation des deux onduleurs sont différentes. Ça est dû à la différence du potentiel généré par les deux onduleurs. Ce courant provoque une surcharge sur l'un des deux onduleurs mis en parallèle. Cela engendre une baisse de la fiabilité du système et peut même provoquer l'arrêt complet du circuit. Un courant de circulation peut aussi être la cause d'une différence entre les impédances d'un même onduleur.

Les équations définissant le courant de circulation sont données dans le référentiel  $d-q$  défini par sa matrice de passage comme suit [21]:

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \cos(\omega t) & \frac{2}{3} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \frac{2}{3} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{2}{3} \sin(\omega t) & \frac{2}{3} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \frac{2}{3} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

En introduisant cette transformation dans l'équation (II.5) et l'équation (II.6) on obtient :

$$\begin{aligned}
 & -P(\theta)^{-1} \vec{V}_{qd0,1} + (L_1 + L_L) \frac{d}{dt} [P(\theta)^{-1} \vec{i}_{qd0,1}] + (R_1 + R_L) P(\theta)^{-1} \vec{i}_{qd0,1} + R_L P(\theta)^{-1} \vec{i}_{qd0,2} + \\
 & L_L \frac{d}{dt} [P(\theta)^{-1} \vec{i}_{qd0,2}] + P(\theta)^{-1} \vec{V}_{dq0,r} + P(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} V_{no} \\ V_{no} \end{bmatrix} = \vec{0}
 \end{aligned} \quad (II.8)$$

$$\begin{aligned}
 & -P(\theta)^{-1} \vec{V}_{qd0,1} + L_1 \frac{d}{dt} [P(\theta)^{-1} \vec{i}_{qd0,1}] + R_1 P(\theta)^{-1} \vec{i}_{qd0,1} - L_2 \frac{d}{dt} [P(\theta)^{-1} \vec{i}_{qd0,2}] - \\
 & R_2 P(\theta)^{-1} \vec{i}_{qd0,2} + P(\theta)^{-1} \vec{V}_{dq0,2} = \vec{0}
 \end{aligned} \quad (II.9)$$

Après simplification, L'équation II-7 peut être écrite sous une forme réduite dans le repère  $d-q$  telle que :

$$\begin{cases}
 -V_{q,1} + (L_L + L_1) \frac{d}{dt} i_{q,1} + (L_L + L_1) \omega i_{d,1} + R_L (i_{q,1} + i_{q,2}) + R_1 i_{q,1} + L_L \frac{d}{dt} i_{q,2} + L_L \omega i_{d,2} + V_{q,r} = 0 \\
 -V_{d,1} + (L_L + L_1) \frac{d}{dt} i_{d,1} - (L_L + L_1) \omega i_{q,1} + R_L (i_{d,1} + i_{d,2}) + R_1 i_{d,1} + L_L \frac{d}{dt} i_{d,2} - L_L \omega i_{q,2} + V_{d,r} = 0 \\
 -V_{0,1} + (L_L + L_1) \frac{d}{dt} i_{0,1} + R_L (i_{0,1} + i_{0,2}) + R_1 i_{0,1} - R_2 i_{0,2} + L_L \frac{d}{dt} i_{0,2} + V_{0,r} + V_{no} = 0
 \end{cases} \quad (II.10)$$

$$\begin{cases}
 -V_{q,1} + L_1 \frac{d}{dt} i_{q,1} + L_1 \omega i_{d,1} + R_1 i_{q,1} - L_2 \frac{d}{dt} i_{q,2} - L_2 \omega i_{d,2} - R_2 i_{q,2} + V_{q,2} = 0 \\
 -V_{d,1} + L_1 \frac{d}{dt} i_{d,1} + L_1 \omega i_{q,1} + R_1 i_{d,1} - L_2 \frac{d}{dt} i_{d,2} - L_2 \omega i_{q,2} - R_2 i_{d,2} + V_{d,2} = 0 \\
 -V_{0,1} + L_1 \frac{d}{dt} i_{0,1} + R_1 i_{0,1} - L_2 \frac{d}{dt} i_{0,2} - R_2 i_{0,2} + V_{0,2} = 0
 \end{cases} \quad (II.11)$$

Sachant que notre système est connecté en étoile au réseau et que :

$$(i_{a1} - i_{a2}) + (i_{b1} - i_{b2}) + (i_{c1} - i_{c2}) = 0 \quad (II.12)$$

$$i_{0,1} = (i_{a1} + i_{b1} + i_{c1}) \quad (II.13)$$

$$i_{0,2} = (i_{a2} + i_{b2} + i_{c2}) \quad (II.14)$$

À partir de ces équations {(II.12), (II.13), (II.14)}, le courant homopolaire du premier onduleur est égal à l'inverse de courant homopolaire du deuxième onduleur. Cela se traduit par [20]:

$$i_{0,1} = -i_{0,2} \quad (II.15)$$

$$I_{Cr} = \frac{(i_{a1} - i_{a2}) + (i_{b1} - i_{b2}) + (i_{c1} - i_{c2})}{2} = \frac{i_{0,1} - i_{0,2}}{2} \quad (II.16)$$

La substitution de l'équation (II.13) dans l'équation (II.9) donne :

$$-V_{0,1} + L_1 \frac{d}{dt} i_{0,1} + R_1 i_{0,1} + L_2 \frac{d}{dt} i_{0,1} + R_2 i_{0,1} + V_{0,2} = 0 \quad (\text{II.17})$$

La transformée de l'équation II.15 dans le domaine « s », nous donne :

$$\begin{cases} -V_{0,1} + sL_1 i_{0,1} + R_1 i_{0,1} + sL_2 i_{0,1} + R_2 i_{0,1} + V_{0,2} = 0 \\ -V_{0,1} + i_{0,1}((R_1 + R_2) + s(L_1 + L_2)) + V_{0,2} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

D'où, on tire la formule du courant homopolaire :

$$i_{0,1} = \frac{V_{0,1} - V_{0,2}}{(R_1 + R_2) + s(L_1 + L_2)} \quad (\text{II.19})$$

Par conséquent, la différence du potentiel de la séquence zéro alimentant une impédance formée par la mise en série de celles des deux onduleurs est à l'origine de ce courant de circulation.

La validation de cette étude fera l'objet d'une simulation d'un système composé de deux onduleurs mis en parallèle et connectés au réseau.

## II.5. Simulation de la mise en parallèle de deux onduleurs

Sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, une simulation de deux onduleurs identiques en parallèles connectés au réseau est entreprise.

### II.5.1. Cas où le courant de circulation est nul

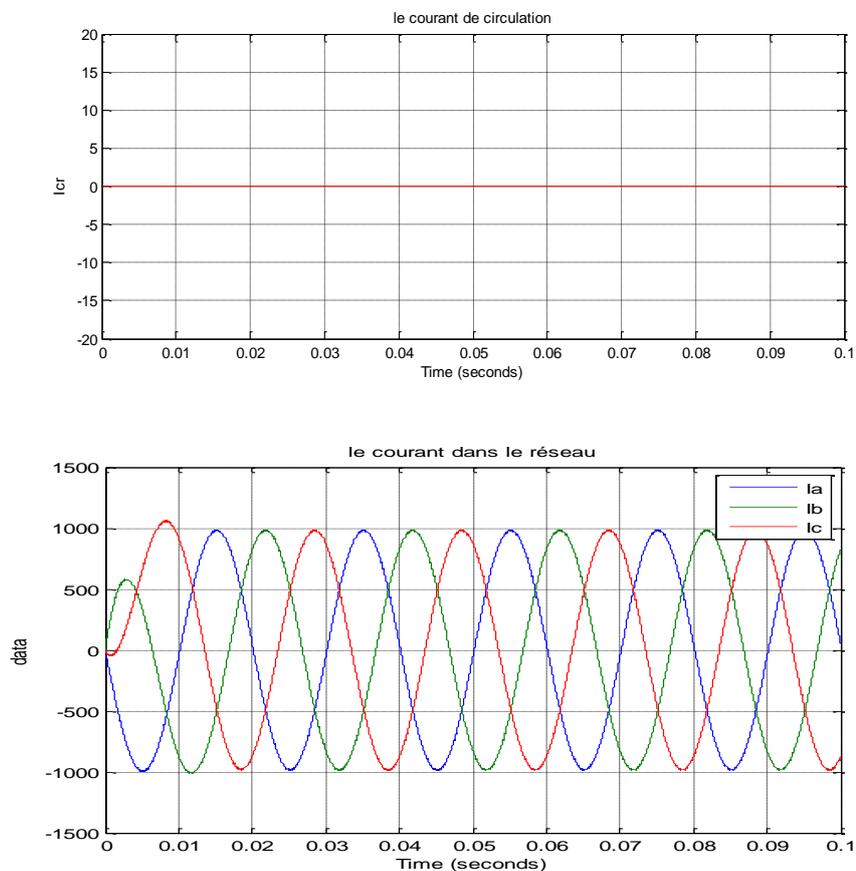
#### II.5.1.1. Cas des deux onduleurs identiques

Les valeurs des paramètres prises pour la simulation sont illustrées dans le tableau II-1

Tableau II-1 : Les paramètres de simulation

$V_{dc}$	400V
$R_1, R_2$	$0.1 \Omega$
$L_1, L_2$	0.00034H
$L_L$	0.00034H
$R_L$	$0.1 \Omega$
$F_{z1}, F_{z2}$	10 000 Hz
E	$220\sqrt{2}$

La Figure II-4 montre la variation des courants et des tensions générés par une structure composée de deux onduleurs identiques reliés au point commun de connexion par des impédances de lignes égales. L'application d'une même modulation aux deux onduleurs se traduit par un courant de circulation. Le courant de la charge est distribué d'une manière uniforme le long des deux onduleurs,



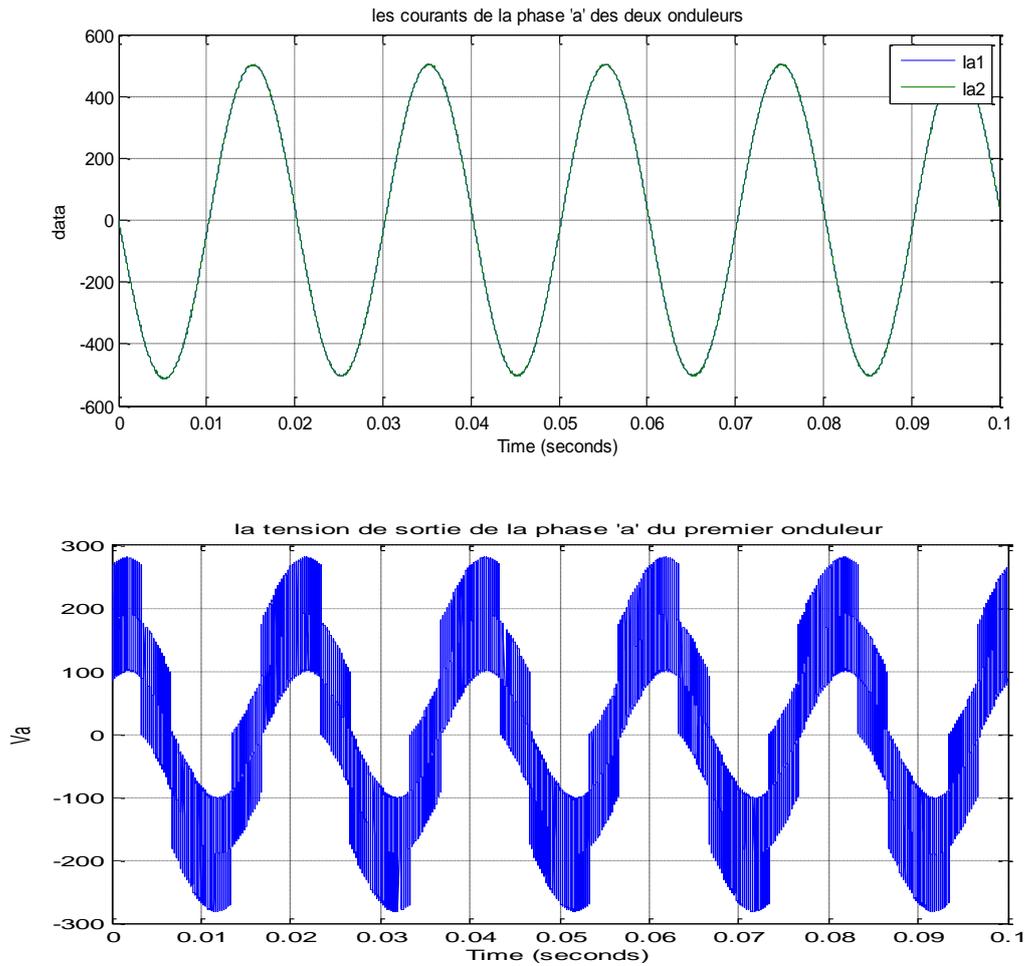


Figure II-4 : Simulation des courants et des tensions pour un système équilibré

### II.5.1.2. Cas où les impédances de ligne sont différentes

La Figure II-5 montre un courant de circulation nul pour le cas où l'impédance de ligne du premier onduleur est égale à deux fois celle du deuxième onduleur. Le courant de charge est distribué d'une manière non uniforme sur les deux onduleurs. Le rapport des courants des deux onduleurs est inversement proportionnel au rapport des impédances de ligne. Cela peut provoquer une surcharge sur l'un des deux onduleurs d'où une surchauffe et une diminution de l'efficacité.

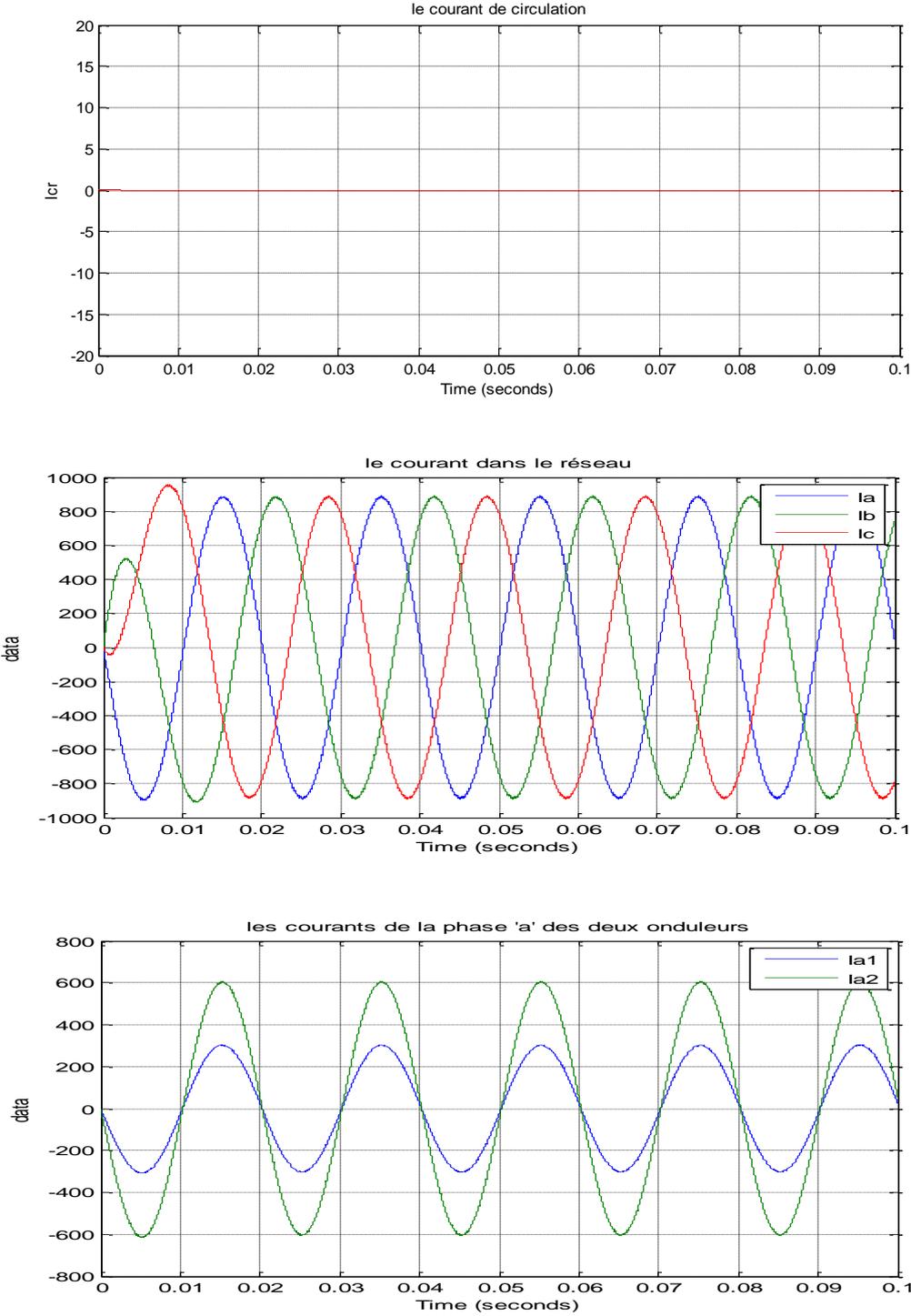


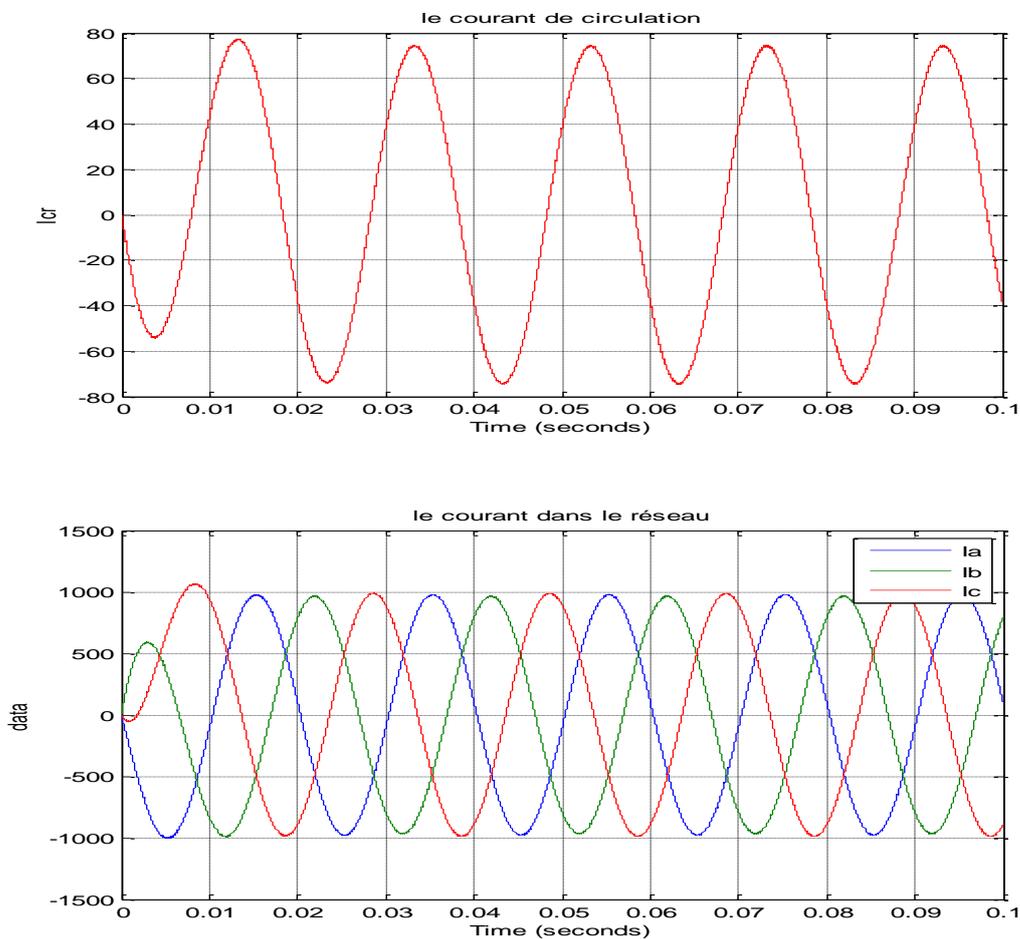
Figure II-5 : Simulation de la commande MLI avec  $\Delta Z \neq 0$

## II.5.2. Cas de la présence d'un courant de circulation

### II.5.2.1. Cas de l'impédance d'une phase différente de celles des autres phases

Sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, on prendra le cas où l'impédance de la phase 'a' du premier onduleur est différente de celle des autres phases. Pour une première étape l'inductance  $L_{1a}$  est prise égale à 0.0005H.

La Figure II-6 montre que le courant de circulation a une forme sinusoidale et une amplitude égale à 18% de la valeur courant du courant du deuxième onduleur. Le courant de la phase 'a' du premier onduleur est déphasé et non égal en amplitude à celui du deuxième onduleur. Le courant obtenu dans la charge est déséquilibré.



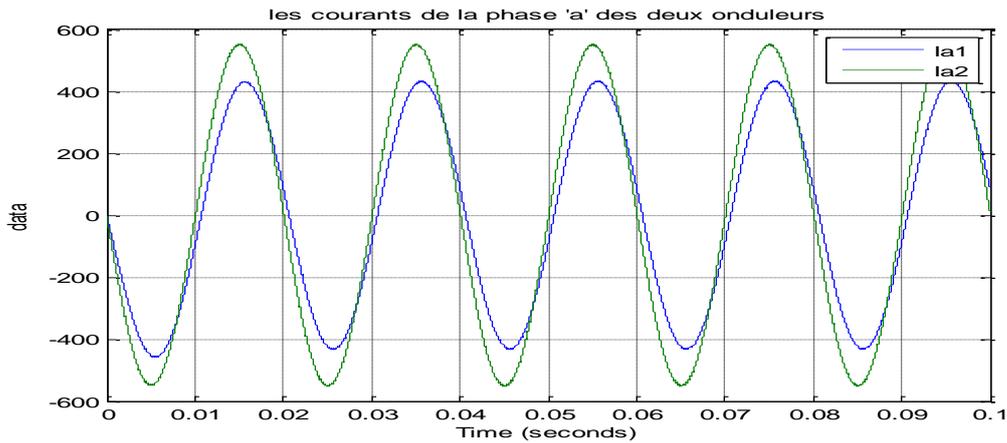
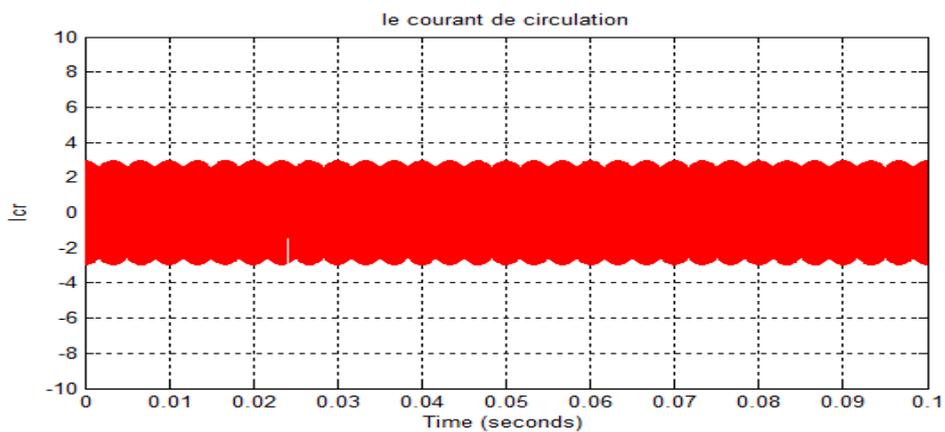


Figure II-6 : Simulation des courants et des tensions lors d'une perturbation de système

### II.5.2.2. Cas où le taux de modulation est différent

Dans cette section, on procèdera à l'application d'une modulation SPWM ayant respectivement des taux de modulation de 0.8 et de 0.6 pour le premier et le deuxième onduleur.

La Figure II-7 montre un courant de circulation d'amplitude égal à 2.5% du courant de charge. La différence des taux de modulation génère à la sortie des onduleurs des tensions triphasées équilibrées d'amplitudes et de phases différentes. Cette différence de potentiel provoque un chemin de circulation du courant homopolaire.



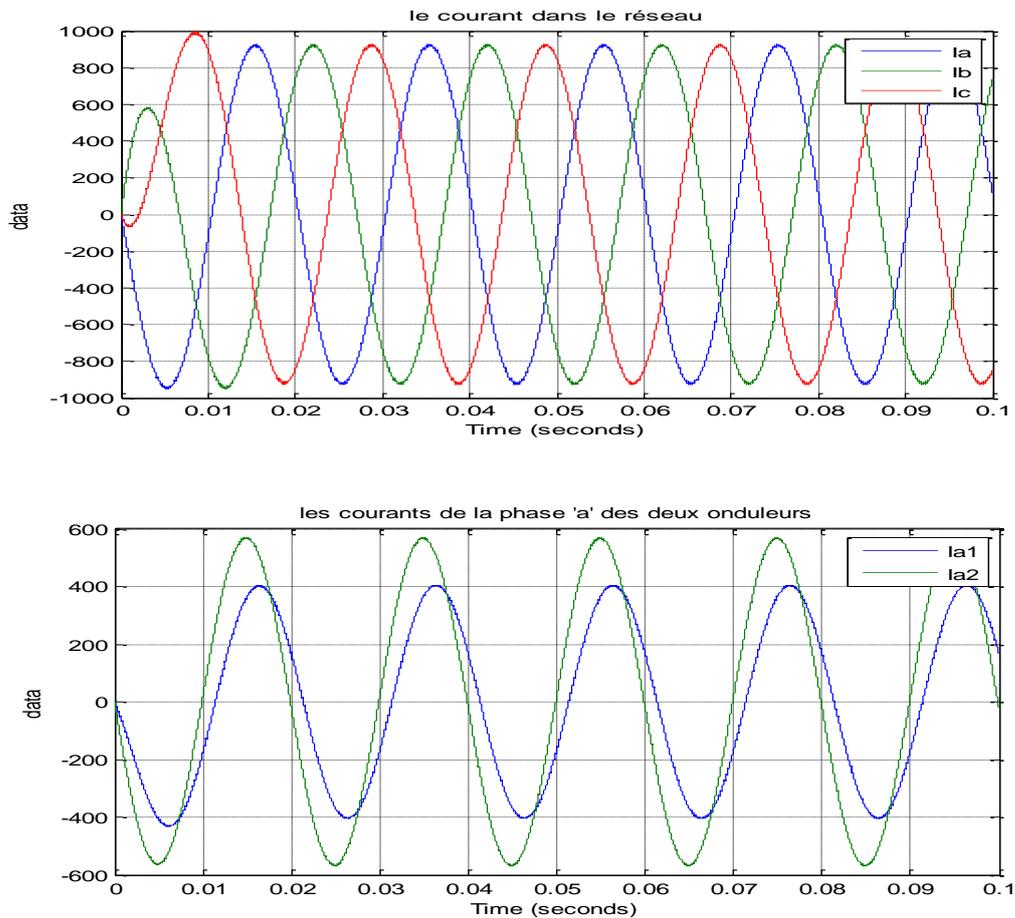


Figure II-7 : Simulation d'une commande MLI avec  $\Delta r \neq 0$

### II.5.2.3. Cas où $\Delta\varphi \neq 0$

Dans cet essai on va traiter le cas d'un déphasage de  $\pi/6$  entre les modulantes de la première et la deuxième SPWM appliquée respectivement au premier et au deuxième onduleur.

Les résultats de la simulation (La Figure II-8) sont quasi-similaires de ceux du cas où le taux de modulation des deux modulantes est différent. La même variation du courant de circulation avec une forme différente.

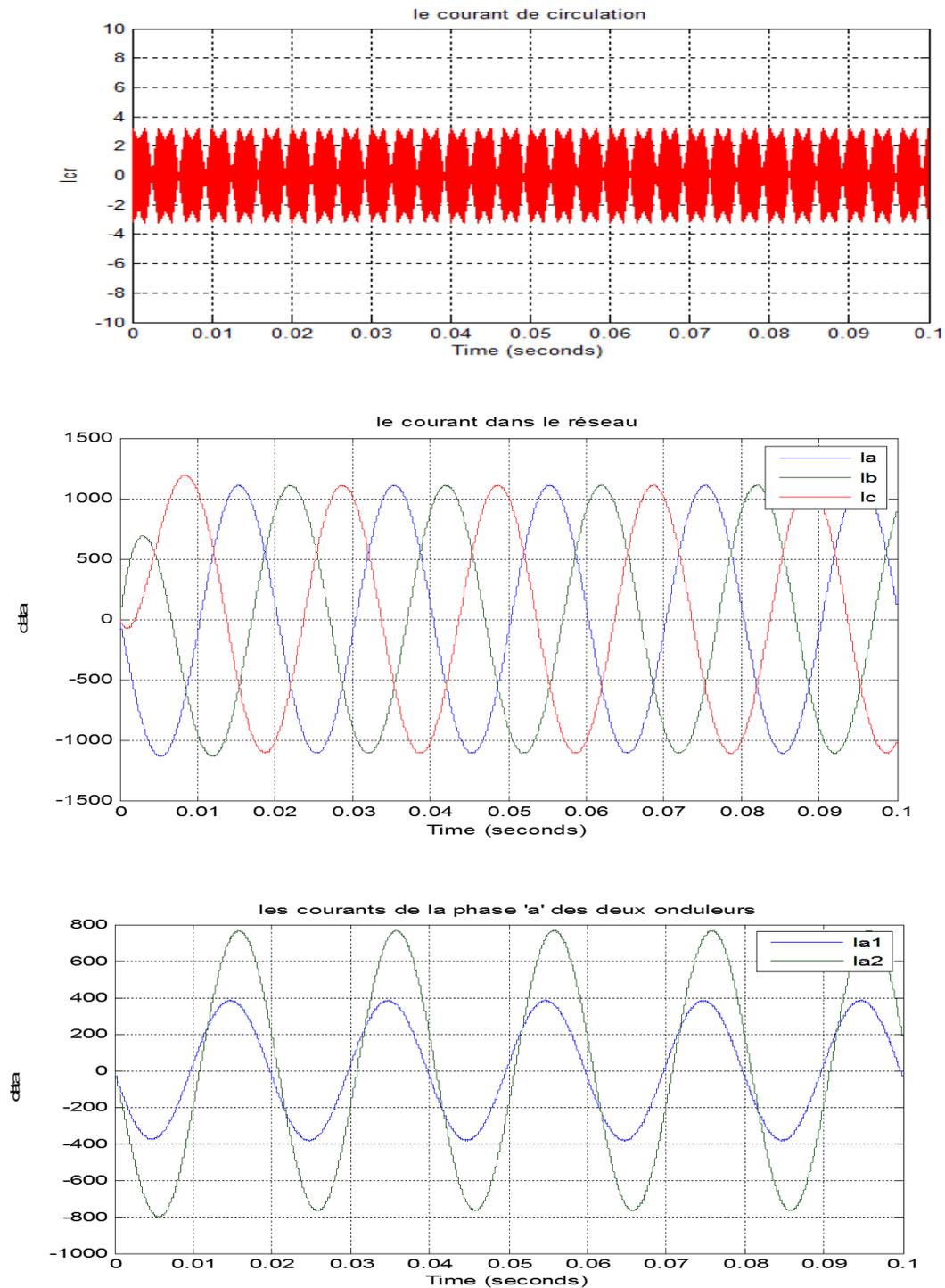


Figure II-8 : Simulation de la commande MLI avec  $\Delta\phi \neq 0$

## II.6. Optimisation du courant de circulation

Pour le cas étudié dans le paragraphe (II.5.2.1), un courant de circulation de l'ordre de 18% par rapport au courant du deuxième onduleur est obtenu. La question que l'on pourrait se poser est la suivante : Est-il possible de trouver de nouveaux paramètres de la SPWM qui permettent de minimiser au maximum le courant de circulation. Un choix précis des valeurs

de l'indice de modulation et du déphasage donne les résultats de la Figure II-9, l'algorithme permettant de trouver ces valeurs est le suivant [22] :

$$R_{t1} = R_1 + 2 * R_L \quad (II.20)$$

$$R_{t2} = R_2 + 2 * R_L \quad (II.21)$$

$$X_{t1} = (L_1 + 2 * L_L) * \omega \quad (II.22)$$

$$X_{t2} = (L_2 + 2 * L_L) * \omega \quad (II.23)$$

$$Z_{t1} = \sqrt{(R_{t1}^2 + X_{t1}^2)} \quad (II.24)$$

$$Z_{t2} = \sqrt{(R_{t2}^2 + X_{t2}^2)} \quad (II.25)$$

$$\text{Teta1} = \arctan(X_{t1}/R_{t1}) \quad (II.26)$$

$$\text{Teta2} = \arctan(X_{t2}/R_{t2}) \quad (II.27)$$

Calcul du module du courant équilibré :

$$\gamma = \sqrt{(r^2 * E^2 + V_{dc}^2 - 2 * V_{dc} * r * E * \cos(\varphi))} / Z_{t1} \quad (II.28)$$

Détermination d'epsilon1 :

$$\text{Epsilon1} = \cos^{-1} ((V_{dc}^2 + Z_{t1}^2 * \gamma^2 - r^2 * E^2) / (2 * V_{dc} * Z_{t1} * \gamma)) \quad (II.29)$$

Détermination d'epsilon2 :

$$\text{Epsilon2} = \text{Epsilon1} - \text{Teta2} + \text{Teta1} \quad (II.30)$$

$$r' = (\sqrt{(V_{dc}^2 + Z_{t2}^2 * \gamma^2 - 2 * V_{dc} * Z_{t2} * \gamma * \cos(\text{Epsilon2}))}) / E \quad (II.31)$$

$$\varphi' = -\cos^{-1} ((V_{dc}^2 + r'^2 * E^2 - Z_{t2}^2 * \gamma^2) / (2 * V_{dc} * r' * E)) \quad (II.32)$$

On injecte ces nouvelles valeurs dans les paramètres de la modulante, les résultats de simulation sont représentés dans la Figure II-11.

La Figure II-11 montre que le courant de circulation a diminué jusqu'à la valeur 2.7 A « 0.02% de courant du deuxième onduleur ». Ce choix des paramètres permet de minimiser le courant de circulation d'une manière considérable, et les deux courants  $I_{a1}$  et  $I_{a2}$  se superposent en régime permanent.

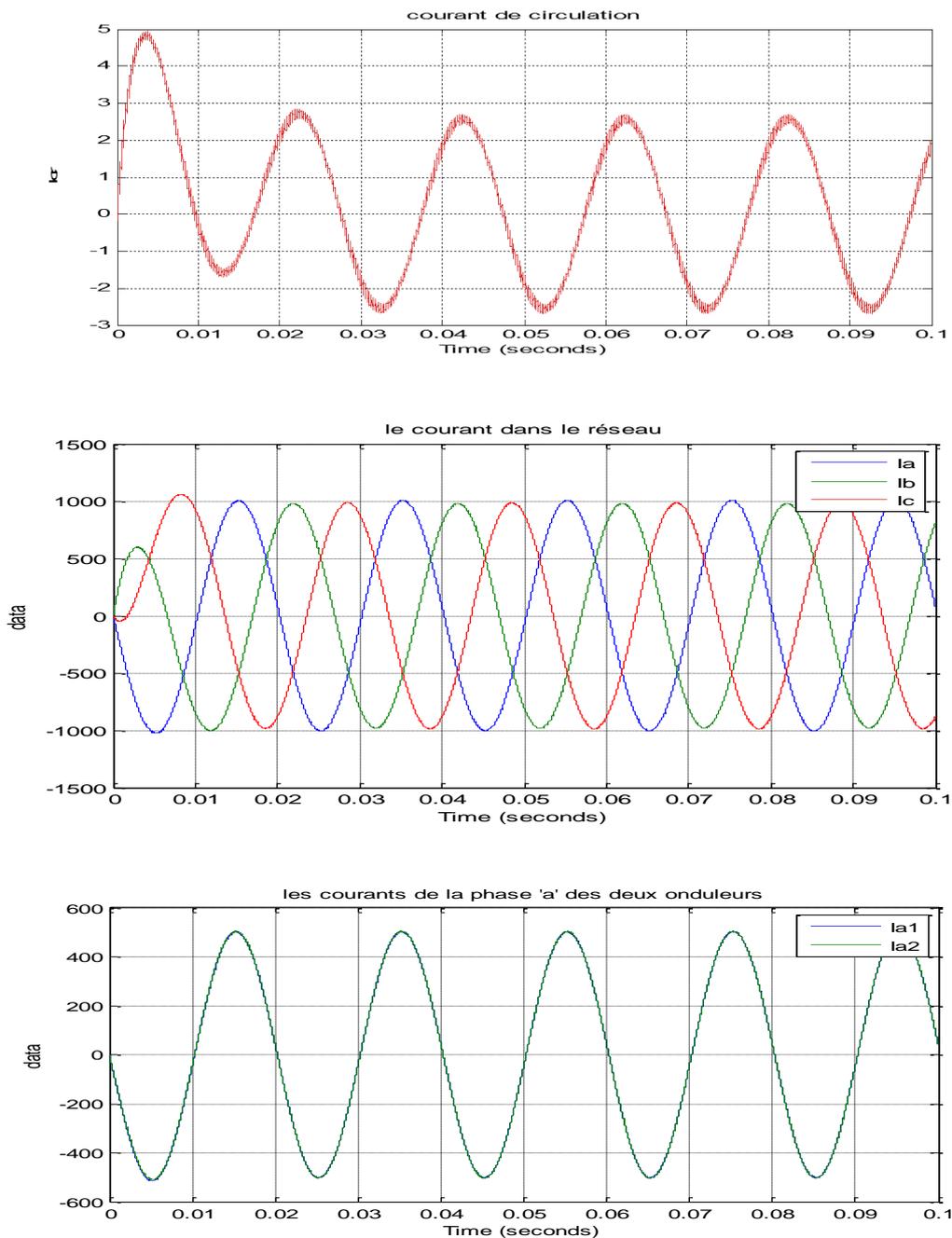


Figure II-9 : Minimisation du courant de circulation

## II.7. Simulation de la commande active

On va examiner la commande active de la SPWM sur deux onduleurs mis en parallèle et connectés au réseau [23].

### II.7.1. Cas où $I_{d1}=I_{d2}$ et $I_{q1}=I_{q2}$

On remarque sur la Figure II-14 pour un choix identique des courants directs et indirects, que les courants générés par les deux onduleurs se superposent et que les courants  $I_d$

et  $I_q$  suivent la référence (Figure II-12). Le courant dans la charge est équilibré et est égale à 1000 A. Par conséquent, le système ne possède pas de courant de circulation. Cela peut être expliqué par la symétrie du système, car les deux onduleurs fournissent des tensions égales.

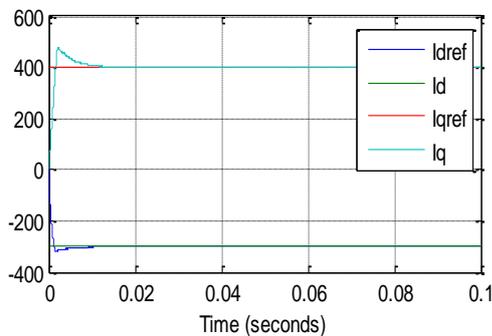


Figure II-12 : Les courants  $I_{d1}$  et  $I_{q1}$

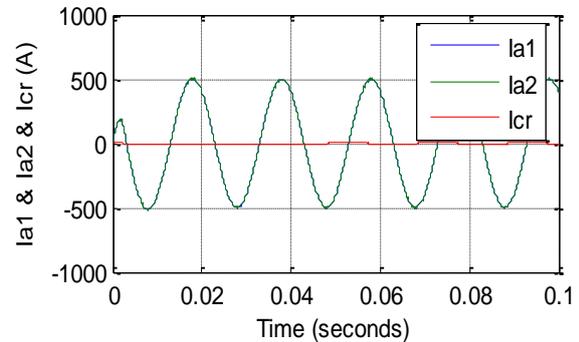


Figure II-13: Les courants  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  et  $I_{cr}$

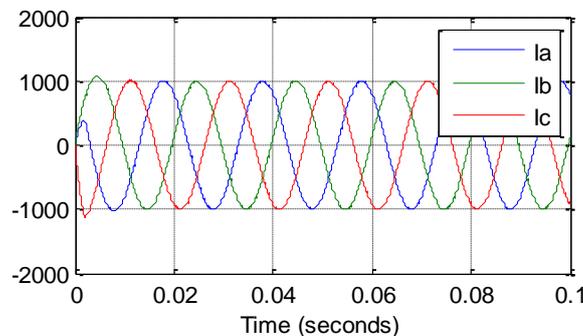


Figure IV-14 : Le courant de charge

### II.7.2. Cas où $I_{d2}=1/2 I_{d1}$ et $I_{q2}=1/2 I_{q1}$

Les figures (II-15, II-16) illustrent le cas où les consignes du premier onduleur est égale au double de celui du deuxième. Les courants  $I_d$ ,  $I_q$  suivent les références, les courants de ligne fournis par les deux onduleurs possèdent des amplitudes différentes telles que  $I_2 = 1/2 I_1$  (Figure II-17) ; le courant de charge a diminué par rapport au cas décrit dans le paragraphe (II.7.1). Le courant de circulation s'annule après une durée de 15ms.

On peut expliquer ces résultats par le fait que les consignes ont changé, donc le système devient asymétrique. La différence des courants générés par chacun des deux onduleurs provoque un chemin de circulation de courant, sa valeur est de 6A (Figure II-18); le courant de charge a diminué par rapport à l'essai précédent à cause de la diminution de la consigne.

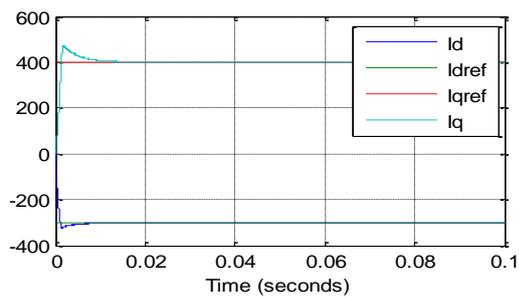


Figure II-15 : Les courants  $I_{d1}$  et  $I_{q1}$

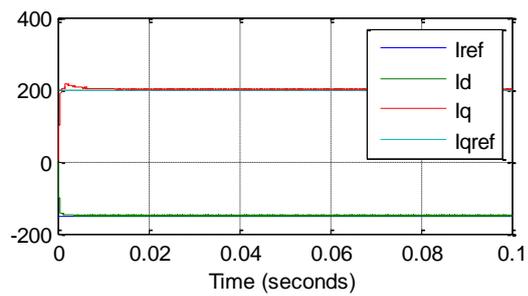


Figure II-16 : Les courants  $I_{d2}$  et  $I_{q2}$

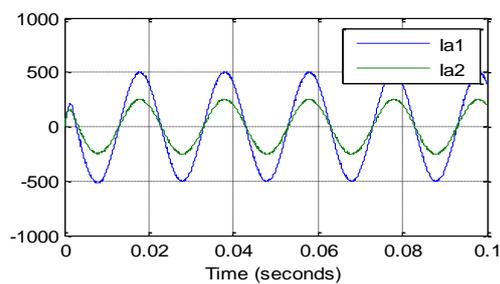


Figure II-17 : Les courants  $I_{a1}$  et  $I_{a2}$

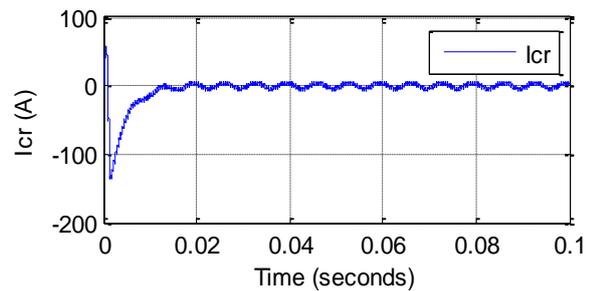


Figure II-18 : Le courant de circulation

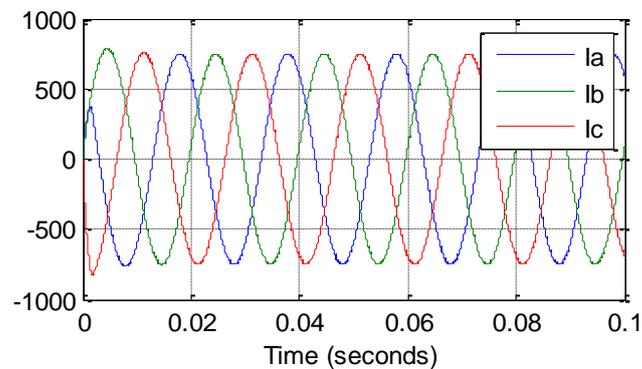


Figure II-19 : Le courant de charge

## II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude du courant de circulation ainsi que la distribution du courant de charge le long des 2 onduleurs est entreprise. Un fonctionnement correct de la structure passe par un partage équitable du courant de la charge. L'analyse des courants de circulation de la mise en parallèle de deux onduleurs connectés au réseau passe obligatoirement par une modélisation du système.

Une simulation du courant de circulation a été faite pour un choix différent des paramètres de la modulation ( $\Delta r \neq 0, \Delta \varphi \neq 0, \Delta Z \neq 0$ ) et pour une charge déséquilibrée.

Une minimisation du courant de circulation est nécessaire et par un choix judicieux des paramètres de la modulation en boucle ouverte. Une réduction de plus de 90% du courant de circulation est obtenue.

À partir des résultats de simulation on peut conclure que la commande active sert à imposer le partage de puissance entre modules onduleurs, et cela provoque un courant de circulation.

---

## CONCLUSION GENERALE

---

La demande croissante d'énergie électrique dans le monde rend les énergies fossiles insuffisantes pour la production de cette dernière. Différentes solutions de substitution ont été envisagées.

Les sources d'énergie renouvelable nécessitent plusieurs conversions avant qu'elles soient transmises aux consommateurs. Dans les applications de fortes puissances, nous devrions utiliser des structures permettant d'obtenir un fort courant de sortie. La mise en parallèle des onduleurs est souvent utilisée, car elle permet de transférer plus de courant que dans le cas d'un seul onduleur. Elle concerne la conception de modules de forte puissance intégrés plus fiables, en garantissant une meilleure répartition des contraintes électriques. Le bon fonctionnement du système impose un partage équitable de la puissance le long des onduleurs mis qu'une optimisation du courant de circulation. Après un rappel de la modélisation de la mise en parallèle connectée à un réseau, nous avons alors développé l'analyse de cette structure par la modulation SPWM.

La modulation SPWM a été appliquée pour un système de deux onduleurs mis en parallèles connectés au réseau. Le choix des paramètres de la modulante ainsi que les paramètres du circuit ont un effet direct sur le mode de fonctionnement de la structure et la variation du courant de circulation. Dans le cas d'une charge déséquilibrée, un algorithme pour le calcul des nouveaux paramètres de la modulante, et ce pour minimiser le courant, nécessite d'être établi.

L'introduction d'une commande active pour la modulation SPWM, a montré que le choix des courants de référence a imposé la puissance transmise par chaque onduleur. Un partage asymétrique de la puissance risque de compromettre le fonctionnement de la structure. Par ailleurs.

Plusieurs points concernant la mise en parallèle des onduleurs peuvent faire l'objet d'un futur travail. On peut citer :

- L'étude de la structure avec l'insertion d'une PLL (phase locked loop).
- La régulation du courant de charge et des courants de circulation dans le cas de l'insertion d'une charge déséquilibrée.
- Validation expérimentale de la régulation mise en œuvre.

---

# BIBLIOGRAPHIE

---

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Observer, l'observatoire des Energies renouvelables, " La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde ", Quinzième inventaire, Edition 2013.
- [2] Observer, l'observatoire des Energies renouvelables, " La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde ", Neuvième inventaire, Edition 2007.
- [3] <http://www.lemonde.com/energies>, 15 May 2016.
- [4] C. Gombert, "Simulation temps réel des dispositifs d'Electronique de Puissance dédiés aux réseaux d'énergie électrique", Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, 2005.
- [5] G. Pinson, "Onduleurs ", Cours de physique appliquée, Académie d'Aix-Marseille, 2008
- [6] S. Rehala, N. Chahmi, "Etude et Réalisation d'un Onduleur MLI Triphasé pour Banc d'Essai Avion ", Projet de fin d'études, EMP, 2004.
- [7] R. Grezaud, "Commande de composants grand gap dans un convertisseur de puissance synchrone sans diode ", Université de Grenoble, 2014.
- [8] F. Berrezzek, " Etude des différentes techniques de commande des onduleurs à MLI associés à une machine asynchrone ", thèse de Magistère, Université BADJI MOKHTAR ANNABA, 2006.
- [9] D. Sasi, J. Kuruvilla, " Modelling and Simulation of SVPWM Inverter fed Permanent Magnet Brushless DC Motor Drive ", International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 2, pp. 1947-1952, May 2013.
- [10] P. O. Jeannin, " Le transistor MOSFET en commutation : Application aux associations série et parallèle de composants à grille isolée", Sciences de l'ingénieur, Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, 2001.
- [11] Z. Ye, D. Boroyevich, J. Y. Choi, F. Lee, "Control of circulating current in two parallel three-phase boost rectifiers ", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 17, No. 5, September 2002.
- [12] B. M. Jassim, B. Zahawi, D. Atkinson, "Control of parallel connected three-phase PWM converter without inter-module reactors", Journal of Power Electronics, Vol. 15, No. 1, pp. 116-122, January 2015.
- [13] C. Lim, K. Lee, R. Kim, D. Hyun, "Analysis and modeling of parallel three-phase boost converters using three-phase coupled inductor ", J Electr Eng Technol, Vol. 8, No. 5, pp. 1086-1095, 2013.
- [14] C. A. Sanz, J. Gonzalez, J. Vazquez, " Circulating current produced in a system of two inverters connected in parallel due to a difference between the zero-vector parameters ", International Journal of Renewable Energy and Biofuel, Vol. 2013, 2013.

- [15] X. Fu, J. Li, H. Xu, “Modeling and simulation of parallel-operation grid-connected inverter”, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 5, No 4, pp. 978-984, August 2008.
- [16] Y. Zhang, Z. Jiang, “Sliding mode based zero-sequence current mitigation of parallel-connected power converter”, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 17, No. 5, pp. 1658-1663, September 2009.
- [17] C. Sanz, J. Gonzalez, J. Vazquez, “Circulating current produced in a system of two inverters connected in parallel”, International Journal of Electrical, Electronics and Computer Systems, Vol.15, No. 2, August 2013.
- [18] J. Kimball, J. T. Mossoba, P. Krein, “Control technique for series input-parallel output converter topologies”, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 16, pp. 1441-1445, March 2005.
- [19] M. Purhonen, “Minimizing circulating current in parallel-connected photovoltaic inverters”, Thèse Doctorat University of Technologie, Finland, December 2014.
- [20] N. Seki, H. Uchino, “Which is better at a high power reactive power compensation system, high PWM frequency or multiple connection”, IEEE Industry Applications Society Annual Conference, pp. 946-953, 1994.
- [21] C. Burlacu, E. Masada, “Bilinear approach for the parallel connected multiconverter and the respective control”, International Power Electronics & Motion Control Conference, Budapest, Hungary, Vol.1, pp. 201-209, Sept. 1996.
- [22] T. Zebbadji, “Etude et modélisation de la mise en parallèle des onduleurs modulaires connectés au réseau”, Thèse de doctorat Tahar, Ecole Nationale Polytechnique, Septembre 2015.
- [23] N. Kawakami, “Quick Response and Low-Distortion Current Control For Multiple Inverter-Fed Induction Motor Drives,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 9, no. 2, pp. 240-247, March 1994.