

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE



Ecole Nationale Polytechnique

Département D'Automatique



THÈSE

Pour l'obtention du

DIPLÔME DE MASTER EN

AUTOMATIQUE

*Etude et Commande d'un
Convertisseur Z-source : Application
à l'Entrainement Electrique*

Proposée par: Pr.Em.Berkouk

Etudiée par:

BOUSHABA Abdelouahab

Promotion Juin 2014

ملخص

Z-source Converter هو نوع جديد من محولات الطاقة، يحتوي على شبكة مكثفات و شائع تربط بين مصدر الطاقة و دائرة التحويل، و هذا يسمح باستخدام حالة Shoot-Through التي تعطي المحول خاصية رفع الفولطية لدرجة عالية. الهدف من هذا المشروع هو دراسة محول DC-AC ذو Z-source و استخدامه لتزويد محرك لا التزامني بالطاقة اللازمة. تم في هذه المذكرة دراسة طريقة simple boost للتحكم في المحول و استعمالها مع متحكم PID للتحكم في فولطية الربط. تم كذلك القيام بمقارنة بين المحول العادي و المحول ذو Z-source من حيث استعمالهما كتغذية للمحرك اللاتزامني.

كلمات مفتاحية :

محول مستمر-متناوب, محرك لاتزامني, متحكم PID , Z-source , simple boost.

Abstract

Z-Source Converter is novel power converter topology based on relating the switching circuit to the power source using an impedance network that makes the use of “Shoot-Through” state possible which results in a high boosting performance and eliminate the risk of damaging the switches. The aim of this project is to study the Z-source inverter and use it to provide the induction motor with the needed power. The simple boost method is discussed and used to control the ZSI, with a PID controller to control the dc-link voltage. A comparative study between the performance of the VSI and ZSI as motor power supply has been presented.

Key words: Z-Source, Shoot-Through, induction motor, dc-link voltage, PID, modified PWM, boosting methods, voltage mode control.

Résumé

Le convertisseur à Z-source est une nouvelle topologie de convertisseur de puissance où la source d'énergie est relié à tout type d'étage de commutation à travers un réseau d'impédances ce qui rend l'utilisation de l'état Shoot-Through possible, ce qui donne une aptitude élevée de survoltage et élimine le risque de court-circuit de la source. Le but de ce projet est d'étudier l'onduleur à Z-source et l'utiliser pour l'alimentation d'une machine asynchrone. La méthode simple boost a été discutée et utilisée pour commander le ZSI, avec un régulateur PID pour réguler la tension du bus continu virtuelle. Une étude comparative entre les performances du VSI et ZSI comme alimentation d'une machine asynchrone a été élaborée.

Mots-clés : Z-source, Shoot-Through, Machine asynchrone, bus continu, PID, MLI modifiée, méthode de survoltage, commande en tension.

Remerciements

Louange à ALLAH, Seigneur de l'univers, le tout miséricordieux, le très miséricordieux, pour nous avoir accordé le savoir, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, durant toutes nos années d'études.

Nous profitons à remercier du cœur nos professeurs qui nous ont transmis le tison de la connaissance.

*Nous tenons à exprimer aussi nos vives gratitudees à notre promoteur **Pr EM.BERKOUK** pour avoir proposé ce sujet, ses précieux conseils et son aide tout au long de notre travail.*

Nous remercions très chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner notre travail.

Enfin, tous nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail.

*To my dear parents, brothers and all the BOUSHABA-BOUZENADA
family,*

Abdelouahab

Table des matières

Introduction Générale	3
1 L'onduleur à Z-source	5
1.1 Introduction	5
1.2 Convertisseur DC-AC (Onduleur) conventionnel	5
1.2.1 Modélisation du filtre LC à la sortie du ZSI	7
1.3 L'état Shoot-Through	8
1.4 Commande MLI classique et MLI modifiée	9
1.4.1 MLI classique	9
1.4.2 MLI modifiée	10
1.5 Méthode de survoltage	11
1.5.1 Simple boost	11
1.5.2 simulation de la commande simple boost	12
1.5.3 Simulation en boucle fermée	15
1.5.4 Conclusion de la simulation	18
1.6 Analyse de la tension fournie par le ZSI	18
1.6.1 Qualité du signal de sortie	18
1.6.2 Analyse spectrale	19
1.7 Conclusion	23
2 Alimentation de la MAS par ZSI	24
2.1 Généralités sur Machine Asynchrone	24
2.1.1 Principe de fonctionnement	25
2.1.2 Branchement de la machine asynchrone	25
2.2 Résultats de simulations	27
2.3 Conclusion	31
Conclusion	32
Bibliographie	33

Table des figures

1.1	transformation continue/alternative	5
1.2	onduleur à deux niveaux (IGBT)	6
1.3	Schéma monophasé équivalent du filtre LC	8
1.4	Structure générale d'un ZSI	9
1.5	commande MLI conventionnelle	9
1.6	MLI conventionnelle	11
1.7	MLI modifiée	11
1.8	La commande simple boost [7]	12
1.9	Signaux de commande (SB)	13
1.10	Les signaux de commande (interrupteurs inférieures)	13
1.11	La tension V_{dc} de bus continu virtuel	14
1.12	La tension V_{dc} de bus continu virtuel ► zoom	14
1.13	Les tensions simples non filtrées	14
1.14	Les tensions simples filtrées	14
1.15	Les courants non filtrés	15
1.16	Les courants filtrés	15
1.17	Les signaux de commande (SB)	16
1.18	les signaux de commandes des interrupteurs inférieures	16
1.19	La tension V_{dc} et V_{dcn} de bus continu virtuel	16
1.20	La tension aux niveau du condensateur	16
1.21	Les tensions simples non filtrées	17
1.22	Les tensions simples filtrées	17
1.23	Les courants non filtrés	17
1.24	Les courants filtrés	17
1.25	Le courant I_L et $I_{L-filtre}$ au niveau de l'inductance L	18
1.26	Le courant I_L et $I_{L-filtre}$ au niveau de l'inductance L ► zoom	18
1.27	Spectre de la tension simple avant filtarge	20
1.28	Spectre de la tension simple après filtarge	21
1.29	Spectre du courant avant filtarge	22
1.30	Spectre du courant après filtarge	22
2.1	Plaque à bornes d'une MAS triphasée	26

2.2	Couplage en étoile	26
2.3	Couplage en triangle	27
2.4	Tension d'alimentation U_a	28
2.5	Tension d'alimentation filtrée U_a	28
2.6	Courants de ligne $I_{a,b,c}$	28
2.7	le Couple électromagnétique	28
2.8	Vitesse de rotation du rotor (rad/s)	29
2.9	Tension d'alimentation U_a	30
2.10	Tension d'alimentation filtrée U_a	30
2.11	Courants de ligne $I_{a,b,c}$	30
2.12	le Couple électromagnétique	30
2.13	Vitesse de rotation du rotor (rad/s)	30
2.14	Tension du bus continu	30
2.15	Couple Electromagnétique (ZSI)	31
2.16	Couple électromagnétique (VSI)	31

Liste des tableaux

1.1	données de simulation en boucle ouverte	13
1.2	caractéristiques du filtre	13
1.3	Paramètres de simulation en boucle fermée	15
2.1	Caractéristiques de la MAS	27

Abréviations et symboles

PV	Photovoltaïque	
SCP	Système de conditionnement de puissance	
ZS	Z-source	
ZSC	Hacheur à Z-source	
ZSI	Onduleur à Z-source	
PID	Régulateur Proportionnel, Intégral et Dérivé	
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion	
ESR	Résistance Equivalente en Série	
D	Rapport cyclique de Shoot-Through	
v_{dc}	Tension de bus continu	V
V_{dcn}	Tension maximale du bus continu	V
S_1	Interrupteur S_1	
S_2	Interrupteur S_2	
T_0	Durée de Shoot-Through	s
T	Période de Commutation	s
B	Facteur de survoltage	
MCC	Mode de conduction continu	
V_{ac}	Amplitude de la tension simple alternative	V
M	Taux de modulation	
v_{ref}	Tension de référence	V
S_i	l'interrupteur i ème d'un onduleur triphasé à deux niveaux	
U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}	Tensions composées de sortie de l'onduleur	V
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	Tensions simples à la sortie de l'onduleur	V
i_a, i_b, i_c	Courants fondamentaux à la sortie de l'onduleur	A

I_m	Amplitude de courant	A
ω	Fréquence angulaire	rad/s
ϕ	Déphasage entre le courant et la tension de phase	$degré$
H_s	Fonction de Transfert du filtre	
L_f	Inductance du filtre	H
r_f	Résistance de fuite de l'inductance L_f	Ω
C_f	Capacité du filtre	C
ξ	Coefficient d'amortissement du filtre	
ω_n	Pulsation propre du filtre	rad/s
m	Indice de modulation	
f_p	Fréquence de la porteuse	Hz
f	Fréquence de la tension de référence	Hz
V_{ref}	Amplitude de la tension de référence	V
V_p	Amplitude de la porteuse	V
n	Nombre de Niveaux	
VSI	Onduleur à source de tension	
CSI	Onduleur à source de courant	
G	Gain de survoltage	
SB	Simple Boost	
T_0	Durée du Shoot-Through	s
$f_{coupure}$	Fréquence de Coupure	Hz
THD	Taux de Distorsion d'Harmonique	
f_c	fréquence de commutation	Hz

Introduction

A nos jours, la demande d'énergie est en augmentation accentuée et continuelle. Les ressources traditionnelles (Les énergies fossiles et le nucléaire) sont limitées et la pollution causée par leur usage a créé une grande polémique et ouvert un débat global sur les meilleures voies du développement durable et l'avenir des générations futures.

Les regards sont tournés aujourd'hui vers des sources alternatives d'énergie, comme le soleil, le vent, la biomasse, et la mer...etc. Après une grande hésitation dans les décennies précédentes, ces énergies propres se sont imposées comme porteuses d'une promesse d'un développement plus responsable de l'environnement.

Prenons l'exemple de l'énergie solaire dont les systèmes *PV* connectés au réseau sont en croissance de 25% par an [1], cette énergie venant du soleil est gratuite, le coût de son exploitation est principalement composé des coûts des panneaux photovoltaïques et l'étape de conversion précédant la distribution appelée autrement le système de conditionnement de puissance (*SCP*). Avec le développement des technologies des cellules photovoltaïques, le prix des panneaux solaires a connu une chute dramatique. Des statistiques mondiales ont montrées que dans les trois dernières années, le prix unitaire des panneaux solaires a chuté de 16.95% [1]. Hors que, les prix des *SCP* sont restés presque constants.

Les énergies renouvelables sont des sources inépuisables, cependant elles ne sont pas bien adaptées pour les applications mobiles (*Véhicules hybrides*), c'est pour cela que les piles à combustible se présentent comme une meilleure source d'énergie portable.

La nature variable de l'énergie électrique issue de ces sources, nécessite des étages d'adaptation qui permettent une utilisation optimale adaptée aux différentes applications et assurent un transfert de qualité de l'énergie produite.

Ainsi, les convertisseurs statiques associés à leurs commandes sont devenus incontournables dans les dispositifs actuels de conversion d'énergie électrique. Cet état de fait a très tôt poussé les concepteurs de commandes à contrôler finement les variables électriques en sortie des convertisseurs statiques (*tensions et courants*), car de ces dernières découlent directement la qualité des commandes ultérieures telles que le couple et la vitesse dans le cas du

pilotage d'un actionneur ou encore des flux de puissances active et réactive dans le cas du contrôle d'un générateur raccordé au réseau.[2]

Des recherches ont été élaborés pour améliorer les convertisseurs de puissance en terme d'efficacité, coût et volume. Avec le développement d'une électronique de puissance spécifique dédiée aux applications d'énergies renouvelables, beaucoup de systèmes de conversion innovants ont été conçus, notamment des onduleurs ayant un étage d'adaptation en entrée. Cet étage d'adaptation est généralement un convertisseur *DC-DC* , et malgré que cette structure est amplement utilisée, elle n'est pas dépourvue d'inconvénients :

- Encombrement du *SCP*.
- Réduction d'efficacité.
- Et augmentation du coût de construction du *SCP*.

Une autre structure plus récente qui permet de surmonter les problèmes mentionnés a été proposée en 2002, c'est le Convertisseur *Z-source*.

Dans ce mémoire sera consacré à l'application de l'onduleur *Z-source* à deux niveaux à l'alimentation d'une machine asynchrone. Dans le premier chapitre nous exposant le ZSI avec la méthode de survoltage simple boost. Dans le deuxième chapitre, nous introduisant la machine asynchrone, puis nous comparons les résultats de simulation de l'alimentation avec un VSI à ceux de l'alimentation avec le ZSI.

Finalement, une conclusion sera tirée des résultats de simulations.

1.1 Introduction

Les convertisseurs statiques permettent grâce à une commande appropriée de transférer de l'énergie d'une source vers un récepteur. Ils nécessitent l'utilisation d'interrupteurs à semi-conducteurs, commandés ou non, comme les transistors, les thyristors, les diodes... [3]. La conversion continue alternative a pour rôle la transformation d'un signal de tension (ou de courant) continu en un signal de tension (ou de courant) alternatif d'amplitude, de fréquence et de phase désirées. Cette transformation s'opère dans un convertisseur appelé onduleur (Figure 1.1), aussi on distingue deux grands groupes : les onduleurs de tension et les onduleurs de courant.

On élabore un modèle du fonctionnement des onduleurs à Z-source sans a priori sur la

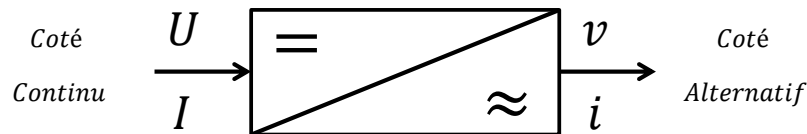


Figure 1.1: transformation continue/alternative

commande et par la suite avec les commandes étudiées en [4], et pour simplifier le schéma, on représente chaque paire IGBT-Diode par un seul interrupteur bidirectionnel K et on procède par bras (grâce à la symétrie de ZSI). Les composants évoqués dans ce mémoire seront considérés comme parfaits : donc aucune perte de puissance ne leur sera imputable.

Dans ce chapitre, nous aborderons en premier lieu le fonctionnement des onduleurs conventionnels, puis le ZSI en passant par l'état Shoot-Through. Nous décrirons par la suite la méthode simple boost.

1.2 Convertisseur DC-AC (Onduleur) conventionnel

Actuellement l'utilisation des onduleurs, qui prennent de plus en plus du terrain dans les domaines d'applications les plus variés, devient incontournable. Le développement des semi-conducteurs entièrement commandable, rapides, et robustes d'une part, et le perfectionnement des techniques de commande d'autre part ont eu un énorme rôle dans l'évolution

de ces convertisseurs. Ces progrès ont permis d'intégrer les onduleurs dans des applications particulièrement intéressantes [5]. On distingue deux principaux types d'onduleurs selon la nature de la source d'alimentation [6] :

- Les onduleurs de courant : Alimentés par une source de courant, sont peu affectés par les variations de tension.
- Les onduleurs de tension : Alimentés par une source de tension continue, sont peu affectés par les variations de courant. Composés de bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture.

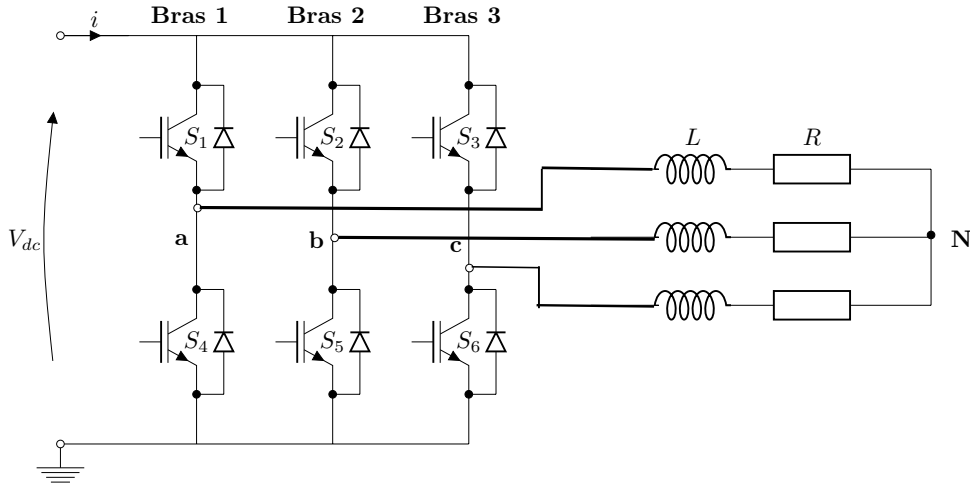


Figure 1.2: onduleur à deux niveaux (IGBT)

- Branche 1 : $S_a = 0$ Si S_1 est ouvert et S_4 est fermé $S_a = 1$ Si S_1 est fermé et S_4 est ouvert
- Branche 2 : $S_b = 0$ Si S_2 est ouvert et S_5 est fermé $S_b = 1$ Si S_2 est fermé et S_5 est ouvert
- Branche 3 : $S_c = 0$ Si S_3 est ouvert et S_6 est fermé $S_c = 1$ Si S_3 est fermé et S_6 est ouvert

À la sortie du convertisseur, nous avons les tensions composées qui sont exprimées en fonction des états des interrupteurs et de la tension continue, elles sont données par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (1.1)$$

Si on considère que les tensions sont équilibrées, alors nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (1.2)$$

En remplaçant (1.1) dans l'expression (1.2) nous obtenons sous la forme matricielle le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

A l'équilibre, avec des impédances de phases identiques, les courants fondamentaux sont exprimés comme suit :

$$\begin{cases} i_a = I_m \sin(\omega t + \phi) \\ i_b = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) \\ i_c = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{cases} \quad (1.4)$$

Tel que :

- I_m : L'amplitude du courant
- ω : La fréquence angulaire
- ϕ : Déphasage entre le courant et la tension de phase

1.2.1 Modélisation du filtre LC à la sortie du ZSI

Pour diminuer les harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur, un filtre doit être bien modélisé. Afin de déterminer plus facilement la transmittance du filtre, on utilise le schéma monophasé. (Figure 1.3)

Où r_f est la résistance de fuite de l'inductance L_f .

La fonction de transfert du filtre est donnée par l'expression suivante [5] :

$$H_s = \frac{V_C}{V_A} = \frac{1}{1 + C_f r_f \cdot s + L_f C_f \cdot s^2} \quad (1.5)$$

Elle est de la forme :

$$H_s = \frac{1}{1 + \frac{1}{2\xi\omega_n} \cdot s + \frac{1}{\omega_n^2} \cdot s^2} \quad (1.6)$$

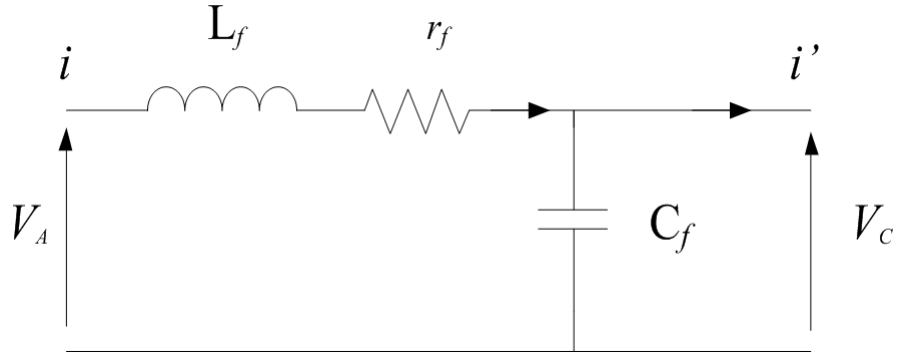


Figure 1.3: Schéma monophasé équivalent du filtre LC

Par identification on trouve :

$$\begin{aligned}\omega_n &= \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \\ \xi &= \frac{1}{2} \cdot r_f \cdot \sqrt{\frac{C_f}{L_f}}\end{aligned}\quad (1.7)$$

En choisissant une bonne fréquence de coupure qui va nous permettre d'éliminer les fréquences non désirées et en considérant le coefficient d'amortissement ξ adéquat, on attribue un dimensionnement correct à l'inductance et à la capacité du filtre utilisé.

1.3 L'état Shoot-Through

Le couplage de la source continue et l'onduleur est fait à travers le réseau d'impédance Z-source. Le ZSI accepte un état de commutation non permis dans l'onduleur de tension conventionnel, cet état aura lieu lorsque tous les interrupteurs d'un bras sont fermés, c'est l'état *Shoot-Through*.

Dans un onduleur conventionnel les états possibles de commutation sont huit (8) : six (6) états actifs où la charge voit la source de tension et les deux (2) autres états sont appelés les états zéro où tous les interrupteurs en haut ou en bas de tous les bras d'un onduleur sont fermés ou ouverts, donc la charge ne voit pas la source de tension continue, sa tension est nulle. En conséquence ZSI contient neuf état de commutation : huit conventionnels et l'état *Shoot-Through*).

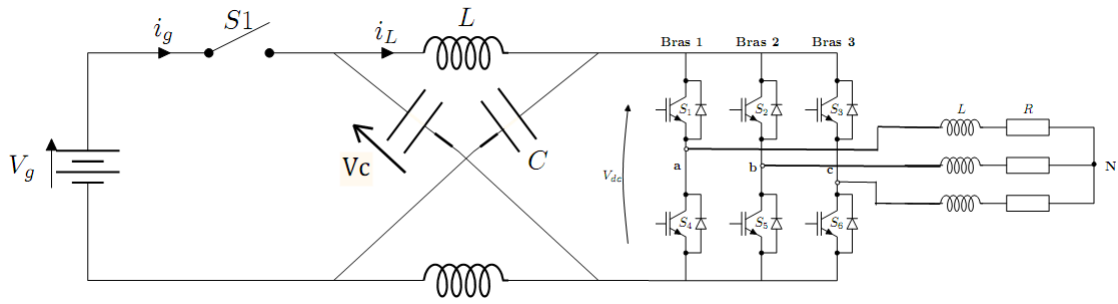


Figure 1.4: Structure générale d'un ZSI

Ce dernier peut être produit par sept manières différentes : par un seul bras, par combinaison de de deux bras ou par tous les trois bras. Des différentes méthodes de survoltage existent, nous décortiquons la méthode simple boost dans ce chapitre qui permet d'insérer l'état Shoot-Through sans modifier le fonctionnement des MLI, afin de ne pas altérer la tension de sortie de ZSI.

1.4 Commande MLI classique et MLI modifiée

1.4.1 MLI classique

Cette technique de commande utilise les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur sont commandées par le signal résultant de la comparaison de ces deux signaux. Deux paramètres caractérisent cette technique :

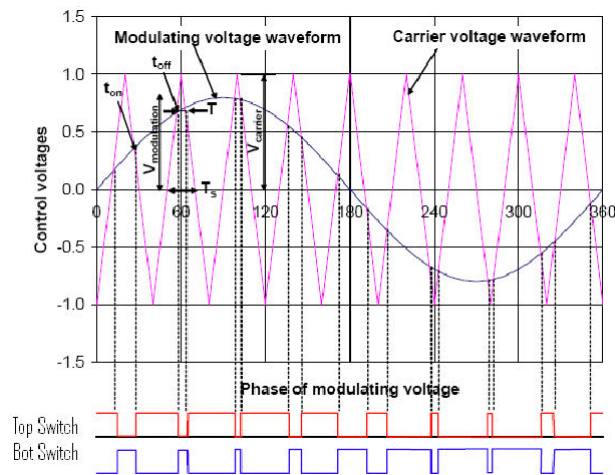


Figure 1.5: commande MLI conventionnelle

- L'indice de modulation : $m = \frac{f_p}{f}$ Avec :
 - f_p : La fréquence de la porteuse ;

- f : La fréquence de la tension de référence.
- Le taux de modulation M :

$$M = \frac{V_{ref}}{(n-1)V_p} \quad (1.8)$$

- $n=2$: nombre de niveaux
- V_{ref} : L'amplitude de la tension de référence.
- V_p : L'amplitude de la porteuse.

Nous pouvons résumer la stratégie de commande triangulo-sinusoidale pour un onduleur à deux niveaux en 2 cas, pour le bras 1,2 ou 3 :

$k = a, b, c$

$$V_{ref} \succeq V_p \implies S_k = 1$$

$$V_{ref} \prec V_p \implies S_k = 0$$

1.4.2 MLI modifiée

La figure (1.6) suivante montre la porteuse triangulaire d'une MLI pour VSI, les références sont comparées à la porteuse triangulaire, si une référence est supérieure à la porteuse l'interrupteur en haut dans le bras correspondant à la référence devient fermé et celui en bas dans le même bras devient ouvert et vice versa. Le premier état zéro a lieu lorsque la porteuse est supérieure à toutes les références, i.e. tous les interrupteurs en haut dans tous les bras sont fermés et ceux en bas sont ouverts. Le second état zéro a lieu lorsque la porteuse est inférieure à toutes les références, i.e. tous les interrupteurs en bas dans tous les bras sont fermés et ceux en haut sont ouverts.

Tous les huit (8) états possibles d'un VSI peuvent se distinguer dans la figure (1.6). L'état Shoot-Through peut être inséré dans la MLI classique pour un onduleur de tension sans modifier cette dernière. On distribue les états shoot-through avec des durées égales dans les états zéro. On constate d'après la figure (1.7) que les états actifs sont les mêmes avant et après l'introduction de shoot-through, ils restent intacts dans un onduleur ZS.

Un autre avantage de ZSI par rapport à l'onduleur de tension conventionnel apparait dans la pratique : dans l'onduleur de tension conventionnel il est nécessaire lors de la transition d'un état de commutation à un autre d'introduire la butée d'onduleur (Dead time) pour protéger l'onduleur en évitant le court-circuit, ce qui cause la distorsion de la tension de sortie de l'onduleur, mais en ZSI l'utilisation de la butée d'onduleur (Dead time) n'est plus indispensable.

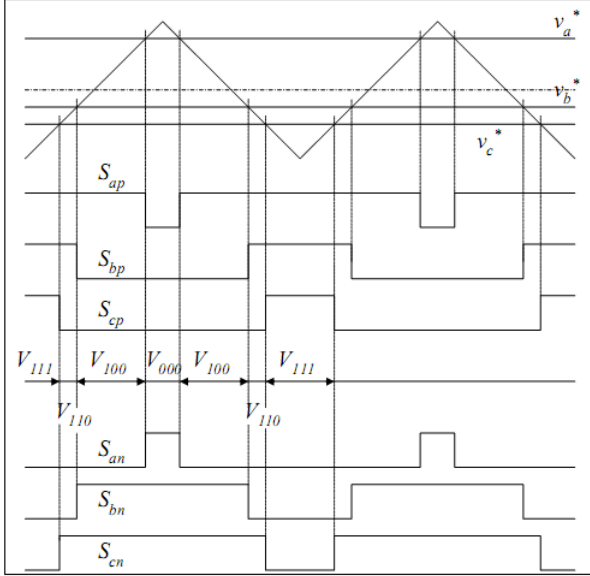


Figure 1.6: MLI conventionnelle

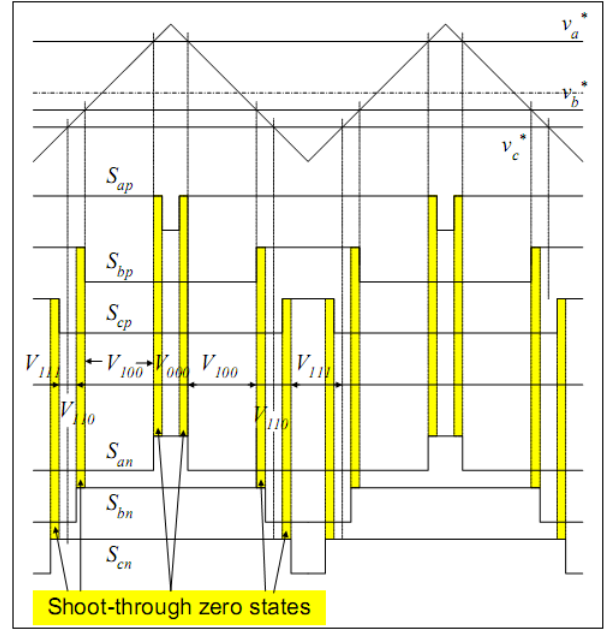


Figure 1.7: MLI modifiée

1.5 Méthode de survoltage

On a expliqué comment introduire les états shoot-through dans une MLI, on va introduire maintenant la méthode simple boost.

1.5.1 Simple boost

La méthode simple boost est utilisée pour commander le rapport cyclique de Shoot-Through, la figure (1.8) illustre cette méthode, où on utilise deux droites horizontales (V_P et V_N), V_P est égale ou supérieure à V_{ref} , et V_N est inférieure ou égale $-V_{ref}$. Si la porteuse triangulaire est supérieure à V_P ou inférieure à V_N , ZSI est à l'état shoot-through, ZSI maintient les états actifs d'un onduleur conventionnel.

Dans cette méthode la valeur maximale du rapport cyclique de Shoot-Through D_{max} diminue si le taux de modulation M augmente, la valeur maximale de D est donnée par :

$$D_{max} = 1 - M \quad (1.9)$$

Les formules reliant le taux de modulation M et le facteur de survoltage B discutées en [8] sont :

$$B_{max} = \frac{1}{1 - 2D_{max}} = \frac{1}{1 - 2(1 - M)}$$

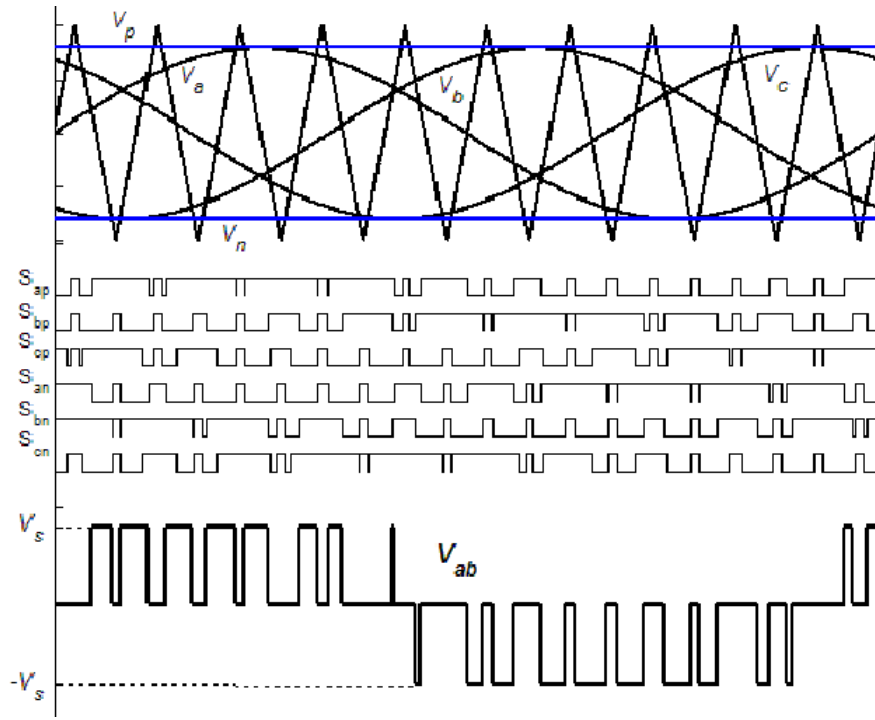


Figure 1.8: La commande simple boost [7]

$$\Rightarrow M = \frac{B + 1}{2B} \quad (1.10)$$

On aura finalement le gain :

$$G = M \times B = \frac{\hat{V}_{ac}}{V_g/2} = \frac{B + 1}{2} \quad (1.11)$$

On obtient le gain max en fonction de M :

$$G_{max} = \frac{M}{2M - 1} \quad (1.12)$$

1.5.2 simulation de la commande simple boost

On impose dans cette simulation la valeur max $D=0.2$ qui donne une tension simple à la sortie de l'onduleur de valeur maximale calculée comme suit :

$$V_{an} = MB \frac{V_g}{2} = 0.8 \times 1.67 \times 44/2 = 29.4V \quad (1.13)$$

Le tableau (1.1) résume les paramètres du système choisis pour la simulation.

La figure (1.13) montre les signaux de commande des interrupteurs, la ligne verte (bleu) représente la droite horizontale V_p (V_n). Quand la porteuse triangulaire est supérieure (inférieure) à la droite V_p (V_n) on voit bien que tous les signaux de commande S_i sont mis à l'état 1 : c'est l'état Shoot-Through.

$L(\mu H)$	$C(\mu F)$	$f_{ref}(Hz)$	$f_p(Hz)$	$R_l(\Omega)$	$L_l(mH)$	$V_g(V)$	V_p	V_{ref}	M	B
470	452	50	7500	10	5^{-3}	44	0.8	1	0.8	2.6

Table 1.1: données de simulation en boucle ouverte

$L(mH)$	$Q_c(kVAR)$	$f_{coupure}(Hz)$	ξ
2	3	200	0.707

Table 1.2: caractéristiques du filtre

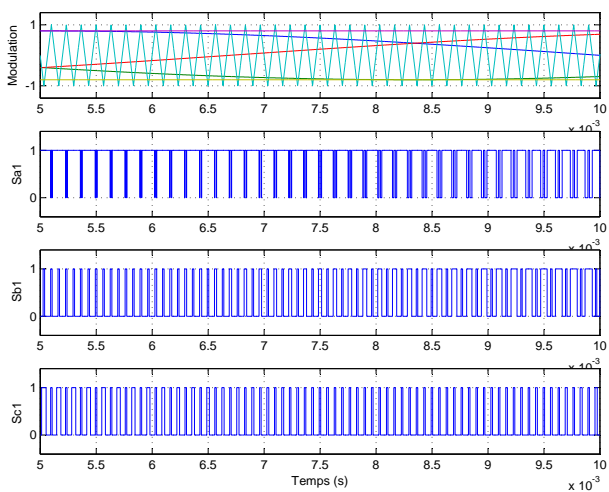


Figure 1.9: Signaux de commande (SB)

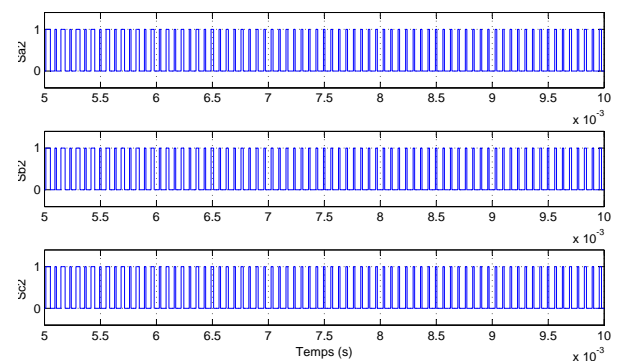


Figure 1.10: Les signaux de commande (interrupteurs inférieures)

La figure (1.11) montre la tension du bus continu qui se stabilise après une durée de 60 ms avec des ondulations de l'ordre de 0.3V (0.4%).

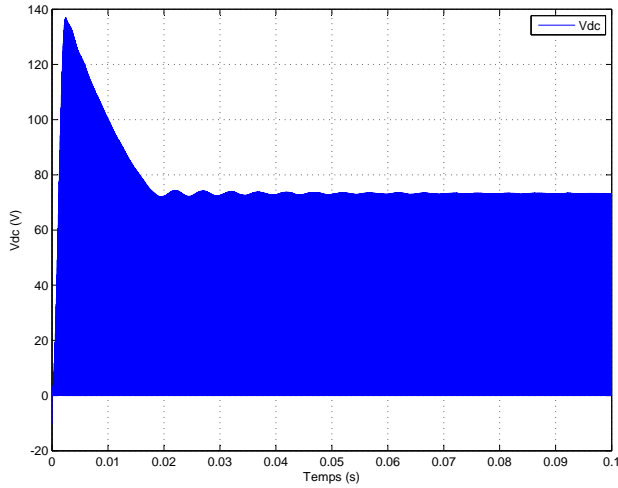


Figure 1.11: La tension V_{dc} de bus continu virtuel

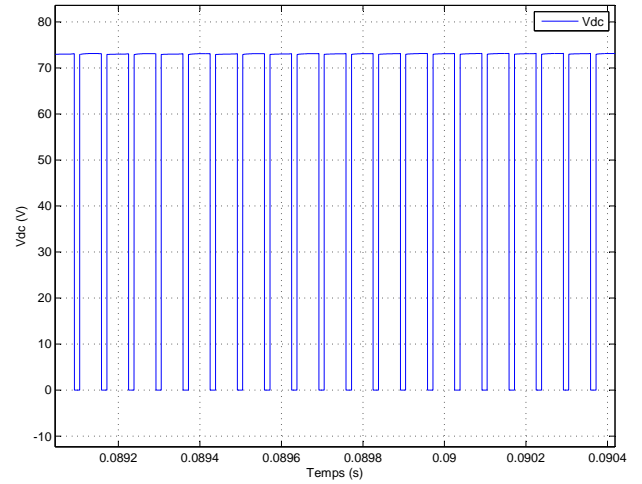


Figure 1.12: La tension V_{dc} de bus continu virtuel ►zoom

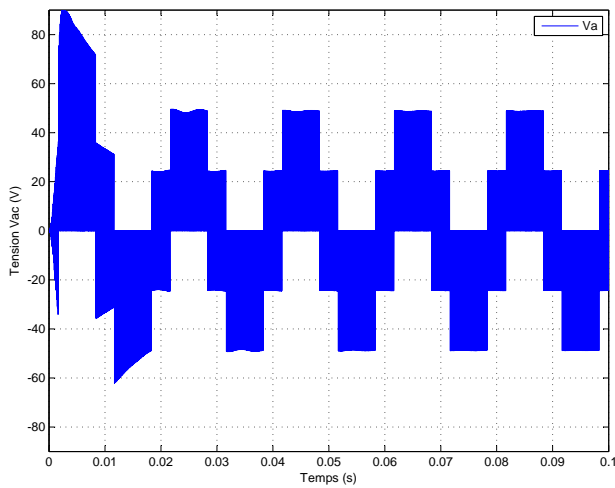


Figure 1.13: Les tensions simples non filtrées

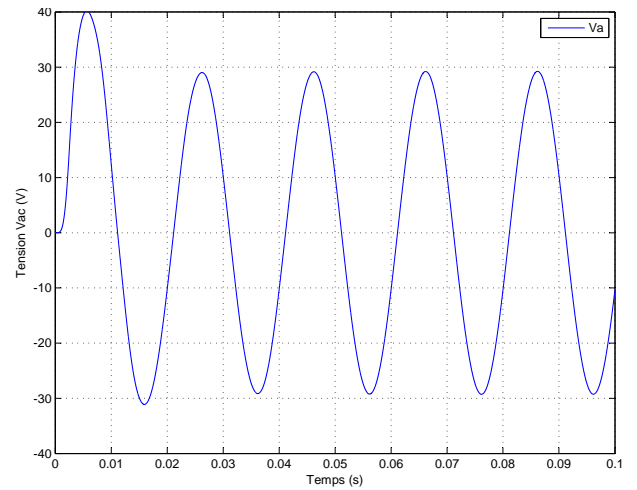


Figure 1.14: Les tensions simples filtrées

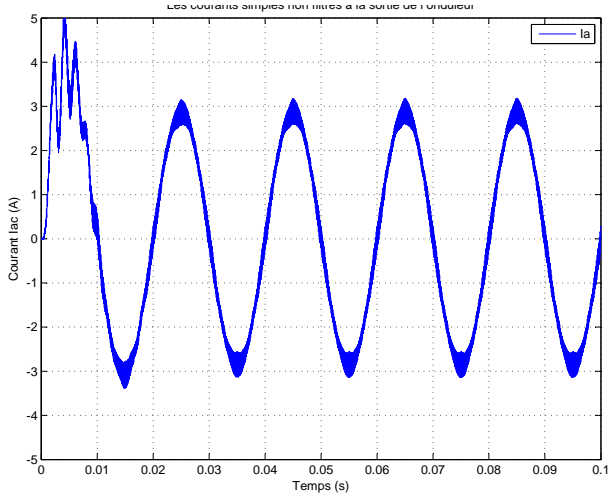


Figure 1.15: Les courants non filtrés

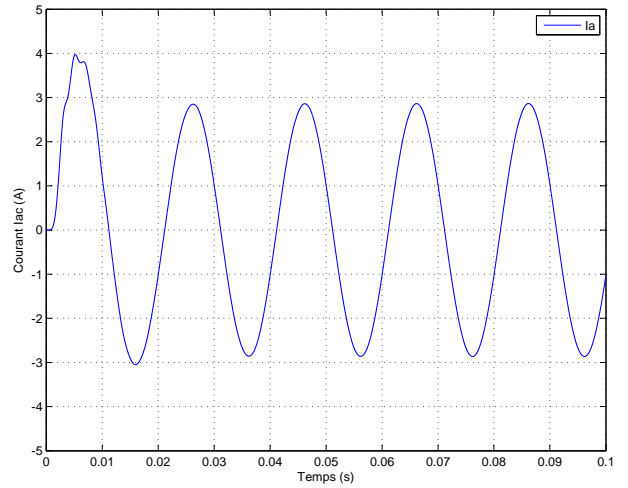


Figure 1.16: Les courants filtrés

Les tensions de sortie de l'onduleur montrées dans la figure (1.14) sont compatibles avec les valeurs calculées. Dans la figure (1.16), les courants de ligne ont une valeur maximale de 2.94 A, ce qui peut être calculé comme suit : $I = V/Z = 29.4/10 = 2.94A$.

1.5.3 Simulation en boucle fermée

La tension simple désirée à la sortie de l'onduleur est d'une valeur max de 220V, on choisit $V_{dc} = 700V$ on aura donc : $M = \frac{220}{\frac{700}{2}} = 0.6284$.

Ce qui limite le rapport cyclique de Shoot-Through et ne dépasse pas la valeur maximale $D_{max} = 1 - M = 0.3716$.

D'après ces données et l'équation (1.11) il en découle que V_g doit être supérieure à 180V. Le régulateur PID conçu dans le Chapitre 3 sera utilisé pour réguler la tension de bus continu.

$L(\mu H)$	$C(\mu F)$	$f_{ref}(Hz)$	$f_p(Hz)$	$P(KW)$	$V_g(V)$	V_p	V_{ref}	M	B
470	275	50	10000	5	185	0.6286	1	0.6286	3.84

Table 1.3: Paramètres de simulation en boucle fermée

La commande issue du régulateur qui représente le rapport de Shoot-Through est appliqué au système en moyennant la MLI modifiée, on doit assurer que les droites V_p et V_n et les références sinusoïdales ne se chevauchent pas pour ne pas influencer les états actifs.(Figure 1.17).

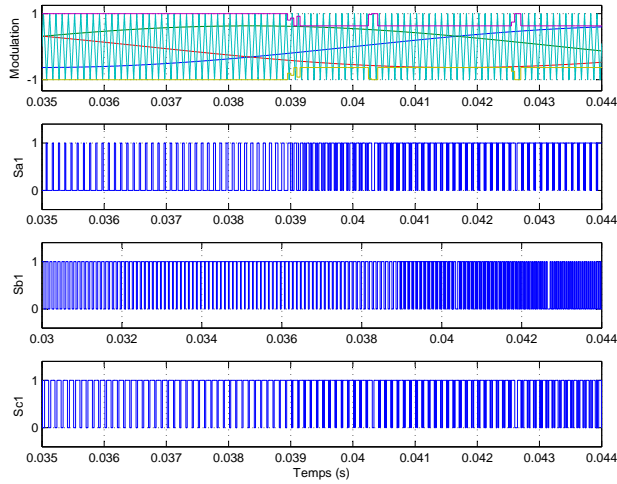


Figure 1.17: Les signaux de commande (SB)

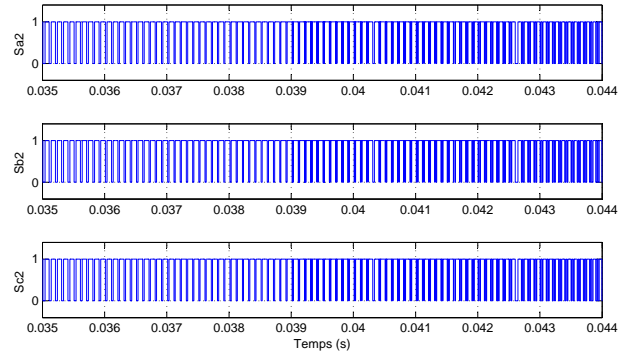


Figure 1.18: les signaux de commandes des interrupteurs inférieures

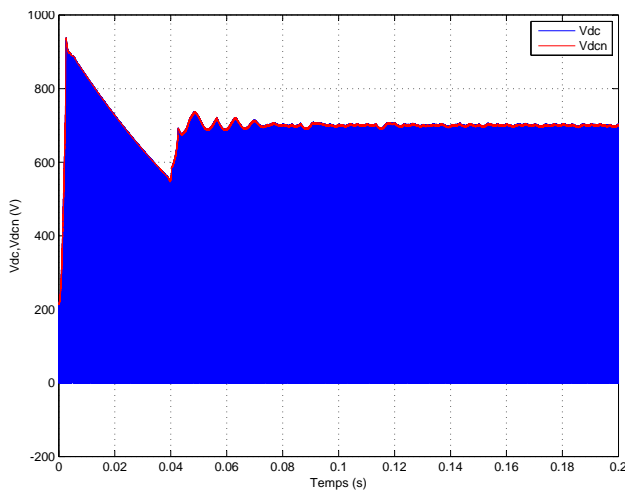


Figure 1.19: La tension V_{dc} et V_{den} de bus continu virtuel

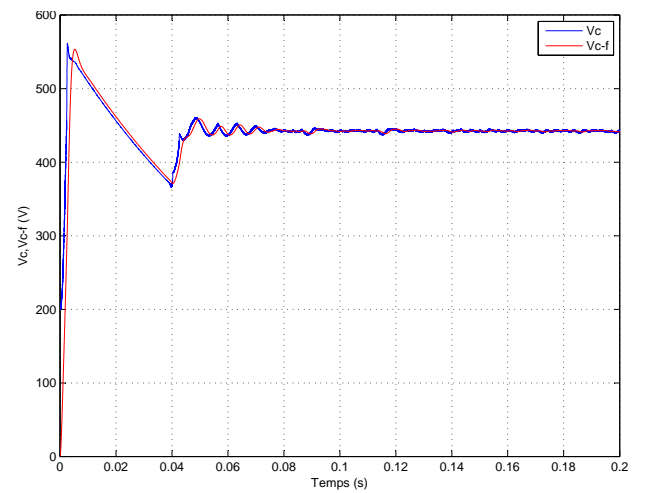


Figure 1.20: La tension aux niveau du condensateur

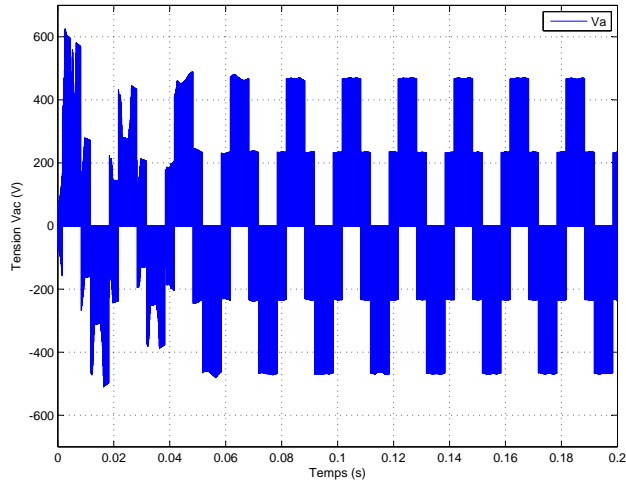


Figure 1.21: Les tensions simples non filtrées

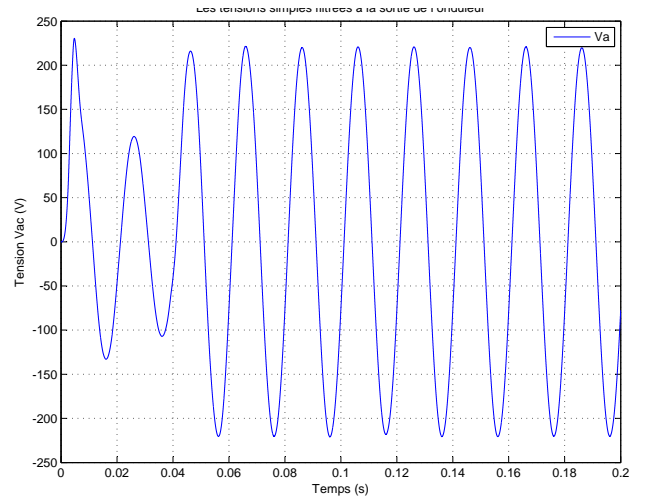


Figure 1.22: Les tensions simples filtrées

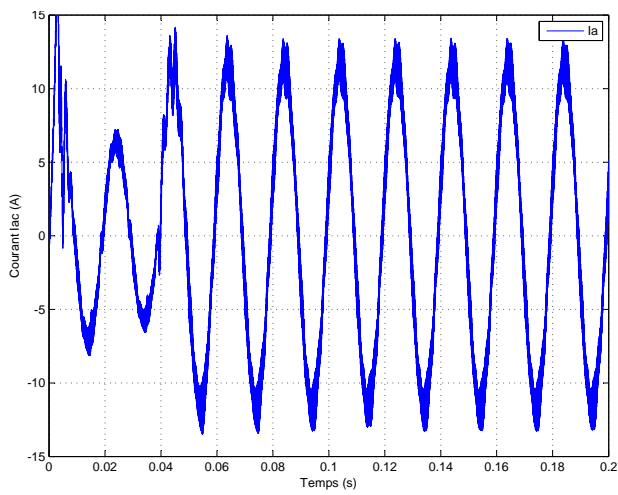


Figure 1.23: Les courants non filtrés

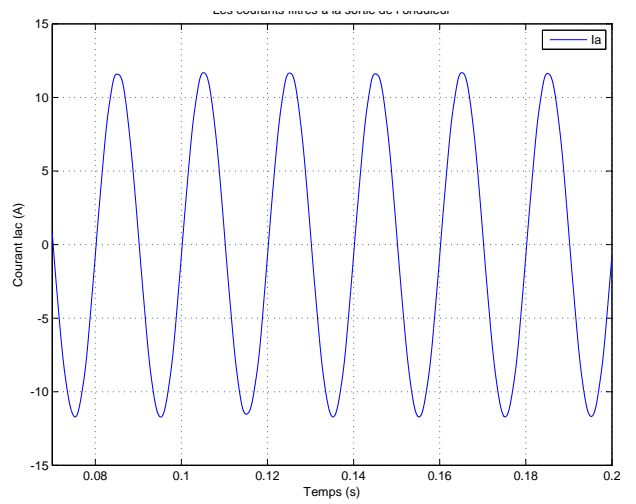


Figure 1.24: Les courants filtrés

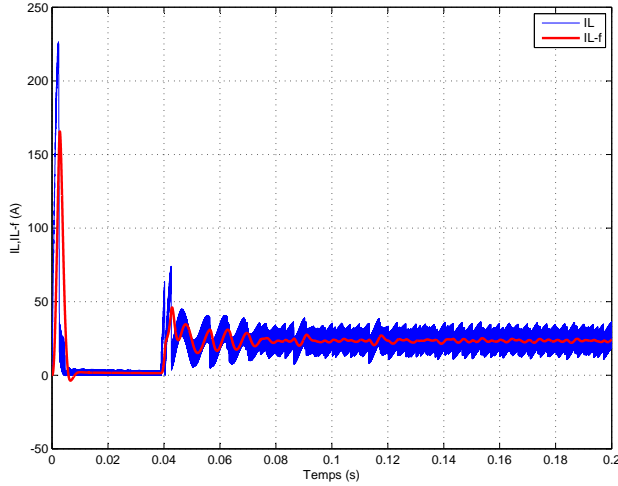


Figure 1.25: Le courant I_L et $I_{L-filtre}$ au niveau de l'inductance L

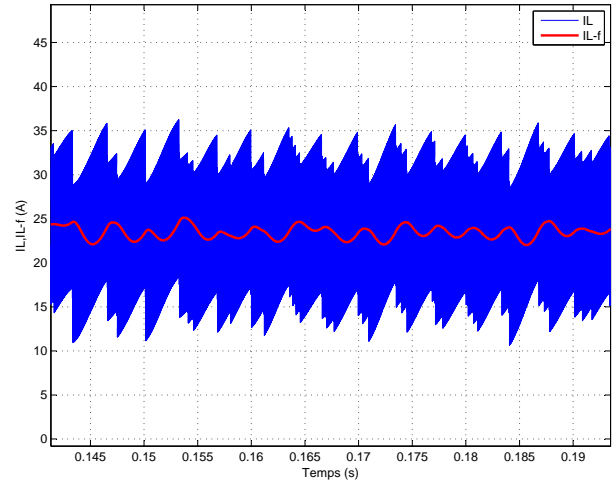


Figure 1.26: Le courant I_L et $I_{L-filtre}$ au niveau de l'inductance L ► zoom

1.5.4 Conclusion de la simulation

Le régulateur PID conçu en [4] a montré son efficacité d'assurer une très bonne poursuite lorsqu'il est utilisé pour commander la tension du bus continu d'un ZSI. L'overshoot est diminué, en comparant avec la simulation en boucle ouverte, et aussi le temps de réponse et les ondulations.

1.6 Analyse de la tension fournie par le ZSI

Les onduleurs sont caractérisés par la qualité de la tension alternative qu'ils fournissent à leurs sorties. Celle-ci est évaluée par trois paramètres : le facteur d'harmonique, la distorsion totale d'harmonique et l'harmonique de plus bas ordre. Dans notre étude on se base sur le THD : il représente la mesure du *rapprochement dans la forme* entre l'onde de tension et son fondamentale :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V} = \frac{\sqrt{V^2 - (V_1)^2}}{V} \quad (1.14)$$

Dans le cas idéal où l'onde de tension est une sinusoïde pure, on a $THD = 0$, donc plus le THD se rapproche de zéro plus l'onde est proche de la sinusoïde.

1.6.1 Qualité du signal de sortie

Le spectre d'un signal rectangulaire inclut une onde fondamentale (rang $n = 1$, pulsation ω_1) et des ondes harmoniques (rang $n_i \geq 1$, pulsation $\omega_n = n\omega_1$) d'amplitude plus ou moins

importante. Dans ce qui suit, on compare les performances de chaque signal à la sortie de l'onduleur avant et après le filtrage au cas idéal (onde sinusoïdale pure de pulsation ω_1) en calculant le spectre du signal généré. On cherche à diminuer le plus possible l'amplitude des harmoniques de rang faible car :

- les harmoniques de rang élevé sont faciles à filtrer : un onduleur est toujours suivi d'un filtre passe-bas.
- sur charge inductive, ce sont les harmoniques de rang faible qui génèrent les courants les plus importants [9].

$$I_n = \frac{V_n}{\sqrt{R^2 + L^2\omega_1^2 n^2}} \quad (1.15)$$

1.6.2 Analyse spectrale

Un onduleur idéal devrait fournir une tension alternative sinusoïdale. Cependant, les onduleurs réels produisent une onde de tension non-sinusoïdale et contient donc un certain nombre d'harmoniques. Pour les applications à faible et à moyenne puissance, une tension alternative à onde carrée ou à onde quasi-carrée est acceptable, cependant pour les puissances élevées est requise une onde de tension sinusoïdale de faible distorsion. Grâce à la disponibilité de nouveaux composants à semi-conducteurs rapides et de forte puissance, il est possible de minimiser ou de réduire les harmoniques que contient l'onde de tension [10].

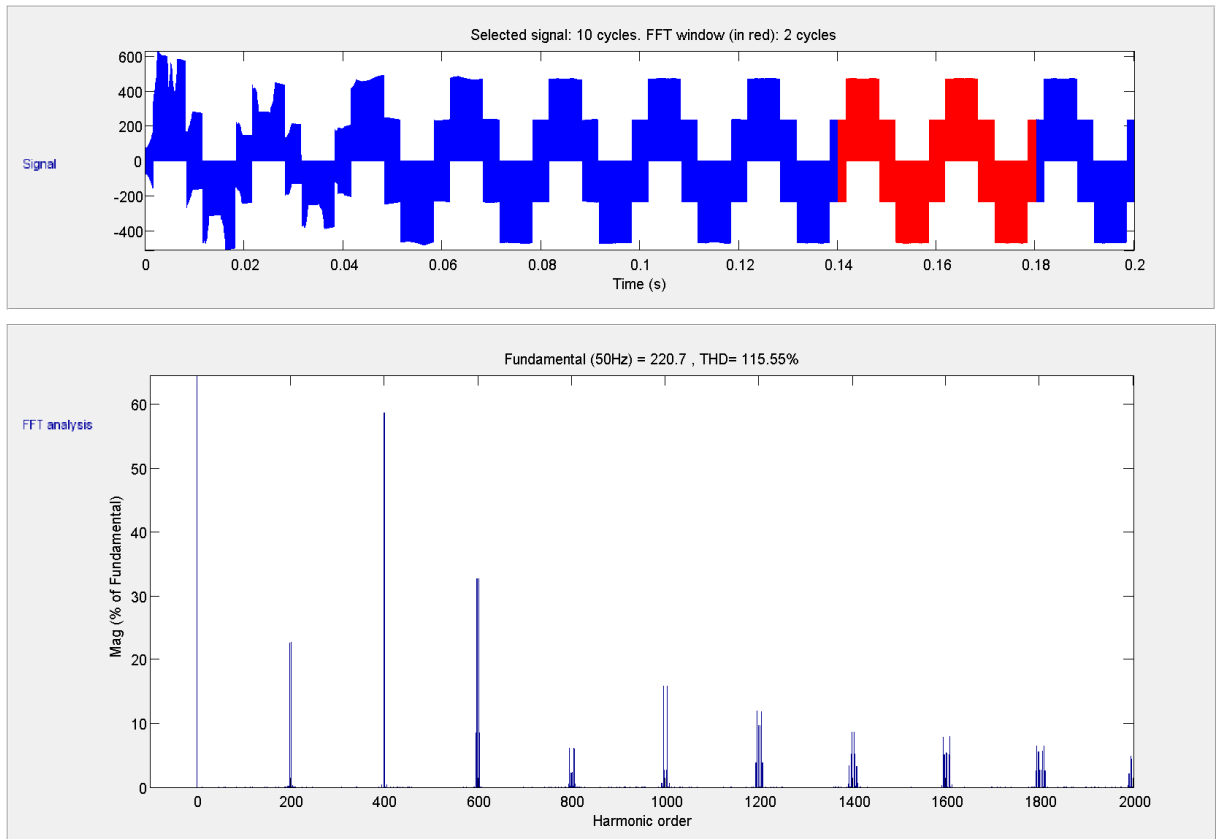


Figure 1.27: Spectre de la tension simple avant filtrage

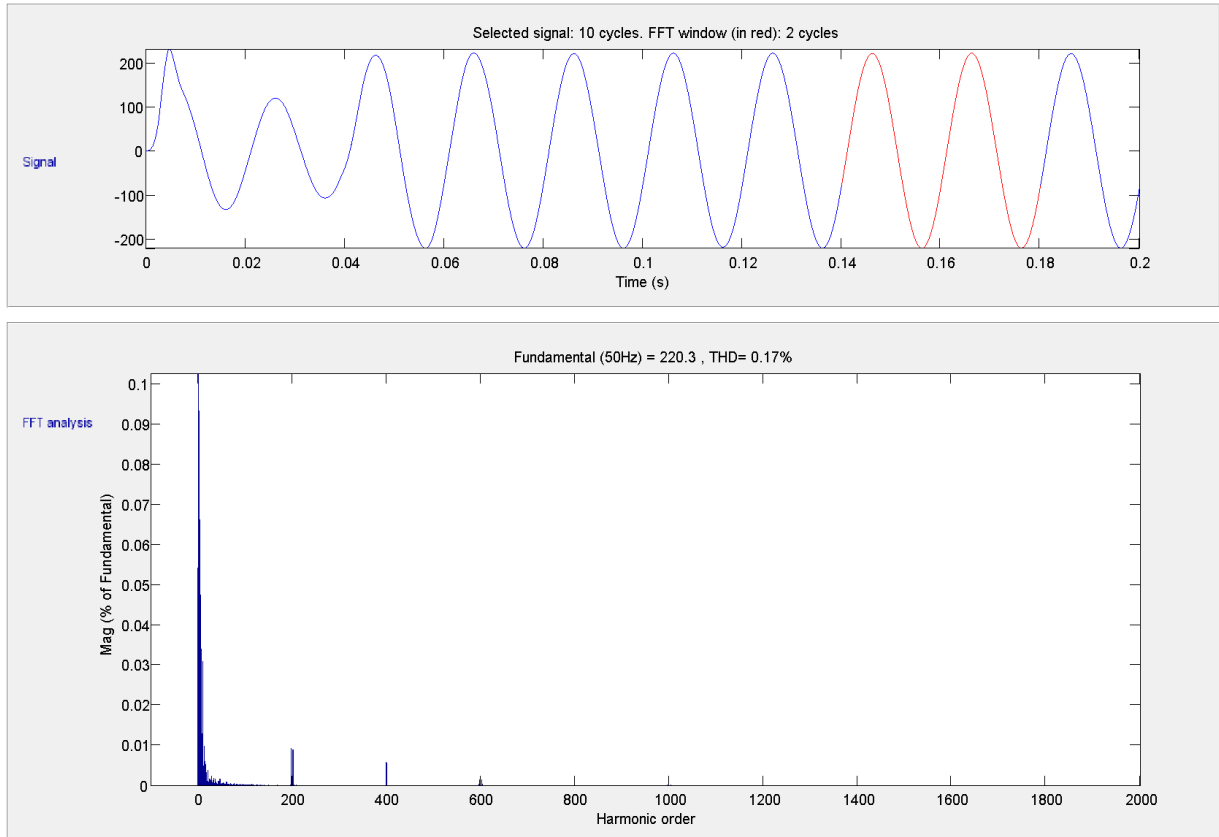


Figure 1.28: Spectre de la tension simple après filtrage

La figure(1.27) présente le spectre de la tension obtenue à la sortie de l'onduleur (avant qu'elle soit filtrée) . On remarque que les harmoniques d'amplitude considérables ont des fréquences multiples de la fréquence de commutation, ce sont les paquets regroupés aux fréquences multiples de 10kHz, et aussi l'harmonique de fréquence la plus grande (60% de l'amplitude de la fondamentale) à la fréquence 20kHz qui est un multiple de l'indice de modulation $m = 200$. Le taux de distorsion en tension est très important, il est de l'ordre de 115.55%, ce qui explique l'importante diminution d'amplitude de la tension après filtrage. L'analyse spectrale faite après filtrage présente une nette amélioration par rapport à l'élimination des harmoniques de tension, confirmée par un THD de 0.17 %.

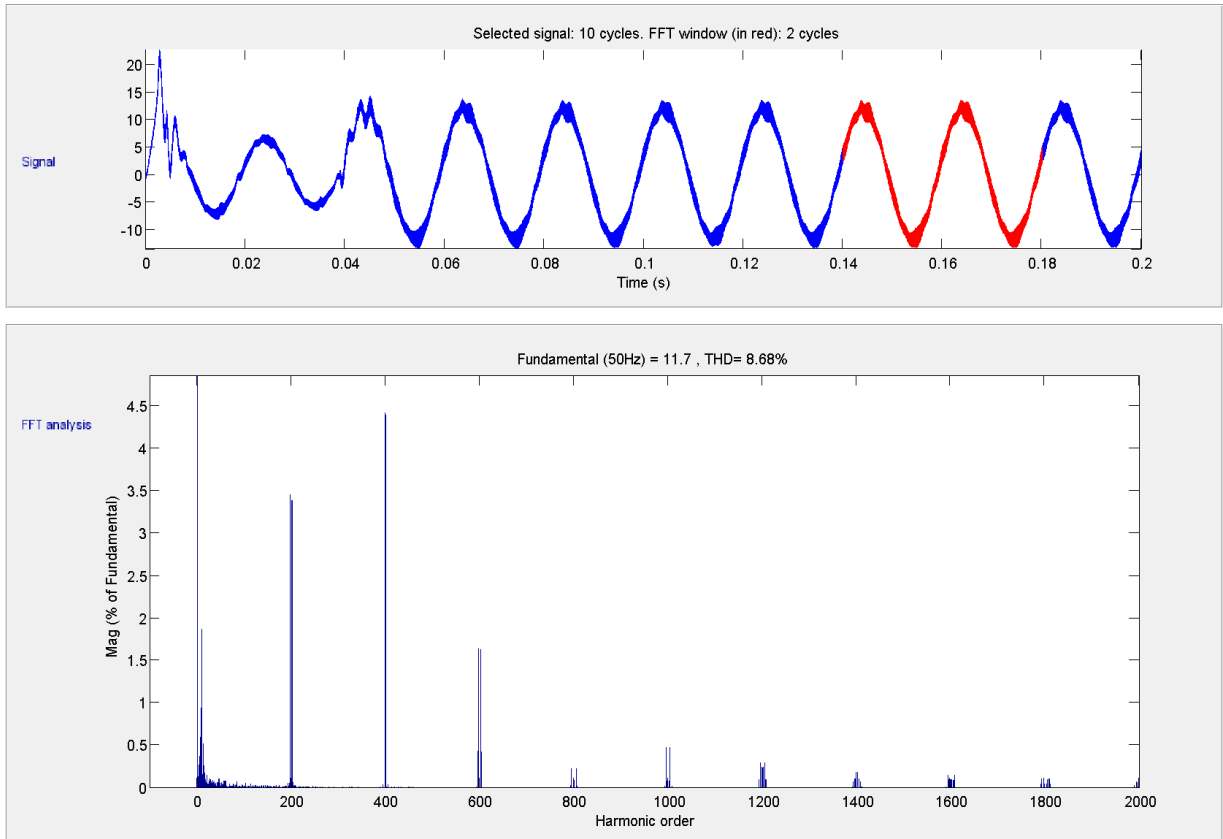


Figure 1.29: Spectre du courant avant filtre

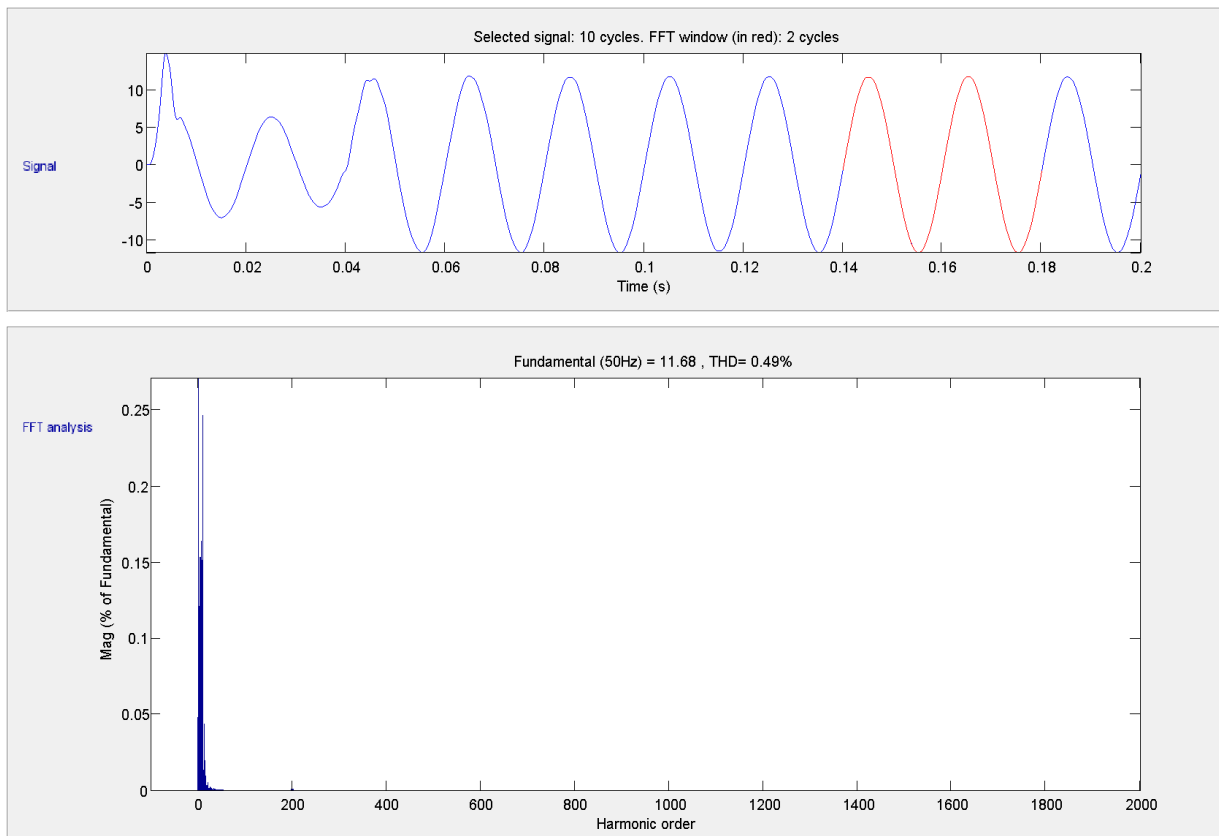


Figure 1.30: Spectre du courant après filtrage

On représente l'allure des courants et des tensions à la sortie de l'onduleur avant, et après filtrage. On aperçoit tout d'abord des courants pas très déformés, ceci est dû à la charge inductive qui joue le rôle de filtre pour le courant. Après utilisation du filtre LC l'allure de ces courants est moins déformée et on retrouve des courbes proches d'une sinusoïde parfaite. L'analyse spectrale avant et après filtrage des courants démontre l'intérêt de l'utilisation du filtre. La figure (1.29) présente l'analyse spectrale faite avant filtrage, où on voit bien un taux d'harmoniques de courants de l'ordre de 8.68%. Puis après filtrage figure (1.30), ce taux est diminué à 0.49%.

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'onduleur à Z-source avec son état Shoot-Through qui n'est pas permis dans les onduleurs conventionnels.

La méthode SB a été simulée en boucle ouverte, puis en boucle fermée pour valider la commande conçue en [4].

Les résultats de simulations obtenus par SimPowerSystems/MATLAB, nous ont permis d'approcher au mieux le fonctionnement réel de notre système. On peut résumer les résultats comme suit :

L'utilisation de la topologie Z-source permet de booster la tension continue d'entrée de l'onduleur sans utiliser un hacheur boost, ce qui réduit le nombre d'interrupteurs et la complexité du SCP.

Un autre avantage de l'utilisation de cette topologie c'est l'absence de la butée d'onduleur existée dans les onduleurs conventionnels, donc on évite la distorsion de tension causée par cette dernière.

En utilisant la méthode de survoltage SB, on peut commander la tension de sortie de l'onduleur en agissant séparément sur le facteur de survoltage B et le taux de modulation M, d'où la grande flexibilité offerte par le ZSI en terme de survoltage et de qualité de la tension de sortie.

La nature ondulatoire de la tension du bus continu crée des distorsions de la tension à la sortie de l'onduleur qu'on peut remarquer par le THD très élevé. L'ajout d'un filtre passe bas s'est avéré une solution efficace à ce problème.

Chapitre 2

Alimentation de la MAS par ZSI

Dans ce chapitre, on va étudier les performances de l'onduleur à ZS à travers son utilisation pour l'alimentation d'une machine asynchrone à cage.

2.1 Généralités sur Machine Asynchrone

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. La machine asynchrone est utilisée aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elle était à l'origine uniquement utilisée en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes. Pour les applications de puissance, au-delà de quelques kilowatts, les moteurs asynchrones sont uniquement alimentés par des systèmes de courants triphasés.[12].

La machine asynchrone est une machine électrique à courant alternatif, elle connue aussi sous le nom de machine à induction. L'origine du terme *asynchrone* est le fait que la vitesse de rotation de cette machine n'est pas synchronisée avec la vitesse de rotation du champs induit.

Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique, sinon la cage ne serait plus balayée par le champs tournant et il y'aurait disparition des courants induits et donc des forces de *Laplace* et du couple moteur. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones.[11]

La machine asynchrone monophasée nécessite un système de démarrage, hors qu'il suffit d'alimenter les trois bobines du stator de machine triphasée par une alimentation triphasée pour qu'elle puisse démarrer.

Les machines asynchrones sont différenciées par le type du rotor utilisé, il peut être bobiné comme dans le cas d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Le deuxième type de rotor est la cage d'écureuil, où le rotor est un bobinage à grosse section (faible résistance) constitué par des barres d'aluminium.

2.1.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de la machine à induction est basé sur la création d'un champ magnétique \vec{B} tournant en alimentant le bobinage du stator par une source triphasée de fréquence f . Le champ tournant \vec{B} varie en direction et en intensité suivant le courant passant par la bobine, c'est une grandeur vectorielle.

Le stator contient trois bobines disposées de 120 deg l'une par rapport à l'autre, ainsi, le champ magnétique total est la somme vectorielle des champs magnétiques produits par les trois bobines et qui tourne à une fréquence de synchronisme n_s donnée par :

$$n_s = \frac{f}{p}. \quad (2.1)$$

Tel que :

n_s : La fréquence de rotation du champ \vec{B} en tours par seconde [tr/s].

f : La fréquence des tensions d'alimentation en Hertz [Hz].

p : Le nombre de paires de pôles du rotor.

Le champ tournant balaye la cage du rotor et induit des courants de Foucault circulant les conducteurs de la cage, un couple est exercé sur le rotor par les forces de Laplace résultantes. La loi de Lenz dit que les courants induits s'opposent à la cause qui leur a donné naissance. Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ tournant mais avec une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme. La différence entre ces deux fréquences est appelée fréquence de glissement, donnée par :

$$\Delta n = n_s - n \quad (2.2)$$

Tel que :

Δn : La fréquence de rotation du glissement en tours par seconde [tr.s⁻¹]

n_s : La fréquence de rotation du champ \vec{B} en tours par seconde [tr.s⁻¹]

n : La fréquence de rotation du rotor en tours par seconde [tr.s⁻¹].

Le glissement est le rapport entre fréquence de glissement et fréquence de synchronisme, il est donc donné par :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.3)$$

2.1.2 Branchement de la machine asynchrone

Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à bornes située au dessus de la machine. Six bornes sont placées sur la plaque, chacune est reliée à une extrémité de l'une des trois bobines.(Figure 2.1).

Il y'a deux façons de coupler la machine à la source d'alimentation, il s'agit du couplage en

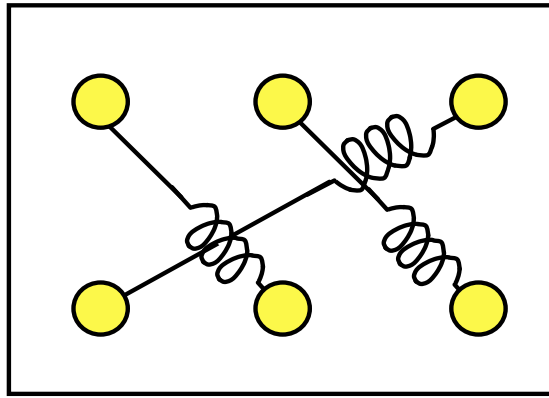


Figure 2.1: Plaque à bornes d'une MAS triphasée

triangle et en étoile, on choisit l'un ou l'autre selon la tension supportée par la bobine et qu'on trouve la valeur sur la plaque signalétique de la machine.

Le couplage en étoile applique la tension simple du réseau sur chaque enroulement du stator, et le couplage en triangle applique la tension composée. La relation entre ces deux tensions est donnée par :

$$U = V\sqrt{3} \quad (2.4)$$

Tel que :

U : La valeur efficace de la tension composée $u(t)$ en volts [V]

V : La valeur efficace de la tension simple $v(t)$ en volts [V]

La figure (2.2) illustre le couplage en étoile où les bobines sont soumises à la tension entre phase et neutre du réseau et traversées par le courant de ligne $i(t)$.

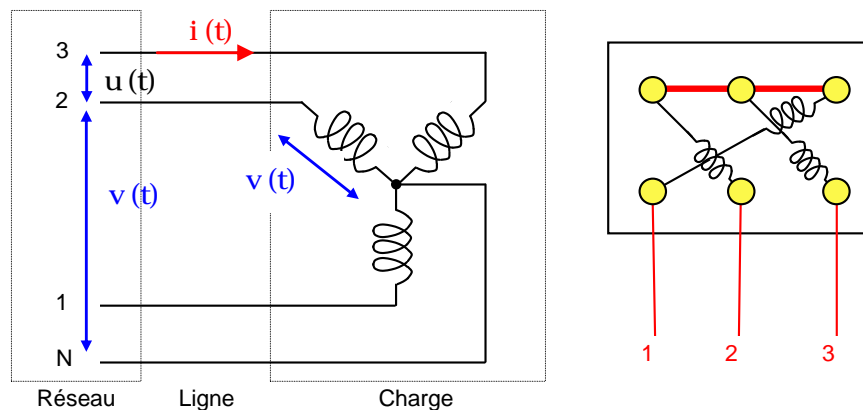


Figure 2.2: Couplage en étoile

La figure (2.3) illustre le couplage en triangle où les bobines sont soumises à la tension entre deux phases du réseau et traversées par un courant $j(t)$, sa valeur efficace J est reliée à la valeur efficace du courant de ligne I par la relation :

$$I = J\sqrt{3} \quad (2.5)$$

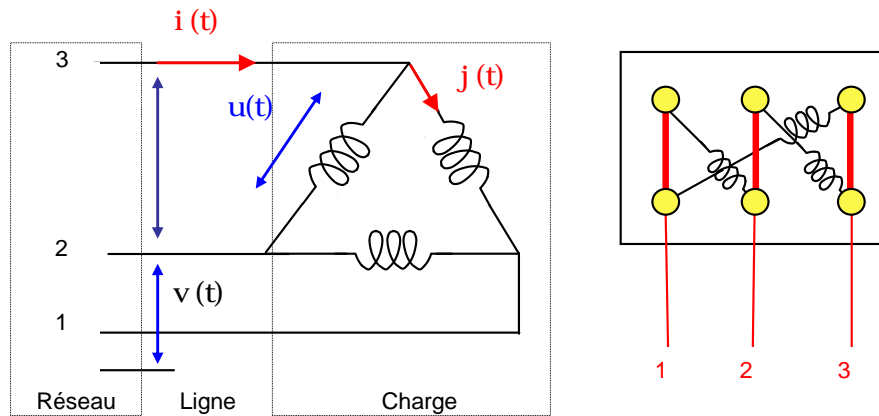


Figure 2.3: Couplage en triangle

2.2 Résultats de simulations

L'alimentation de la machine peut influencer énormément le bon fonctionnement de cette dernière, une source offrant une tension stable et une puissance suffisante assurera un fonctionnement optimale de la machine.

Cette partie sera consacrée à l'étude du fonctionnement de à vide d'une machine asynchrone alimentée par un VSI conventionnelle, puis par un ZSI. Le but principale est d'étudier les performances du ZSI et vérifier son efficacité.

Pour cette étude nous considérons une machine asynchrone avec les paramètres affichés dans le tableau (2.1).

P_n	V_n	f_n	R_s	L_s et L_r	R_r	L_m	J	F	p
37kVA	460V	50Hz	87mΩ	35.5mH	0.23Ω	34.7mH	1.66kg.m ²	0.1N.m.s	2

Table 2.1: Caractéristiques de la MAS

1. Alimentation avec un VSI

L'entrée de l'onduleur est une source de tension continue $V_{dc} = 780V$, donc la tension simple à la sortie du VSI pour un taux de modulation $M = 0.68$ est donnée par :

$$V_a = M \frac{V_{dc}}{2} = 265V \quad (2.6)$$

La machine est couplé en triangle, c'est la tension composée qui est appliqué sur les bobines du stator, elle est de valeur $U_a = 460V$.

La fréquence des la source d'alimentation est $50Hz$, d'où la fréquence de synchronisation est de :

$$n_s = \frac{50}{2} = 25\text{tour}/s = 157\text{rad}/s \quad (2.7)$$

Les résultats de la simulation sont présentés par les figures (2.4 à 2.8) :

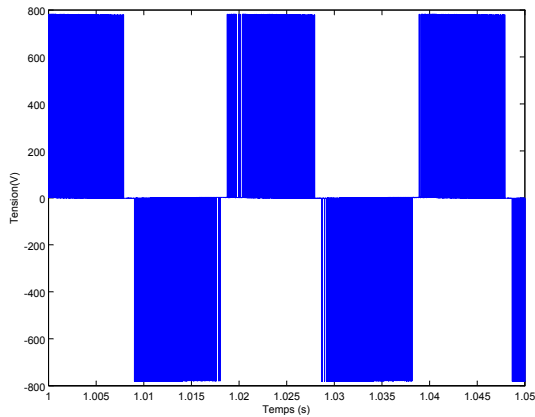


Figure 2.4: Tension d'alimentation U_a

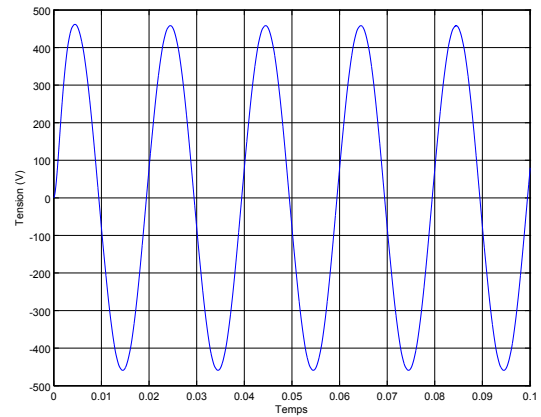


Figure 2.5: Tension d'alimentation filtrée U_a

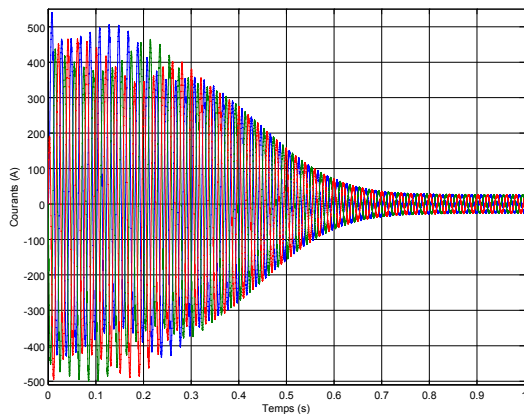


Figure 2.6: Courants de ligne $I_{a,b,c}$

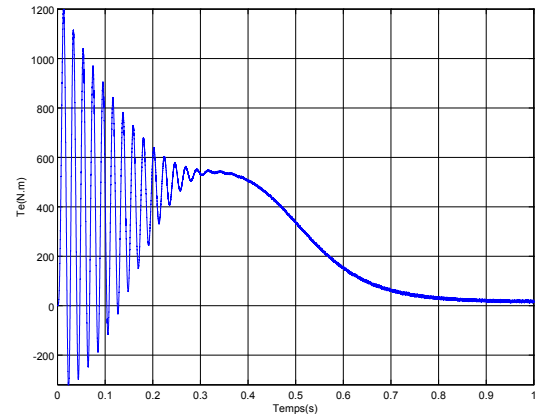


Figure 2.7: le Couple électromagnétique

Au démarrage, un fort courant est appelée par la machine afin de générer un couple électromagnétique capable de vaincre l'inertie de la machine. La vitesse de rotation du rotor s'augmente et se stabilise a la vitesse $n = 156\text{rad}/s$, le glissement est donné par :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{157 - 156}{2} = 0.007 \quad (2.8)$$

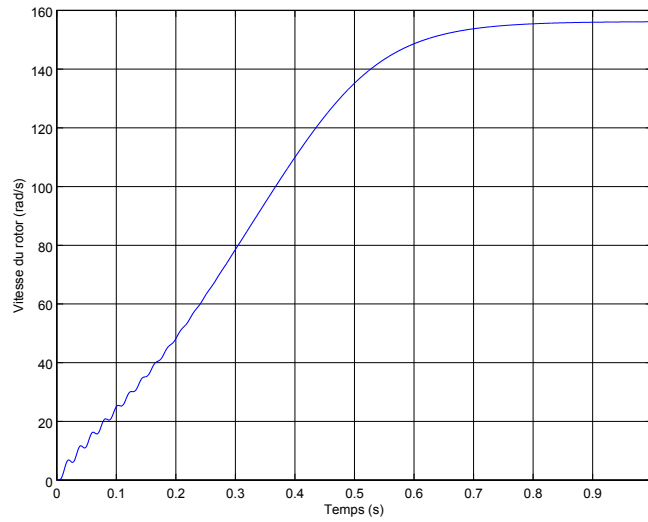


Figure 2.8: Vitesse de rotation du rotor (rad/s)

Après que la vitesse du rotor atteinte la valeur n , les courants diminuent et le couple électromagnétique se réduit a un couple égale au couple de frottement donnés par :

$$C_f = F \times n = 15.6 N.m.s \quad (2.9)$$

où :

C_f : Couple de frottement.

F : coefficient de frottement

2. Alimentation par un ZSI

La même machine est relié à un onduleur à ZS, le branchement est toujours en triangle. La méthode de survoltage choisie est la méthode Simple Boost afin d'avoir une flexibilité dans le choix des paramètres de boosting. La tension du bus continu virtuelle à l'entrée de l'étage de commutation est supposée suivre la référence donnée à l'entrée du régulateur PID. La valeur efficace de la tension simple à la sortie du ZSI pour un taux de modulation $M = 0.68$ est donnée par :

$$V_a = MB \frac{V_g}{2} = 265V \quad (2.10)$$

Les résultats de simulation sont illustrés par les figures suivantes :

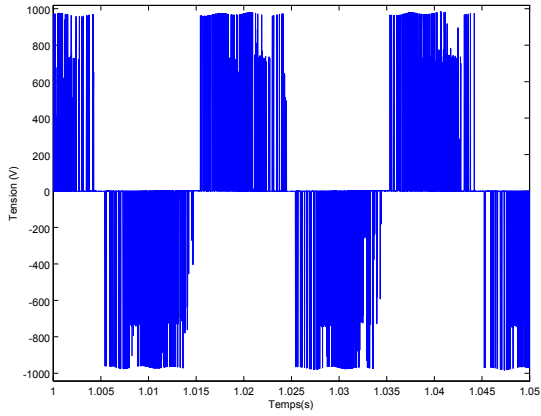


Figure 2.9: Tension d'alimentation U_a

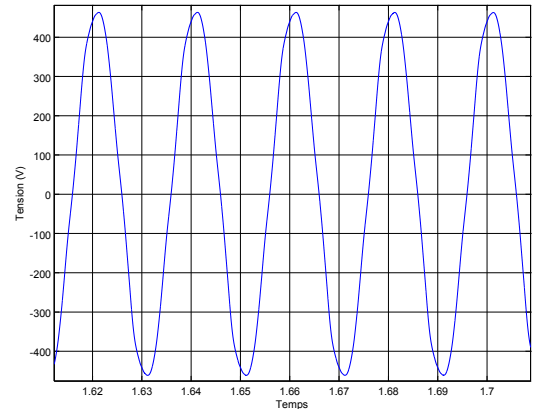


Figure 2.10: Tension d'alimentation filtrée U_a

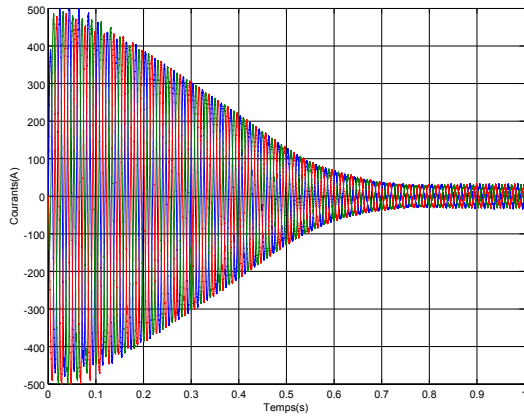


Figure 2.11: Courants de ligne $I_{a,b,c}$

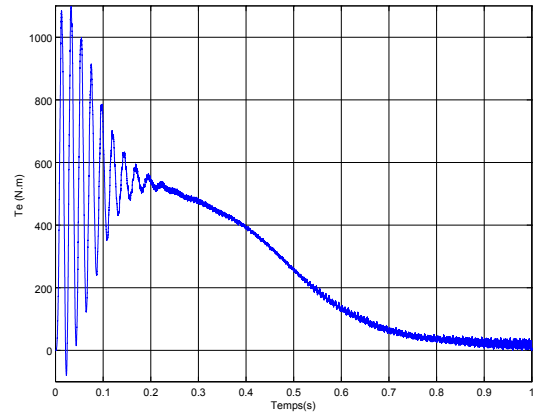


Figure 2.12: le Couple électromagnétique

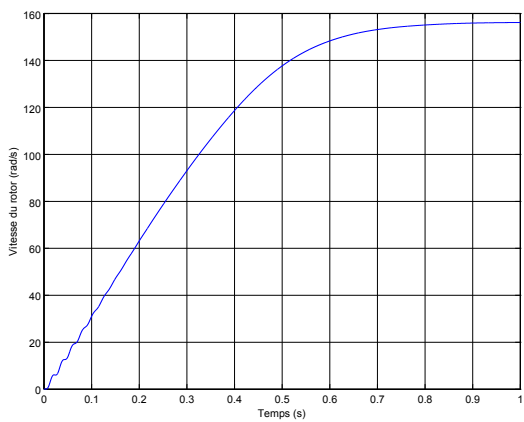


Figure 2.13: Vitesse de rotation du rotor (rad/s)

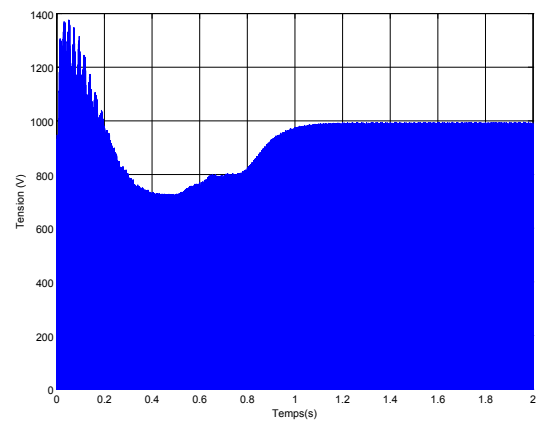


Figure 2.14: Tension du bus continu

D'après les simulations on voit bien que lorsque la vitesse du rotor atteint la valeur $n = 156rad/s$ les courants diminuent et le couple électromagnétique atteint une valeur égale au couple de frottement.

La tension du bus continu est stabilisée quand l'appel du courant est légèrement variable, puis elle s'éloigne de la référence quand le courant commence à diminuer. Ce changement de la tension du bus continu engendre des distorsions de la tension d'alimentation à la sortie de l'onduleur et on remarque aussi que les ondulations couple électromagnétique sont plus grandes.(Figures 2.15,2.16)

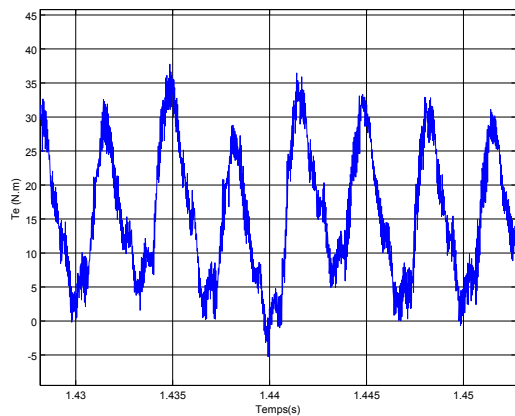


Figure 2.15: Couple Electromagnétique (ZSI)

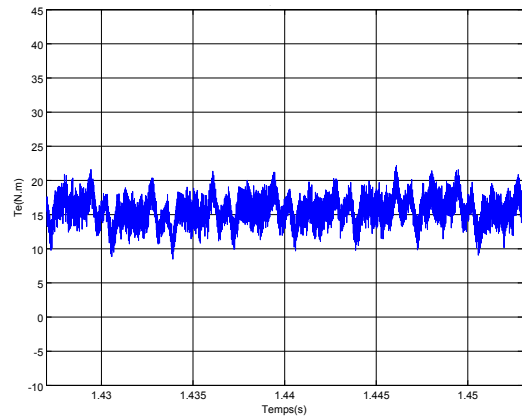


Figure 2.16: Couple électromagnétique (VSI)

2.3 Conclusion

L'alimentation d'une machine asynchrone exige des tensions alternatives les moins polluées possible, hors que la nature pulsative et les ondulations de la tension fournie par le ZSI contient des harmoniques non négligeables ce qui cause des distorsions et influe sur le bon fonctionnement de la machine.

Le régulateur PID conçu afin de régler la tension du bus continu s'est montré inadapté à l'utilisation avec une machine électromagnétique vu la grande variation des courants appelés par la machine. Cette stratégie de commande peut être améliorée en ajoutant une boucle interne pour régler le courant.

Conclusion

Z-source est un réseau d'impédance couplant la source d'énergie avec tout type de convertisseur de puissance. Ce réseau d'impédances possède des caractéristiques qui le distinguent des convertisseurs conventionnels et lui permettant de surmonter les limitations de ces derniers.

L'exploitation de l'état *Shoot-Through* interdit dans les convertisseurs conventionnels assure un boosting "*théoriquement infini*" (Sous contrainte des technologies des composants utilisés), ce qui donne plus de flexibilité dans le dimensionnement de l'étage de commutation. Le rapport cyclique de l'état *Shoot-Through* est inséré dans les états *zero* des MLI classiques, ce qui permet de bénéficier d'un survoltage sans affecter le fonctionnement de l'onduleur, d'où une nouvelle notion de MLI est introduite.

L'utilisation du réseau *Z-Source* permet de remplacer le convertisseur *DC-DC*, ce qui diminue le nombre d'étages de commutation, ainsi le nombre des interrupteurs du *SCP*. Cela signifie une meilleure efficacité, un volume optimisé et un cout de construction réduit.

L'analyse spectrale des tensions de sortie du *ZSI* a montrée que le signal est très pollué, le *ZSI* génère beaucoup d'harmoniques, ce qui cause la distorsion des tensions de sortie. Cela crée un grand problème lors de l'alimentation d'une *MAS* avec un *ZSI*, d'où la nécessité de filtrage.

La stratégie de commande en tension élaborée en [?], a montrée son inefficacité dans le cas d'alimentation de *MAS*, la forte variation des courants appelés par la machine nécessite une boucle interne de réglage en courant afin d'assurer la stabilité de la tension du bus continu et supporter les variations de la charge.

Bibliographie

- [1] Yi Huang, Miaosen Shen, Fang Z. Peng, and Jin Wang, *Z-Source Inverter for Residential Photovoltaic Systems*, IEEE Transaction on power electronics, VOL. 21, NO. 6, NOVEMBRE 2006
- [2] Eric Mon-masson, *Commande rapprochée de convertisseur statique, Volume 2*, Lavoisier 2009.
- [3] Dominique Bareille, *Electrotechnique sciences appliquées en 28 fiches*, Dunod 2011 p.10
- [4] Boushaba Abdelouahab and Sanet Arezki, *Etude et Commande d'un Convertisseur Z-source*, PFE, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2014
- [5] A. Bisker, *Commande d'un Système Photovoltaïque en Mode Isolé et en Mode Connecté au Réseau*, Master, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2012
- [6] Em. Berkouk, *Contribution à la commande des machines monophasés et triphasés*, Doctorat, ENS Cashan 1995.
- [7] Xinping Ding, Zhaoming Qian, Shuitao Yang, Bin Cui, Fangzheng Peng, *A PID Control Strategy for DC-link Boost Voltage in Z-source Inverter*, Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE, vol., no., pp.1145,1148, Feb. 25 2007-March 1 2007.
- [8] H. Rostami, D. A. Khaburi, *Voltage Gain Comparison of Different Control Methods of the Z-Source Inverter*, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
- [9] G. Pinson, *Physique Appliquée*, PINSON, G. Physique Appliquée. CEM-A15/1 à 12, ISBN 2-9520781-0-6, <http://www.syscope.net/elec>, 2004.

[10] E. Chekireb, *La Conversion Continu-Alternatif*, Cours d'électronique de puissance, ENP 2012

[11] *Le moteur asynchrone triphasé*,
Cours version électronique, Académie Caen 2.1

[12] *Machine Asynchrone*,
www.wikipedia.com