الجمهورية الجزائرية الديموقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
National Higher School of Advanced Technologies

Département d'électrotechnique

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

De MASTER

Filière

Electrotechnique

Spécialité

Traction électrique

Thème

Convertisseurs de puissance et route vers le chaos

Réalisé par

Tedjani TIOUA

Soutenu le **30/06/2025**

Membres de Jury

Prénom NOM	Université	Grade	Qualité
M. Belkacem SAGHI	ENSTA	MCB	Président
M. Mahmoud ARBID	ENSTA	MCA	Rapporteur
M. Hammou TEBIBEL	CDER	Directeur de recherche	Co-Rapporteur
M. M'Hamed OUADAH	ENSTA	MCA	Examinateur

2024/2025

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la santé, la patience et la force nécessaires à l'accomplissement de ce travail. Sans Sa volonté, rien n'aurait été possible.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus chaleureux à mes parents, pour leur soutien moral inconditionnel, leurs prières et leur encouragement constant tout au long de mon parcours universitaire. Qu'Allah les protège et les récompense pour tous leurs sacrifices.

Je tiens ensuite à exprimer ma sincère gratitude à Monsieur MAHMOUD ARBID, mon encadrant, pour son accompagnement attentif, ses conseils avisés et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce travail,sans oublier Monsieur HAMMOU TEBIBEL que je remercie pour leur informations précieuses .

Je remercie également Monsieur BELKACEM SAGHI et Monsieur M'HAMED OUADAH, membres du jury, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour leurs remarques pertinentes et enrichissantes.

Mes pensées reconnaissantes vont aussi à mes amis et collègues, pour leur aide, leur soutien, leurs échanges enrichissants et leur présence bienveillante durant cette période de travail.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire

ملخص

يستكشف هذا العمل الظواهر غير الخطية في محولات الطاقة، من خلال الجمع بين نهج نظري (نمذجة باستخدام الأنظمة الديناميكية) والتحقق من النتائج باستخدام المحاكاة العددية. نقدم أولاً البُنى الأساسية، وهي محولات التيار المستمر إلى التيار المستمر (باك، بوست، باك-بوست)، محولات التيار المستمر إلى المتناوب، والمقوّمات من التيار المتناوب إلى المستمر، مع تحليل أوضاع التشغيل الطبيعية وحدود التشغيل تحت قيود واقعية (تقلبات الحمل، والاضطرابات الخارجية). ثم تركز الدراسة على آليات عدم الاستقرار الناتجة عن معلمات حرجة، والتي قد تدفع هذه الأنظمة إلى الانتقال من نظام دوري مستقر إلى سلوك فوضوي.

Résumé

Ce mémoire explore les phénomènes non linéaires dans les convertisseurs de puissance, en combinant une approche théorique (modélisation par systèmes dynamiques) et des validations par simulations numériques. Nous présentons d'abord les architectures clés à savoir les convertisseurs DC-DC (Buck, Boost, Buck-Boost), onduleurs DC-AC et redresseurs AC-DC en analysant leurs modes de fonctionnement normaux et leurs limites opérationnelles sous contraintes réelles (fluctuations de charge, perturbations externes). L'étude se concentre ensuite sur les mécanismes d'instabilité déclenchés par des paramètres critiques, qui peuvent faire basculer ces systèmes d'un régime périodique stable vers un comportement chaotique.

Abstract

This work explores nonlinear phenomena in power converters, combining a theoretical approach (modeling via dynamical systems) with validations through numerical simulations. We first present key architectures, namely DC-DC converters (Buck, Boost, Buck-Boost), DC-AC inverters, and AC-DC rectifiers, analyzing their normal operating modes and operational limits under real-world constraints (load fluctuations, external disturbances). The study then focuses on instability mechanisms triggered by critical parameters that can shift these systems from a stable periodic regime to chaotic behavior.

Table des matières

Table des figures

Abbréviations

1 Convertisseurs de puissance et route vers le chaos **1**

1.1 Introduction 1

1.2 Types de convertisseurs de puissance 2

1.2.1 Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs) 2

1.2.2 Hacheur abaisseur (Buck) 3

1.2.3 Hacheur élévateur (Boost) 5

1.2.4 Hacheur Buck-Boost 6

1.2.5 Convertisseur DC-AC (onduleurs) 7

1.2.6 Convertisseur AC-DC (redresseur) 11

1.3 Systèmes dynamiques non linéaires 13

1.3.1 Systèmes dynamiques continus 13

1.3.2 Systèmes dynamiques discrets 13

1.3.3 Non-linéarité 14

1.3.4 Phénomènes non linéaires 14

1.3.5 Phénomènes non linéaires dans les convertisseurs de puissance à commutation 14

1.3.6 Analyse du fonctionnement du convertisseur boost contrôlé en mode courant 15

1.3.7 Résultats de simulations et interprétation 16

1.4 Conclusion 20

Bibliographie **21**

Table des figures

1.1 Hacheur 2
1.2 Hacheur buck 3
1.3 Hacheur boost 5
1.4 Hacheur buck-boost 7
1.5 Symbole d'un onduleur 8
1.6 symbole et signal d'un onduleur 9
1.7 Symbole d'un redresseur 11
1.8 Redresseur non commandé 11
1.9 Redresseur semi-commandé 12
1.10 Redresseur commandé 12
1.11 Convertisseur boost contrôlé en mode courant 15
1.12 Régime périodique fondamental 17
1.13 Cycle d'ordre 2 17
1.14 Cycle d'ordre 4 18
1.15 Régime chaotique 19

Abréviations

CC : Courant Continu
CA : Courant Alternatif
MCC : Mode de Conduction Continue
MLI / PWM : Modulation de Largeur d'Impulsion / Pulse Width Modulation
Iref : Courant de référence
DC-DC : Convertisseur Continu–Continu
DC-AC : Convertisseur Continu–Alternatif (Onduleur)
AC-DC : Convertisseur Alternatif–Continu (Redresseur)
MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor
S : Commutateur
D : Rapport cyclique (duty cycle)
t : Temps
T : Période de commutation

Chapitre 1

Convertisseurs de puissance et route vers le chaos

1.1 Introduction

Depuis le milieu du XXe siècle, une discipline électrique a émergé à la croisée de l'électrotechnique et de l'électronique : l'électronique de puissance, initialement nommée « électronique des courants forts ». Son développement a été porté par l'avènement de composants semi-conducteurs (diodes, thyristors, transistors ...) , capables de manipuler des tensions et courants élevés. Ces innovations ont propulsé cette technique au rang de pilier essentiel du génie électrique aujourd'hui [1].

Ce chapitre se consacre à la présentation des principaux types de convertisseurs de puissance, notamment les convertisseurs les hacheurs DC-DC, les onduleurs DC-AC et les redresseurs AC-DC. Chaque type a son propre jeu de caractéristiques et se glisse dans des missions variées, de l'alimentation de petits circuits jusqu'au transport d'énergie sur des sites industriels ou des installations vertes.

En plus de ces tâches, la vitesse de commutation des composants crée une dynamique interne qui ne se laisse pas décrire par de simples équations linéaires. Résultat, des oscillations imprévues, voire du chaos, apparaissent parfois. Les étudier aide à cerner les limites de chaque convertisseur et à peaufiner ses règles de commande pour qu'il fonctionne toujours dans son meilleur registre.

Ce chapitre introduit donc, dans un premier temps, les différents types de convertisseurs de puissance ainsi que leurs principes de fonctionnement. Il aborde ensuite la modélisation des systèmes dynamiques non linéaires, en mettant en évidence leur apparition dans les systèmes

à commutation. Une attention particulière sera portée à l'étude du convertisseur Boost en mode courant, dont le comportement chaotique sera illustré à travers une analyse approfondie et des résultats de simulation.

1.2 Types de convertisseurs de puissance

1.2.1 Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs)

Le hacheur, convertisseur statique DC-DC, régule la tension continue via des interrupteurs à semi-conducteurs (transistors, IGBT, etc.). Ces composants, commutant à haute fréquence, permettent de moduler l'énergie transmise à la charge. Son équivalent en AC est le transformateur, mais son domaine d'application couvre les systèmes électriques où la source et la charge sont continues (véhicules électriques, réseaux photovoltaïques, etc.) [2].

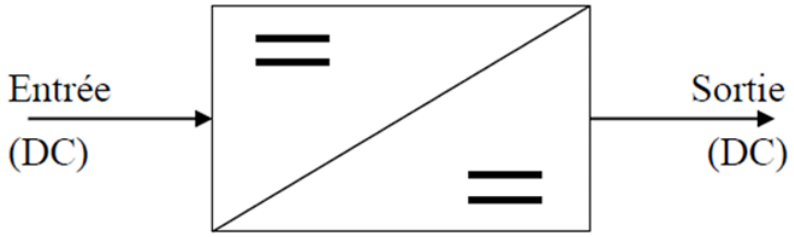


FIGURE 1.1 – Hacheur

1.2.1.1 Domaine d'utilisation

Les hacheurs trouvent l'un de leurs principaux débouchés dans la régulation de vitesse des moteurs à courant continu (MCC). Ils équipent ainsi une grande partie des véhicules à traction moyenne, comme les métros, et ont même été intégrés aux premiers TGV associés à des moteurs à courant continu . Au-delà des transports, ces dispositifs sont essentiels dans les systèmes d'énergie renouvelable (éolien, solaire), où ils stabilisent une tension d'entrée naturellement variable. Ils sont également employés pour piloter avec précision les moteurs pas à pas, garantissant une alimentation adaptée à leurs besoins spécifiques [2].

1.2.1.2 Types des hacheurs

Dans cette section, nous considérons les convertisseurs unidirectionnels en termes de courant et de tension. Cela signifie que l'énergie ne circulera que dans un sens au sein du convertisseur. Cela signifie que :

- Les sources de tension utilisées sont non réversibles et unidirectionnelles en courant.
- Les sources de courant sont également non réversibles et unidirectionnelles en tension.

Ainsi, nous nous concentrons sur les convertisseurs DC-DC les plus basiques, qui peuvent être catégorisés en trois types principaux :

1. Hacheur Abaisseur (Buck) : diminue la tension d'entrée.
2. Hacheur Élèvateur (Boost) : augmente la tension d'entrée.
3. Hacheur Abaisseur-Élévateur (Buck-Boost) : peut diminuer ou augmenter la tension selon les besoins.

1.2.2 Hacheur abaisseur (Buck)

Le convertisseur Buck, basé sur une topologie à découpage, opère selon un cycle de rapport cyclique ajustable pour réguler la tension de sortie. Pendant la phase de conduction (interrupteur fermé), l'énergie est stockée dans l'inductance L. Lors de la phase de blocage, cette énergie est transférée à la charge via la diode de roue libre, tandis que le condensateur C lisse les variations haute fréquence. Cette architecture, largement utilisée dans les alimentations embarquées (véhicules électriques, drones) et les systèmes photovoltaïques, optimise le rendement énergétique tout en réduisant les pertes par échauffement [3].

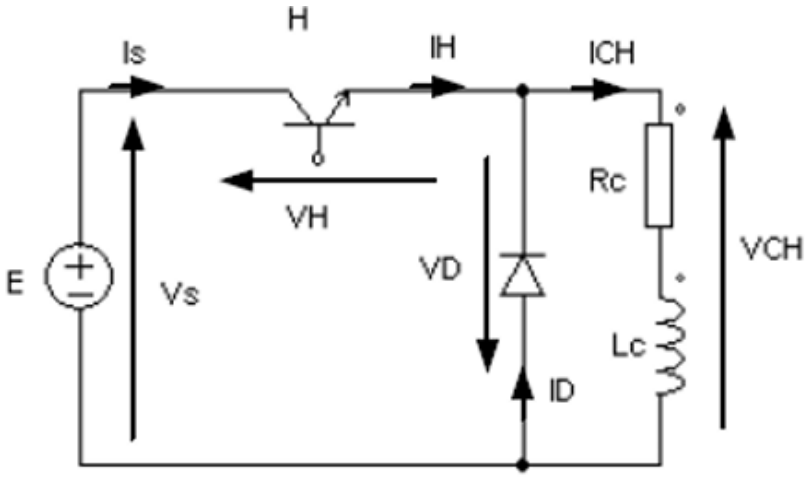


FIGURE 1.2 – Hacheur buck

1.2.2.1 Principe de fonctionnement

Le cycle de fonctionnement, dont la période de hachage est T (avec $T = 1/f$), se compose de deux phases :

1. Première phase : Le transistor est en conduction, tandis que la diode, polarisée en inverse, est bloquée.Cette phase s'étend de 0 à αT avec $0<\alpha<1$, où α représente le rapport cyclique. Durant cette période, la diode agit comme un interrupteur ouvert et le circuit est régi par l'équation suivante :

$$E = R_c I_c + L_c \frac{dI_c}{dt}$$
$$I_c = I_h = \frac{E}{R_c} + \left(I_m - \frac{E}{R_c}\right) e^{\frac{-t}{\tau}} \tag{1.1}$$

Avec $\tau = \frac{E}{R_c}$.
A $t = \alpha T$, il vient :

$$I_m = \frac{E}{R_c} + \left(I_m - \frac{E}{R_c}\right) e^{\frac{-\alpha T}{\tau}} \tag{1.2}$$

Lors de la seconde phase, on bloque le transistor et la diode devient passante. Un telle phase dure de αT à T, l'équation différentielle devient :

$$R_c T_c + L_c \frac{dI_c}{dt} = 0 \tag{1.3}$$

L'intégration de cette équation conduit à :

$$I_c = I_D = I_M \, e^{-(\frac{t-\alpha t}{\tau})} \tag{1.4}$$

A $t = T$:

$$I_m = I_M \, e^{-(\frac{T-\alpha T}{\tau})} \tag{1.5}$$

D'après les relations (1.2) et (1.4), il vient :

$$I_m = \frac{E}{R_c} \frac{e^{-(\frac{T-\alpha T}{\tau})} - e^{\frac{-T}{\tau}}}{1 - e^{\frac{-T}{\tau}}} = -\frac{E}{R_c} \frac{1 - e^{\frac{-\alpha T}{\tau}}}{1 - e^{\frac{-T}{\tau}}} e^{\frac{-T}{\tau}}$$

D'où :

$$I_M = I_m \, e^{(\frac{T-\alpha T}{\tau})} \tag{1.6}$$

La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_c = R_c I_c + L_c \frac{dI_c}{dt} \tag{1.7}$$

L'intégration des deux membres sur une période complète T conduit à l'expression suivante :

$$\int_0^T V_c \cdot dt = R_c \int_0^T I_c \cdot dt + L_c \int_{I_m}^{I_M} dI_c \tag{1.8}$$

On déduit la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge [4] :

$$V_{\text{cmoy}} = \alpha.E \tag{1.9}$$

1.2.3 Hacheur élévateur (Boost)

Ce convertisseur est désigné sous le nom de hacheur parallèle, car le composant semi-conducteur (commandé pour s'ouvrir et se fermer) est placé en parallèle avec la source d'entrée. Il est aussi qualifié de hacheur survolteur ou élévateur de tension, car sa tension de sortie dépasse toujours la tension moyenne d'entrée. Cette caractéristique lui permet d'élever le niveau de tension, d'où son appellation courante de convertisseur boost (ou step-up en anglais).

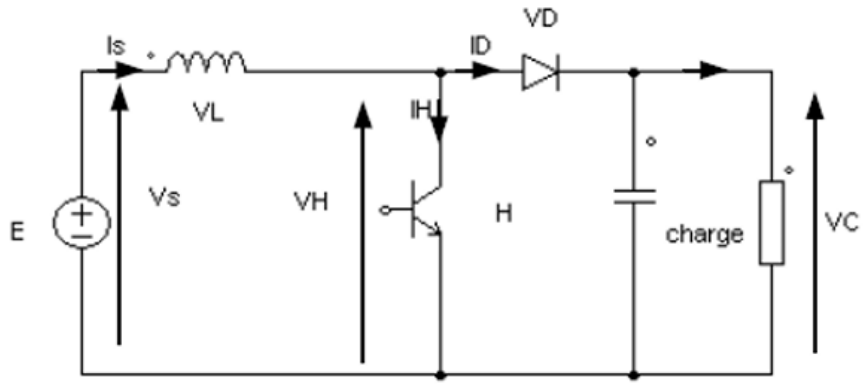


FIGURE 1.3 – Hacheur boost

1.2.3.1 Principe de fonctionnement

Pendant la première phase du cycle (de 0 à αT), l'interrupteur est fermé : la source charge l'inductance, qui stocke de l'énergie. La diode, bloquée, isole la charge de la source, et le condensateur fournit l'énergie nécessaire à la charge. Cette étape prépare l'élévation de tension lors de la phase suivante.

$$E = L \cdot \frac{dI_s}{dt},$$
$$V_H = 0; I_s = I_H; I_D = 0.$$

Le courant augmente linéairement, passant d'une valeur minimale I_M. Pour $t = \theta$:

$$I_s = \frac{E.t}{L} + I_M. \tag{1.10}$$

Sinon à $t = \alpha \cdot T$:

$$I_M = \frac{E \cdot \alpha \cdot T}{L} + I_m. \tag{1.11}$$

Au cours de la deuxième phase du cycle, jusqu'à l'instant T, l'interrupteur piloté est ouvert, ce qui rend la diode conductrice. Cette transition permet alors la connexion entre la source d'alimentation et la charge.
On a :

$$V_H = E_c; \quad V_D = 0$$
$$I_s = 0; \quad I_s = I_D;$$

L'équation de fonctionnement est [4] :

$$V_{\text{cmoy}} = E - L \cdot \frac{dI_s}{dt} \tag{1.12}$$

Soit :

$$(V_{\text{cmoy}} - E)\, dt = -L.dI_s$$

D'où :

$$(V_{\text{cmoy}} - E)\,(T - \alpha.T) = -L\,(I_m - I_M) \tag{1.13}$$

D'après les relations (1.12) et (1.13), il vient :

$$(V_{\text{cmoy}} - E)\,(T - \alpha.T) = E.\alpha.T$$

D'où :

$$V_{\text{cmoy}} = \frac{E}{(1-\alpha)} \tag{1.14}$$

1.2.4 Hacheur Buck-Boost

Un convertisseur Buck-Boost est un circuit à découpage électronique permettant de transformer une tension continue d'entrée en une tension continue de sortie, ajustable (inférieure ou supérieure à la tension d'entrée), mais de polarité opposée [5].

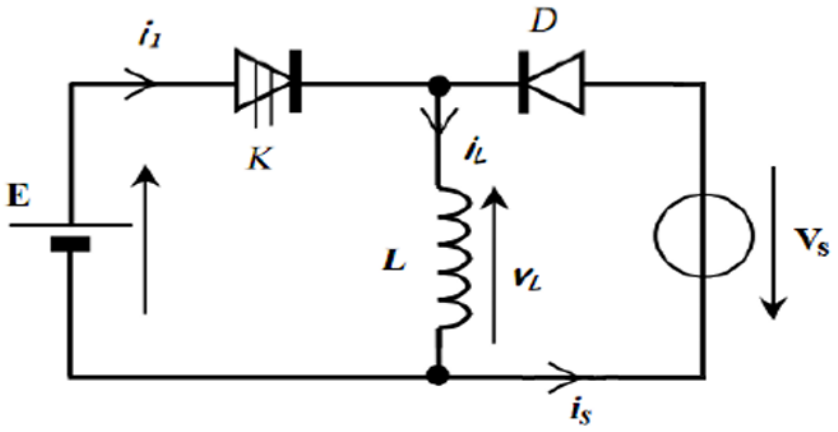


FIGURE 1.4 – Hacheur buck-boost

1.2.4.1 principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configura tions suivant l'état de l'interrupteur :

- Dans l'état passant, l'interrupteur est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.

-Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

La tension de sortie moyenne est donnée par :

$$V_{out} = -V_{in} \times \frac{D}{1-D} \tag{1.15}$$

où D est le rapport cyclique ($0 < D < 1$). Cela confirme la capacité d'ajustement de la tension et l'inversion de polarité [6].

1.2.5 Convertisseur DC-AC (onduleurs)

Un onduleur est un convertisseur statique qui transforme une tension continue (DC) en tension alternative (AC) réglable en fréquence et amplitude, via des semi-conducteurs (transistors, IGBT, thyristors) commandés par des séquences de commutation (PWM, créneaux). Il génère un signal alternatif à valeur moyenne nulle, reproduisant une forme d'onde sinusoïdale ou modifiée, adaptée aux besoins des charges (moteurs, réseaux). Fonctionnant comme interface entre une source DC (batteries, panneaux solaires) et des charges AC, il régule tension, fréquence et harmoniques pour assurer compatibilité et stabilité. Ses applications

incluent énergies renouvelables, ASI, véhicules électriques et systèmes industriels. Ses performances reposent sur l'efficacité des commutations, la précision de modulation et le respect des normes (THD, rendement) [7, 8].

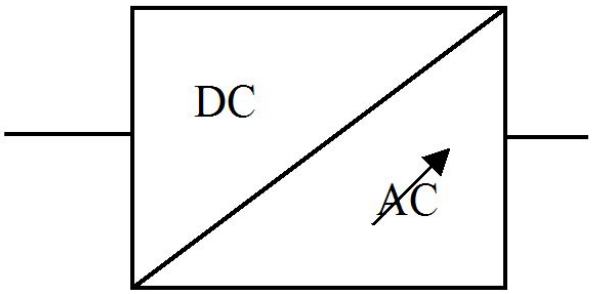


FIGURE 1.5 – Symbole d'un onduleur

.

1.2.5.1 Classification des onduleurs

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en générale classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs. Principalement, on peut distinguer deux grandes familles : Onduleur non autonome et onduleur autonome [9].

- Onduleur non autonome : Ce système utilise des composants commandés à l'ouverture et à la fermeture, fonctionnant à fréquence variable. Les instants de commutation sont déterminés par des circuits externes associés à la charge, imposant un contrôle précis du timing.
- Onduleur autonome : Contrairement au modèle non autonome, cet onduleur emploie des thyristors uniquement commandés à l'amorçage (fermeture). La commutation est ici déclenchée par la charge elle-même, sans nécessiter d'intervention externe. Son application phare concerne les variateurs de vitesse pour moteurs de très haute puissance, où les thyristors restent les seuls composants disponibles capables de supporter des courants élevés.

Les onduleurs sont aussi classés selon la nature de la source continue :

- Onduleur source de tension : La source continue fournit une tension fixe, tandis que la charge AC détermine un courant sinusoïdal.

— Onduleur source de courant : La source continue délivre un courant constant, et la charge AC impose une tension sinusoïdale.

1.2.5.2 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Un onduleur convertit une tension continue en une tension alternative grâce à des composants d'électronique de commutation. Cette conversion repose principalement sur deux approches distinctes :

1. Commutation temporelle avec interrupteurs de base, une méthode utilise des paires d'interrupteurs pour connecter ou isoler la source continue à la sortie, en ajustant la fréquence et la durée des connexions. Elle donne lieu à des techniques de modulation de largeur d'impulsion (PWM), où le contrôle précis des impulsions permet de façonner l'onde alternative souhaitée.

2. Contrôle de l'amplitude :

Régulation continue : L'amplitude de la tension de sortie est ajustée via une source réglable, nécessitant un étage de conversion supplémentaire (ex : transformateur ou circuit DC-DC).

3. Régulation discrète : Plusieurs sources de tension sont combinées (ex. : par commutation de cellules ou redresseurs multi-niveaux) pour générer des niveaux d'amplitude prédéfinis. Ces deux stratégies permettent d'adapter l'onduleur à des applications variées, en fonction des exigences de précision, de complexité et de coût [10]. .

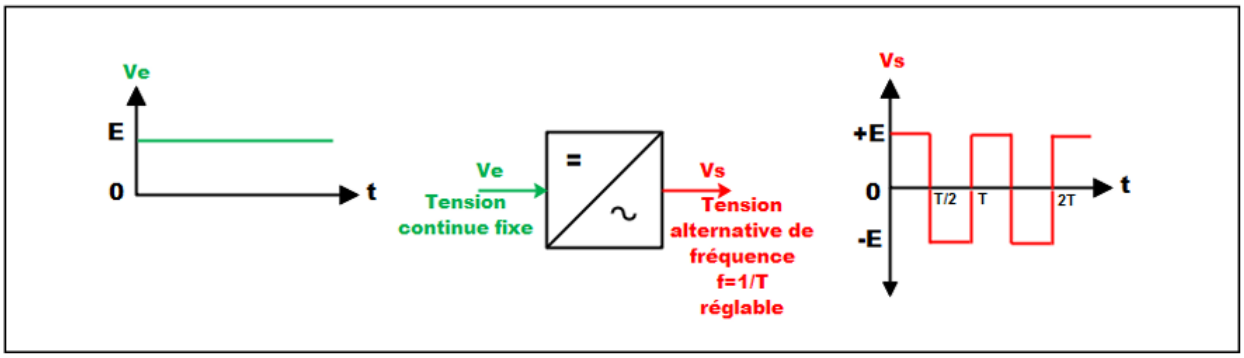


FIGURE 1.6 – symbole et signal d'un onduleur

1.2.5.3 Techniques de commande des onduleurs

1. Modulation haute fréquence :

Un onduleur transforme une tension continue en tension alternative grâce à des composants

électroniques de commutation. Cette conversion repose principalement sur deux méthodes : la commutation temporelle, utilisant des interrupteurs pour générer des impulsions contrôlées (comme la modulation PWM), et le réglage de l'amplitude, ajustant la tension via des sources réglables ou multiples. Pour améliorer la qualité du signal, les techniques de modulation haute fréquence (hystérésis, PWM, injection d'harmoniques, PWM vectorielle) déplacent les harmoniques indésirables vers des fréquences plus élevées, facilitant leur filtrage. Ces approches permettent de maîtriser à la fois la tension alternative de base et son spectre basse fréquence, optimisant ainsi la précision et la stabilité de l'onduleur [10, 11].

2. Modulation de largeur d'impulsion :

Cette technique, utilisée pour commander les convertisseurs statiques (comme les onduleurs), permet de réguler l'énergie transférée entre une source (tension continue fixe) et une charge (ex : moteur électrique). En ajustant la durée et la séquence d'activation des interrupteurs (semi-conducteurs), la MLI génère des tensions ou courants variables aux bornes de la charge, malgré une source à fréquence et tension constantes. Essentielle pour contrôler la vitesse des machines ou optimiser les performances (rendement, pertes, bruit), elle offre une gestion précise de la puissance, adaptée aux applications telles que les entraînements motorisés ou les systèmes énergétiques [10, 11].

3. Modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle :

Cette technique consiste à comparer une tension de référence basse fréquence (signal modulant) avec une onde porteuse triangulaire haute fréquence. Les commutations des interrupteurs sont déclenchées aux points d'intersection entre ces deux signaux, avec une fréquence de commutation définie par la porteuse . Dans un système triphasé, trois signaux sinusoïdaux de référence, décalés de $2\pi/3$ et de même fréquence f, sont utilisés. Bien que la tension de sortie de l'onduleur ne soit pas parfaitement sinusoïdale (présence d'harmoniques induisant des pertes et des perturbations), la MLI permet de limiter ces défauts. Ses principaux avantages incluent :

— Contrôle de la fréquence de sortie pour adapter la vitesse des machines électriques.
— Réduction des harmoniques indésirables, améliorant l'efficacité énergétique et réduisant le bruit acoustique.

Cette méthode optimise ainsi la qualité de l'énergie fournie à la charge, tout en simplifiant la gestion des convertisseurs statiques [10, 11].

1.2.6 Convertisseur AC-DC (redresseur)

C'est un convertisseur statique qui transforme une tension alternative (provenant par exemple d'un générateur) en tension continue, afin d'alimenter une charge électrique. Il assure ainsi l'adaptation entre une source AC et une charge nécessitant un courant DC [12].

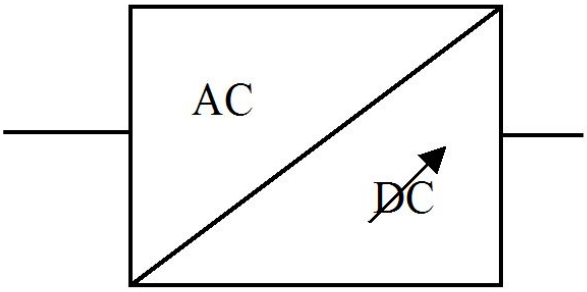


FIGURE 1.7 – Symbole d'un redresseur

1.2.6.1 Classification des redresseurs

Les redresseurs se divisent en trois catégories principales [12] :

1. Redresseurs non commandés : Constitués de diodes, ils sont utilisés lorsque la tension de sortie ne nécessite pas de réglage. Simples et robustes, ils convertissent une tension alternative en tension continue fixe, sans possibilité d'ajuster son amplitude.

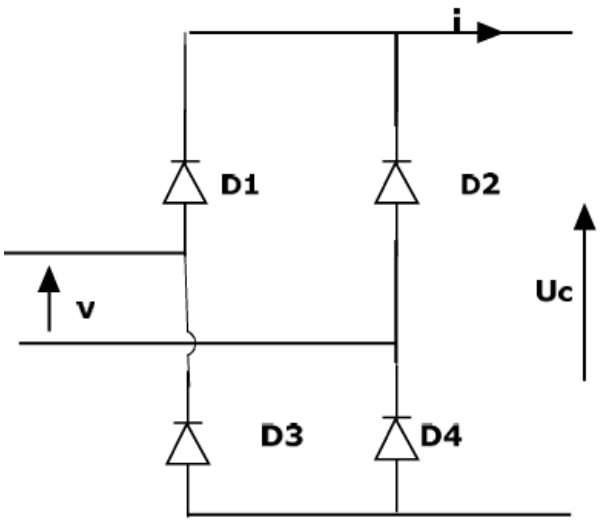


FIGURE 1.8 – Redresseur non commandé

2. Redresseurs semi-commandés : Ils combinent des thyristors (pour le contrôle) et des diodes (pour bloquer l'inversion de tension), permettant de régler la tension moyenne de sortie tout en évitant une polarisation négative aux bornes de la charge. Avec les redresseurs non commandés, ils constituent les convertisseurs unidirectionnels, où l'énergie circule exclusivement de la source alternative (AC) vers la charge continue (DC), sans possibilité de transfert inverse.

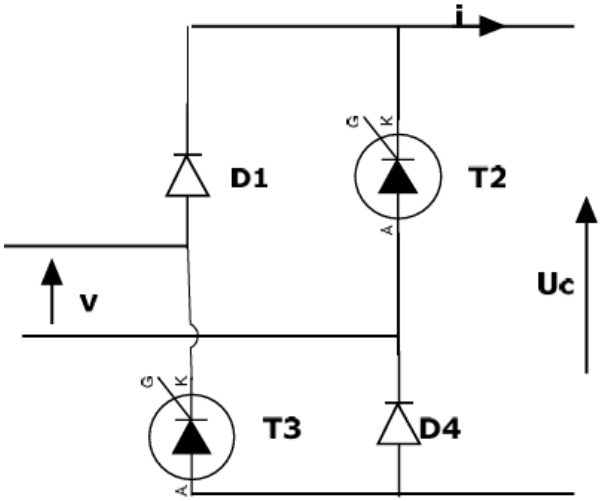


FIGURE 1.9 – Redresseur semi-commandé

3. Redresseurs entièrement commandés : Composés uniquement de thyristors, ils fonctionnent comme des convertisseurs bidirectionnels, autorisant une circulation de la puissance dans les deux sens (source alternative → charge continue, ou charge continue → source alternative). Cette capacité permet un contrôle complet de la conversion d'énergie, adapté aux systèmes nécessitant une réversibilité (ex : récupération d'énergie).

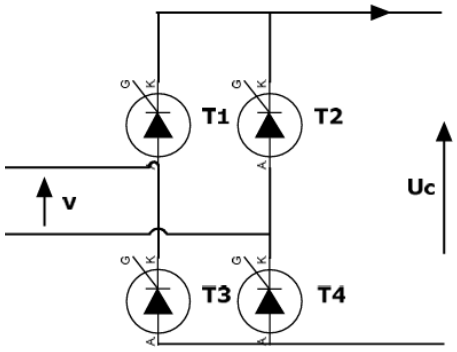


FIGURE 1.10 – Redresseur commandé

1.3 Systèmes dynamiques non linéaires

La dynamique est un processus évolutif dans le temps, l'ensemble des équations décrivant cette dynamique est appelé un système dynamique. On peut représenter les systèmes dynamiques mathématiquement par un ensemble d'équations différentielles ou aux différences [13].

Les systèmes dynamiques sont classés en deux catégories :

1.3.1 Systèmes dynamiques continus

Considérons $X \subseteq R^n$ comme l'espace d'état continu et $Q = \{q_1, \ldots, q_N\}$ un ensemble fini d'états discrets. L'espace X détermine les valeurs admissibles des variables d'état continues associées à chaque configuration discrète $q \in Q$, où q représente l'état (on ou off) de l'ensemble des commutateurs du circuit [14].

Ces réseaux composés de sources idéales, d'éléments linéaires et de commutateurs idéaux, présentent une dynamique continue spécifique à chaque configuration $q \in Q$. Ainsi, pour chaque état discret q, le comportement du système peut être décrit par une équation différentielle de la forme :

$$\dot{x}(t) = f_q(x(t)) = A_q x(t) + B_q, \quad t > 0, \tag{1.16}$$

où $x(t) \in \mathcal{X}$, $A_q \in R^{n\times n}$ et $B_q \in R^n$.

1.3.2 Systèmes dynamiques discrets

On modélise parfois les systèmes avec un temps "par bonds" plutôt qu'en continu. Cela arrive pour deux raisons :

Soit le système évolue naturellement par étapes (comme une chaîne de production qui avance par cycles).

Soit on doit simplifier un système complexe pour le simuler sur ordinateur. Dans les deux cas, on observe l'état du système à des moments régulièrement espacés.

Le choix de cet intervalle de temps est décisif : il influence directement la précision du modèle. Pour représenter ce temps discret, on utilise un simple compteur entier k. Dans ce cas où le temps est discret le système dynamique est présenter par une application (fonction itérative) [15].

$$x(k+1) = g(x(k), k), \text{ où } k \in \ Z \tag{1.17}$$

1.3.3 Non-linéarité

Un système chaotique est un système dynamique non linéaire. Un système linéaire ne peut pas être chaotique [16].

1.3.4 Phénomènes non linéaires

Un système dynamique peut manifester un comportement entièrement chaotique, rendant son analyse particulièrement complexe [16]. Ce chaos apparaît généralement dans un circuit électrique lorsqu'au moins un élément non-linéaire est présent, incluant :

1. Les systèmes décrits par des équations différentielles non-linéaires (comme le circuit de Lorenz).

2. Les composants à caractéristique non-linéaire ou linéaire par morceaux (telle la résistance du circuit de Chua).

3. Les dispositifs de commutation actifs (transistors, MOSFET) basculant entre états bloqué/conducteur via un signal de commande, ou passifs (diodes) avec une relation $v = f(i)$ fortement non-linéaire.

4. Les circuits à rétroaction intégrant des blocs non-linéaires tels que comparateurs, modulateurs PWM, multiplieurs ou circuits monostables [13].

1.3.5 Phénomènes non linéaires dans les convertisseurs de puissance à commutation

Notre attention s'est portée sur les convertisseurs DC-DC, qui sont essentiels pour la conversion de tension en mode de commutation. Bien que ces circuits soient hautement non linéaires, ils présentent un potentiel chaotique basé sur leurs paramètres de conception. Lors du développement de convertisseurs de puissance fiables, il est important d'anticiper l'émergence de comportements chaotiques. Ce type d'analyse aide non seulement à comprendre et à maîtriser de tels phénomènes pour les neutraliser en utilisant des stratégies de contrôle du chaos, mais permet également de les exploiter dans certains contextes. Ces contextes incluent la transmission de données sécurisée ou la modulation de signal pour des agressions électromagnétiques où la génération contrôlée de chaos est avantageuse. Par conséquent, que ce soit pour éliminer le chaos par le contrôle ou pour le créer délibérément, l'étude de ces dynamiques devient nécessaire [14].

1.3.6 Analyse du fonctionnement du convertisseur boost contrôlé en mode courant

Le convertisseur boost en mode courant (boucle ouverte) comprend deux parties principales : le circuit convertisseur et l'unité de contrôle (Fig. (1.11)). Le convertisseur, un circuit de deuxième ordre, intègre une inductance, une capacité, une diode, un commutateur (S) et une résistance en parallèle avec la capacité. L'unité de contrôle compare en temps réel le courant d'inductance (i_L) au courant de référence I_{ref}. Au début de chaque cycle ($t = nT$), le commutateur S est fermé, permettant à (iL) d'augmenter. Lorsque (i_L) atteint (I_{ref}), la bascule RS de l'unité génère un signal pour ouvrir S, qui reste ouvert jusqu'au prochain cycle, assurant ainsi un fonctionnement cyclique et automatique [14].

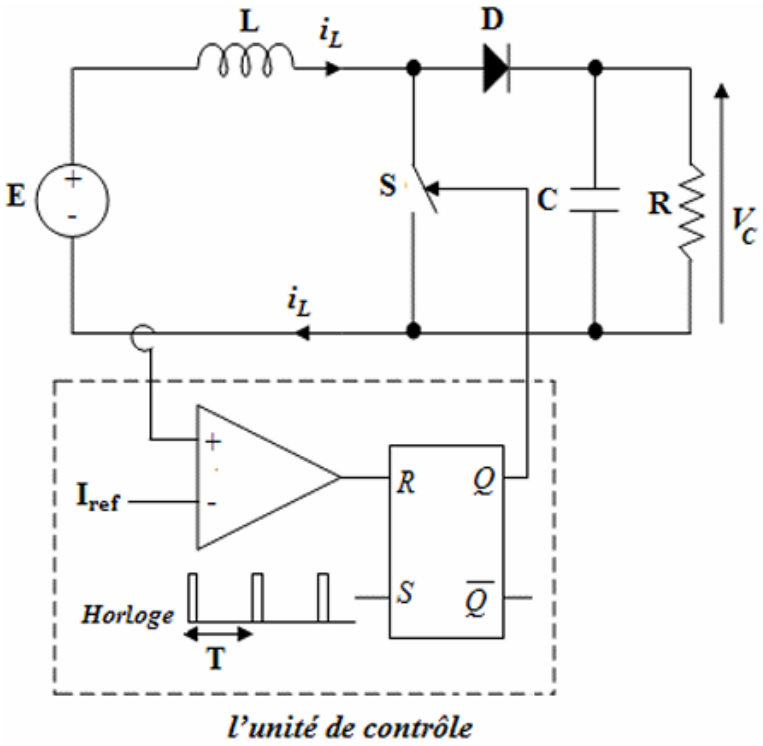


FIGURE 1.11 – Convertisseur boost contrôlé en mode courant

1.3.6.1 Équations d'état du convertisseur boost contrôlé en mode courant

Le convertisseur boost en mode courant (boucle ouverte) est un système dynamique d'ordre 2 fonctionnant en mode de conduction continue (MCC),où le courant dans l'inductance reste strictement positif.Son fonctionnement cyclique repose sur deux états de commutation [17, 14] :

1. Commutateur fermé (intervalle $nT \leq t < (n+d)T$) : Le courant (i_L) croît sous l'effet de la tension d'entrée,tandis que la tension du condensateur (v_C) décroît exponentiellement à travers la charge R.

2. Commutateur ouvert (intervalle $(n+d)T \leq t < (n+1)T$) : Le courant (i_L) diminue en transférant son énergie au condensateur,et (v_C) augmente.

L'équation générale qui régit le fonctionnement du convertisseur boost est :

$$\dot{x}(t) = f_q(x(t)) = A_q x(t) + B_q, \text{ pour } q \in Q = [1, 2].$$

Pour $q = 1$ et $q = 2$, on obtient le système à deux équations différentielles suivant :

$$\begin{cases} S_{on} : \dot{x} = f_1(x) = A_1 x + B_1 \\ S_{off} : \dot{x} = f_2(x) = A_2 x + B_2 \end{cases} \tag{1.18}$$

Avec $\{x = [v_C, i_L]^T$ le vecteur de variables d'état, et A ,B sont des matrices données par :

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-1}{RC} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E}{L} \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{-1}{RC} & \frac{1}{C} \\ \frac{-1}{L} & 0 \end{bmatrix}$$

Les sections de commutation des systèmes S_{on} etS_{off} sont données par [17] :

$$\begin{cases} \beta_{\text{on,off}} = \left\{(x,t) \in R^2 \times R : i_L - I_{ref} = 0\right\} \\ \beta_{\text{off,on}} = \left\{(x,t) \in R^2 \times R : t - nT = 0\right\} \end{cases} \tag{1.19}$$

Le convertisseur boost en mode de conduction continue (MCC) commute entre deux états dynamiques Son (interrupteur fermé) et $Soff$ (interrupteur ouvert) lorsque les seuils de commutation $\beta_{\text{off , on}}$ $et\beta_{\text{on,off}}$ sont atteints.

1.3.7 Résultats de simulations et interprétation

Les simulations réalisées sous MATLAB fournissent des résultats dans le domaine temporel et dans le plan tension-courant $[v_C, i_L]$. La figure (1.12) (sous-figure centrale) illustre la forme d'onde périodique du courant (i_L), caractérisée par une période T = 1,1 (ms) et une amplitude oscillant entre 0,4 (A) et 0,7 (A). La trajectoire du système S1 est matérialisée par une courbe bleue, tandis que celle du système S2 est représentée en rouge. Le premier

événement notable se produit lorsque (i_L) atteint 0,7 (A) à l'instant $t_{0.7\,\mathrm{A}} = 49$ (ms). Le second événement correspond au retour de (i_L) à sa valeur minimale 0,4 (A) à $t_{0.4\,\mathrm{A}} = 49.1$ (ms), marquant la fin d'un cycle.

Les figures (1.13) ,(1.14) et (1.15) mettent en évidence des régimes dynamiques distincts : un cycle d'ordre 2, un cycle d'ordre 4, et un comportement chaotique, respectivement .

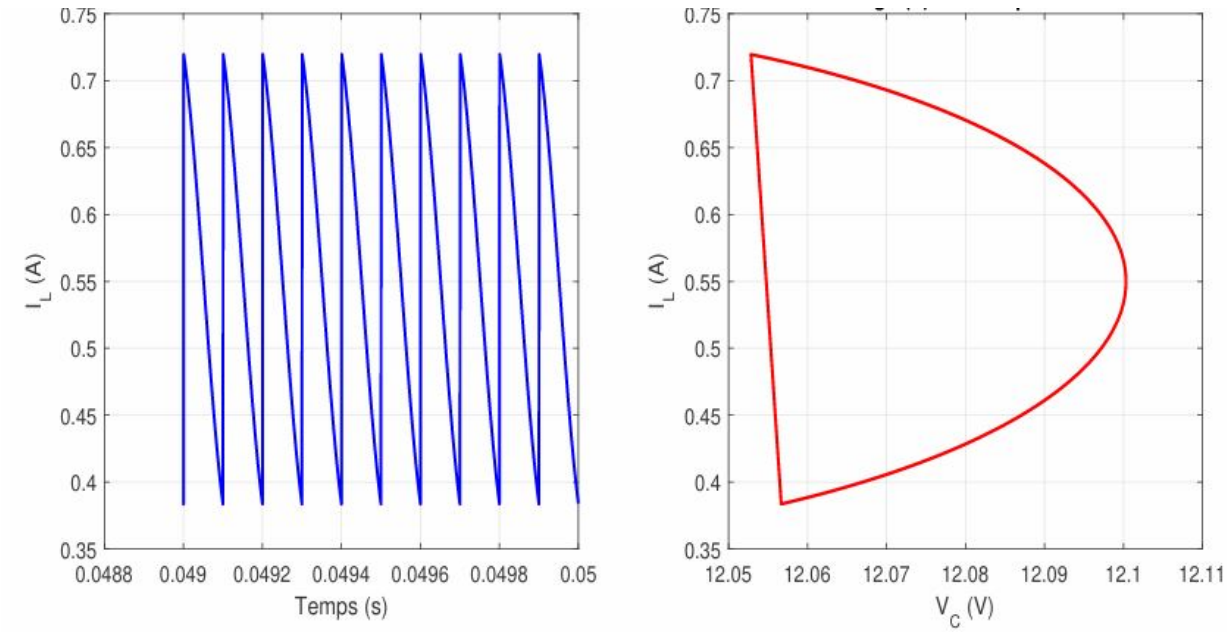


FIGURE 1.12 – Régime périodique fondamental

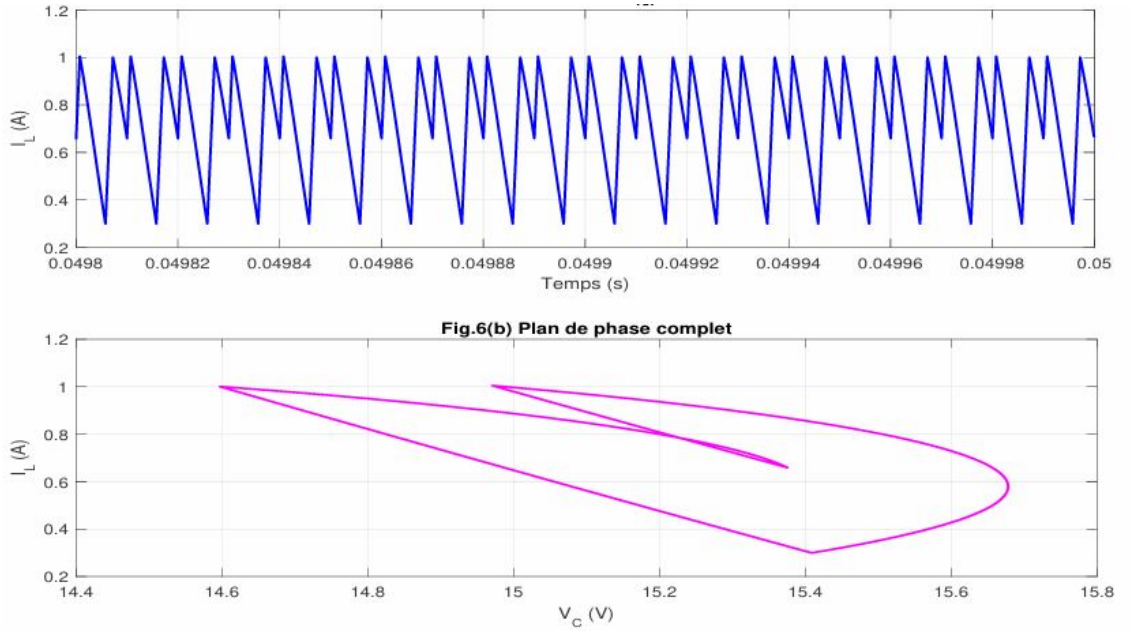


FIGURE 1.13 – Cycle d'ordre 2

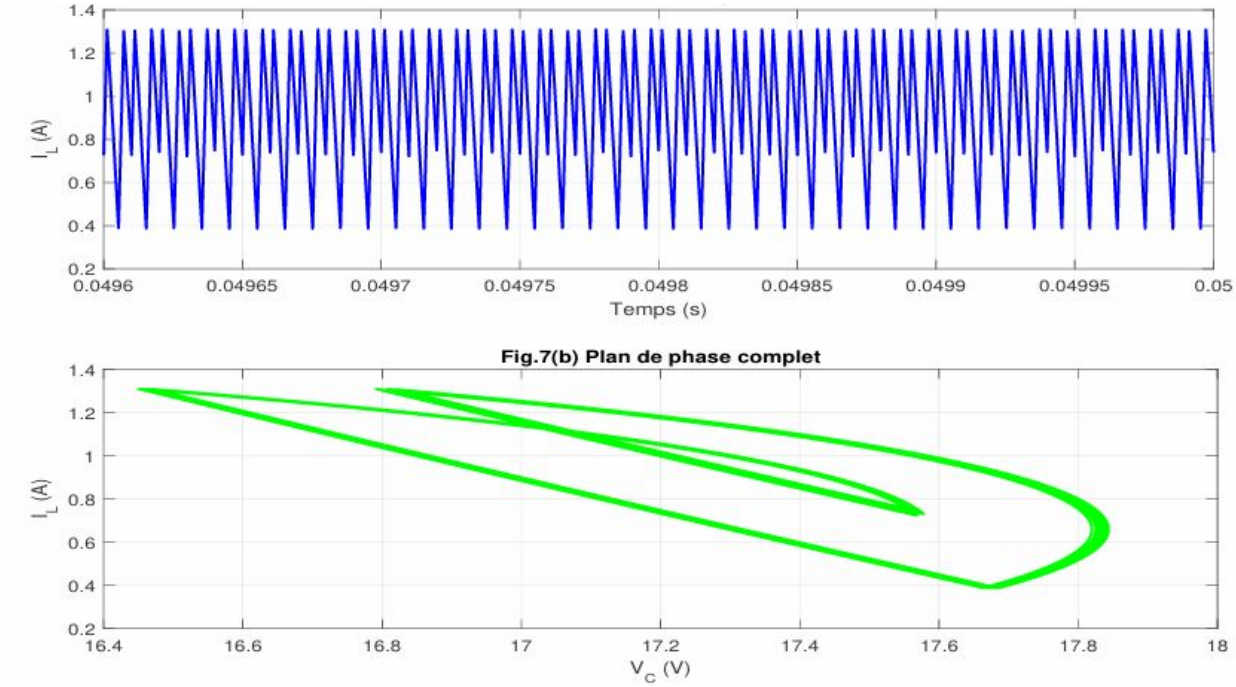


FIGURE 1.14 – Cycle d'ordre 4

Pour la figure (1.12) :

- Courant (i_L) : Oscille entre 0,4 (A) et 0,7 (A) avec une période de 100 µs, montrant une croissance linéaire (commutateur fermé S1) et une décroissance (ouvert S2).
- Plan de phase $[v_C, i_L]$: Boucle fermée périodique, typique d'un régime stable, illustrant l'alternance dynamique entre les deux systèmes de commutation.
- Régime global : Fonctionnement périodique confirmé pour I_{ref}=0,7 (A), avec une dynamique cohérente temporellement et en phase.

Le convertisseur Boost est stable, caractérisé par des transitions précises et une trajectoire cyclique dans le plan de phase.

La figure (1.13) :

- Courant (i_L) : Oscille entre deux niveaux d'amplitude, révélant un cycle d'ordre 2 (double motif périodique), alternant des phases linéaires selon l'état des commutateurs S1 et S2.
- Plan de phase $[v_C, i_L]$: Trajectoire fermée à deux boucles imbriquées, caractéristique d'un régime d'ordre 2, illustrant une dynamique plus complexe que le régime fondamental mais restant périodique.
- Régime global : Transition vers un cycle d'ordre 2 pour I_{ref}=1 (A), où la dynamique

du convertisseur Boost combine périodicité et organisation multi-échelle.

Le comportement périodique est stable mais structuré en sous-cycles, confirmant une complexification contrôlée du système, typique des régimes d'ordre supérieur.

La figure (1.14) :

— Courant (i_L) : Oscille entre quatre niveaux d'amplitude, marquant un cycle d'ordre 4, avec une alternance de motifs répétitifs correspondant à chaque sous-période.

— Plan de phase $[v_C, i_L]$: Trajectoire fermée à quatre boucles imbriquées, caractéristique d'un régime d'ordre 4, illustrant une complexification accrue tout en gardant une périodicité organisée.

— Régime global : Transition vers un cycle d'ordre 4 pour I_{ref}=1,3(A), avec une dynamique multi-échelle mais structurée et périodique.

Le comportement est stable malgré la complexité accrue, confirmant la capacité du convertisseur Boost à maintenir une périodicité contrôlée dans des régimes d'ordre élevé.

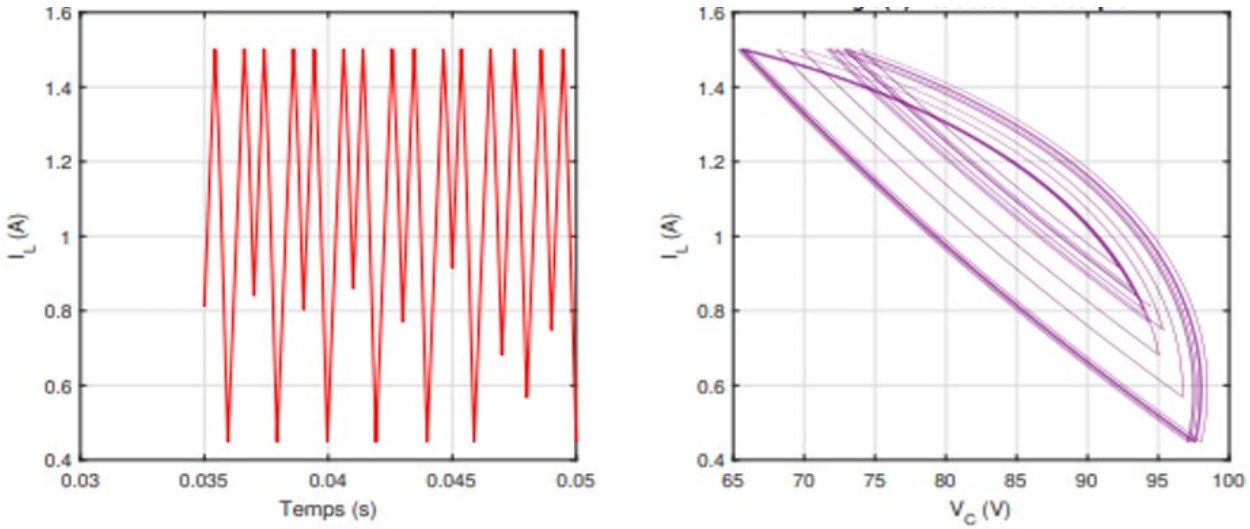


FIGURE 1.15 – Régime chaotique

La figure (1.15) :

— Courant (i_L) : Dynamique erratique dans l'inductance, sans motif périodique identifiable, révélant une sensibilité aux conditions initiales propre aux systèmes chaotiques.

— Plan de phase $[v_C, i_L]$: Trajectoire désordonnée et non fermée, remplissant une zone du plan de manière anarchique, confirmant l'absence de structure périodique.

— Régime global : Émergence d'un régime chaotique pour I_{ref}=1,5(A), marqué par une dynamique imprévisible et une perte de périodicité.

interprétation générale : La variation du courant de référence I_{ref} agit comme un paramètre de contrôle qui pousse le système Boost au-delà de sa stabilité périodique. Lorsque I_{ref} devient trop élevé, cela déclenche une cascade de bifurcations vers un comportement chaotique en raison de la nature non linéaire et commutée du système.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les convertisseurs de puissance qui jouent un rôle fondamental dans les systèmes électroniques modernes, en permettant l'adaptation efficace de la tension et du courant électrique selon les besoins des charges. Nous avons décrit les principaux types de convertisseurs : les hacheurs DC-DC (Buck, Boost, Buck-Boost), les onduleurs DC-AC et les redresseurs AC-DC, en soulignant leur principe de fonctionnement et leurs domaines d'application.

La seconde partie du chapitre a été consacrée à l'étude des systèmes dynamiques non linéaires, dans le but de mieux comprendre le comportement complexe de certains convertisseurs à découpage. Nous avons mis en évidence l'apparition de phénomènes non linéaires.

Une attention particulière a été portée à l'analyse du convertisseur Boost en mode courant, un cas représentatif illustrant le passage vers des dynamiques instables sous certaines conditions.

Bibliographie

[1] Guy Séguier, Francis Labrique, and Philippe Delarue. *Électronique de puissance : Structures, commandes, applications*. Dunod, Paris, France, 5 edition, 2021.

[2] Ben Hamida Nasri. Analyse et commande d'un hacheur buck boost. Mémoire de master, Université de Biskra, June 2018.

[3] Achour Abderraouf. Etude et simulation d'un hacheur (buck-boost). Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, June 2021.

[4] Abdellah Berrabah Imad Eddine Azzi Mohammed Anouar. Etude sur l'impact des perturbations électromagnétiques d'un réseau dc/dc à base des hacheurs buck dans un environnement électrique. Mémoire de master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, June 2020.

[5] Derradji Belloum Anes Bacha Marouane. Étude et réalisation des convertisseurs dc-dc de type boost et buck. Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, June 2022.

[6] Bouradi Sarah Khattab Khadidja. Contribution à la commande des convertisseurs dc-dc boost et buck. Mémoire de master, UniversitÉ Ibn-Khaldoun de Tiaret, June 2019.

[7] Mezzi Abdelkerim Zouatine Abderrezeq. Etude comparative des stratégies de commande des onduleurs. Master's thesis, Université iden Ghardaïa, June 2024.

[8] Azirou Naim Tamadartaza Cylia. Etude et réalisation d'un onduleur monophasé pur sinus. Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira, June 2022.

[9] Youcef MAMERI Kamel MOUSLI. Etude par simulation d'un onduleur à haute fréquence, application au chauffage à induction. Mémoire de master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, June 2015.

[10] Bouzada Hanaa Bouzidi Fatiha. Etude et simulation d'un onduleur multi niveaux. Mémoire de master, Université -Ain-Temouchent Belhadj Bouchaib, June 2024.

[11] Kaci Yahia. Etude d'une nouvelle approche mli (pwm) en temps réel basée sur le principe des réseaux de neurones destinée aux véhicules électriques. Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, January 2015.

[12] Ouali Abdelatif. Etat de l'art sur les convertisseurs dynamiques statiques utilisés dans la production éolienne. Mémoire de master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, June 2022.

[13] Cristina Morel. Analyse et contrôle de dynamiques chaotiques, application à des circuits électroniques non-linéaires. Thèse de doctorat, Université D'Anger, décembre 2005.

[14] Philippe Djondiné. *Étude des comportements chaotiques dans les convertisseurs statiques*. PhD thesis, Université de Cergy-Pontoise, July 2016.

[15] OUAHABI Rabiaa. Systèmes dynamiques et chaos : Différentes méthodes de contrôle et de synchronisation. Thèse de doctorat, Université frères mentouri - Constantine 1, Mars 2018.

[16] OUADAH Mohamed amine HAMED KHODJA Noureddine. Étude de la dynamique non linéaire générée par l'association de deux (ou plusieurs) générateurs de chaos. Mémoire de master, Université Akli Mohand Oulhadj– Bouira, October 2017.

[17] Fatima El Guezar. Génération du chaos à partir d'un système dynamique hybride affine par morceaux. Mémoire de master, Université Ibn Zohr, Agadir-Maroc, June 2007.

[18] A. Karimi D. Bonvin. Identification de systèmes dynamiques. Polycopié de cours, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2007. Support de cours.

[19] Claude Chevassu. *Composants de l'électronique de puissance*. Dunod, Paris, France, 2005.