



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

Université M'Hamed Bougara de boumerdes  
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

**Département d'automatisation et électrification des procédés industrielles**

**Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme de Master**

**Spécialité : électricité industrielle**

**Thème :**

---

**Etude et commande  
des hacheur multicellulaire série**

---

**Présenté par :**

-MELLAHI chaima

**Encadré par :**

- Mr. KHELIFI Fateh

# Remerciements :

En premier lieu, nous tenons à remercier ALLAH, le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté pour accomplir ce travail. Nous tenons à remercier très sincèrement notre encadrant : Mr, Khelifi Fatch, pour sa disponibilité à tout instant et ses orientations, qu'elles trouvent ici le témoignage de notre haute considération et de notre profond respect. Nos précieux remerciements vont également au président et membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce travail. Nous rendons grâce à tous les enseignants de notre département d'automatisation et électrification des procédés industriels, qui nous ont suivis durant notre cursus, et tous ceux qui ont contribué, à ce que ce travail prenne forme. Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous ont soutenu de près ou de loin, pour élaborer ce travail

# Dédicaces :

Je dédie ce projet : A mes chers parents : Père, vous avez toute ma gratitude, car c'est grâce à toi que j'ai atteint mon but..., Ma très chère maman, je vous remercie pour votre soutien moral, vos encouragements et vos conseils qui m'ont guidé durant mon parcours,

A ma chère sœur Oumaima, A tous mes oncles et tantes ainsi que leurs familles, A tous mes cousins et cousines,

A mes intimes et à toute personne qui me connaît, et tous mes collègues du groupe MAEI18.

A toutes ma famille, à tous mes chers amis, A tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail, je ne saurais vous remercier autant.

Chaima

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE .....	15
CHAPITRE I : .....	18
Les convertisseurs statiques .....	18
I-1- Introduction.....	19
I-2-Les composants semi-conducteurs de puissance.....	20
I-2-1- Les interrupteurs .....	20
I-2-1-1- Régime statique .....	20
I-2-1-2-Régime dynamique.....	20
I-2-2- Classification des interrupteurs à semi-conducteurs.....	22
I-2-2-1- La diode.....	22
I-2-2-2- Le thyristor .....	23
I-2-2-3- Le thyristor GTO (Gate Turn-Off Thyristor) .....	23
I-2-2-4- Les transistors.....	24
I-2-3- Règles d'interconnexion des sources.....	25
I-2-4- Cellule de commutation élémentaire .....	26
I-2-4-1- Etude de la cellule élémentaire de commutation .....	26
I-2-4-2- Modélisation d'une cellule élémentaire de commutation.....	27
I-2- Les onduleurs .....	31
I-2-1- Définition.....	31
I-2-2- Les différents types des onduleurs.....	31
I-2-2-1- Les onduleurs non autonomes .....	31
I-2-2-2- Les onduleurs autonomes .....	31
I-3- CONVERTISSEUR CONTINU – CONTINU (Les hacheurs) .....	32
I-3-1- Définition.....	33
I-3-2- Principe générale de fonctionnement.....	33
I-3-3- Les types des hacheurs.....	34
I-3-3-1- Hacheur survolteur .....	34
I-4- Conclusion .....	42
Chapitre II : .....	43
LES HACHEURS MULTICELLULAIRES .....	43
II-2- Convertisseurs multicellulaires.....	45
II-2-1- Convertisseurs multicellulaires séries FCMC (Flying Capacitor Multilevel Converters).....	45
II-2-1-1- La cellule élémentaire de commutation .....	45
II-2-1-2- Principe de base d'un convertisseur multicellulaire série [CHO 10] .....	46
II-2-1-3- Cas d'un convertisseur a deux cellules .....	47

II-2-1-4- Le rôle des condensateurs dans les convertisseurs de type NPC et multicellulaire série .....	49
II-2-1-5- Analyse des formes d'onde .....	50
II-2-1-6- Evolution de la tension aux bornes des condensateurs flottants .....	<b>51</b>
II-2-1-7- La dynamique de la tension des condensateurs flottants.....	51
II-2-1-8- Les avantages et les inconvénients d'un convertisseur multicellulaire série .....	52
II-2-2- Convertisseurs multicellulaires parallèles PMC ( Parallel Multicellular Converter .....	52
II-2-2-1-Topologie et principe de fonctionnement .....	53
II-2-2-3- Cas d'un convertisseur PMC à 2 cellules de commutation :.....	54
II-2-2-4- Les avantages et les inconvénients d'un convertisseur multicellulaire parallèle.....	56
II-2-3- Convertisseurs multicellulaires superposés SMC (Stacked Multicellular Converters).....	56
II-2-3-1- Principe de base d'un convertisseur SMC 1x2 (3 niveaux) .....	57
II-2-3-2- Les avantages et les inconvénients d'un convertisseur multicellulaire superposé.....	60
II-3- Conclusion .....	62
Chapitre III.....	63
MODELISATION DES HACHEURS MULTICELLULAIRES SERIES .....	63
III.1 Introduction.....	64
III-2- Présentation des modèles .....	65
III-2-1- Le modèle aux valeurs instantanées .....	65
III-2-2- Le modèle aux valeurs moyennes .....	65
III-2-3- Modèle harmonique .....	65
III-2-4- Le modèle hybride .....	66
III-3- Modélisation d'un hacheur multicellulaire série .....	66
III-3-1- Le modèle aux valeurs instantanées .....	66
III-3-2- Hypothèses.....	66
III-3-3- Le principe de modèle appliquée sur l'hacheur multicellulaire série.....	66
III-3-4- Formulation générale .....	67
III-3-5- Principe de fonctionnement .....	68
III-3-6- Les séquences de commande des hacheur multicellulaires séries.....	69
III-3-6-1- l'hacheur a 2 cellules .....	69
III-3-6-2- l'hacheur à 3 cellules .....	72
III-3-6-3- l'hacheur à 5 cellules .....	76
III-2- Commande en boucle ouverte .....	79
III-2-1- Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).....	80
III-3- Commande en boucle fermée .....	81
III-3-1- Commande en durée .....	82
III-3-1-1- Commande linéaire par modulation des rapports cycliques .....	82
Chapitre IV : .....	85

SIMULATION DES HACHEURS MULTICELLULAIRES SERIES .....	85
IV-1- Introduction .....	86
IV-2- Simulation des hacheurs multicellulaires séries.....	86
IV-2-1- Simulation d'un hacheur à deux cellules .....	86
IV-3- Application de technique de commande linéaire par modulation des rapports cycliques.....	101
IV-4- Conclusion .....	109
Conclusion générale.....	86

# **LISTE DES FIGURES**



## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Interrupteur utilisé en électronique de puissance et ses caractéristiques statiques. ....	20
Figure 2: Commutation commandée d'un interrupteur.....	21
Figure 3: Commutation spontanée .....	22
Figure 4: Caractérisation d'une diode.....	22
Figure 5: Le thyristor .....	23
Figure 6: Caractéristiques et symbole d'un thyristor GTO.....	24
Figure 7 : Symboles et caractéristiques des principaux transistors.....	25
Figure 8: Possibilités d'interconnexions d'une source de tension et d'une source de courant [50].....	25
Figure 9: Cellule de commutation élémentaire .....	26
Figure 10: convention sur l'état d'une cellule de commutation.....	26
Figure 11: Convention sur le rapport cyclique appliqué à une cellule de commutation élémentaire ...	27
Figure 12: grandeurs électriques au sein de la cellule de commutation.....	27
Figure 13: Modèle instantané de la cellule de commutation.....	28
Figure 14: valeurs moyennes des tensions et courants d'une cellule de commutation .....	29
Figure 15: Modèle moyen d'une cellule de commutation .....	30
Figure 16: Modèle harmonique d'une cellule de commutation .....	31
Figure 17: Schéma synoptique d'un hacheur .....	33
Figure 18: Convertisseur continu- continu.....	34
Figure 19: Schéma principale d'un hacheur survolteur MATALAB/SIMULINK .....	34
Figure 20: Partie commande d'un hacheur survolteur MATALAB/SIMULINK.....	35
Figure 21: La tension aux borne de la charge .....	35
Figure 22: Le courant aux bornes de la charge .....	36
Figure 23: Signal de commande de l'interrupteur Tr.....	37
Figure 24: Schéma équivalent du hacheur survolteur durant la phase active MATALAB/SIMULINK .....	38
Figure 25: Schéma équivalent du hacheur survolteur durant la phase active .....	38
Figure 26: Schéma équivalent du hacheur Boost durant la phase de roue libre MATALAB/SIMULINK .....	39
Figure I.27: Schéma équivalent du hacheur Boost durant la phase de roue libre .....	39
Figure 28: Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur (buck).....	40
Figure 29: Schémas équivalents du hacheur dévolteur avec K fermé et ouvert .....	40
Figure 30: Bras multicellulaire à P cellules de commutation. ....	45
Figure 31: Bras de convertisseur multicellulaire série à deux cellules de commutation. ....	46
Figure 32: Deux cellules de commutation .....	47
Figure 33: Dynamique idéale des tensions flottantes.....	51
Figure 34: Convertisseur multicellulaire parallèle à P cellules de commutation. ....	53
Figure 35: Convertisseur multicellulaire parallèle à 1 cellule. ....	54
Figure 36: Convertisseur multicellulaire parallèle à 2 cellules.....	55
Figure 37: Convertisseur multicellulaire superposé Px2. ....	57
Figure 38: Convertisseur multicellulaire superposé 1x2.....	58
Figure 39: Configurations possibles du convertisseur SMC 1x2.....	59
Figure 40: Hacheur dévolteur à p cellules associé à une charge R,L.....	67
Figure 41: Hacheur multicellulaire à N cellules. ....	67
Figure 42: Hacheur à deux cellules connectées à une charge R, L .....	70

Figure 43: Les configurations possibles d'un hacheur multicellulaire série à 2 cellules .....	71
Figure 44: Hacheur à trois cellules connectées à une charge R, L.....	72
Figure 45: Les configurations possibles d'un hacheur multicellulaire série à 3 cellules.....	74
Figure 46: Hacheur à cinq cellules connectées à une charge R, L.....	76
Figure 47: Les configurations possibles d'un hacheur multicellulaire série à 3 cellules.....	79
Figure 48: Principe de la MLI-ST pour un hacheur multicellulaire série.....	80
Figure 49: Commande en boucle ouverte par MLI-ST d'un hacheur multicellulaire série à trois cellules.....	81
Figure 50: Structure d'un bras d'hacheur multicellulaire série à deux cellules sur SIMULINK .....	86
Figure 51: Structure de commande MLI à deux porteuses dans SIMULINK .....	87
Figure 52: Intersection entre deux porteuses décalées de $2\pi/2$ avec un rapport cyclique de 0.5 .....	87
Figure 53: Les deux signaux de commande.....	88
Figure 54: Hacheur à deux cellules sur SIMULINK.....	89
Figure 55: Evolution de la tension aux bornes du condensateur (2 cellules) .....	90
Figure 56: Evolution du courant de charge (2 cellules) .....	91
Figure 57: Evolution de tension de charge (2 cellules).....	91
Figure 58: Structure d'un bras d'hacheur multicellulaire série à trois cellules dans SIMULINK.....	92
Figure 59: Structure de commande MLI à trois porteuses dans SIMULINK .....	92
Figure 60: Intersection entre trois porteuses décalées entre eux de $2\pi/3$ avec un rapport cyclique de 0.5 .....	93
Figure 61: hacheur à trois cellules sur SIMULINK.....	94
Figure 62: Evolution de la tension aux bornes des condensateurs (3 cellules).....	95
Figure 63: Evolution du courant de charge (3 cellules) .....	96
Figure 64: Evolution de tension de charge (3 cellules).....	96
Figure 65: Structure d'un bras d'hacheur multicellulaire série à cinq cellules dans SIMULINK.....	97
Figure 66: Structure de commande MLI à cinq porteuses dans SIMULINK .....	98
Figure 67: Intersection entre cinq porteuses décalées entre eux de $2\pi/5$ avec un rapport cyclique de 0.5 .....	98
Figure 68: hacheur à trois cellules sur SIMULINK.....	98
Figure 69: Evolution des tensions aux bornes des condensateurs (5 cellules).....	99
Figure 70: Evolution du courant de charge (5 cellules) .....	100
Figure 71: Evolution de tension de charge (5 cellules).....	100
Figure 72: Structure de la loi de commande modulant les rapports cycliques.....	101
Figure 73: Boucle de régulation de la tension condensateur $VC_i$ .....	102
Figure 74: Boucle de régulation de la tension condensateur $VC_1$ .....	103
Figure 75: Evolution de la tension aux bornes de condensateur $C_1$ .....	104
Figure 76: Evolution de la tension aux bornes de condensateur (Variation de la tension de bus).....	104
Figure 77: Boucle de régulation des tensions des condensateurs ( $VC_1, VC_2$ ).....	105
Figure 78: Evolution de la tension aux bornes des condensateurs ( $C_1, C_2$ ).....	106
Figure 79: Boucle de régulation de la tension condensateur $VC_1, VC_2, VC_3, VC_4$ .....	107
Figure 80: Evolution de la tension aux bornes des condensateurs ( $C_1, C_2, C_3, C_4$ ).....	108

# **LISTE DES TABLEAUX**

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Caractéristiques d'une cellule de commutation .....	46
Tableau 2: Caractéristiques principales de l'association de deux cellules.....	47
Tableau 3: Caractéristiques principales de l'association de 2 cellules ( $E1=E/2$ ).....	48
Tableau 4: Définition des grandeurs caractéristiques de l'association de P cellules de commutation..	48
Tableau 5: résumé les caractéristiques principales de ces états .....	55
Tableau 6: Définition des grandeurs caractéristiques du PMC à P cellules.....	56
Tableau 7: Caractéristiques principales du fonctionnement de l'onduleur SMC 1x2. ....	60
Tableau 8: Définition des grandeurs caractéristiques de l'association de 3 cellules de commutation..	76
Tableau 9: Définition des grandeurs caractéristiques de l'association de 5 cellules de commutations	79

# **LISTE DES SYMBOLES**

## LISTE DES SYMBOLES

$C_i$  : Condensateur flottant  $i$  lié à la cellule de commutation  $i$ .

$E$  : Tension d'alimentation.

$f_{\text{déc}}$  : Fréquence de découpage.

$T_{\text{déc}}$  : Période de découpage.

$i_{\text{ch}}$  : Courant de charge.

$I_{\text{ci}}$  : Courant moyen traversant les condensateurs flottants.

$L$  : Inductance de charge.

$P$  : Nombre de cellules de commutation.

$R_{\text{ch}}$  : Résistance de charge.

$i$  : Indice de numérotation des cellules de commutation.

$S_i$  : Interrupteur de haut de cellule  $i$ .

$\bar{S}_i$  : Interrupteur de bas de cellule  $i$ .

$T_{\text{ON}}$  : Durée de l'état bloqué d'un interrupteur.

$T_{\text{OFF}}$  : Durée de l'état passant d'un interrupteur.

$P$  : Nombre de cellules de commutation.

$u_i$  : Rapport cyclique de la cellule  $i$ .

$V_{\text{ci}}$  : Tension aux bornes de condensateur flottant.

$\tau$  : Constante de temps liés aux dynamiques imposées sur les tensions des condensateurs.

### Liste des abréviations :

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor.

MLI : Modulation Largeur Impulsion.

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction

Au cours des dernières décennies, la société de l'électronique de puissance a été confrontée à des défis croissants en matière d'alimentation de diverses applications technologiques via des convertisseurs de commutations, comme les véhicules électriques, les systèmes à énergie renouvelable, les microprocesseurs, etc. Dans ces applications, les contraintes de tension et de courant peuvent aller au-delà de la plage que peut supporter un dispositif de puissance et des performances insatisfaisantes sont généralement rencontrées en raison de la fréquence de commutation limitée. Pour répondre aux contraintes de tension ou de courant, plusieurs solutions ont été proposées, basées sur l'association de plusieurs convertisseurs de puissance ou bien la connexion de plusieurs dispositifs de puissance pour obtenir un macro-composant ayant des caractéristiques satisfaisantes en tension et/ou courant. Bien que ces solutions semblent être attractives, un contrôle synchrone direct et non direct des multiples éléments doit être assuré. A cet effet, une solution innovante a été proposée au début des années 1990 par H. Foch et T. Meynard, utilisant le concept de cellule de commutation, connue sous le nom de convertisseur multicellulaire série (les hacheurs multicellulaires série). Cette topologie permet la répartition de la haute tension d'entrée  $E$  sur les cellules de commutation au moyen de condensateurs flottants. Chaque cellule est composée de paires d'interrupteurs complémentaires. Cette structure offre  $p+1$  niveaux de tension de sortie, ce qui permet d'obtenir une amélioration remarquable sur la forme de signal de courant ; tension de sortie.

Afin de conserver un fonctionnement correct de l'hacheur multicellulaire série au cours du temps, sa commande doit assurer la régulation des tensions des condensateurs. Ainsi, la régulation permet d'une part de répartir équitablement les contraintes sur chaque interrupteur, et d'autre part conserver les mêmes caractéristiques du point de vue des niveaux de tension de sortie. Cette régulation est assurée par une commande convenable. Il existe une commande en boucle ouverte très simple permettant d'assurer la stabilité de ce convertisseur. Elle est connue sous le nom de commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions). Cette commande permet l'équilibrage naturel des tensions aux bornes des condensateurs. Il apparaît cependant, que pour certains points de fonctionnement, la commande MLI ne permet plus d'assurer la régulation des tensions des condensateurs, ce qui peut conduire à la destruction du convertisseur. Pour pouvoir fonctionner quel que soit le point de fonctionnement, il est absolument nécessaire de développer de nouvelles commandes en boucle fermée. En effet, l'utilisation des commandes en boucle fermée prend en compte l'évolution des tensions des condensateurs et du courant de charge.

Il existe plusieurs techniques de commande en boucle fermée tels que : commande par mode glissant, commande symétrique, décalée, MLI (Modulation de largeur d'impulsion), MLI vectorielle, MLI précalculée, MLI aléatoire, commande en durée ....

Dans cette étude on va appliquer la commande linéaire par modulation des rapports cycliques sur l'hacheur multicellulaire série à 2,3 et 5 cellules, cette stratégie de commande est dite « en durée » est basée sur l'utilisation d'une boucle de rétroaction pour comparer la tension de sortie réelle avec la tension de référence et ajuster le rapport cyclique en conséquence. Cette dernière assure juste la régulation des tensions aux bornes des condensateurs flottants.

A la fin on va comparer les résultats de simulation de chaque différent circuit.

Le thème est divisé en quatre chapitres :



Le premier chapitre sera consacré à des rappels sur les convertisseurs statiques (hacheur et onduleur) et leurs structures, principe de fonctionnement et ces différents types, ensuite nous allons présenter une étude théorique sur les composants semi-conducteurs de puissance.

Dans le deuxième chapitre, on a parlé sur les 3 principaux types des hacheurs multicellulaires : séries, parallèles et superposés, leurs topologies et principe de fonctionnement. Une brève partie été dédiée pour l'hacheur multicellulaire série et comment la tension aux borne des condensateurs évoluer, à la fin on a donné les avantages et désavantages de chaque type.

Au troisième chapitre, nous présenterons différents modèles existants pour modéliser un convertisseur multicellulaire série. Par la suite, un modèle de l'hacheur multicellulaire série sera présenté : le modèle aux valeur instantanée , par la suite on a développé la topologies d'hacheur multicellulaire série à 2,3 et 5 cellule, leurs principe de fonctionnement et chaque un ses configurations possibles .A la fin nous présenterons plusieurs techniques de commande en boucle ouverte et en boucle fermée appliquée à l'hacheur multicellulaire série et on a basé sur la commande en duré( commande linéaire par modulation des rapports cyclique.

Le quatrième chapitre aborde les simulations des différents hacheurs à deux, trois et cinq cellules sur SIMULINK et la comparaison entre eux.

En termine avec une conclusion générale.

# CHAPITRE I :

## **Les convertisseurs statiques**

## I-1- Introduction

Les convertisseurs statiques jouent un rôle essentiel dans le domaine de l'alimentation électrique, offrant des solutions efficaces pour la conversion, la régulation et le contrôle de l'énergie électrique. Ces dispositifs électroniques sont largement utilisés dans divers secteurs tels que l'industrie, les réseaux de distribution d'énergie, les véhicules électriques, les énergies renouvelables, et bien d'autres.

La mise au point de semi-conducteurs, diodes, thyristors et transistors au silicium, permettant le contrôle des courants et des tensions importants a donné un essor considérable à cette nouvelle technique, au point d'en faire aujourd'hui une discipline de base du génie électrique.

Ce chapitre est consacré à l'étude théorique des convertisseurs statiques qui sont des systèmes permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donnée.

## I-2-Les composants semi-conducteurs de puissance

### I-2-1- Les interrupteurs

Les semi-conducteurs utilisés en électronique de puissance présentant la particularité de fonctionner en commutation, c'est-à-dire ouverts ou fermés, c'est pour cela qu'a été introduite la notion d'interrupteur par analogie à l'interrupteur mécanique. Dans tous les cas, tout interrupteur peut présenter deux états stables en régime statique :

- A l'état passant (ON), l'interrupteur est dit conducteur, fermé ou amorcé.
- A l'état bloqué (OFF), l'interrupteur est dit non-conducteur, ouvert ou bloqué.

Le passage d'un état à un autre implique un fonctionnement transitoire, régime dynamique qui est très complexe, car il dépend d'une part, des conditions imposées par le circuit extérieur et d'autre part, de la manière dont on peut éventuellement agir sur sa structure interne (par l'intermédiaire d'un circuit de commande) pour forcer son basculement [1].

#### I-2-1-1- Régime statique

En régime statique, l'interrupteur se comporte comme une résistance linéaire, très faible à l'état passant, très élevée à l'état bloqué. L'interrupteur est considéré comme un dipôle avec une convention récepteur (figure ) La caractéristique statique  $I_K(V_K)$ , qui représente l'ensemble des points de fonctionnement de l'interrupteur, comporte deux branches situées dans les deux quadrants tels que :  $V_K \cdot I_K > 0$  (I.1.a) L'une de ces caractéristiques est très proche de l'axe des ordonnées (état passant), l'autre très proche de l'axe des abscisses (état bloqué), (figure I.1.b). Si l'on idéalise l'interrupteur, on peut confondre la caractéristique statique avec le demi-axe (ou segment) dont elle est voisine (figure I.1.c). Dans le cas des interrupteurs à semi-conducteurs, la caractéristique statique peut se réduire à un certain nombre de segments du plan  $I_K(V_K)$ , cette caractéristique a au moins deux demi-axes (ou deux segments). Suivant le nombre de segments, les interrupteurs peuvent être à deux, trois ou quatre segments.

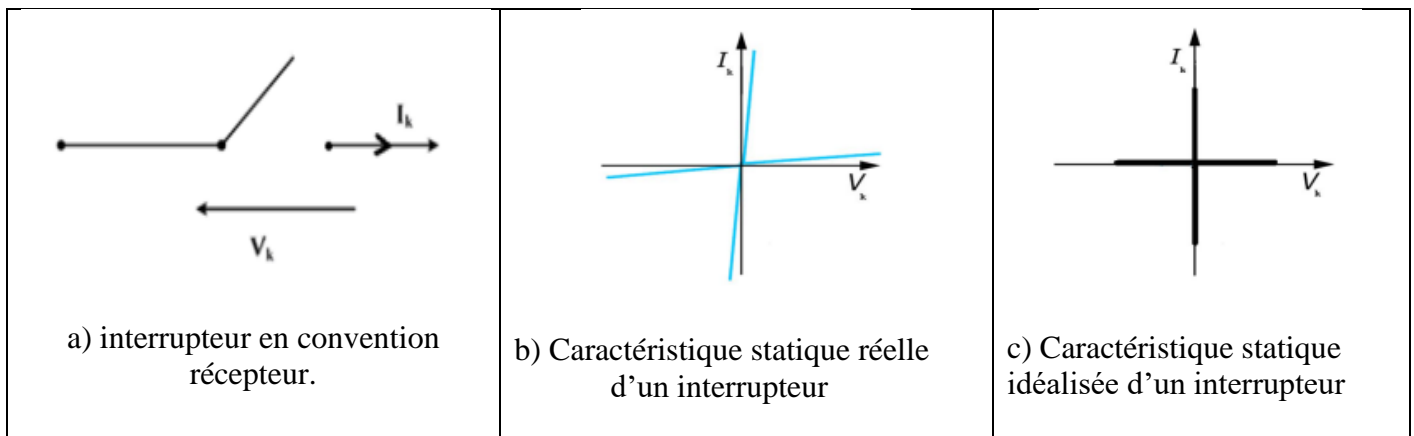


Figure 1: Interrupteur utilisé en électronique de puissance et ses caractéristiques statiques.

#### I-2-1-2-Régime dynamique

Ce régime est défini par le passage de l'état passant à l'état bloqué, ou inversement, ce qui correspond, dans le plan  $I_K(V_K)$ , au passage du point de fonctionnement d'un demi-axe à un demi-axe perpendiculaire.

La trajectoire suivie par le point de fonctionnement constitue la caractéristique dynamique de commutation de l'interrupteur, laquelle dépend des contraintes imposées par le circuit extérieur.

Le trajet du point de fonctionnement ne peut se faire que dans les quadrants tels que la condition (1) soit satisfaite.

### I-2-1-2-1-Mode de commutation

: Aussi bien pour l'amorçage que pour le blocage, deux modes de changement d'état son à distinguer :

- La commutation commandée ;
- La commutation spontanée.

#### a) Commutation commandée :

L'interrupteur possède dans ce cas en plus de ses deux électrodes principales, une électrode de commande sur laquelle on peut agir pour provoquer son changement d'état.

Cette électrode permet de modifier brusquement la structure interne de l'élément, et par suite, de faire passer sa résistance d'une valeur très faible ( $\approx 0$ ) à une valeur très élevée, ou inversement (Figure I.2).

Il s'ensuit que :

- Si les points de fonctionnement statique, imposés par la séquence précédant la commutation et la séquence suivante, se trouvent sur deux segments de même signe, cette commutation ne peut être que commandée.
- Il faut aussi noter que la commutation commandée fait apparaître des contraintes sévères pour l'élément, suivant la trajectoire du point de fonctionnement, le temps de commutation et la fréquence de cette dernière. Ces contraintes se manifestent par l'échauffement du composant et peuvent entraîner sa destruction.



Figure 2: Commutation commandée d'un interrupteur

#### b) Commutation spontanée d'un interrupteur :

Elle ne dépend que du circuit électrique extérieur, l'élément commute naturellement au passage par zéro du point de fonctionnement.

- Le blocage spontané (figure I.3.a), s'effectue au passage par zéro du courant  $I_k$  ;
- L'amorçage spontané (figure I.3.b), s'effectue au passage par zéro de la tension  $V_k$ .

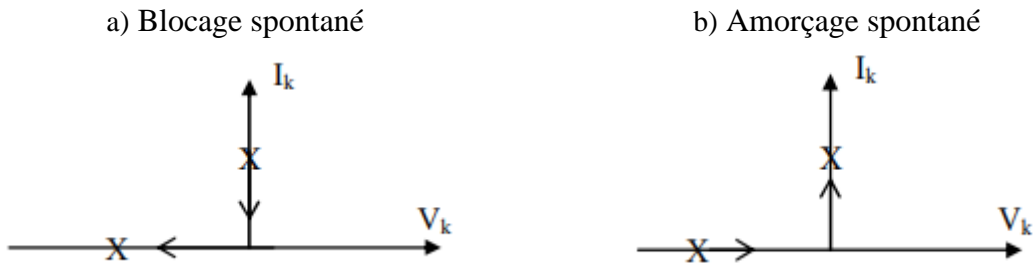


Figure 3: Commutation spontanée

Il s'ensuit que : Si les points de fonctionnement statique, imposés par la séquence précédant la commutation et la séquence suivante se trouvent sur deux segments de signes contraires, cette commutation ne peut être que spontanée.

**a) Cycle de commutation :**

On conclut que pour caractériser complètement un interrupteur, il faut connaître, d'une part, sa caractéristique, d'autre part ses modes de commutation. Au cours d'une période de fonctionnement, la trajectoire du point de fonctionnement ( $V_k, I_k$ ) décrit un cycle.

**I-2-2- Classification des interrupteurs à semi-conducteurs**

Les interrupteurs utilisés dans les convertisseurs statiques peuvent être classés en fonction de leur caractéristique statique (deux, trois ou quatre segments), et de la nature de leur commutation, à l'amorçage ou au blocage, commandée ou spontanée.

**I-2-2-1- La diode**

La (figure I.4), donne le symbole utilisé pour représenter une diode et ses caractéristiques statiques et dynamiques. Il s'agit, donc, d'un interrupteur deux segments, unidirectionnel en tension et en courant et à commutation spontanée [2].

A : anode

K : cathode

**a) Caractéristiques statique de dynamique**



Figure 4: Caractérisation d'une diode.

## I-2-2-2- Le thyristor

C'est un interrupteur à trois bornes qui possède en plus de l'anode (A) et de la cathode (K), une gâchette (G).

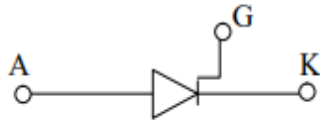
L'anode et la cathode constituent l'accès de puissance.

La gâchette et la cathode, l'accès de commande (figure I.5).

Ses caractéristiques statiques et dynamiques sont représentées sur la (figure).

Le thyristor est, donc, un interrupteur trois segments à fermeture commandée et à ouverture spontanée

a) symbole



b) caractéristiques statiques

et dynamiques

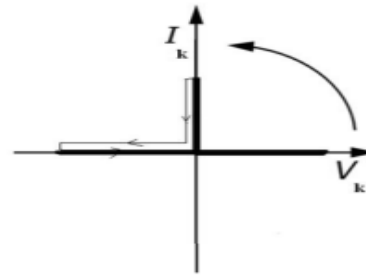


Figure 5: Le thyristor

## I-2-2-3- Le thyristor GTO (Gate Turn-Off Thyristor)

Ce composant est venu pour palier à l'inconvénient majeur que représente le thyristor à savoir qu'une fois amorcé, un thyristor ne s'arrête de conduire qu'au passage par zéro du courant qui le traverse ou l'application d'une tension négative à ses bornes à l'aide de circuits extérieurs d'extinction.

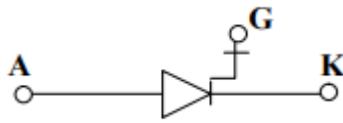
Le thyristor GTO présente la particularité d'être commandable à l'ouverture et à la fermeture.

Le thyristor GTO est, donc, un interrupteur à deux segments avec une ouverture et une fermeture commandée (Figure I.6.b).

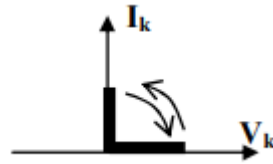
Cependant, une autre variante du thyristor GTO existe, il s'agit du GTO symétrique. Ses caractéristiques statiques et dynamiques sont représentées à la figure I.6.c.

Mais en pratique, c'est le thyristor GTO asymétrique qui est employé, et son emploi est réservé aux domaines des très fortes puissances.

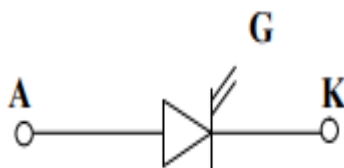
ou



b) GTO asymétrique et ses caractéristiques idéales statique et dynamique



a) symbole



b) GTO asymétrique et ses caractéristiques idéales statiques et dynamiques

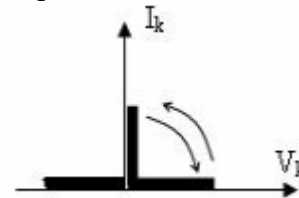


Figure 6: Caractéristiques et symbole d'un thyristor GTO.

#### I-2-2-4- Les transistors

Il existe plusieurs types de transistors de puissance :

- Les transistors bipolaires (Figure I.7 a) dont le collecteur (C) et l'émetteur (E) constituent l'accès de puissance, la base (B) et l'émetteur (E) l'accès de commande.

- Les transistors MOS à effet de champ ou MOSFET (Metal Oxyde Semi Conductor Field Effect Transistor) son symbole est représenté en Figure I.7.b, le drain (D) et la source (S) forment l'accès de puissance, la grille (G) et la source (S) constituent l'accès de commande.

- Les transistors bipolaires à grille isolée ou IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), (Figure I.7.c). Le collecteur et l'émetteur (E) forment l'accès de puissance, la grille (G) et l'émetteur l'accès de commande.

Ces différents types se distinguent les uns des autres par :

- La chute de tension à l'état passant ;
- La rapidité, c'est à dire la vitesse de commutation d'un état à un autre ;
- La manière dont est commandé le transistor : en tension (MOSFET, IGBT) ou en courant (bipolaire).

Leurs caractéristiques ainsi que leurs symboles sont représentés en figure I.7.



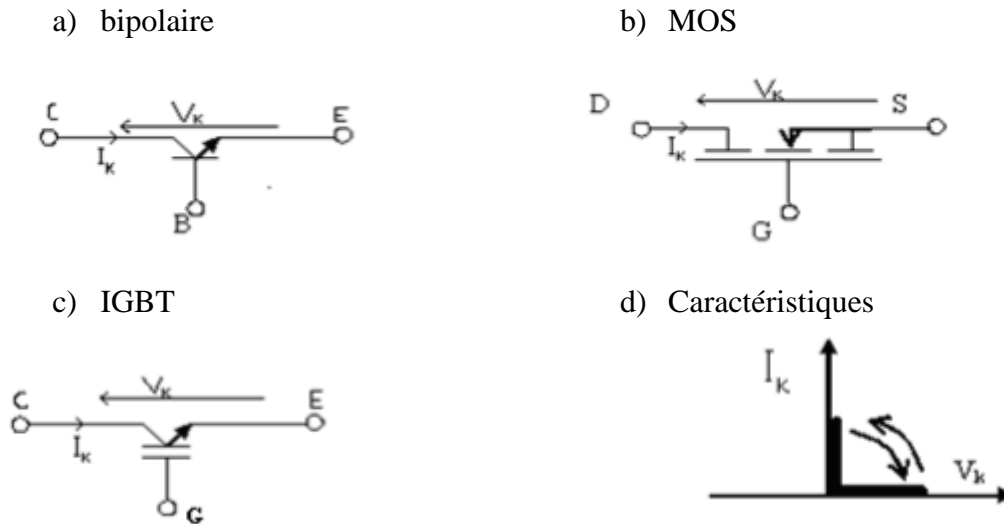


Figure 7 : Symboles et caractéristiques des principaux transistors

**I-2-3- Règles d'interconnexion des sources**

Un convertisseur statique assure et contrôle l'échange d'énergie entre deux sources en les reliant par l'intermédiaire de ses interrupteurs (figure suivante) :

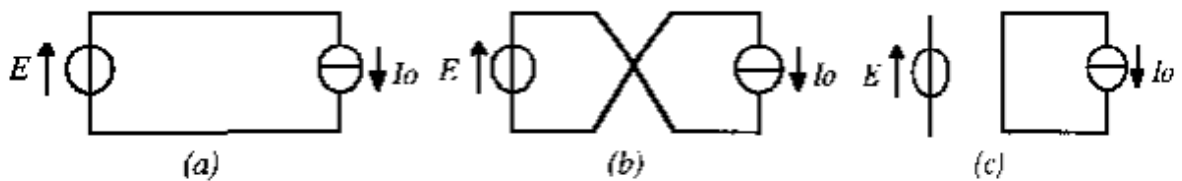


Figure 8: Possibilités d'interconnexions d'une source de tension et d'une source de courant [50]

Trois règles d'interconnexion des sources doivent être impérativement respectées :

- Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée mais elle peut être ouverte.
- Le circuit d'une source de courant ne doit jamais être ouvert mais il peut être court-circuité.
- Il ne faut jamais connecter entre elles qu'une source de courant et une source de tension.

Nous allons à présent passer à la présentation de la cellule élémentaire de commutation qui est un outil pédagogique de l'électronique de puissance.

**I-2-4- Cellule de commutation élémentaire**

**I-2-4-1- Etude de la cellule élémentaire de commutation**

Une cellule de commutation élémentaire est composée d'une source de tension de deux interrupteurs connectés à une source de courant comme le montre la figure I.9 suivante :

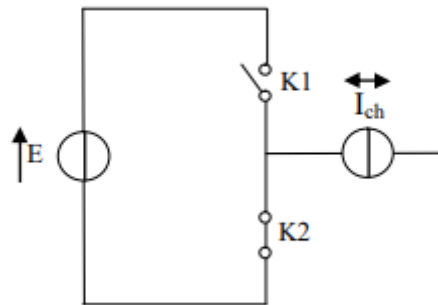


Figure 9: Cellule de commutation élémentaire

Afin de respecter les règles d'interconnexion de sources, les signaux de commande des interrupteurs "K<sub>1</sub>" et "K<sub>2</sub>" devront être de nature complémentaire. Ainsi, une cellule élémentaire de commutation ne peut présenter que deux états . Par convention, une cellule de commutation est dite à l'état "1" lorsque son interrupteur haut (respectivement bas) est passant (respectivement bloquée). Donc une cellule de commutation est dite à l'état "0" lorsque son interrupteur haut (respectivement bas) est bloqué (respectivement passant) comme la montre la figure ci-dessous. Il ne faut jamais connecter entre elles deux sources de mêmes natures ; cela revient à dire qu'on ne peut connecter entre elles qu'une source de courant et une source de tension. Le courant est considéré comme constant pendant une période de commutation.

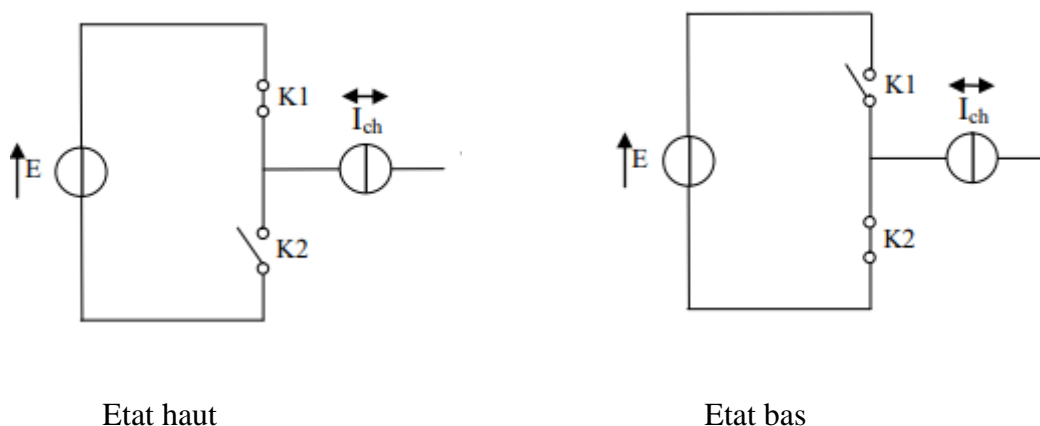


Figure 10: convention sur l'état d'une cellule de commutation

Lorsqu'on parle de rapport cyclique d'une cellule de commutation, il s'agit par défaut de celui de l'interrupteur haut de la cellule. Cela signifie que lorsque le rapport cyclique d'une cellule de commutation est égal à 1 ( $R = 1$ ) donc cela signifie que la cellule de commutation est à l'état 1 durant toute la période de commutation.

**R : Rapport cyclique à la cellule de commutation**

$$R = \frac{t_{on}(k1)}{T_{dec}}$$

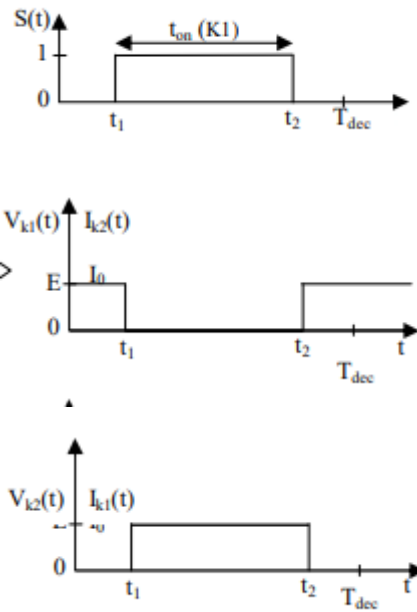


Figure 11: Convention sur le rapport cyclique appliqué à une cellule de commutation élémentaire

Sur la figure suivante nous allons présenter toutes les grandeurs électriques au sein de la cellule de commutation :

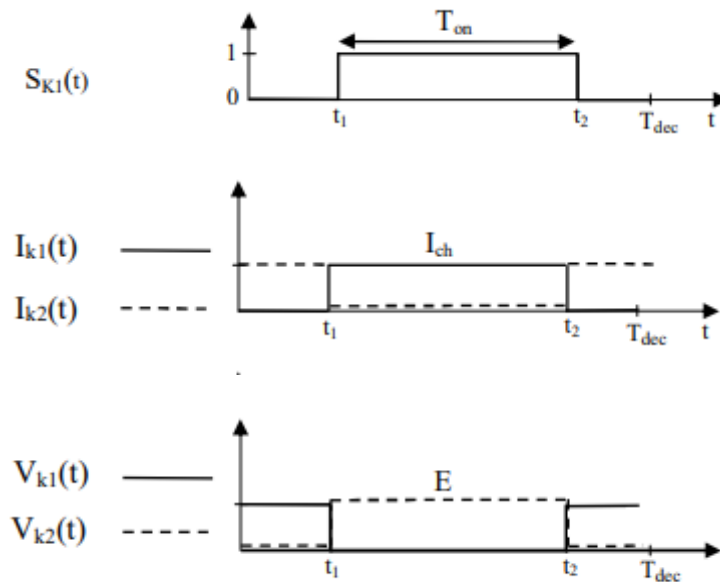


Figure 12: grandeurs électriques au sein de la cellule de commutation

#### I-2-4-2- Modélisation d'une cellule élémentaire de commutation

Il existe dans la littérature trois modèles représentant la cellule de commutation [tachon] à savoir :

- Le modèle exacte (instantané).

- Le modèle moyen.
- Le modèle harmonique.

Nous allons nous attarder sur chacun de ces modèles en vue de mieux saisir les principes de bases nécessaires à la modélisation et conception des convertisseurs multicellulaires séries (qui sont l'objet de notre travail).

**I-2-4-2-1- Modèle exact de la cellule de commutation**

Le modèle exact représentant l'état de la de commutation à chaque instant. Ce dernier modèle, le plus simple de tous, devient très délicat à manier dès qu'il s'agit de l'utiliser dans une simulation numérique. Les seules hypothèses qui sont faites ici concernent les interrupteurs qui sont supposés parfaits (tension de saturation, courant de fuite et temps de commutation nuls).

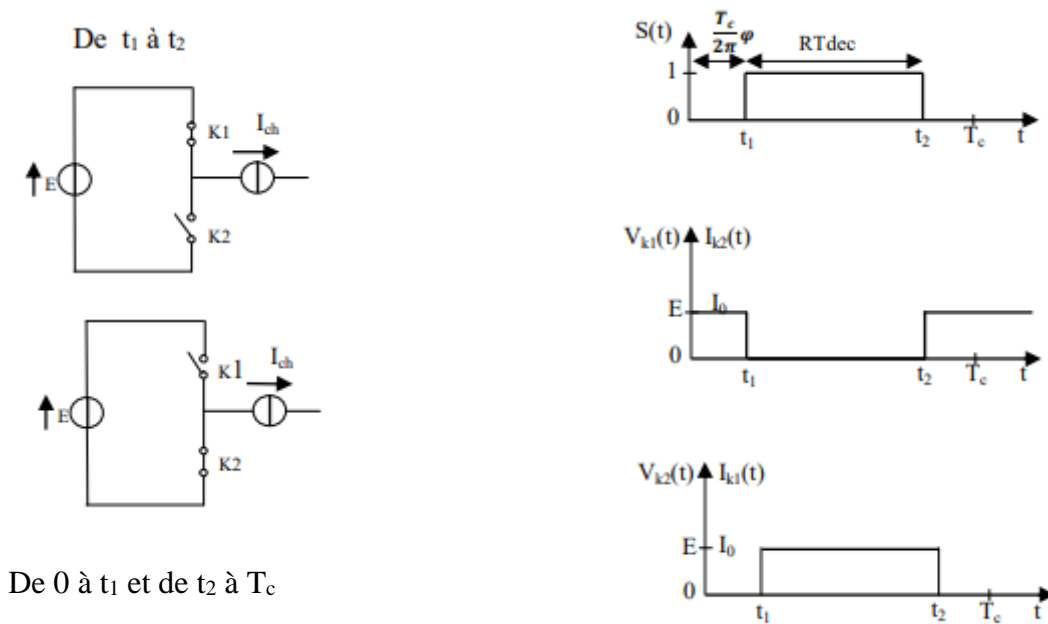


Figure 13: Modèle instantané de la cellule de commutation

Nous constatons que deux paramètres suffisent pour définir les commutations d'une cellule pendant une période de commutation :  $t_1$  et  $t_2$ . Ces deux informations peuvent aussi être définies par le rapport cyclique

$$R = \frac{t_2 - t_1}{T_c} \text{ et le déphasage } = \frac{t_1}{T_c} 2\pi .$$

Le courant traversant l'interrupteur  $K_1$  et la tension aux bornes de l'interrupteur  $K_2$  sont, dans le domaine temporel, donnés par les équations suivantes

$$\begin{cases} I_{K1}(t) = I_0(t) \times S(t) \dots \dots \dots \text{I. 1} \\ V_{K2}(t) = E(t) \times S(t) \dots \dots \dots \text{I. 2} \end{cases}$$

Avec  $S(t)$  : signal de commande des interrupteurs

Les modèles qui vont suivre présentent l'avantage, par rapport au modèle exact, de pouvoir être utilisés dans une simulation numérique en prenant une fréquence d'échantillonnage égale à la fréquence de commutation. En effet, bien que le modèle instantané soit des plus simples à réaliser, il s'accompagne néanmoins d'un désavantage non négligeable du point de vue de la simulation.

### I-2-4-2-2- Modèle moyen de la cellule de commutation :

Nous utiliserons les valeurs moyennes du courant et de la tension appliquée aux interrupteurs composant la cellule de commutation figure 14.a.

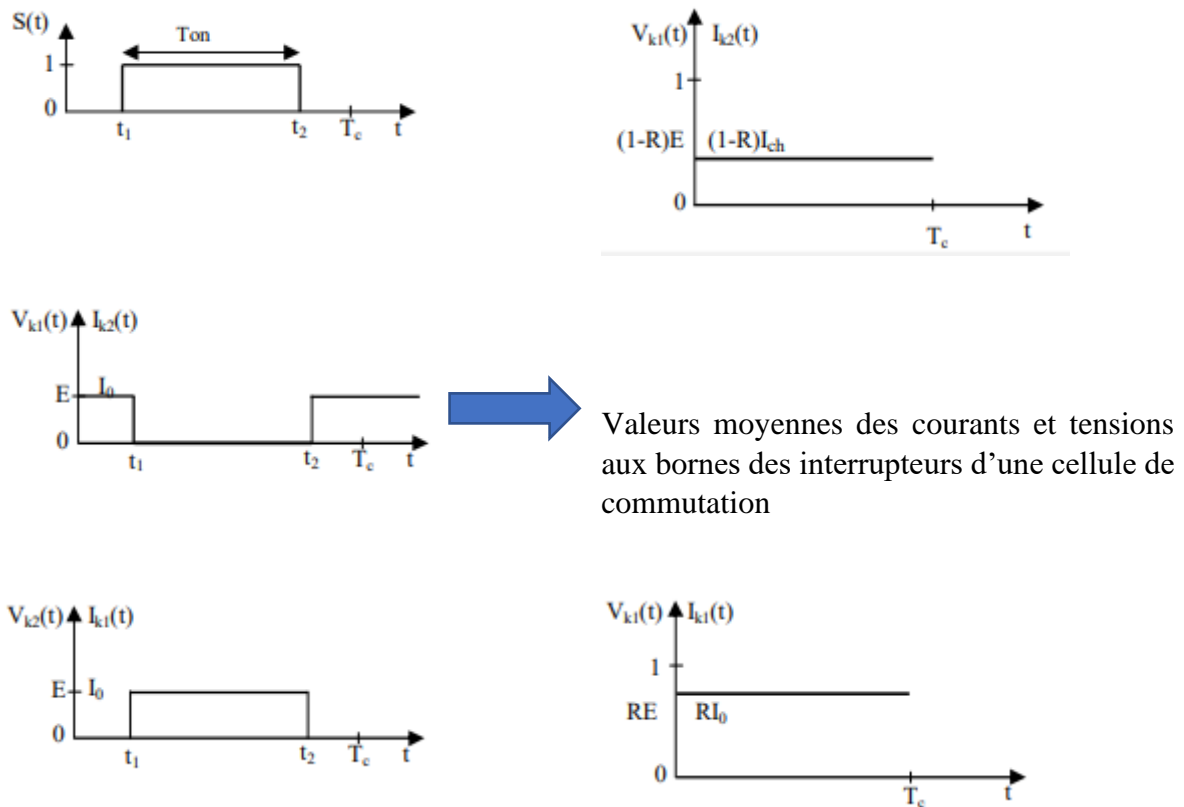


Figure 14: valeurs moyennes des tensions et courants d'une cellule de commutation



ou

Figure 15: Modèle moyen d'une cellule de commutation

Dans le domaine temporel, les équations représentant ce modèle sont les suivantes :

$$\begin{cases} I_{K1}(t) = I_0 \times R \dots \dots \dots \text{I. 3} \\ V_{K2}(t) = E(t) \times R \dots \dots \dots \text{I. 4} \end{cases}$$

Donc, en plus des hypothèses liées aux interrupteurs parfaits qui ont été faites dans le modèle exact, deux nouvelles hypothèses sont posées :

Nous supposons que  $E(t)$  et  $I_0(t)$  sont constants pendant la période de commutation et donc que les harmoniques du spectre de  $E(t)$  et du spectre de  $I_0(t)$  sont supposés nuls.

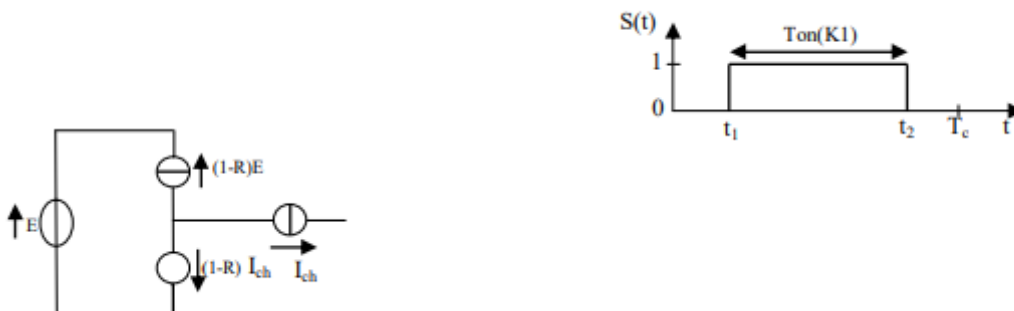
Seule la composante continue du spectre de  $S(t)$  est considérée (c'est-à-dire le rapport cyclique). Les harmoniques du spectre de  $S(t)$  sont négligés.

Ce modèle n'utilise qu'une seule information concernant la cellule de commutation : le rapport cyclique. Il ne tient absolument pas compte du second paramètre qui est le déphasage :

Modèle harmonique de la cellule de commutation :

Pour représenter correctement l'équilibrage naturel (nous allons en reparler plus loin), l'hypothèse déjà posée,  $E(t)$  reste constant et donc les harmoniques du spectre  $E(t)$  sont nuls. Dans ce modèle de la cellule de commutation, appelé modèle harmonique, est ramené à un circuit équivalent composé d'une source de courant, représentant le courant moyen calculé à l'aide des harmoniques de courant traversant la charge, et d'une source de tension représentant les harmoniques de tensions aux bornes de l'autre interrupteur.

Soulignons que dans ce modèle, nous tenons compte des deux paramètres qui caractérisent les commutations pendant une période de commutation : le rapport cyclique et le déphasage



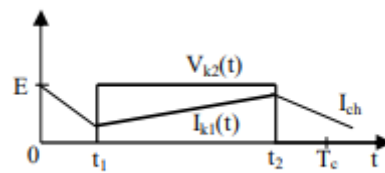


Figure 16: Modèle harmonique d'une cellule de commutation

## I-2- Les onduleurs

### I-2-1- Définition

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.

Ex : C'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner à vitesse variable par exemple (la vitesse est liée à la fréquence des courants qui traversent la machine).

- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

Ex : C'est le cas en particulier des alimentations de sécurité destinées à se substituer au réseau en cas de défaillance de celui-ci par exemple. L'énergie stockée dans les batteries de secours est restituée sous forme continue, l'onduleur est alors nécessaire pour recréer la forme de tension et fréquence du réseau. On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).

### I-2-2- Les différents types des onduleurs

#### I-2-2-1- Les onduleurs non autonomes

Les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est "naturelle" contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables.

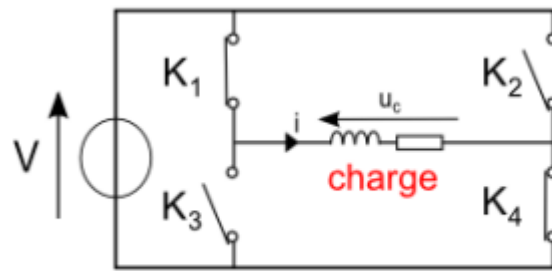
#### I-2-2-2- Les onduleurs autonomes

Les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est "naturelle" contrairement à l'onduleur autonome. Les onduleurs autonomes permettent le réglage de la fréquence de la tension de sortie. La structure la plus répandue est la structure en pont complet

Commande des interrupteurs :

→ K1 et K3 ne peuvent pas être fermés en même temps car V serait court-circuitée.

Il en est de même pour K2 et K4.



→ Si la charge est inductive (source de courant) K1 et K3 ne peuvent pas être ouverts en même temps car la charge serait en circuit ouvert. Il en est de même pour K2 et K4.

**K1 et K3 sont donc complémentaires et il en est de même pour K2 et K4.**

On distingue deux types d'onduleurs autonomes :

### I-1-2-2-2-1- Les onduleurs de tension

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, la tension «  $U_{dc}$  » n'est pas affecté par les variations du courant «  $i_{dc}$  » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. Le courant à la sortie «  $i_{ch}$  » et donc le courant à l'entrée «  $i_{dc}$  » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f.e.m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie [3].

### I-1-2-2-2-2- Les onduleurs de courant

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu, c'est-à-dire par une source d'inductance interne si grande que le courant «  $i_{dc}$  » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension «  $U_{dc}$  » à ses bornes.

### I-1-2-2-3- Les onduleurs à résonance

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si celle-ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome [4].

## I-3- CONVERTISSEUR CONTINU – CONTINU (Les hacheurs)

Les niveaux de puissance que l'on trouve dans les convertisseurs vont de moins d'un watt dans les convertisseurs des équipements portables, à une dizaine ou centaine de watts dans les alimentations des ordinateurs de bureau, aux kilowatts ou mégawatts dans la commande des moteurs à vitesse variable, et jusqu'aux térawatts dans les centrales électriques du secteur.

Les convertisseurs DC/DC en général réalisent deux fonctions : modifier le niveau de tension (élever ou abaisser) et réguler la tension. L'électronique de conversion se trouve à l'interface entre les batteries, accumulateurs (sources d'énergie en général) et l'ensemble des blocs



constitutifs du système considéré, des circuits électroniques numériques et analogiques, des écrans, des actionneurs, des claviers, etc. Plus de 5 à 6 niveaux de tensions peuvent cohabiter dans un seul système

### I-3-1- Définition

Un hacheur est un convertisseur statique continu – continu. On convertit une tension continue fixe  $U$  (en provenance d'une alimentation) en une tension continue réglable  $V$  par un signal de commande  $U_{com}$  de rapport cyclique variable.

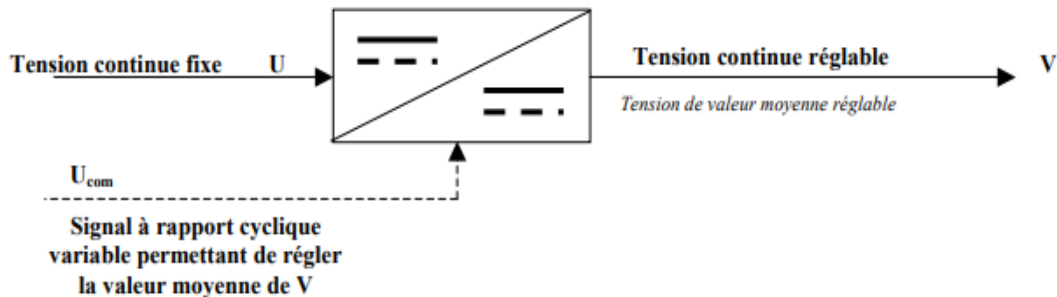


Figure 17: Schéma synoptique d'un hacheur

### I-3-2- Principe générale de fonctionnement

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continus-continus permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle figure (2.10), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues. Dans le cas d'un système photovoltaïque l'entrée variable.

Les convertisseurs DC/DC en général réalisent deux fonctions : modifier le niveau de tension (élever ou abaisser) et réguler la tension. L'électronique de conversion se trouve à l'interface entre les batteries, accumulateurs (sources d'énergie en général) et l'ensemble des blocs constitutifs du système considéré, des circuits électroniques numériques et analogiques, des écrans, des actionneurs, des claviers, etc. Plus de 5 à 6 niveaux de tensions peuvent cohabiter dans un seul système.

La (figure 18) montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge

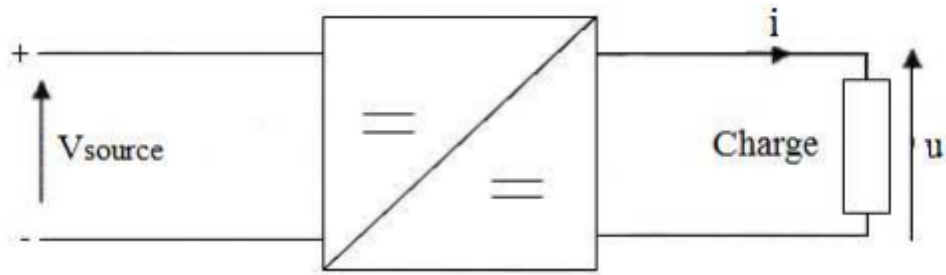


Figure 18: Convertisseur continu- continu.

### I-3-3- Les types des hacheurs

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe de trois types de convertisseur à découpage (dévolteur, survolteur et mixte).

#### I-3-3-1- Hacheur survolteur

- Présentation de la structure :
- La tension d'entrée  $V_e = 12V$  DC
- La tension de la sortie  $V_s = 20V$  DC
- L'inducteur  $L = 75.8 \cdot 10^{-6} H$
- Le courant d'inducteur  $I_L = 8.33A$
- La capacité  $C = 400 \cdot 10^{-6} F$
- La résistance  $R = 4\Omega$
- La fréquence de commutation  $= 25KHz$
- Duty cycle  $= 0.4$

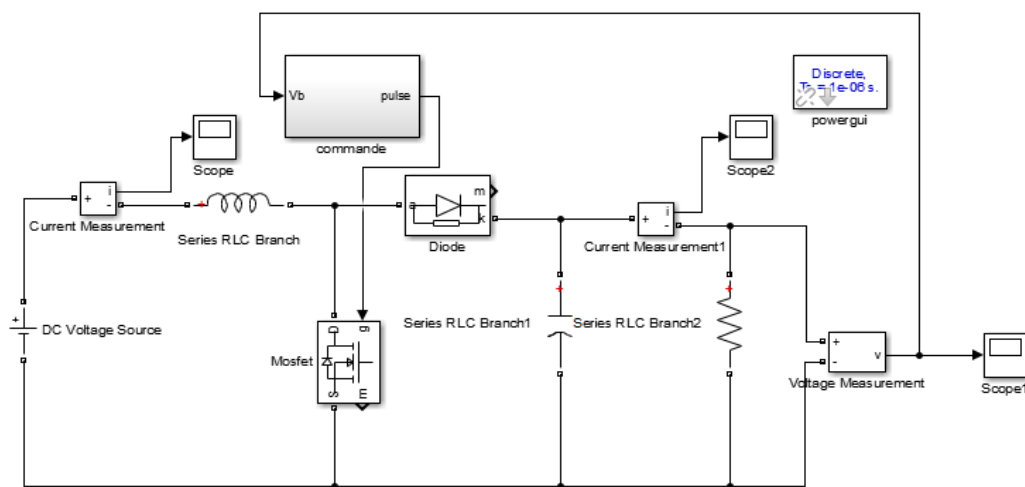


Figure 19: Schéma principale d'un hacheur survolteur MATALAB/SIMULINK

**La partie commande :**

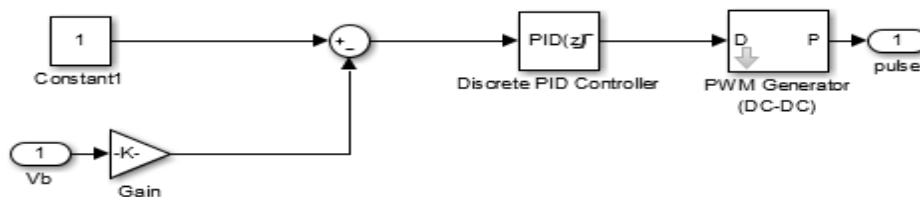


Figure 20: Partie commande d'un hacheur survolteur MATALAB/SIMULINK

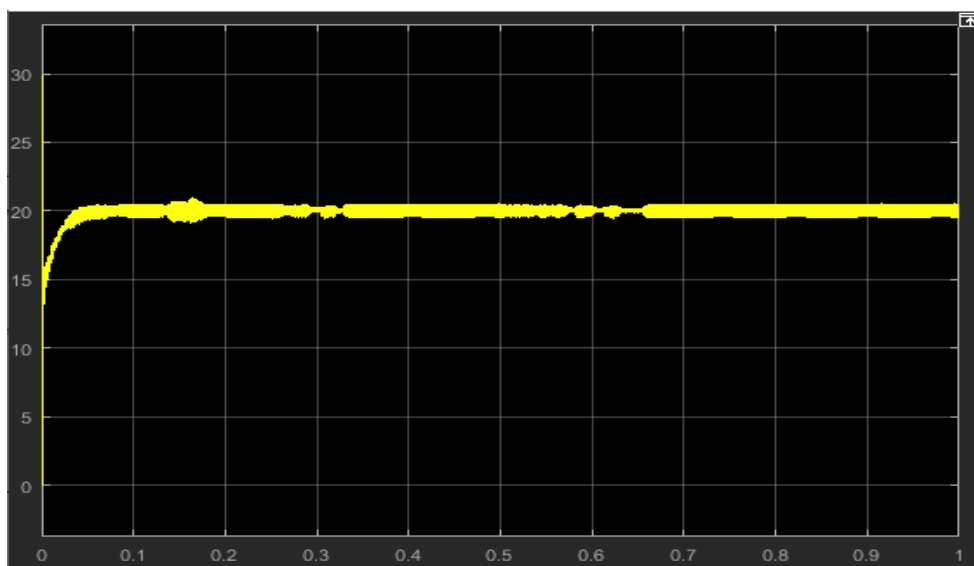


Figure 21: La tension aux borne de la charge

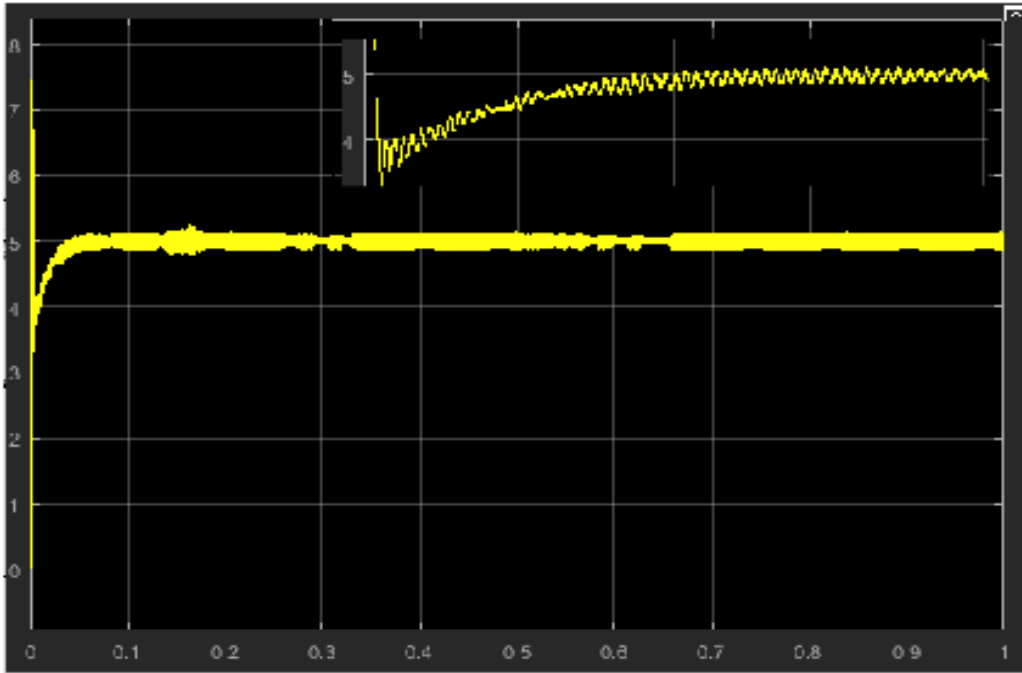


Figure 22: Le courant aux bornes de la charge

Le schéma de principe d'un hacheur survolteur est donné par la figure ci-dessus. Cette structure est composée principalement d'une inductance  $L$  et de deux interrupteurs MOSFET et Diode. Selon l'état de ces deux interrupteurs, on peut distinguer deux phases de fonctionnement :

- **La phase active** : lorsque l'interrupteur  $M$  est fermé et l'interrupteur  $D$  est ouvert. Durant cette séquence, le courant traversant l'inductance  $L$  va augmenter linéairement et une énergie  $W_L$  est stockée dans  $L$ . Le condensateur  $C$  fournit de l'énergie à la charge  $R$ .
- **La phase de roue libre** : lorsque l'interrupteur  $M$  est ouvert, l'interrupteur  $D$  est fermé. Durant cette séquence, l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est restituée au condensateur et à la charge  $R$ . Lors de cette phase, le fait que l'inductance  $L$  soit en série avec la source de tension d'entrée permet d'obtenir un montage survolteur.

La figure I.23 présente l'allure du signal de commande appliqué à l'interrupteur  $T_r$ . C'est un signal rectangulaire de fréquence  $f$  dont la durée est à l'état haut (durée de conduction de l'interrupteur  $T_r$ , notée  $T_{ON}$ ) est ajustée par le paramètre  $\alpha$ . Ce paramètre, appelé rapport cyclique, est défini comme étant le rapport entre la durée de conduction de l'interrupteur  $T_r$  et la période de découpage  $T$  de celui-ci :  $\alpha = \frac{T_{ON}}{T}$ , On a :  $T = T_{ON} + T_{OFF}$  ou  $T_{OFF}$  correspond à la durée de blocage de l'interrupteur  $T_r$ .

La durée de conduction  $T_{ON}$  est compris entre 0 et  $T$  donc, le rapport cyclique est compris entre 0 et 1. On peut exprimer la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur  $T_r$  en fonction de  $\alpha$  et  $T$  :

- Durée de conduction :  $T_{ON} = \alpha T$ .
- Durée de blocage :  $T_{OFF} = (1-\alpha) T$ .

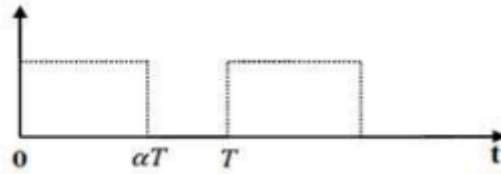


Figure 23: Signal de commande de l'interrupteur  $T_r$

Dans l'étude qui suit, nous ferons les hypothèses suivantes :

- La tension d'alimentation  $V_{PV}$  est continue et constante.
- La valeur du condensateur  $C$  est suffisamment grande afin de pouvoir considérer la tension de sortie  $V_S$  comme continue.
- Les composants sont idéaux.

On peut distinguer deux régimes de conduction :

- La conduction continue qui correspond au cas où le courant  $i$  traversant l'inductance ne s'annule jamais.
- La conduction discontinue qui correspond au cas où le courant  $i$  traversant l'inductance s'annule avant la prochaine phase active.

Dans la suite on explique le comportement de la structure en fonction de ces deux régimes de conduction. L'objectif principal est de déterminer les relations reliant les grandeurs électriques d'entrée et de sortie du convertisseur ainsi que les formules permettant de dimensionner les différents composants

## Conduction continue

- **Séquence 1** : Phase active,  $0 < t < \alpha T$

À l'instant  $t = 0$ , on ferme l'interrupteur  $T_r$  pendant une durée  $\alpha T$ . La tension aux bornes de la diode  $D$  est égale à  $V_d = V_{T_r} - V_s$ . Comme l'interrupteur  $T_r$  est fermé, on a  $V_{T_r} = 0$  ce qui implique  $V_d = -V_s$ . La diode est donc bloquée puisque  $V_s > 0$ . Dans ces conditions, on obtient alors le schéma équivalent de la figure ci-dessous.

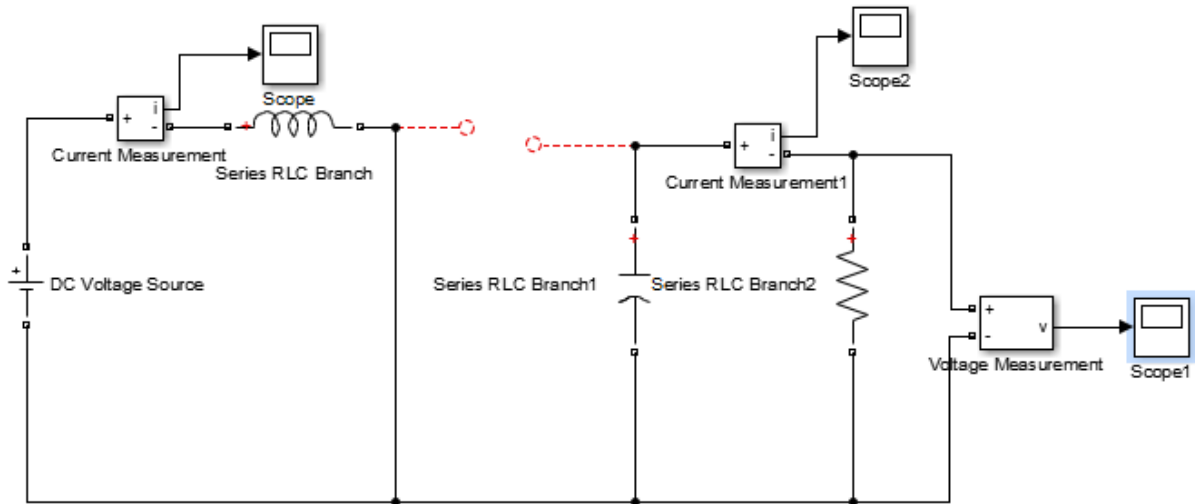


Figure 24: Schéma équivalent du hacheur survolteur durant la phase active MATALAB/SIMULINK

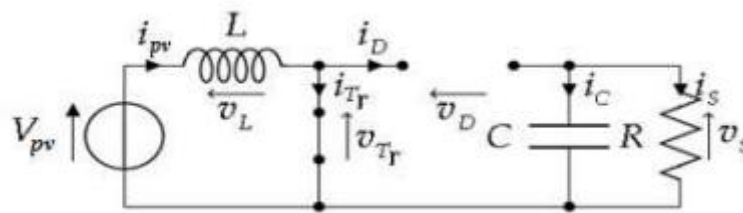


Figure 25: Schéma équivalent du hacheur survolteur durant la phase active

La tension aux bornes de l'inductance est alors :

$$V_L = V_{pv} = L \frac{di}{dt} > 0 \dots \dots \dots \text{II. 1}$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient l'expression suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_L = \frac{V_{pv}}{L} t + I_{Lmin}$$

**Séquence 2** : Phase de roue libre,  $\alpha t < t < T$

À l'instant  $t = \alpha T$ , on ouvre l'interrupteur pendant une durée  $(1 - \alpha)T$ . Pour assurer la continuité du courant, la diode entre en conduction. On obtient alors le schéma équivalent de la figure ci-dessous [5]:

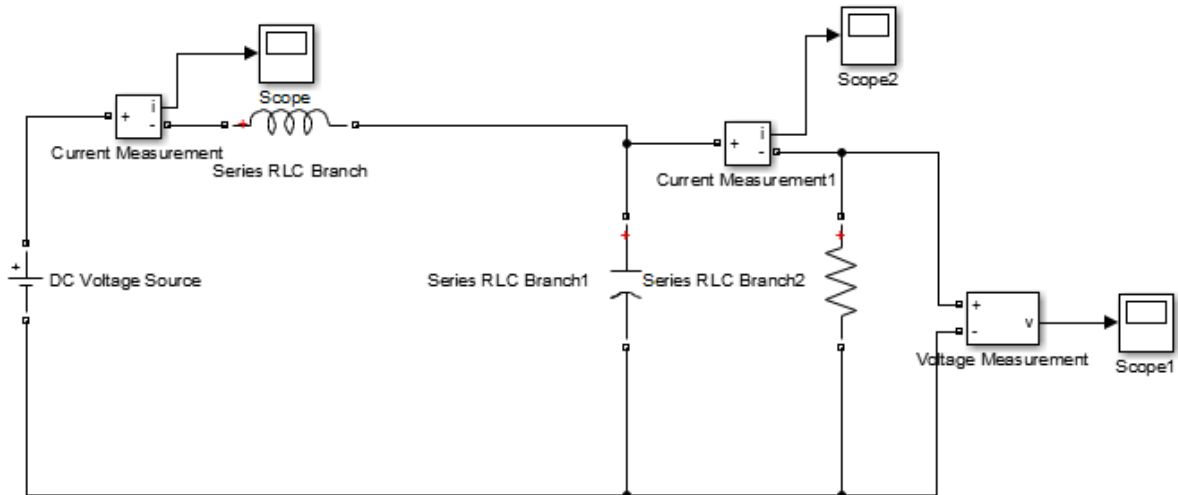


Figure 26: Schéma équivalent du hacheur Boost durant la phase de roue libre  
MATALAB/SIMULINK

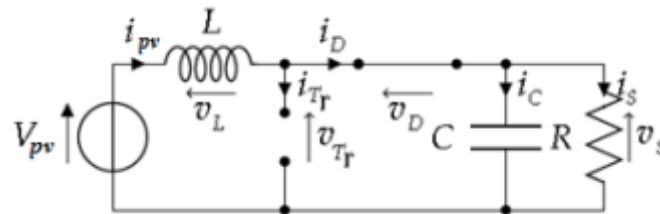


Figure I.27: Schéma équivalent du hacheur Boost durant la phase de roue libre

### I-3-3-2-Hacheur dévolteur :

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $V_s$  est inférieure à celle de l'entrée  $V_i$ . Pour un rapport cyclique «  $\alpha$  » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$V_s = \alpha \cdot V_i$$

- Présentation de la structure :
- La tension d'entrée  $V_e = 12V$  DC
- La tension de la sortie  $V_s = 5V$  DC
- L'inducteur  $L = 12.15e-6$  H
- La capacité  $C = 3.75e-6$  F
- La résistance  $R = 1\text{ohm}$
- La fréquence de commutation  $= 400\text{KHz}$

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La (figure I.28) présente le schéma de principe du

convertisseur dévolteur [5]. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $M = V_0 / V_i$  change avec le rapport cyclique du commutateur.

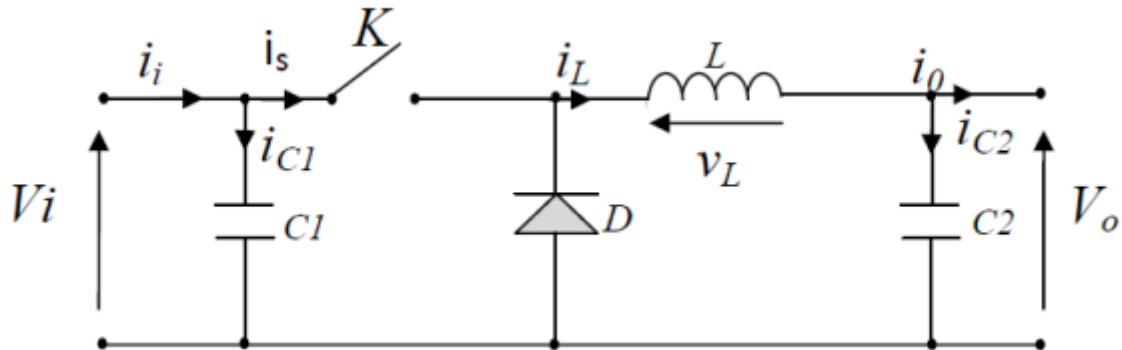


Figure 28: Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur (buck).

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique.

Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La (figure 29) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant  $d \cdot T_s$  et l'interrupteur ouvert pendant  $(1 - d) \cdot T_s$  [6].

Schémas équivalents du hacheur dévolteur, K fermé

Schémas équivalents du hacheur dévolteur, K ouvert

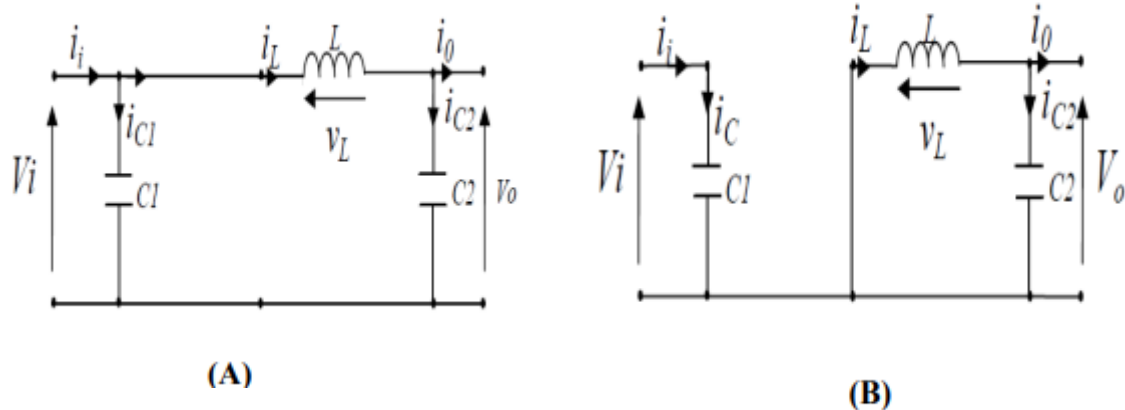


Figure 29: Schémas équivalents du hacheur dévolteur avec K fermé et ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la (figure I.28), on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour la première période  $d \cdot T_s$  :



$$\begin{cases} ic1(t) = C1 \frac{dvi(t)}{dt} = ii(t) - iL(t) \\ ic2(t) = C2 \frac{dv0(t)}{dt} = iL(t) - i0(t) \\ VL(t) = L \frac{diL(t)}{dt} = Vi(t) - V0(t) \end{cases}$$

Pour la deuxième période  $(1-d).T_s$

$$\begin{cases} ic1(t) = C1 \frac{dvi(t)}{dt} = ii(t) \\ ic2(t) = C2 \frac{dv0(t)}{dt} = iL(t) - i0(t) \\ VL(t) = L \frac{diL(t)}{dt} = -V0(t) \end{cases}$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période  $T_s$ , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) T_s = \frac{dx}{dt} dT_s + \frac{dx}{dt(1-d)} (1-d) T_s$$

En appliquant la relation (I.18) sur les systèmes d'équations (I.16) et (I.17), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} C1 \frac{dvi(t)}{dt} T_s = dT_s(ii - iL) + (1-d)T_s ii \\ C2 \frac{dv0(t)}{dt} T_s = dT_s(iL - i0) + (1-d)T_s(iL - i0) \\ L \frac{diL(t)}{dt} = dT_s(Vi - V0) + (1-d)T_s(-V0) \end{cases}$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} iL(t) = \frac{1}{d} (ii(t) - C1 \frac{dvi(t)}{dt}) \\ i0(t) = iL(t) - C2 \frac{dv0(t)}{dt} \\ Vi(t) = \frac{1}{d} (L \frac{diL(t)}{dt} + V0(t)) \end{cases}$$

### **I-4- Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les composants semi-conducteurs de puissance et leurs utilisations dans les convertisseurs statiques, ces derniers jouent un rôle important pour convertir l'énergie électrique basant sur les hacheurs et les onduleur

**Chapitre II :**  
**LES HACHEURS**  
**MULTICELLULAIRES**

### II.1 Introduction

L'application de l'électronique de puissance dans différents domaines industriels, tel que le transport d'énergie à haute tension ou le pilotage de machines électriques à haute vitesse, demande une augmentation de la puissance traitée par les convertisseurs statiques. Cette augmentation de puissance se traduit normalement par une augmentation de la tension d'entrée et/ou du courant de sortie.

Parmi les solutions proposées, nous trouvons est la conception de nouvelles architectures de conversion capables de répartir les contraintes tension/courant au niveau des interrupteurs de puissance.

Celle-ci est effectuée par l'association de cellules de commutation classiques. Ces associations ont l'avantage d'augmenter les degrés de liberté des structures de conversion, d'améliorer la qualité des signaux de sortie et aussi de limiter les contraintes de tension / courant au niveau des interrupteurs. Dans la suite, nous allons présenter les associations en série et en parallèle qui forment la base des structures de conversion multiniveaux

## II-2- Convertisseurs multicellulaires

### II-2-1- Convertisseurs multicellulaires séries FCMC (Flying Capacitor Multilevel Converters)

Dans les années 1990, un brevet déposé par Thierry A. Meynard et Henri Foch a donné naissance au convertisseur multicellulaire série (CMS). Ce type de conversion d'énergie repose sur l'utilisation des interrupteurs commandés placés en série. La structure du CMS est basée sur la mise en série des cellules de commutation, entre les quelles une source de tension flottante est insérée. Ces sources de tension flottantes sont créées à l'aide des condensateurs. Le convertisseur multicellulaire série peut être adapté à différentes configurations telles que le montage en hacheur, en onduleur avec un point milieu capacitif, en demi-pont ou en pont complet [7].

Dans la Figure 30, on peut voir le schéma d'un bras d'un convertisseur multicellulaire série à N niveaux, composé de  $p = N - 1$  cellules

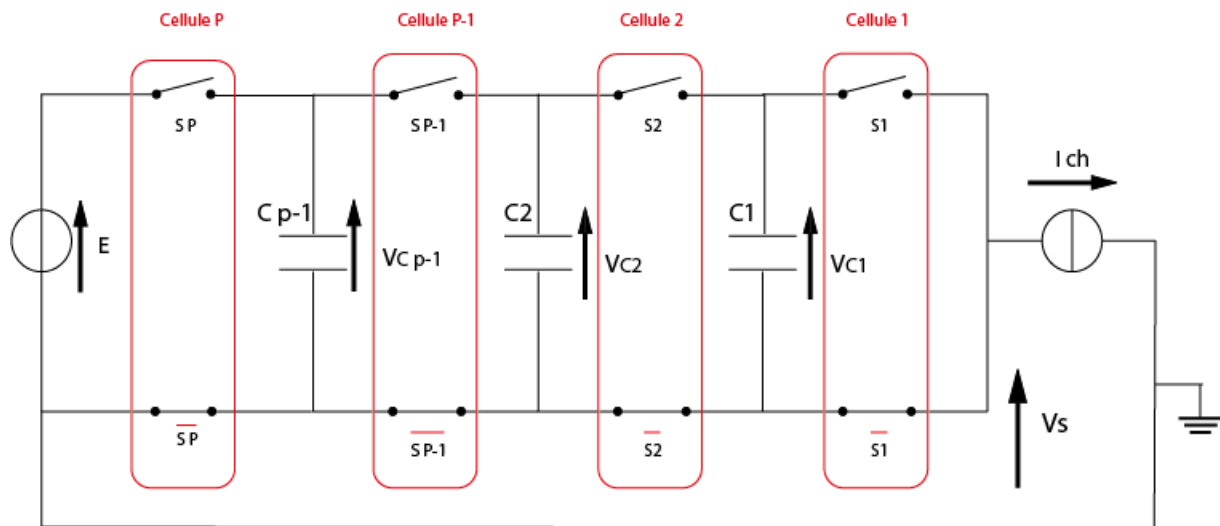


Figure 30: Bras multicellulaire à P cellules de commutation.

#### II-2-1-1- La cellule élémentaire de commutation

La figure (30) présente le schéma de principe d'une cellule élémentaire de commutation. Pour respecter les règles d'interconnexion des sources, les signaux de commande des interrupteurs  $S$  et  $\bar{S}$  doivent être complémentaires, c'est-à-dire que lorsque l'un est passant, l'autre est bloqué. Ainsi, une cellule élémentaire de commutation ne peut avoir que deux états. Par convention, la cellule de commutation est considérée à l'état 1 lorsque l'interrupteur  $S$  est passant, et à l'état 0 lorsque ce même interrupteur est bloqué.

Sur le tableau (II.1) on résume les caractéristiques principales d'une cellule de commutation.

Etat	Etat S	Etat $\bar{S}$	$V_s$	$i_s$	$i_{\bar{s}}$	$V_s$	$V_{\bar{s}}$
1	Passant	Bloqué	E	$i_s$	0	0	E
0	Bloqué	Passant	0	0	$i_s$	E	0

Tableau 1: Caractéristiques d'une cellule de commutation

La cellule de commutation peut être considérée comme un système binaire, ainsi pour faciliter les explications, par la suite on va définir l'état passant des interrupteurs comme état 1 et l'état bloqué comme état 0.

### II-2-1-2- Principe de base d'un convertisseur multicellulaire série [8]

Il est nécessaire, lors d'une association en série de composants semi-conducteurs, d'assurer une répartition équilibrée de la tension d'alimentation sur les différents interrupteurs. Si nous considérons deux interrupteurs de tenue en tension  $E/2$  à la place d'un seul capable de supporter  $E$ , il est nécessaire de faire en sorte que la tension appliquée sur ces interrupteurs soit équilibrée à  $E/2$ . Une solution consiste à insérer une source de tension, comme indiqué sur la figure 31.

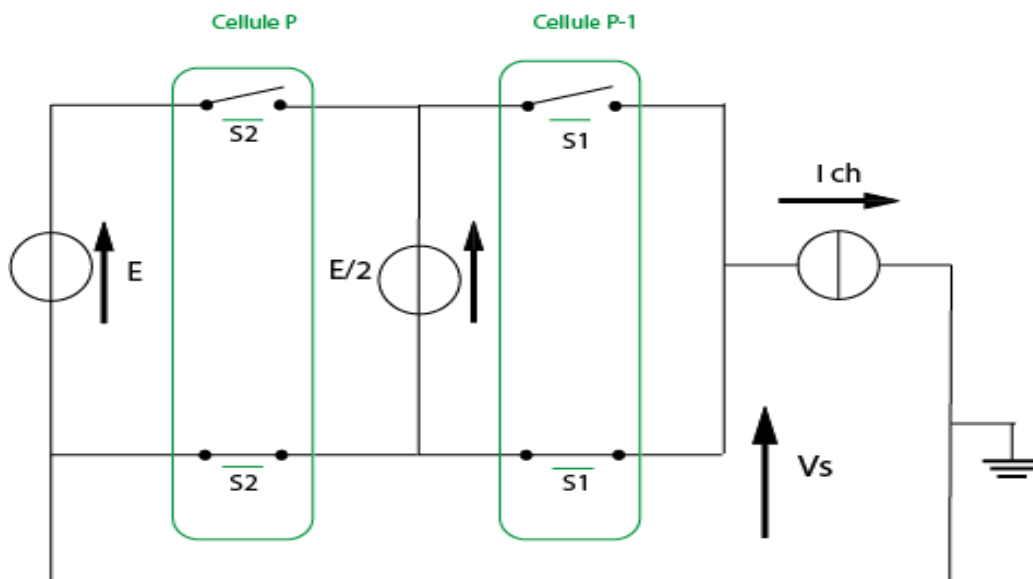


Figure 31: Bras de convertisseur multicellulaire série à deux cellules de commutation.

Si la source de tension flottante délivre une tension égale à  $E/2$ , alors la répartition est équilibrée. En effet,  $V_{cell1} = E/2$ ,  $V_{cell2} = (E - (E/2)) = E/2$ . Ce type de convertisseur est facilement généralisable à  $P$  cellules de commutation (figure 31).

Le convertisseur est à  $P$  cellules. Chaque cellule est constituée de deux interrupteurs et d'une source de tension.

Les interrupteurs fonctionnent de façon complémentaire : quand l'un est passant l'autre est bloqué. La fonction de chaque cellule  $i$  est représentée par  $S_i$ . Le  $S_i$  sera également appelé état de la cellule  $i$ . La tension de sortie est notée  $V_s$ .

La commande par les  $S_i$  donne  $2^P$  configurations différentes. La tension en régime permanent est de  $(P+1)$  niveaux.

**II-2-1-3- Cas d'un convertisseur a deux cellules**

La structure de base du convertisseur multicellulaire série commence par l'association de deux cellules élémentaires de commutation, comme présenté sur la figure 32

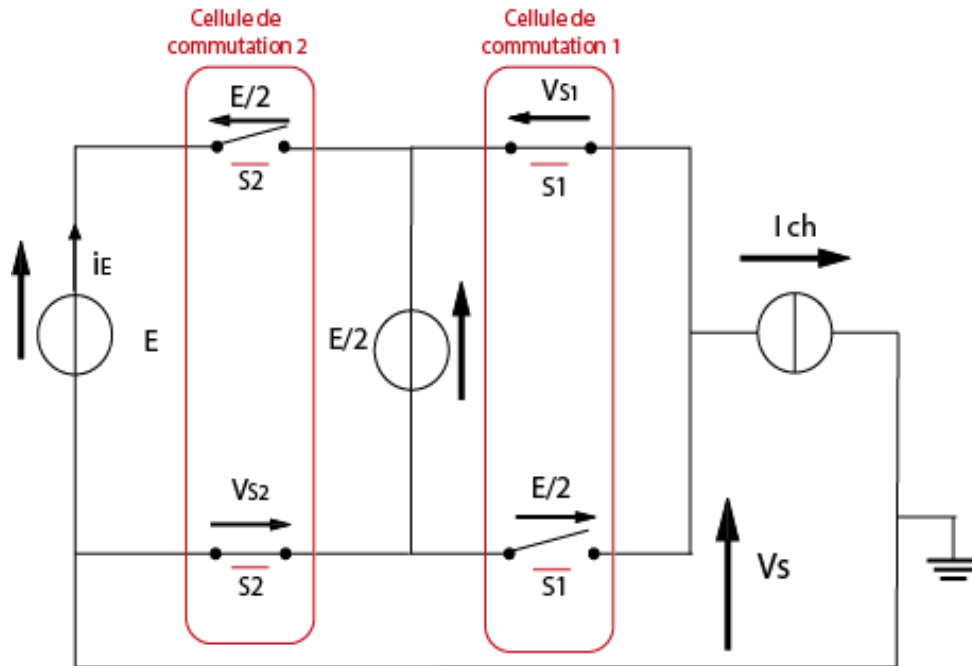


Figure 32: Deux cellules de commutation

Etant donné que la cellule peut être considérée comme un système binaire, l'association de deux cellules donne  $2^2$  états possibles dont les caractéristiques principales sont résumées sur le tableau 2.

$S_2$	$S_1$	$V_{s2}$	$V_{s1}$	$i_{E1}$	$i_E$	$V_s$
0	0	$E-E_1$	$E_1$	0	0	0
0	1	$E-E_1$	0	0	$i_{ch}$	$E_1$
1	0	0	$E_1$	$i_{ch}$	$i_{ch}$	$E-E_1$
1	1	0	0	$i_{ch}$	0	$E$

Tableau 2: Caractéristiques principales de l'association de deux cellules

Soit

$$V_s = S_1(E_1) + S_2 (E-E_1) \dots \dots \dots \text{II. 1}$$

Où :  $S_1$  et  $S_2$  représentent l'état de la cellule 1 et de la cellule 2 respectivement.

Si la tension d'alimentation principale est égale à E, sachant qu'elle doit être partagée équitablement parmi les interrupteurs mis en série, on en déduit facilement que la source de tension E1 doit être égale à E/2. Par ailleurs, cette même valeur de tension va nous permettre d'avoir une tension multiniveau à la sortie du convertisseur dont les valeurs sont égales à 0, E et E/2.

S2	S1	VS2	VS1	VS
0	0	$\frac{1}{2}E$	$\frac{1}{2}E$	0
0	1	$\frac{1}{2}E$	0	$\frac{1}{2}E$
1	0	0	$\frac{1}{2}E$	$\frac{1}{2}E$
1	1	0	0	E

Tableau 3: Caractéristiques principales de l'association de 2 cellules (E1=E/2).

On peut généraliser la méthode précédente pour exprimer les grandeurs principales d'une association de P cellules de commutation.

Les grandeurs caractéristiques de l'association de P cellules de commutation sont définies dans le tableau 4 :

Nombre de cellules associées	P
Nombre de condensateurs associés	P-1
Nombre d'états possibles	$2^P$
Nombre de niveaux de tension en sortie	P+1
Valeur de tension principale d'alimentation	E
Valeur de la source de tension de cellule i	$V_{ci} = (\frac{i}{p})E$

Tableau 4: Définition des grandeurs caractéristiques de l'association de P cellules de commutation

Nous avons, également, les expressions suivantes :

Tension de sortie :

$$V_s = \sum_{i=1}^p (E_i - E_{i-1}) \cdot S_i \dots \dots \dots \text{II. 2}$$

Avec :  $E_0 = 0$

Tensions des interrupteurs :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{Si} = (E - E_{i-1}) \cdot \bar{S}_i \dots \dots \dots \text{II. 3} \\ V_{\bar{S}i} = (E - E_{i-1}) \cdot S_i \dots \dots \dots \text{II. 4} \end{array} \right.$$

Les courants débités par les sources de tension sont :



$$i_{Ei} = (S_i - S_{i+1})i_s \dots \dots \dots \text{II. 5} \quad \text{I.10}$$

En utilisant la relation entre les différentes sources de tension exprimée par :

$$V_{ci} = \frac{i}{p} E \dots \dots \dots \text{II. 6}$$

Les expressions des tensions citées ci-dessus peuvent être simplifiées :

Tension de sortie :

$$V_{ci} = \frac{E}{p} \sum_{i=1}^p S_i \dots \dots \dots \text{II. 7}$$

Tensions des interrupteurs :

$$\begin{cases} V_{si} = \frac{E}{p} \bar{S}_i \dots \dots \dots \text{II. 8} \\ V_{\bar{S}_i} = \frac{E}{p} S_i \dots \dots \dots \text{II. 9} \end{cases} \quad \text{I.7}$$

En résumé, l'association de cellules de commutation pour former une structure multiniveaux obéit aux grandeurs définies dans le tableau 3, ainsi qu'aux relations (1) et (3).

**II-2-1-4- Le rôle des condensateurs dans les convertisseurs de type NPC et multicellulaire série**

La définition des potentiels de référence nécessaire pour la réalisation de structures des convertisseurs multiniveaux, de type NPC comme multicellulaire série, est assurée à l'aide des condensateurs. Le problème de l'équilibrage de la tension de ces condensateurs est bien connu comme une des contraintes liées à la réalisation de ces types de convertisseur. La fonction principale de ces condensateurs est, d'une part, maintenir la répartition équilibrée de la tension d'entrée sur les dispositifs semi-conducteurs mis en série et d'autre part, assurer en sortie du convertisseur une forme d'onde multiniveaux (constituée d'échelons de tension d'amplitude égale). Ainsi, cet équilibrage est un point clé de fonctionnement de ces types de convertisseurs multiniveaux.

Dans le cas d'un convertisseur de type NPC, p condensateurs sont mis en série et connectés en parallèle avec l'alimentation principale E, pour former ainsi une sortie de diviseur de tension. La tension moyenne aux bornes des condensateurs est égale à  $E/p$ . Elle sert à maintenir l'équilibre des tensions des interrupteurs mis en série, en même temps qu'elle permet d'avoir une tension multiniveau en sortie de convertisseur. Dans une structure de convertisseur de type multicellulaire série la tension sur chaque interrupteur est donnée par la différence de tension entre les deux condensateurs qui se trouve à côté de l'interrupteur. La tension d'entrée doit être répartie également entre les p interrupteurs mis en série. Le condensateur qui alimente la cellule de sortie (cellule 1) d'un bras doit avoir une tension égale à  $E/p$ , la tension aux bornes du condensateur précédent (cellule 2) doit être égale à  $2 \cdot E/p$ , finalement le condensateur P, qui alimente la cellule p, doit avoir une tension égale à E, ce dernier condensateur est celui à l'entrée du convertisseur (cellule P).

D'autre part, l'évolution de la tension aux bornes d'un condensateur, pendant un intervalle de temps comprise entre  $t_1$  et  $t_2$  est donné par :

$$\Delta V_{cp} = \frac{1}{C_p} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \dots \dots \dots \text{II. 10} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$\Delta V_{cp}$ : Variation de la tension aux bornes du condensateur p .

$C_p$  : Capacité de condensateur P.

$i(t)$ : Courant traversant le condensateur p.

$t_2 - t_1$  : Intervalle de temps considéré.

Cette tension aux bornes des condensateurs doit rester à sa valeur d'équilibre, selon la topologie du convertisseur. Ainsi, pour une évolution moyenne nulle autour de cette valeur, il est nécessaire que le courant moyen traversant les condensateurs soit aussi de valeur moyenne nulle.

Cependant, il y a des conditions de fonctionnement pour lesquelles la tension des condensateurs doit évoluer vers sa valeur d'équilibre, à savoir :

1. Lors de la mise sous tension du convertisseur avec des tensions aux bornes des condensateurs différentes de la valeur d'équilibre.
2. Lors d'un changement de la tension d'alimentation E, au cours de fonctionnement de convertisseur.

L'exigence d'assurer l'équilibre des tensions aux bornes des condensateurs implique que la commande du convertisseur puisse assurer cet équilibre mais au même temps soit capable de retrouver l'équilibre.

A partir de l'équation (1.1) il est clair que la grandeur qui fait évoluer la tension des condensateurs, pendant un certain intervalle de temps, est le courant qui les traverse. Ainsi, plusieurs techniques peuvent être mises au point afin d'assurer l'équilibrage des tensions (ou les faire évoluer vers le point d'équilibre).

**II-2-1-5- Analyse des formes d'onde**

Dans ce paragraphe, nous considérerons toujours des rapports cycliques égaux appliqués sur les différentes cellules.

La tension obtenue aux bornes d'un bras est donnée par la relation suivante :

$$V_S = \sum_{i=1}^p (E_i - E_{i-1}) \cdot S_i = \frac{E}{p} \sum_{i=1}^p S_i \dots \dots \dots \text{II. 11}$$

Afin d'étudier en détail les formes d'onde obtenues, nous allons tout d'abord travailler avec un convertisseur à deux cellules puis nous généraliserons à p cellules.



Ainsi, l'évolution de la dynamique des tensions aux bornes des condensateurs doit être similaire à celle de la figure 33, pour préserver le bon fonctionnement du convertisseur. Car, la stabilité des tensions condensateurs assure un partage égal des contraintes en tension sur les semi-conducteurs mis en série et permet aussi à la tension de sortie d'atteindre tous ces niveaux avec une amplitude des niveaux égale à [10]:

$$E_{niv}(t) = \frac{E(t)}{i} \dots \dots \dots \text{II. 13}$$

### II-2-1-8- Les avantages et les inconvénients d'un convertisseur multicellulaire série

#### Les avantages :

- \*Permet d'assurer une bonne répartition de la tension sur chaque interrupteur quel que soit le régime statique ou dynamique.
- \*On peut réaliser n'importe quelle combinaison sans réduire la durée de vie du système.
- \*L'utilisation de composants ayant à tenir des tensions plus faibles permet d'augmenter les caractéristiques de commutation.
- \*Son aspect modulaire permet de monter en tension facilement en augmentant le nombre de cellules.

#### Les inconvénients :

- \* La nécessité d'un grand nombre de condensateurs, notamment pour une configuration triphasée.

### II-2-2- Convertisseurs multicellulaires parallèles PMC (Parallel Multicellular Converter)

Le convertisseur multicellulaire parallèle a fait son apparition au début des années 1990. Cette structure repose sur l'association de P cellules de commutation interconnectées à l'aide d'inductances indépendantes, également appelées inductances de liaison. Cette topologie permet de réduire les contraintes en courant sur les interrupteurs de puissance, car chaque cellule est soumise à une contrainte équivalente à  $I_E/P$ , étant donné que les cellules sont connectées en parallèle.

La figure 34 illustre un exemple de convertisseur multicellulaire parallèle comprenant P cellules de commutation

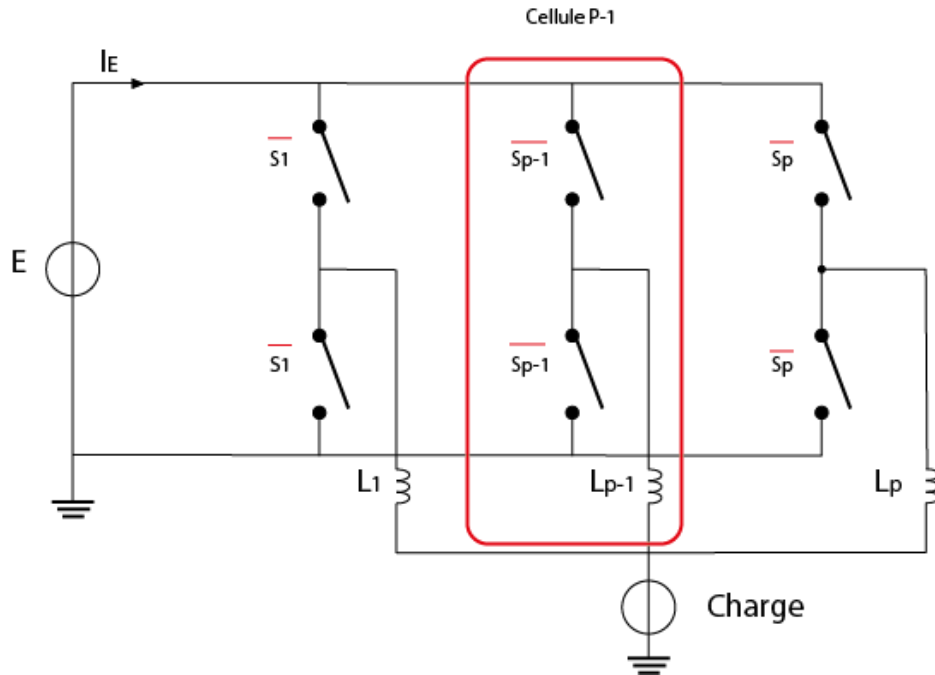


Figure 34: Convertisseur multicellulaire parallèle à P cellules de commutation.

### II-2-2-1-Topologie et principe de fonctionnement

La mise en parallèle de cellules de commutations s'effectue en connectant directement les cellules aux bornes de la source de tension et en courant leurs points milieu par le biais d'inductances de liaison comme le montre la figure 34

Les deux interrupteurs d'une cellule élémentaire obéissent aux lois régissant le fonctionnement d'une cellule de commutation classique :

- \*Les deux interrupteurs ne doivent jamais être passants simultanément, car cela entrainerait un court-circuit de la source.

- \*Les deux interrupteurs ne doivent jamais être bloqués simultanément car la source de courant  $I_s$  serait alors en circuit ouvert

- \*En pratique, des temps morts devront être prévus.

- \*A partir de ce schéma, on peut réaliser tous les types de conversion (DC/DC, DC/AC, AC/AC).

- \*Les réversibilités en courant et en tension des interrupteurs doivent être compatibles avec les réversibilités des sources de courant  $I_s$  et de tension  $E$ .

#### II-2-2-2-1- Principe de base d'un PMC à 1 cellule de commutation

Le convertisseur multicellulaire parallèle à 1 cellule de commutation est constitué de deux semi-conducteurs de puissance et une inductance (élément passif) comme indiqué sur la figure 35. Cette cellule de commutation est similaire à un hacheur abaisseur.

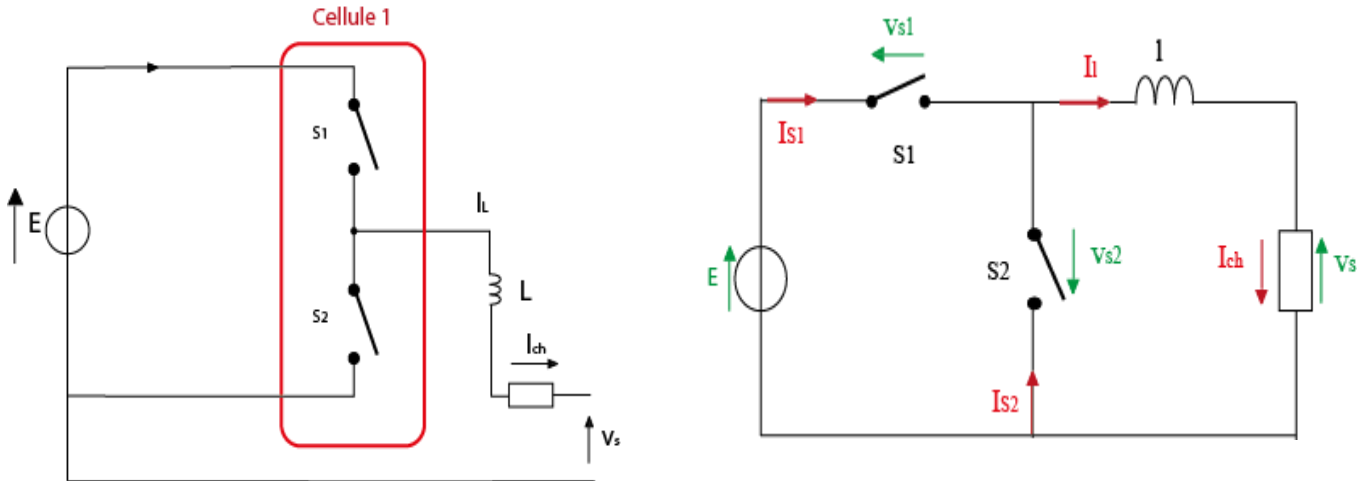


Figure 35: Convertisseur multicellulaire parallèle à 1 cellule.

On peut considérer la cellule de commutation du PMC à 1 cellule comme un système binaire, ce qui nous donne 21 états possibles.

- \*S<sub>1</sub> passant et S<sub>2</sub> bloqué →  $\begin{cases} V_S = E & \text{avec} & V_{S_2} = -E \\ I_E = I_L & \text{avec} & I_{S_1} = I_L \end{cases}$
- \*S<sub>1</sub> bloqué et S<sub>2</sub> passant →  $\begin{cases} V_S = 0 & \text{avec} & V_{S_1} = E \\ I_E = 0 & \text{avec} & I_{S_2} = I_L \end{cases}$

Si on considère que les sources d'alimentations sont unidirectionnelles en courant et en tension, on peut écrire à partir de la figure 35 :

$$\begin{cases} V_{S_1} - V_{S_2} = E & \dots \dots \dots \text{II. 13} \\ I_{S_1} + V_{S_2} = I_L & \dots \dots \dots \text{II. 14} \end{cases}$$

Alors, la tension de sortie V<sub>s</sub> est exprimée comme suit :

$$V_S = S_1 \times E \dots \dots \dots \text{II. 15}$$

Le courant traversant l'inductance I<sub>L</sub> est égal au courant dans la charge I<sub>ch</sub> :

$$I_L = I_{ch} \dots \dots \dots \text{II. 15}$$

Il faut noter que les contraintes sur les deux interrupteurs sont les mêmes

**II-2-2-3- Cas d'un convertisseur PMC à 2 cellules de commutation :**

Le convertisseur multicellulaire parallèle à 2 cellules de commutation est constitué de quatre semi-conducteurs de puissance et de deux inductances de même calibre.

La figure 36 présente un convertisseur multicellulaire parallèle de 2 cellules de commutation.

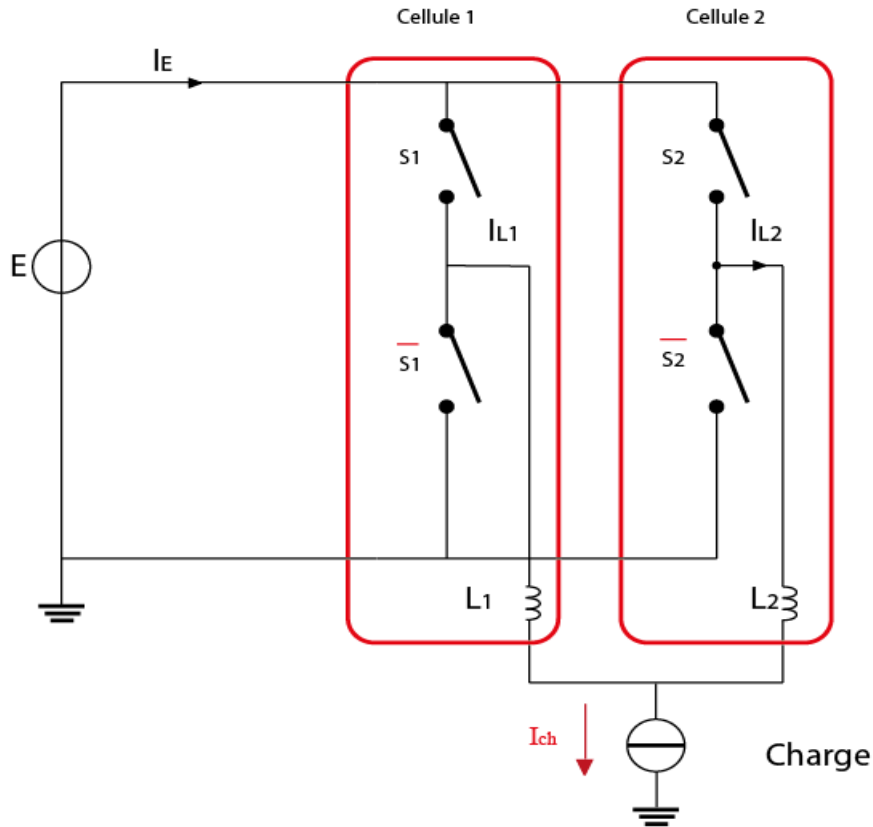


Figure 36: Convertisseur multicellulaire parallèle à 2 cellules.

Dans un convertisseur multicellulaire parallèle à deux cellules de commutation, chaque cellule peut prendre deux états distincts : 0 ou 1. Par conséquent, cela donne un total de

$2^2 = 4$  états possibles

S1	S2	$I_{L1}$	$I_{L2}$	$I_{ch}$
0	0	0	0	0
0	1	0	$I_E/2$	$I_E/2$
1	0	$I_E/2$	0	$I_E/2$
1	1	$I_E/2$	$I_E/2$	$I_E$

Tableau 5: résume les caractéristiques principales de ces états

La méthode d'analyse mentionnée peut être appliquée à un convertisseur multicellulaire à  $P$  cellules de commutation. Le tableau 5 regroupe les grandeurs caractéristiques d'un PMC à  $P$  cellules :





condensateurs flottants par le convertisseur, ainsi que les pertes dans les semi-conducteurs de puissance [13]. La structure multicellulaire superposée peut être adaptée à toutes les configurations : montage en hacheur ou en onduleur.

Les convertisseurs multicellulaires superposés (SMC) sont des topologies de convertisseurs apparues au début des années 2000. Ils sont composés de plusieurs étages, où chaque étage est formé par la connexion en série de P cellules de commutation séparées par P-1 condensateurs flottants. Un convertisseur SMC de n étages et de P cellules est noté SMC Pxn, ce qui signifie qu'il peut générer (Pxn)+1 niveaux.

Cette topologie hybride présente plusieurs avantages par rapport aux topologies concurrentes dans le domaine des convertisseurs. Tout d'abord, elle permet de répartir les contraintes de tension du convertisseur entre plusieurs cellules de commutation, ce qui réduit les contraintes sur chaque cellule individuelle. De plus, elle divise la tension d'entrée en plusieurs fractions, ce qui réduit le nombre de commutations nécessaires pour les semi-conducteurs de puissance. En conséquence, le convertisseur SMC offre d'excellentes performances dynamiques grâce à une fréquence de tension découpée multipliée et à un nombre accru de niveaux de tension. Un autre avantage de cette topologie est la réduction significative de l'énergie stockée dans les condensateurs flottants du convertisseur, ainsi que des pertes dans les semi-conducteurs de puissance. Cela permet d'améliorer l'efficacité globale du convertisseur.

Enfin, la structure multicellulaire superposée peut être adaptée à différentes configurations, que ce soit en tant que hacheur ou en tant qu'onduleur, ce qui la rend flexible et applicable à diverses applications.

En résumé, les convertisseurs multicellulaires superposés (SMC) sont des topologies de convertisseurs qui offrent des avantages tels que la répartition des contraintes de tension, la réduction du nombre de commutations, de l'énergie stockée et des pertes, ainsi que de bonnes performances dynamiques

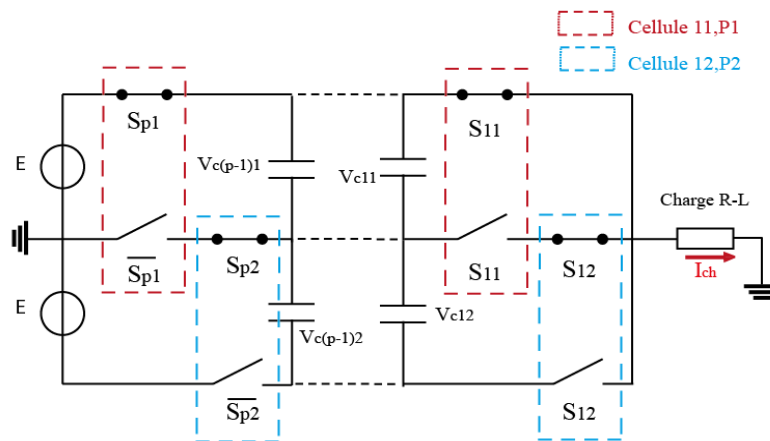


Figure 37: Convertisseur multicellulaire superposé Px2.

### II-2-3-1- Principe de base d'un convertisseur SMC 1x2 (3 niveaux)

La Figure 37 illustre un convertisseur multicellulaire superposé à 3 niveaux, qui est composé de 4 à 6 interrupteurs. Dans cette configuration, les semi-conducteurs de la branche médiane

sont connectés en série et en opposition, formant ainsi un interrupteur bidirectionnel capable de bloquer le courant. La répartition de la contrainte en tension dans ce convertisseur est directement liée à l'état des interrupteurs, c'est-à-dire s'ils sont en mode passant ou en mode bloqué). Lorsque les interrupteurs sont en mode passant, la tension est répartie de manière équilibrée entre les différentes cellules de commutation, ce qui permet de réduire les contraintes de tension sur chaque cellule individuelle. En revanche, lorsque les interrupteurs sont en mode bloqué, la tension est isolée dans les différentes cellules de commutation, évitant ainsi les surtensions ou les contraintes excessives sur les semi-conducteurs. Par conséquent, la répartition de la contrainte en tension dépend de l'état des interrupteurs, jouant un rôle crucial dans le bon fonctionnement du convertisseur multicellulaire superposé à 3 niveaux.

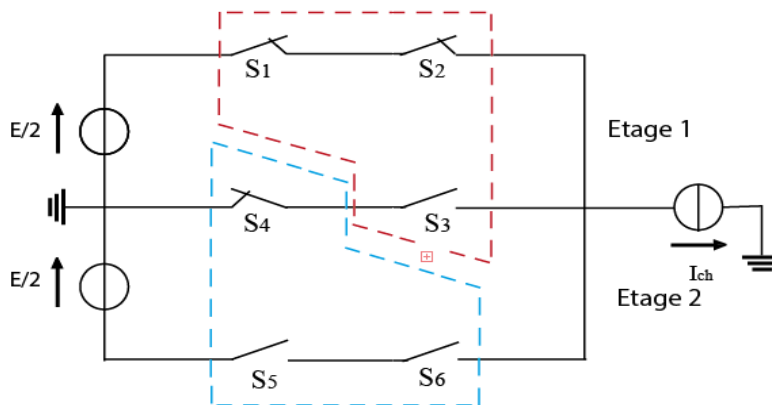


Figure 38: Convertisseur multicellulaire superposé 1x2.

La figure 38 représente toutes les configurations possibles du convertisseur SMC 1x2. Du point de vue de la circulation du courant, les interrupteurs S1 et S2, ainsi que S5 et S6, peuvent être considérés comme un seul interrupteur. Les switches S1 et S3, de même que S4 et S5, sont commandés de manière complémentaire

\*Durant l'alternance positive de la référence, l'interrupteur S4 est toujours activé, tandis que S5 et S6 sont toujours désactivés. Si les interrupteurs S1 et S2 sont allumés, alors S3 est éteint et la tension de sortie est fixée à  $E/2$  (cas 1). En revanche, si S3 est allumé, alors S1 et S2 sont éteints et la tension de sortie est égale à 0V (cas 3).

\*De manière similaire, pendant l'alternance négative de la référence, les interrupteurs S1 et S2 sont toujours désactivés et S3 est toujours activé. Si les interrupteurs S5 et S6 sont activés, alors S4 est éteint et la tension de sortie est fixée à  $-E/2$  (cas 2). En revanche, si S4 est allumé, alors S5/S6 sont éteints et la tension de sortie est égale à 0V (cas 3)

\*Le signe du courant de charge détermine si celui-ci passe à travers une diode ou un transistor. De manière similaire à ceux de l'onduleur NPC (Neutral Point Clamped), les semi-conducteurs externes ne sont pas commutés pendant au moins la moitié de la période de modulation.

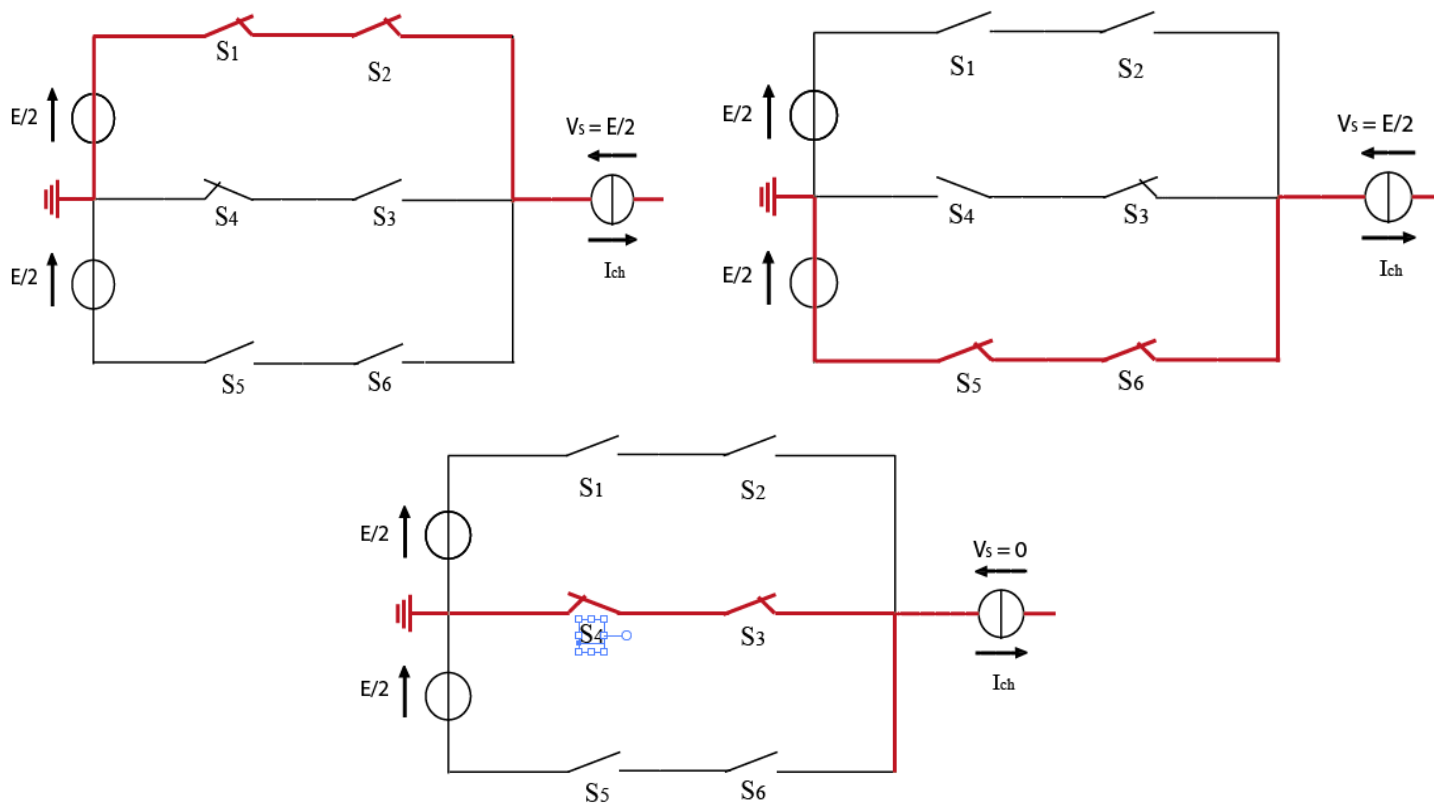


Figure 39: Configurations possibles du convertisseur SMC 1x2



\*Répartition des tensions : Les tensions sont réparties entre les différentes cellules, ce qui permet de réduire les contraintes de tension sur chaque composant individuel, améliorant ainsi la fiabilité et la durée de vie du système.

\*Réduction des pertes de commutation : L'hacheur multicellulaire superposé utilise des niveaux de tension intermédiaires, ce qui permet de réduire les pertes de commutation par rapport à un convertisseur à deux niveaux, où les transitions entre les niveaux de tension sont plus abruptes.

\*Flexibilité de contrôle : En ajustant les niveaux de tension des cellules individuelles, il est possible de contrôler la tension de sortie de manière plus précise et de s'adapter à différentes conditions de charge et de fonctionnement.

### **Les inconvénients :**

\* Complexité accrue : Les hacheurs multicellulaires superposés sont généralement plus complexes que les convertisseurs traditionnels à une seule cellule. Ils nécessitent des circuits de commande et de gestion plus avancés pour coordonner le fonctionnement de plusieurs cellules et assurer une conversion d'énergie efficace.

\* Coûts plus élevés : En raison de leur complexité accrue, les hacheurs multicellulaires superposés peuvent être plus coûteux à concevoir, à fabriquer et à entretenir par rapport aux convertisseurs à une seule cellule. Cela peut limiter leur adoption dans certains domaines où les coûts sont un facteur critique.

### II-3- Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté les convertisseurs multiniveaux (multicellulaire) pour lesquels nous avons donné un petit rappel sur les convertisseurs multicellulaires séries, parallèles et superposés. Cette présentation a été partagée en deux étapes indispensables pour bien comprendre le fonctionnement de ces nouvelles topologies. La première étape a été consacrée à l'étude du principe de fonctionnement de chaque type de convertisseur multicellulaire. La deuxième étape est l'analyse et l'étude théorique du fonctionnement des différentes structures multicellulaires.

En dernier, nous avons donné quelque application de chaque type de convertisseur, et quelques avantages et inconvénients.

## Chapitre III

# MODELISATION DES HACHEURS MULTICELLULAIRES SERIE

### III.1 Introduction

La modélisation est une étape très importante pour étudier le comportement d'un système complexe. Pour un hacheur multicellulaire série, cette étape permet de mettre en évidence les variables continues et discontinues du système, afin de proposer une commande permettant le contrôle des différents paramètres.

Nous présenterons les différents modèles pour chaque type d'hacheur multicellulaire série, tels que :

-Le modèle aux valeurs instantanées ; le modèle aux valeurs moyennes ; le modèle harmonique ; le modèle hybride.



## III-2- Présentation des modèles

### III-2-1- Le modèle aux valeurs instantanées

Le modèle précis ou instantané tient compte à la fois des changements d'état des interrupteurs et des valeurs instantanées des variables d'état du convertisseur. Grâce à ce modèle, chaque cellule de commutation du convertisseur est représentée avec une résolution à l'échelle de la période de découpage, en prenant également en compte les phénomènes harmoniques associés aux commutations des interrupteurs [14].

### III-2-2- Le modèle aux valeurs moyennes

Ce modèle permet de réaliser la synthèse de certaines lois de commande et correspond à l'utilisation des rapports cycliques. Il ne comprend aucune information relative à la phase des signaux. Pour le convertisseur multicellulaire série, les phénomènes harmoniques ne seront donc pas pris en compte tel que le rééquilibrage naturel [15]. Les hypothèses supplémentaires à l'établissement de ce modèle par rapport au modèle instantané sont :

- Tensions flottantes et tension de bus : Les tensions sont considérées constantes durant une période de découpage.

- Courants de phase : Le courant de charge est constant sur une période de découpage et correspond à sa valeur moyenne sur cette même période

### III-2-3- Modèle harmonique

Pour pouvoir décrire le phénomène de l'équilibrage naturel (avec la MLI), ou considérer une commande jouant sur les déphasages, on ne peut pas utiliser le modèle moyen. Le modèle nécessaire ne doit plus se limiter aux composantes continues présentes sur les variables d'états, il doit tenir compte de l'ensemble des harmoniques. Le modèle harmonique est alors très bien adapté. Cette modélisation permet d'intégrer n'importe quelle charge linéaire grâce à sa réponse fréquentielle. Les hypothèses de cette modélisation sont les suivantes :

- les interrupteurs sont parfaits (temps mort nul, temps de commutation nul, courant de fuite nul, pas de tension de saturation) ;

- les tensions des condensateurs sont supposées suffisamment dimensionnées pour être considérées comme constantes sur une période de découpage ;

- la constante de la charge sera supposée inférieure à la période de découpage pour avoir à chaque période de découpage un courant en régime permanent. Le modèle harmonique permet de fournir de nombreuses informations :

- en régime permanent : en fixant le rapport cyclique et le déphasage, il est possible d'extraire les points d'équilibre des tensions des condensateurs sans passer par une longue et fastidieuse simulation ;

- en transitoire avec la détermination des constantes de temps : les valeurs propres de la matrice dynamique élémentaire du système permettent de caractériser les différentes constantes de temps pour chaque tension. Les rapports cycliques appliqués aux cellules sont alors constants sinon le modèle devient non linéaire.

- en réponse fréquentielle (le diagramme de Bode) : contient les résultats sur le calcul et les propriétés des valeurs propres. Il montre que l'équilibrage naturel fonctionne uniquement pour un nombre premier de cellules. La commande fréquentielle basée sur ce modèle permet de réduire le nombre de filtres [16].

### III-2-4- Le modèle hybride

Le modèle hybride d'un convertisseur multicellulaire intègre toutes les variables qui caractérisent cette structure, car il permet de prendre en compte à la fois les variables continues et les variables discrètes, ainsi que leur interaction mutuelle. Ce modèle représente une combinaison d'un modèle dynamique continu et d'un modèle d'événements discrets.

## III-3- Modélisation d'un hacheur multicellulaire série

### III-3-1- Le modèle aux valeurs instantanées

Le modèle permet d'analyser l'évolution des différentes grandeurs d'état qui régissent le fonctionnement d'hacheur multicellulaire série, en tenant compte des commutations des interrupteurs. Ce modèle permet également de représenter l'état de chaque cellule de commutation sur toute la période de découpage.

Grâce à ce modèle basé sur les valeurs instantanées, nous pourrions mettre en évidence le phénomène d'équilibrage naturel des tensions générées par les condensateurs.

### III-3-2- Hypothèses

Les hypothèses retenues pour la mise en œuvre du modèle aux valeurs instantanées d'un hacheur multicellulaire série sont :

- Les interrupteurs sont idéaux (tension de saturation, courant de fuite, temps morts et temps de commutation nuls).
- Les interrupteurs d'une même cellule de commutation fonctionnent de façon complémentaire.
- La tension d'alimentation  $E$  est constante.

### III-3-3- Le principe de modèle appliquée sur l'hacheur multicellulaire série

Le modèle exact ou instantané prend en compte les commutations des interrupteurs et les grandeurs instantanées de variables d'état d'hacheur. Il permet de représenter l'état de chacune des cellules de commutation à l'échelle de la période de découpage et les phénomènes harmoniques liés à la commutation des interrupteurs. Ce modèle est utilisé –pour valider en simulation des lois de commande car il est difficile à exploiter pour élaborer des lois de commande. La figure 40 présente un convertisseur multicellulaire série fonctionnant en hacheur dévolteur associé à une charge  $R - L$ . Ce convertisseur représente une association de  $p$  cellules de commutation. Chaque cellule est formée d'une paire d'interrupteurs ( $sc, \bar{sc}$ ) dont l'état est complémentaire. L'ensemble des cellules constitue un bras. Nous remarquons qu'entre chacune des cellules est inséré un condensateur flottant. La mise en équation de cette structure met en œuvre  $(P - 1)$  équations à l'évolution des tensions aux bornes des  $(P - 1)$  condensateurs flottants et une équation liée au courant de la charge.

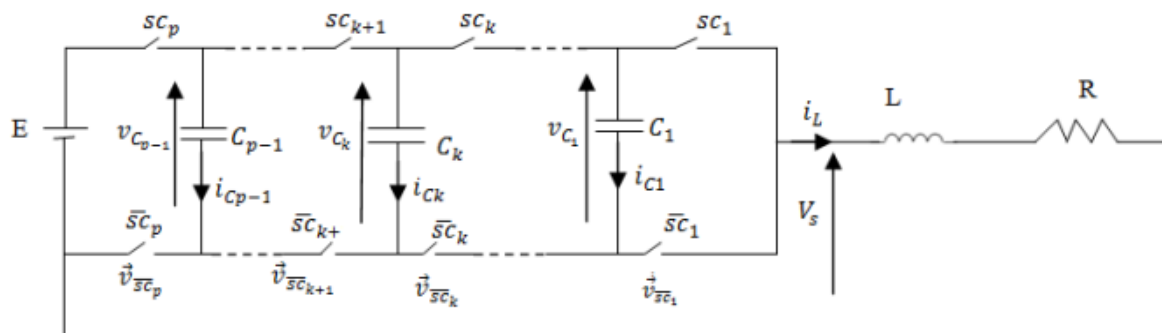


Figure 40: Hacheur dévolteur à p cellules associé à une charge R,L

Pour établir le modèle instantané du convertisseur, on prend deux cellules ( $SC_k, \overline{SC}_k$ ) et ( $SC_{k+1}, \overline{SC}_{k+1}$ ) avec leur condensateur flottant ( $C_k$ ). L'évolution de la tension aux bornes du condensateur  $C_k$  est liée à l'évolution du courant  $i_{Ck}$ , ce dernier étant fonction de l'état des cellules adjacentes (cellule  $k + 1$  et cellule  $k$ ) et du courant de charge  $i_L$ .

### III-3-4- Formulation générale

Le hacheur multicellulaire série est une topologie de convertisseur de tension utilisée dans de nombreuses applications nécessitant une tension de sortie variable et régulée.

La figure 41 représente un hacheur multicellulaire à N cellules associé à une charge R-L, Le modèle de cette structure à N-1 condensateurs flottants contient N - 1 équations différentielles pour l'évolution des tensions des condensateurs flottants

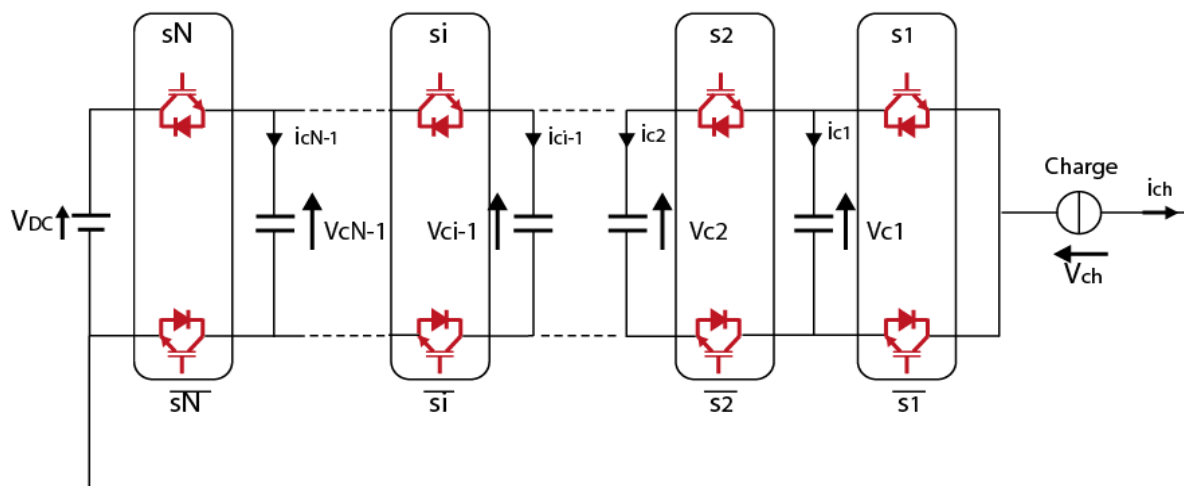


Figure 41: Hacheur multicellulaire à N cellules.

Le condensateur  $C_i$  est parcouru par le courant  $i_{ch}$  lorsque les interrupteurs en amont ( $S_{i+1}$ ) et en aval ( $S_i$ ) ont des états différents et l'évolution de la tension  $v_{Ci}$  aux bornes de  $C_i$  est liée à la variation du courant  $i_{Ci}$ . Le courant du condensateur est donné par l'équation (III-1) et la tension  $v_{Ci}$  est donnée par l'équation.

$$i_{Ci} = [S_{i+1} - S_i]i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 1}$$



soit égal à  $2\pi/N$ . Supposons qu'au moins l'une des tensions flottantes s'écarte de sa valeur souhaitée. La conséquence immédiate sera une altération des niveaux intermédiaires de la tension de sortie. En effet, la tension de bras  $V_{ch}$  (résistance + inductance) est une combinaison linéaire de la tension de bus continu ( $E$ ) et des tensions flottantes ( $V_{C1}, V_{C2}, \dots, V_{CN-1}$ ). Dans un tel cas, le spectre de raies de la tension de sortie se trouve lui aussi dégradé. Il apparaît entre autres, une raie harmonique à la fréquence  $f_{dec}$ , là où normalement la première famille harmonique se situe autour de  $N.f_{dec}$ . Cette composante harmonique se retrouve dans le courant de sortie de la hacheur. C'est elle qui, en circulant à travers les condensateurs flottants, va rééquilibrer chaque tension flottante à  $k.E/N$ . Cela permet de mettre en évidence que l'équilibrage est lié à la composante contenue du courant de charge. Pour que le phénomène de rééquilibrage se produise, il faut qu'il existe une relation de causalité entre la tension de sortie et le courant débité. Cet équilibrage n'est pas envisageable dans le cas d'un fonctionnement à vide. Dans le cas d'une charge  $R, L$ , la dynamique d'équilibrage est conditionnée par la valeur de la constante de temps  $L/R$  de la charge régissant l'évolution du courant de charge  $i_L$ . De plus, pour une résistance donnée, une valeur importante (respectivement faible) de l'inductance de charge  $L$ , entraîne une dynamique d'équilibre lente (respectivement rapide).

### III-3-6- Les séquences de commande des hacheur multicellulaires séries

#### III-3-6-1- l'hacheur a 2 cellules

La structure de base de la hacheur multicellulaire série commence par l'association de deux cellules élémentaires de commutation, Chaque cellule est composée d'un interrupteur (MOSFET) complémentaire (1, 0) et d'un condensateur.

Lorsque le premier interrupteur est fermé, la première cellule est activée et le courant circule à travers elle. Pendant ce temps, le deuxième interrupteur reste ouvert. Cela permet à l'énergie d'être stockée dans l'élément de stockage de la première cellule.

Ensuite, l'interrupteur de la première cellule s'ouvre et l'interrupteur de la deuxième cellule se ferme. Cela active la deuxième cellule et le courant circule maintenant à travers elle. L'énergie stockée dans la première cellule est transférée à la deuxième cellule, où elle est stockée dans son élément de stockage.

Ce processus de commutation se répète périodiquement, alternant entre les deux cellules. La fréquence de commutation est généralement élevée pour permettre une régulation précise de la tension de sortie.

En ajustant les rapports cycliques (le rapport entre la durée pendant laquelle l'interrupteur est fermé et la durée totale d'une période), la tension de sortie du hacheur à deux cellules en série peut être régulée. Cela permet de convertir une tension d'entrée fixe en une tension de sortie variable, adaptée à diverses applications telles que l'alimentation des moteurs ou des dispositifs électroniques.

La figure 42 présente hacheur à deux cellules connectées à une charge  $R, L$ .

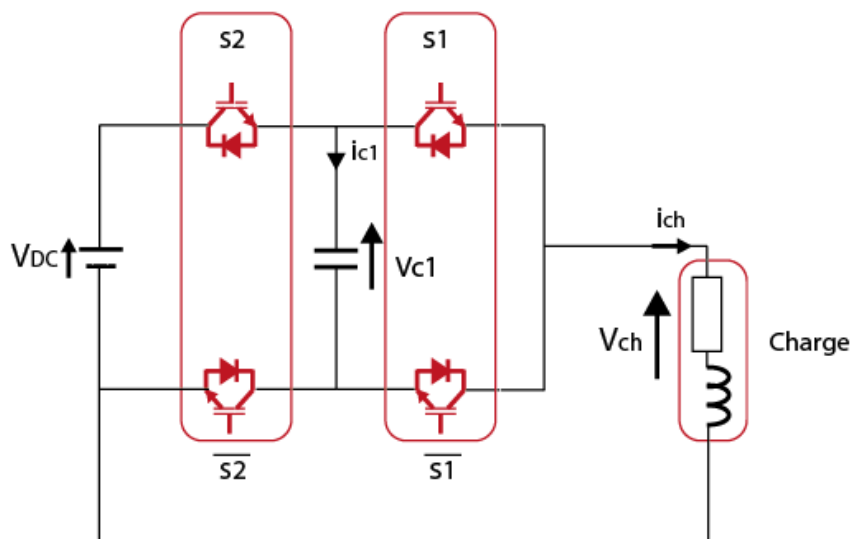


Figure 42: Hacheur à deux cellules connectées à une charge R, L

**III-3-6-1-1- Les équations d'un hacheur à deux cellules**

L'équation de courant de condensateur :

$$i_{c1} = [S_2 - S_1]i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 14}$$

L'équation de tension de condensateurs flottants :

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{[S_2 - S_1]i_{ch}}{c_1} \dots \dots \dots \text{III. 15}$$

L'équation de tension de charge :

$$V_{ch} = [S_1 - S_2]V_{C1} \dots \dots \dots \text{III. 16}$$

$$V_{ch} = \sum_{i=1}^{i=2} \delta_1 V_{C1} \dots \dots \dots \text{III. 17}$$

$$\delta_1 = [S_1 - S_0] \dots \dots \dots \text{III. 18}$$

$$V_{ch} = R_{ch}i_{ch} + L_{ch} \frac{di_{ch}}{dt} \dots \dots \dots \text{III. 19}$$

L'équation de courant de charge :

$$\frac{di_{ch}}{dt} = \frac{V_{ch}}{L_{ch}} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}}i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 20}$$

$$\frac{di_{ch}}{dt} = \frac{[S_1 - S_2]}{L_{ch}}V_{C1} \dots \dots \dots \text{III. 21}$$

**III-3-6-1-2- Configurations possibles De l'hacheur multicellulaire série à deux cellules**

La commande par les Si donne 2<sup>P</sup> configurations différentes implique 2<sup>2</sup>=4

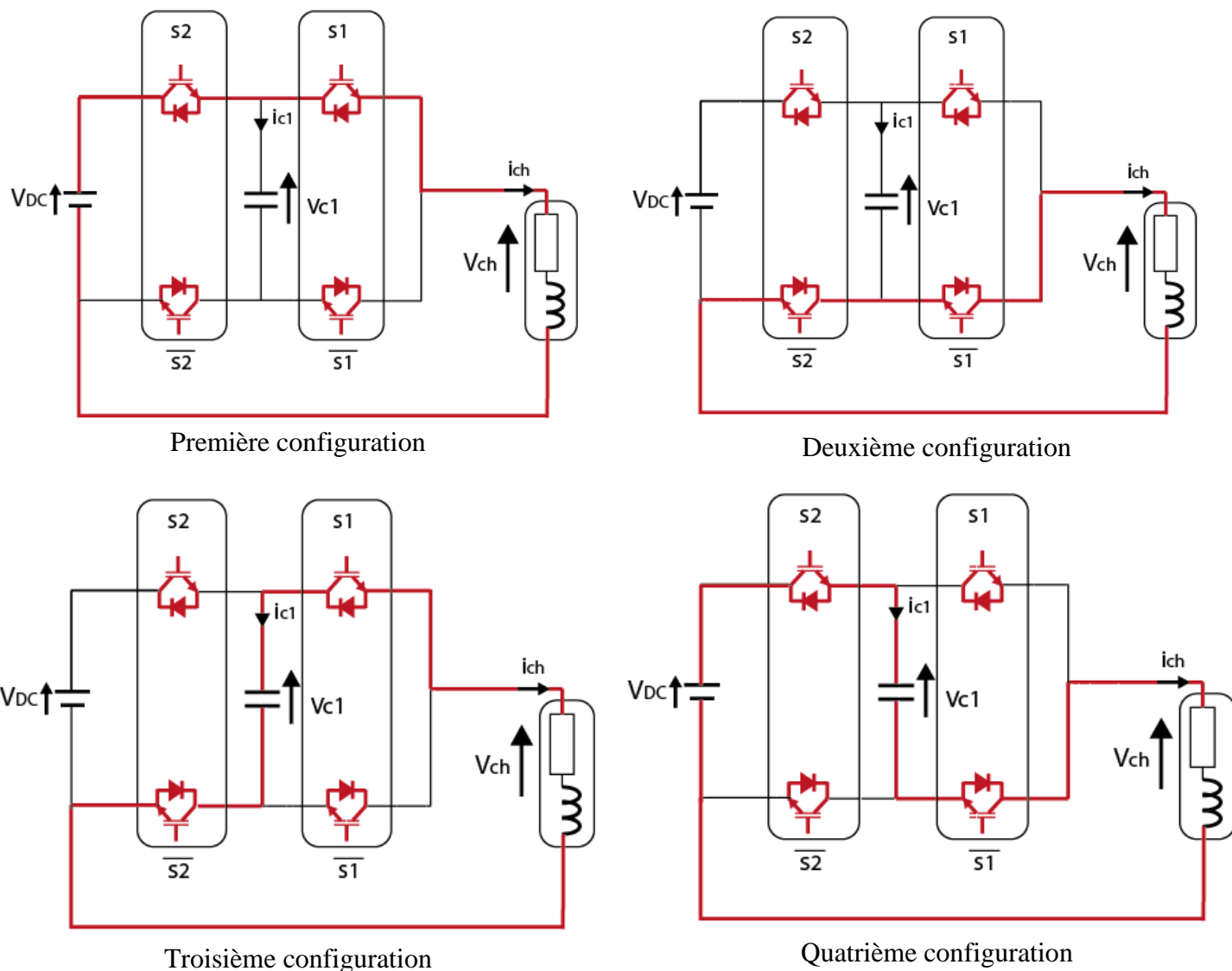


Figure 43: Les configurations possibles d'un hacheur multicellulaire série à 2 cellules

**Première configuration**

Les interrupteurs ( $S_1$  et  $S_2$ ) sont passants et ( $\bar{S}_1$  et  $\bar{S}_2$ ) sont à l'état bloqué.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont,  $V_{S1} = V_{S2} = V_{DC}/2$ ,  $V_{\bar{S}1} = V_{\bar{S}2} = 0$

**Deuxième configuration**

Les interrupteurs ( $\bar{S}_1$  et  $\bar{S}_2$ ) sont passants et ( $S_1$  et  $S_2$ ) sont à l'état bloqué.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont,  $V_{\bar{S}1} = V_{\bar{S}2} = V_{DC}/2$ ,  $V_{S1} = V_{S2} = 0$

**Troisième configuration**

Les interrupteurs ( $S_1$  et  $\bar{S}_2$ ) sont passants et ( $\bar{S}_1$  et  $S_2$ ) sont à l'état bloqué.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont,  $V_{S1} = V_{S2} = V_{DC}/2$ ,  $V_{\bar{S}1} = V_{S2} = 0$

**Quatrième configuration**

Les interrupteurs ( $\bar{S}_1$  et  $S_2$ ) sont passants et ( $S_1$  et  $\bar{S}_2$ ) sont à l'état bloqué.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont,  $V_{\bar{S}1} = V_{S2} = V_{DC}/2$ ,  $V_{S1} = V_{\bar{S}2} = 0$

**III-3-6-2- l'hacheur à 3 cellules**

Etant donné que la cellule peut être considérée comme un système binaire, l'association de trois cellules donne  $2^3$  états possibles dont les caractéristiques principales sont résumées sur le tableau (Tableau 2.2).

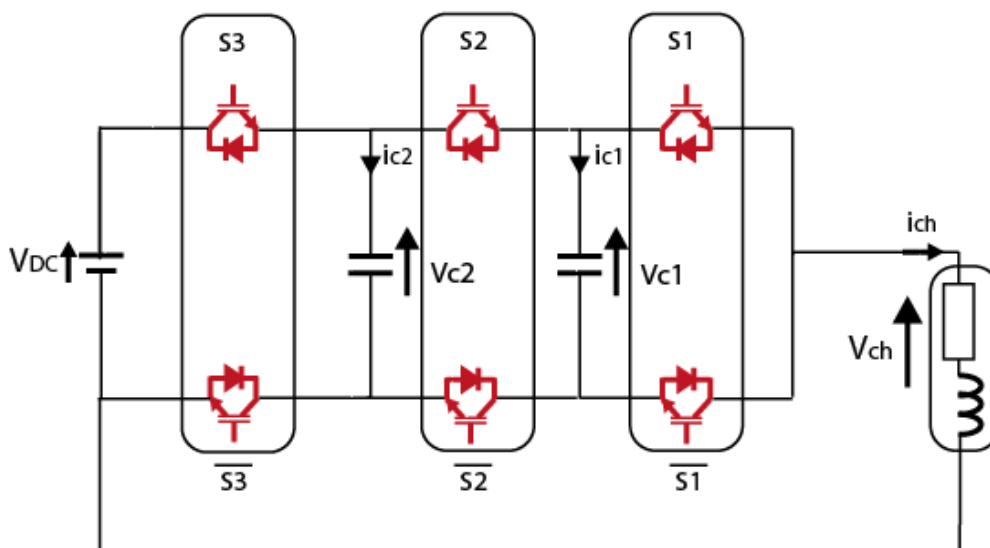


Figure 44: Hacheur à trois cellules connectées à une charge R, L

**III-3-6-2-1- Les équations d'un hacheur à trois cellules**

L'équation de courant de condensateur :

$$i_{c1} = [S_2 - S_1]i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 22}$$

$$i_{c2} = [S_3 - S_2]i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 23}$$

L'équation de tension de condensateurs flottants :

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{[S_2 - S_1]i_{ch}}{c_1} \dots \dots \dots \text{III. 24}$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{[S_3 - S_2]i_{ch}}{c_2} \dots \dots \dots \text{III. 25}$$

L'équation de tension de charge :

$$V_{ch} = [S_1 - S_2]V_{C1} + [S_2 - S_3]V_{C2} \dots \dots \dots \text{III. 26}$$



$$V_{ch} = R_{ch}i_{ch} + L_{ch} \frac{di_{ch}}{dt} \dots \dots \dots \text{III. 27}$$

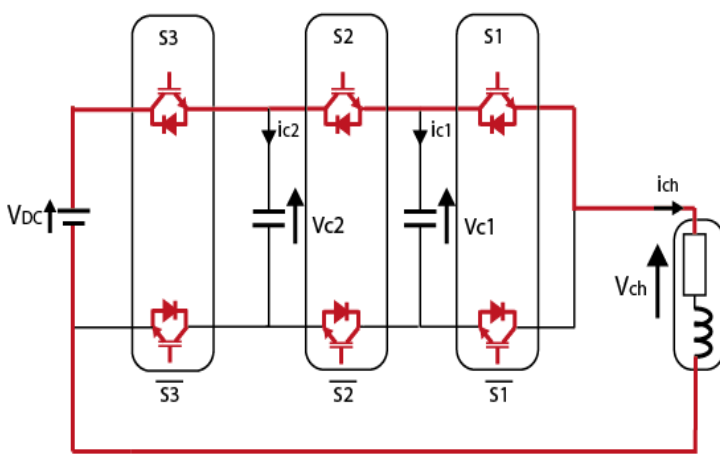
L'équation de courant de charge :

$$\frac{di_{ch}}{dt} = \frac{V_{ch}}{L_{ch}} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 28}$$

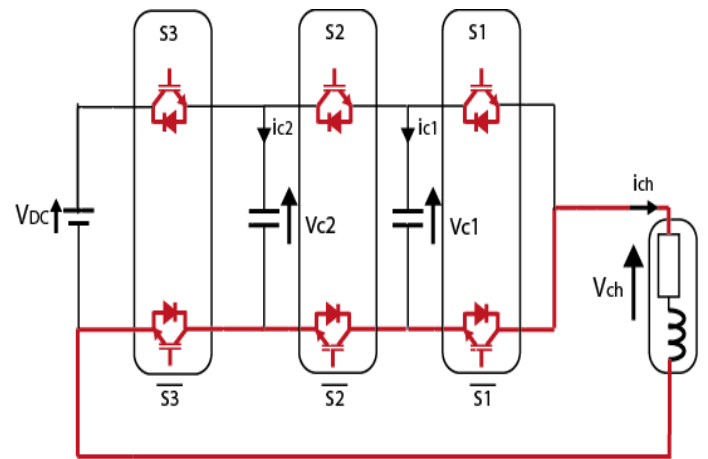
$$\frac{di_{ch}}{dt} = \frac{[S_1 - S_2]}{L_{ch}} V_{C1} + \frac{[S_2 - S_3]}{L_{ch}} V_{C2} \dots \dots \dots \text{III. 29}$$

**III-3-6-2-2- Configurations possibles De l'hacheur multicellulaire série à trois cellules**

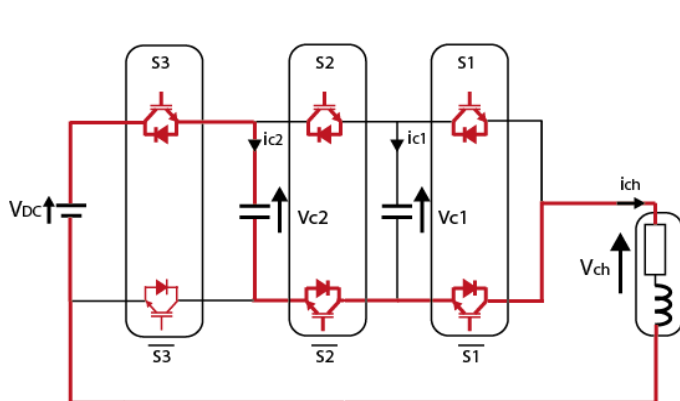
La commande par les Si donne  $2^P$  configurations différentes implique  $2^3=8$



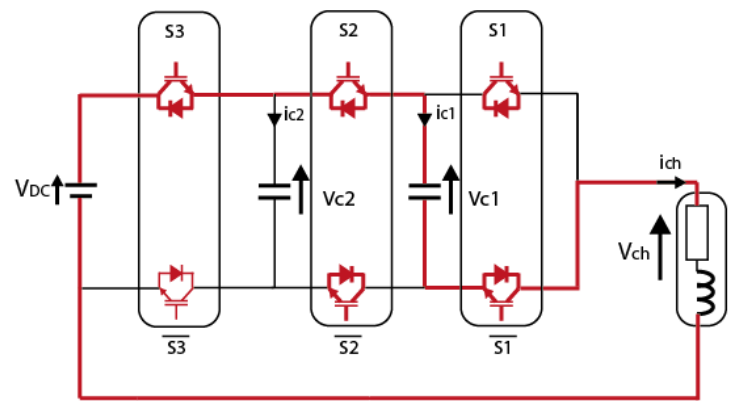
Première configuration



Deuxième configuration



Troisième configuration



Quatrième configuration

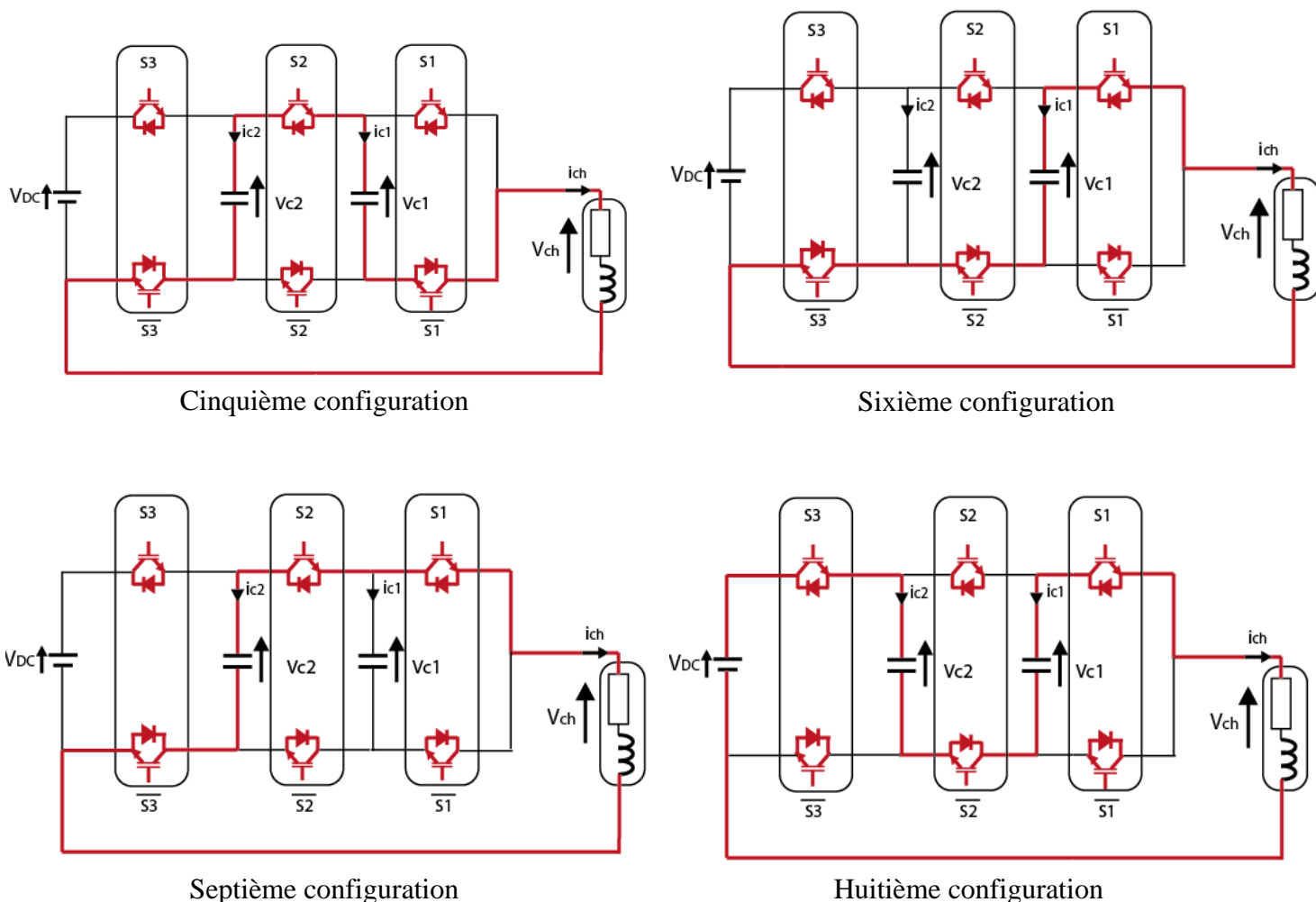


Figure 45: Les configurations possibles d'un hacheur multicellulaire série à 3 cellules.

**Première configuration**

Les interrupteurs ( $S_1, S_2$  et  $S_3$ ) sont passants et ( $\bar{S}_1, \bar{S}_2$  et  $\bar{S}_3$ ) sont à l'état bloqué.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont,  $V_{S1} = V_{S2} = V_{S3} = V_{DC}/3, V_{\bar{S}1} = V_{\bar{S}2} = V_{\bar{S}3} = 0$

**Deuxième configuration**

Les interrupteurs ( $\bar{S}_1, \bar{S}_2$  et  $\bar{S}_3$ ) sont passants et ( $S_1, S_2$  et  $S_3$ ) sont à l'état bloqué.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont,  $V_{\bar{S}1} = V_{\bar{S}2} = V_{\bar{S}3} = V_{DC}/3, V_{S1} = V_{S2} = V_{S3} = 0$

**Troisième configuration**

Les interrupteurs ( $\bar{S}_1, \bar{S}_2$  et  $S_3$ ) sont passants et ( $\bar{S}_3, S_2$  et  $S_1$ ) sont à l'état bloqué.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont,  $V_{\bar{S}1} = V_{\bar{S}2} = V_{S3} = V_{DC}/3$

$V_{\bar{S}3} = V_{S2} = V_{S1} = 0$

**Quatrième configuration**

Les interrupteurs ( $\bar{S}_1, S_2$  et  $S_3$ ) sont passants et ( $S_1, \bar{S}_2$  et  $\bar{S}_3$ ) sont à l'état bloqué.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont,  $\bar{S}_1 = S_2 = S_3 = V_{DC}/3, S_1 = \bar{S}_2 = \bar{S}_3 = 0$

**Cinquième configuration**

Les interrupteurs ( $\bar{S}_1, S_2$  et  $\bar{S}_3$ ) sont passants et ( $S_1, \bar{S}_2$  et  $S_3$ ) sont à l'état bloqué.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont,  $\bar{S}_1 = S_2 = \bar{S}_3 = V_{DC}/3, S_1 = \bar{S}_2 = S_3 = 0$

**Sixième configuration**

Les interrupteurs ( $S_1, \bar{S}_2$  et  $\bar{S}_3$ ) sont passants et ( $\bar{S}_1, S_2$  et  $S_3$ ) sont à l'état bloqué.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont,  $S_1 = \bar{S}_2 = \bar{S}_3 = V_{DC}/3, \bar{S}_1 = S_2 = S_3 = 0$

**Septième configuration**

Les interrupteurs ( $S_1, S_2$  et  $\bar{S}_3$ ) sont passants et ( $\bar{S}_1, \bar{S}_2$  et  $S_3$ ) sont à l'état bloqué.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont,  $S_1 = S_2 = \bar{S}_3 = V_{DC}/3, \bar{S}_1 = \bar{S}_2 = S_3 = 0$

**Huitième configuration**

Les interrupteurs ( $S_1, \bar{S}_2$  et  $S_3$ ) sont passants et ( $\bar{S}_1, S_2$  et  $\bar{S}_3$ ) sont à l'état bloqué.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont, ( $S_1 = \bar{S}_2 = S_3 = V_{DC}/3, \bar{S}_1 = S_2 = \bar{S}_3 = 0$

Etat	S <sub>3</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	V <sub>s3</sub>	V <sub>s2</sub>	V <sub>s1</sub>	i <sub>DC</sub>	i <sub>c2</sub>	i <sub>c1</sub>	V <sub>ch</sub>
0	0	0	0	V <sub>DC</sub> - V <sub>c2</sub>	V <sub>c2</sub> .V <sub>c1</sub>	V <sub>c1</sub>	0	0	0	0
1	0	0	1	V <sub>DC</sub> - V <sub>c2</sub>	V <sub>c2</sub> .V <sub>c1</sub>	0	0	0	i <sub>ch</sub>	1/4 V <sub>DC</sub>
2	0	1	0	V <sub>DC</sub> - V <sub>c2</sub>	0	V <sub>c1</sub>	0	i <sub>ch</sub>	i <sub>ch</sub>	1/4 V <sub>DC</sub>
3	0	1	1	V <sub>DC</sub> - V <sub>c2</sub>	0	0	0	i <sub>ch</sub>	0	1/2 V <sub>DC</sub>
4	1	0	0	0	V <sub>c2</sub> .V <sub>c1</sub>	V <sub>c1</sub>	i <sub>ch</sub>	0	0	1/2 V <sub>DC</sub>
5	1	0	1	0	V <sub>c2</sub> .V <sub>c1</sub>	0	i <sub>ch</sub>	0	i <sub>ch</sub>	1/2 V <sub>DC</sub>
6	1	1	0	0	0	V <sub>c1</sub>	i <sub>ch</sub>	0	i <sub>ch</sub>	1/2 V <sub>DC</sub>
7	1	1	1	0	0	0	i <sub>ch</sub>	0	0	3/4 V <sub>DC</sub>

Nombre de cellules associées	3
Nombre de condensateurs associés	2

Nombre d'états possibles	8
Nombre de niveaux de tension en sortie	4
Valeur de tension principale d'alimentation	$V_{DC}$
Valeur de la source de tension de cellule $i$	$V_{ci} = (i/3) V_{DC}$

Tableau 8: Définition des grandeurs caractéristiques de l'association de 3 cellules de commutation

### III-3-6-3- l'hacheur à 5 cellules

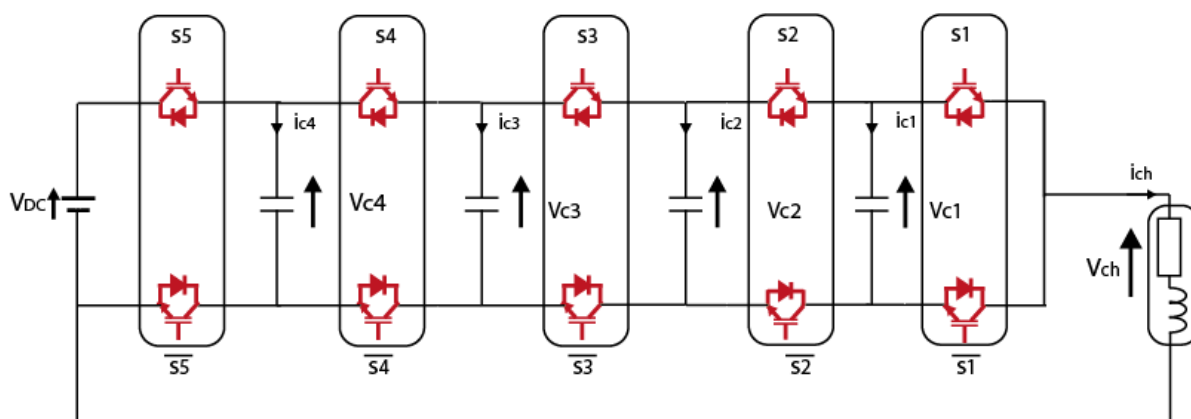


Figure 46: Hacheur à cinq cellules connectées à une charge R, L

#### III-3-6-3-1- Les équations d'un hacheur à cinq cellules

Les équations de courant de condensateurs :

$$i_{c1} = [S_2 - S_1]i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 30}$$

$$i_{c2} = [S_3 - S_2]i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 31}$$

$$i_{c3} = [S_4 - S_3]i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 32}$$

$$i_{c4} = [S_5 - S_4]i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 33}$$

Les équations des tensions de condensateurs flottants :

$$\frac{dV_{c1}}{dt} = \frac{[S_2 - S_1]}{c_1} i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 34}$$

$$\frac{dV_{c2}}{dt} = \frac{[S_3 - S_2]}{c_2} i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 35}$$

$$\frac{dV_{c3}}{dt} = \frac{[S_4 - S_3]}{c_3} i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 36}$$

$$\frac{dV_{C4}}{dt} = \frac{[S_5 - S_4]}{c_4} i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 37}$$

L'équation de tension de charge :

$$V_{ch} = [S_1 - S_2]V_{C1} + [S_2 - S_3]V_{C2} + [S_3 - S_4]V_{C3} + [S_4 - S_5]V_{C4} \dots \dots \text{III. 38}$$

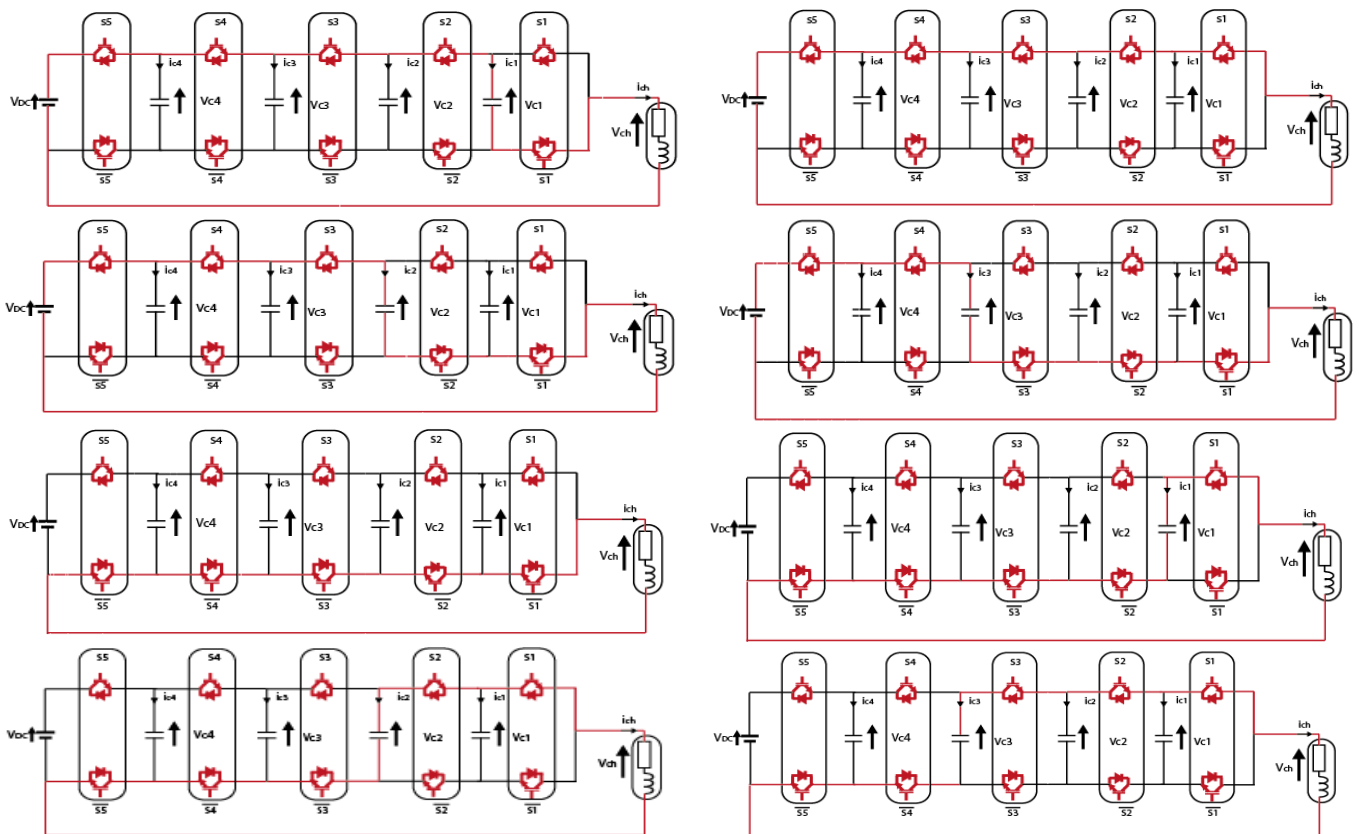
$$V_{ch} = R_{ch}i_{ch} + L_{ch} \frac{di_{ch}}{dt} \dots \dots \dots \text{III. 39}$$

L'équation de courant de charge :

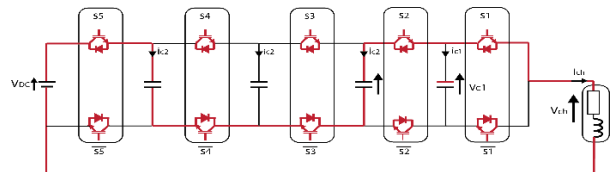
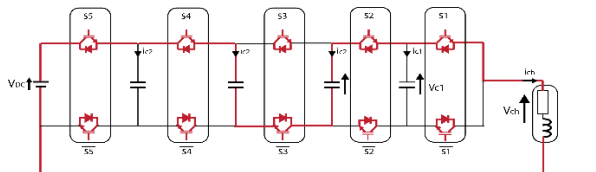
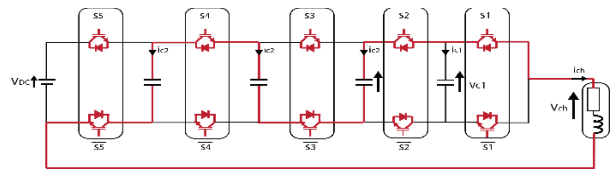
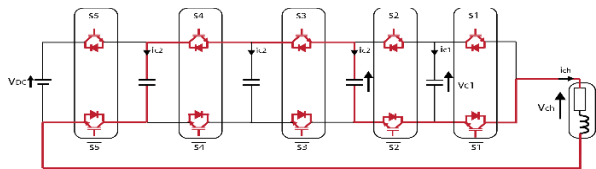
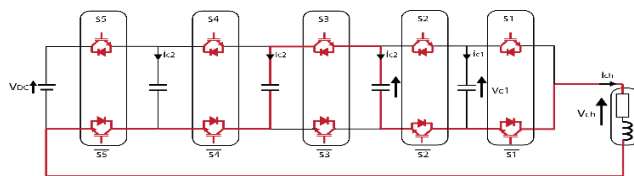
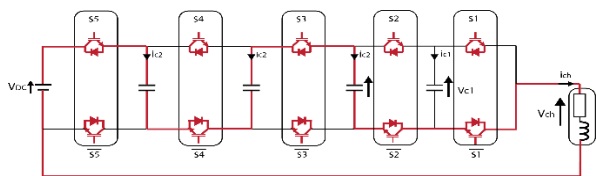
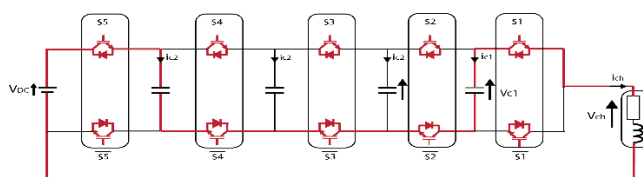
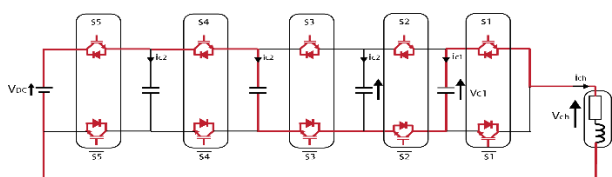
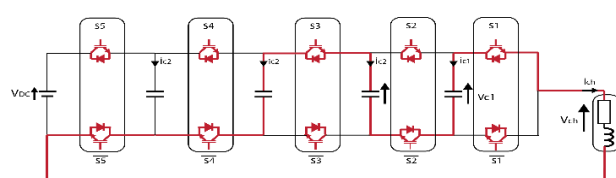
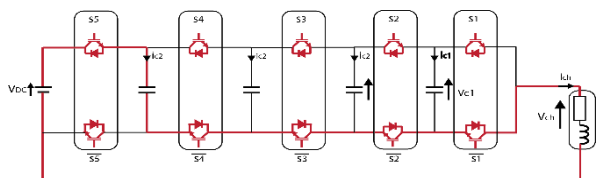
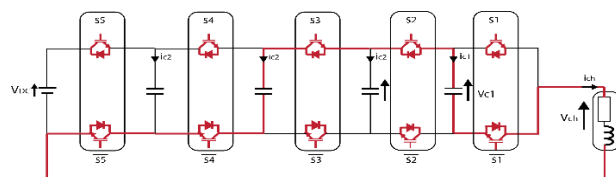
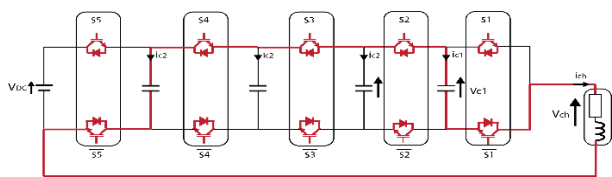
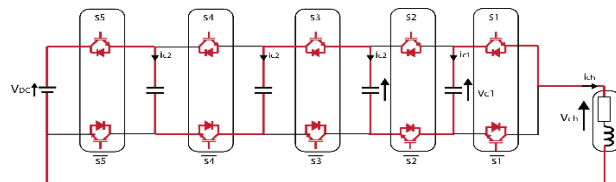
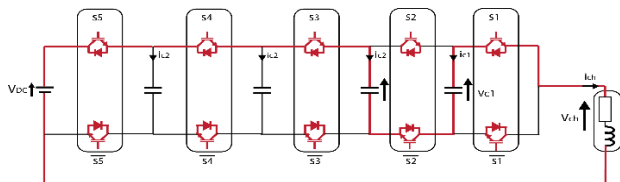
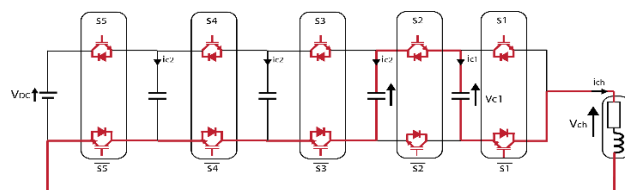
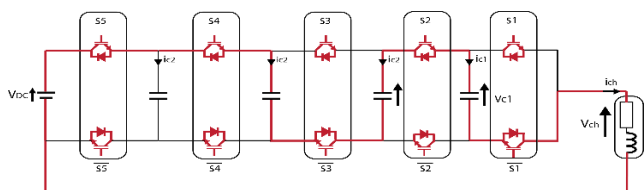
$$\frac{di_{ch}}{dt} = \frac{V_{ch}}{L_{ch}} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{ch} \dots \dots \dots \text{III. 40}$$

$$\frac{di_{ch}}{dt} = \frac{[S_1 - S_2]}{L_{ch}} V_{C1} + \frac{[S_2 - S_3]}{L_{ch}} V_{C2} + \frac{[S_3 - S_4]}{L_{ch}} V_{C3} + \frac{[S_4 - S_5]}{L_{ch}} V_{C4} \dots \dots \dots \text{III. 41}$$

**III-3-6-3-2- Configurations possibles De l'hacheur multicellulaire série à cinq cellules**  
 2<sup>P</sup> configurations différentes implique 2<sup>3</sup>=8



# CHAPITRE III : MODELISATION DES HACHEURS MULTICELLULAIRES SERIES



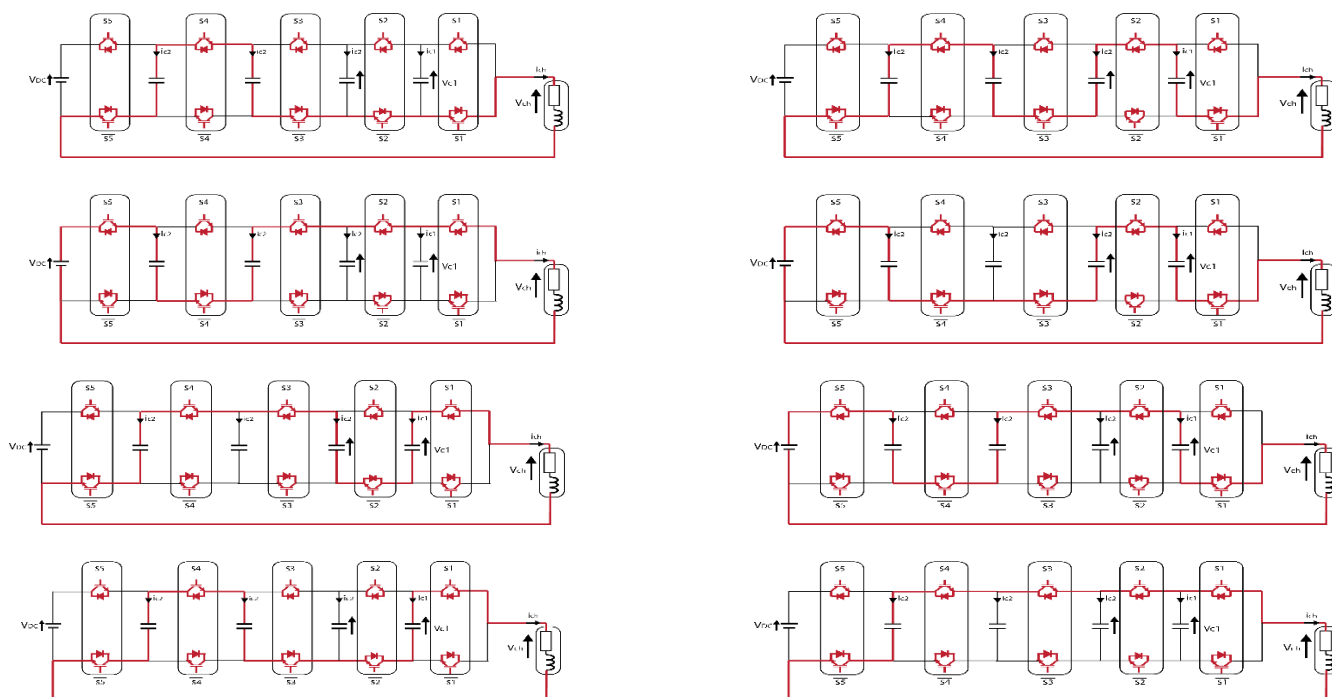


Figure 47: Les configurations possibles d'un hacheur multicellulaire série à 3 cellules.

Nombre de cellules associées	5
Nombre de condensateurs associés	4
Nombre d'états possibles	32
Nombre de niveaux de tension en sortie	6
Valeur de tension principale d'alimentation	$V_{DC}$
Valeur de la source de tension de cellule $i$	$V_{ci} = (i/5) V_{DC}$

Tableau 9: Définition des grandeurs caractéristiques de l'association de 5 cellules de commutations

**Les techniques de commande :**

**III-2- Commande en boucle ouverte**

Le convertisseur multicellulaire série est dit commandé en boucle ouverte lorsqu'aucune boucle de retour ne vient réguler les variables d'état du système. Dans ce qui suit, nous allons utiliser la MLI-ST (Modulation de Largeur d'Impulsion de type constant - Triangle) comme commande en boucle ouverte. Il faut noter que le courant de sortie du convertisseur et les tensions aux bornes des condensateurs flottants restent sans régulation.

### III-2-1- Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

La commande par MLI consiste à découper la tension de sortie générée par le convertisseur en une série de motifs élémentaires de période très faible, et de rapport cyclique variable dans le temps . Dans le cas de la MLI naturelle, les signaux de commande de chaque cellule  $S_i$ , sont obtenus en faisant l'intersection entre une porteuse triangulaire et un signal modulant, dit signal de référence comme indiqué sur la figure III.1.

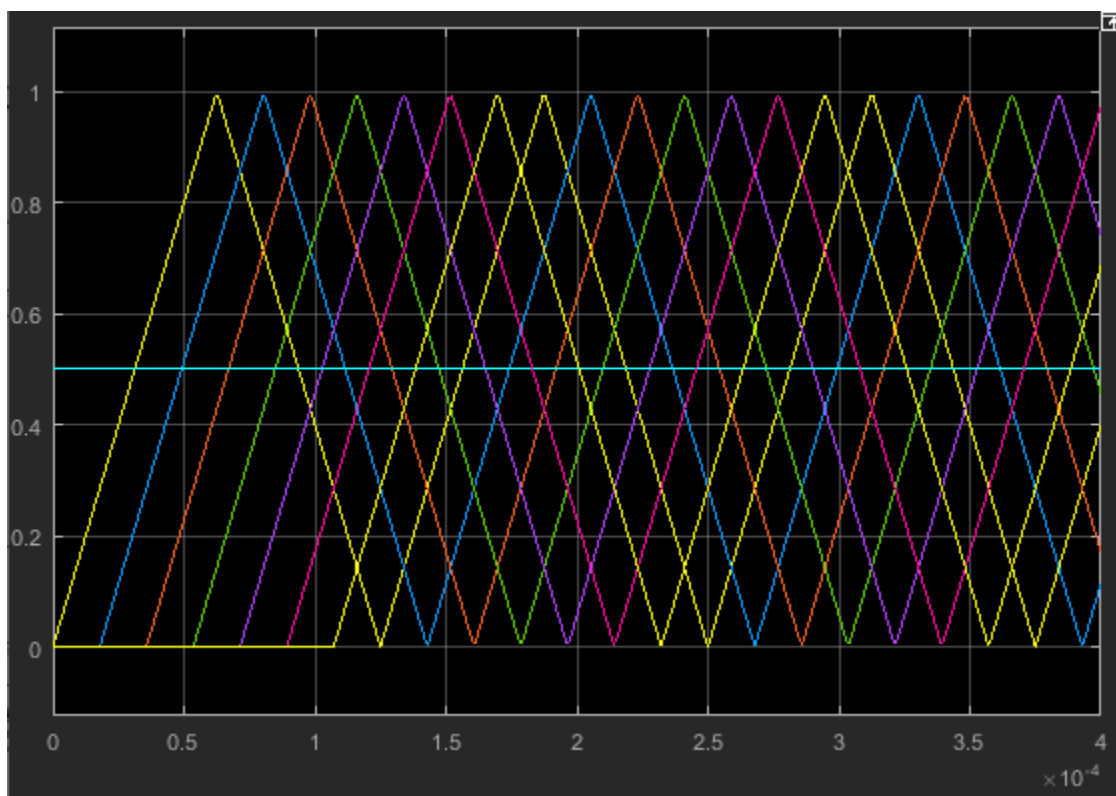


Figure 48: Principe de la MLI-ST pour un hacheur multicellulaire série.

La commande MLI utilise  $P$  porteuses triangulaires pour commander les  $P$  cellules de commutation d'un hacheur multicellulaire série. De plus, ces porteuses sont toutes régulièrement déphasées entre elles de  $2\pi/P$  : la porteuse n°2 est en retard de  $2\pi/P$  par rapport à la porteuse n°1. La porteuse n°3 est en retard de  $(3-1).2\pi/P$  par rapport à la porteuse n°1, ... jusqu'à la porteuse  $P$  qui aura un déphasage de  $(P-1).2\pi/P$  par rapport à la porteuse n°1. Ce déphasage régulier des porteuses les unes par rapport aux autres est utile pour deux raisons [17] :

- D'une part, il permet à la tension multiniveau de sortie d'atteindre ses niveaux intermédiaires. En effet, si toutes les porteuses étaient en phase, toutes les cellules commuteraient en même temps et seraient dans le même état de conduction. La tension de sortie n'atteindrait alors que ses valeurs extrêmes
- D'autre part, le déphasage régulier permet aussi de multiplier la fréquence apparente de découpage de la tension de sortie : Dans le cas d'un convertisseur à  $P$  cellules, si l'on note  $f_{dec}$  la fréquence de découpage de chaque interrupteur, et  $T_{dec}$  la période correspondante, alors le



déphasage régulier des P porteuses triangulaires permet d’obtenir une tension multiniveau de sortie dont chaque motif élémentaire a une durée  $T_{d\acute{e}c}/P$ . Autrement dit, la fréquence apparente de découpage de la tension de sortie vaut  $P.f_{d\acute{e}c}$ .

Les équations permettant de générer les signaux triangulaires notés  $Tr_i$  évoluant sur l’intervalle [0,1] sont [18] [19]:

$$Tr_1 = \frac{2}{\pi} \arcsin(\cos(2\pi \cdot f_{d\acute{e}c} t)) \dots \dots \dots \text{III. 42}$$

$$Tr_2 = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\cos\left(2\pi \cdot f_{d\acute{e}c} t - \frac{2\pi}{P}\right)\right)$$

:

$$Tr_P = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\cos\left(2\pi \cdot f_{d\acute{e}c} t - (P - 1) \frac{2\pi}{P}\right)\right)$$

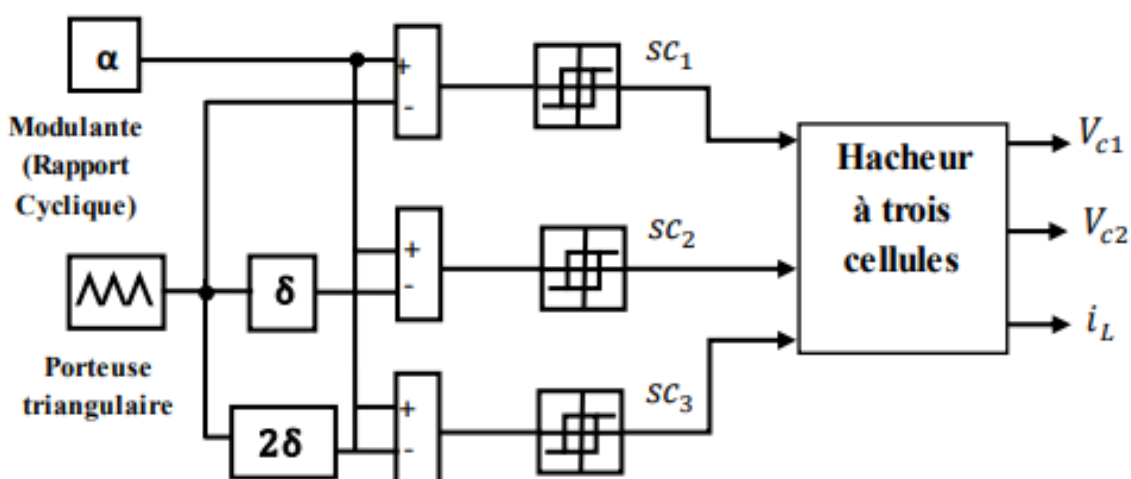


Figure 49: Commande en boucle ouverte par MLI-ST d’un hacheur multicellulaire série à trois cellules.

### III-3- Commande en boucle fermée

Nous avons vu qu’il est possible de commander un hacheur multicellulaire série en boucle ouverte, en bénéficiant de l’équilibrage naturel des tensions flottantes. Cependant, pour des applications nécessitant une dynamique de rééquilibrage plus importante, différentes stratégies de commande ont été imaginées et réalisées expérimentalement. Certaines de ces stratégies assurent juste le contrôle actif des tensions flottantes, d’autres contrôlent les tensions flottantes et le courant de sortie de l’hacheur multicellulaire série. Nous allons présenter rapidement quelques stratégies de commande en boucle fermée, que nous estimons représentatives des deux grandes catégories [20] :

→ **Commande en durée :**

Une stratégie de commande est dite « en durée » lorsque les grandeurs commandant l'hacheur sont les durées de conduction des semi-conducteurs, autrement dit, les valeurs des rapports cycliques. Dans ce chapitre, nous présenterons trois types de commande en durée :

- La commande linéaire par modulation des rapports cycliques
- La commande découplante avec retour d'état non linéaire
- La commande SVM (Space Vector Modulation).

→ **Commande en amplitude :**

Elle regroupe toutes les commandes pour les quelles «l'état des interrupteurs est défini directement en fonction des grandeurs essentielles du convertisseur» [21]. Typiquement, toutes les commandes par fourchette (de courant, et autres), ainsi que les commandes de la valeur crête sont des commandes en amplitude. Dans ce chapitre, nous avons choisi de présenter la commande par mode de glissement, car elle est utilisée pour une grande variété de systèmes et, en particuliers, les convertisseurs statiques.

**III-3-1- Commande en durée**

**III-3-1-1- Commande linéaire par modulation des rapports cycliques**

**III-3-1-1-1- Théorie de la commande linéaire par modulation des rapports cycliques [CHO 10]**

La commande linéaire par modulation des rapports cycliques permet uniquement la régulation des tensions générées par les condensateurs. Dans un hacheur multicellulaire série le courant moyen traversant le condensateur  $C_i$  est proportionnel à la différence de rapports cycliques entre les deux cellules adjacentes. Cette remarque-là représente la base autour de laquelle la commande linéaire par modulation des rapports cycliques est bâtit [22].

La commande linéaire implique généralement l'utilisation d'une boucle de rétroaction pour comparer la tension de sortie réelle avec la tension de référence et ajuster le rapport cyclique en conséquence. Cela permet de maintenir la tension de sortie à la valeur désirée malgré les variations de charge ou d'autres perturbations.

En modulant linéairement le rapport cyclique, on peut obtenir une réponse plus précise et linéaire de la tension de sortie par rapport à la commande de référence. Cela permet d'améliorer la régulation de la tension et de réduire les distorsions ou les variations indésirables.

En résumé, la commande linéaire par modulation des rapports cycliques d'un hacheur est une méthode de contrôle visant à obtenir une régulation précise de la tension de sortie en ajustant le rapport cyclique du signal de commande de manière linéaire.

**Commande découplante avec retour d'état non linéaire :**

La commande découplante avec retour d'état non linéaire d'un hacheur est une technique de commande avancée utilisée pour réguler la tension de sortie d'un hacheur, qui est un convertisseur de puissance DC-DC. Cette méthode vise à minimiser les interactions entre les variables de commande du système, ce qui améliore les performances de régulation.

Dans cette approche, le système est modélisé avec des équations d'état non linéaires, prenant en compte les non-linéarités inhérentes du hacheur. En utilisant ces équations d'état, un retour d'état non linéaire est introduit dans le contrôleur.

Le retour d'état non linéaire permet de prendre en compte les interactions entre les différentes variables du système, telles que la tension de sortie, le courant de sortie et les variables de commande, afin de les contrôler de manière indépendante. Cela permet de compenser les variations et les perturbations du système de manière plus précise et efficace.

La commande découplante vise à obtenir une réponse dynamique rapide et précise du système en réduisant les effets indésirables des interactions entre les variables. Elle permet de réguler la tension de sortie avec une meilleure précision et de réduire les distorsions et les variations indésirables.

Il convient de noter que la mise en œuvre d'une telle commande découplante avec retour d'état non linéaire nécessite une modélisation précise du système, ainsi que des algorithmes de commande sophistiqués. Cependant, elle peut offrir des performances supérieures par rapport à d'autres méthodes de commande plus simples, en particulier dans des conditions de fonctionnement variées ou exigeantes.

**Commande en amplitude :**

Dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface puis, à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée « surface de glissement » et le mouvement le long de cette surface est appelé mouvement de glissement. L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels :

- Synthétiser une surface  $S(x)$ , telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité.
- Déterminer une loi de commande  $u$  (commutations) capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et de les maintenir sur cette surface. La conception de la loi de commande peut être effectuée en trois étapes principales très dépendantes l'une de l'autre :
  - Le choix de la surface.
  - L'établissement des conditions d'existence de la convergence.
  - La détermination de la loi de commande.

### III-4- Conclusion

Ce troisième chapitre a été consacré à la modélisation de différentes topologies des hacheurs multicellulaire série. Après la présentation de différentes modélisations, nous nous sommes intéressés à Le premier est le modèle aux valeurs instantanés qui permet de représenter l'état de chacune des cellules de commutation des hacheurs multicellulaire série à l'échelle de la période de découpage Pour améliorer le comportement et les performances des hacheurs multicellulaires série, nous allons aussi présenter des techniques de commande pour les contrôler.

**Chapitre IV :**  
**SIMULATION DES**  
**HACHEURS**  
**MULTICELLULAIRES**  
**SERIES**

### IV-1- Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation des différents nombres de cellule d’hacheur multicellulaire série (deux, trois et cinq cellules) commandé par la méthode MLI et la commande non linéaire par modulation des rapports cyclique sous logiciel MTLAB SIMULINK.

### IV-2- Simulation des hacheurs multicellulaires séries

Sur les figures suivantes nous présentons les résultats de simulation concernant un hacheur série à deux cellules, alimentant une charge R, L. Les caractéristiques du convertisseur sont :

- La tension du bus continu E = 1500 V
- La résistance de charge R = 10 Ω
- L’inductance de charge L = 0.5 mH
- La capacité C1 = 40 μF
- La fréquence de découpage  $f_{dec} = 16$  kHz
- Le rapport cyclique  $\alpha = 0.5$
- Le déphasage  $\delta = 2\pi/P$

#### IV-2-1- Simulation d’un hacheur à deux cellules

Ce hacheur est composé de quatre interrupteurs et un condensateur alimente une charge R-L.

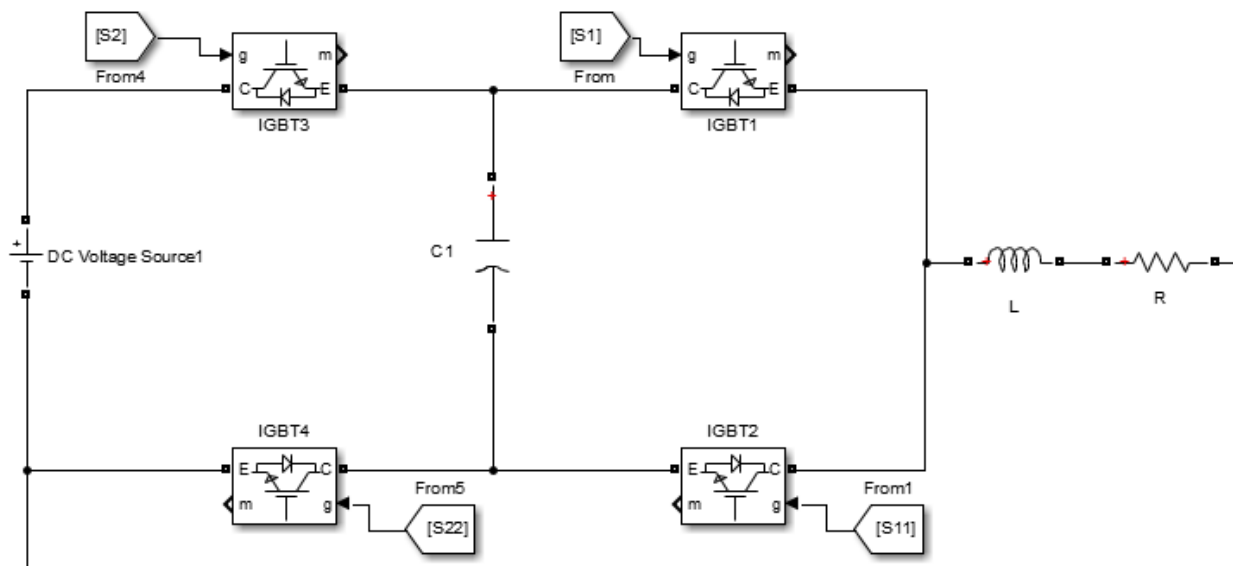


Figure 50: Structure d’un bras d’hacheur multicellulaire série à deux cellules sur SIMULINK

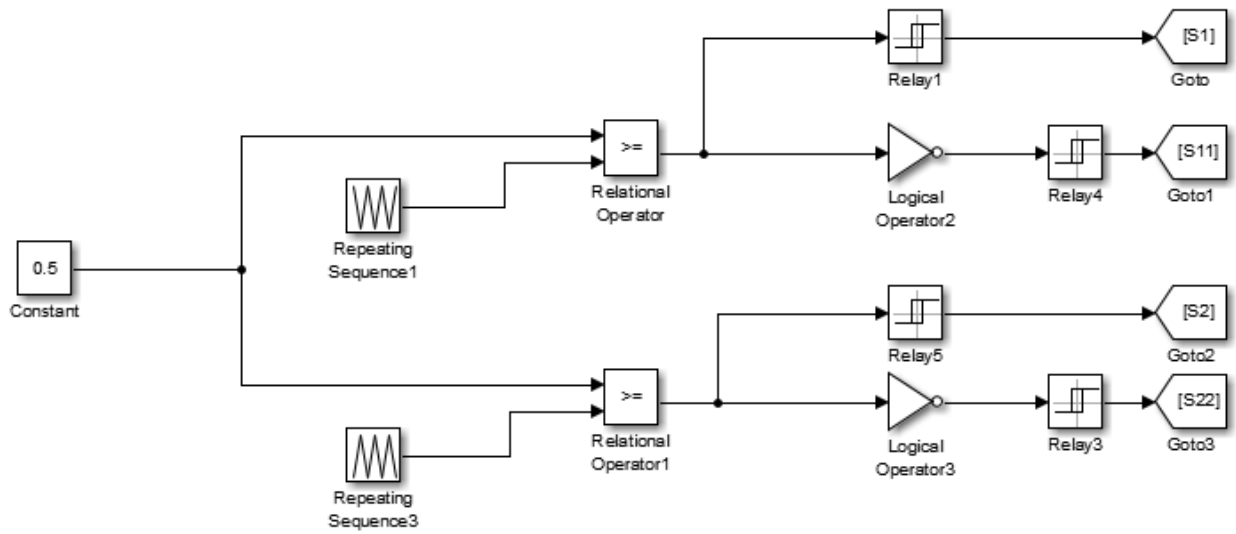


Figure 51: Structure de commande MLI à deux porteuses dans SIMULINK

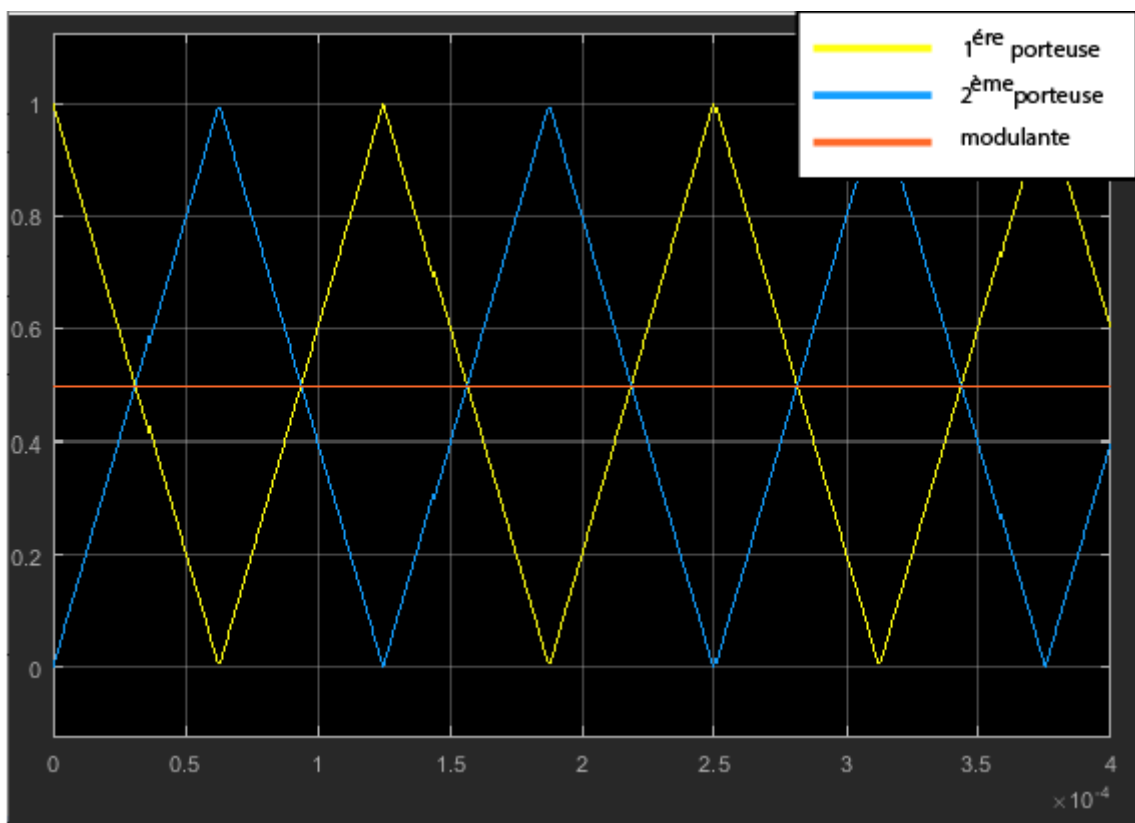


Figure 52: Intersection entre deux porteuses décalées de  $2\pi/2$  avec un rapport cyclique de 0.5

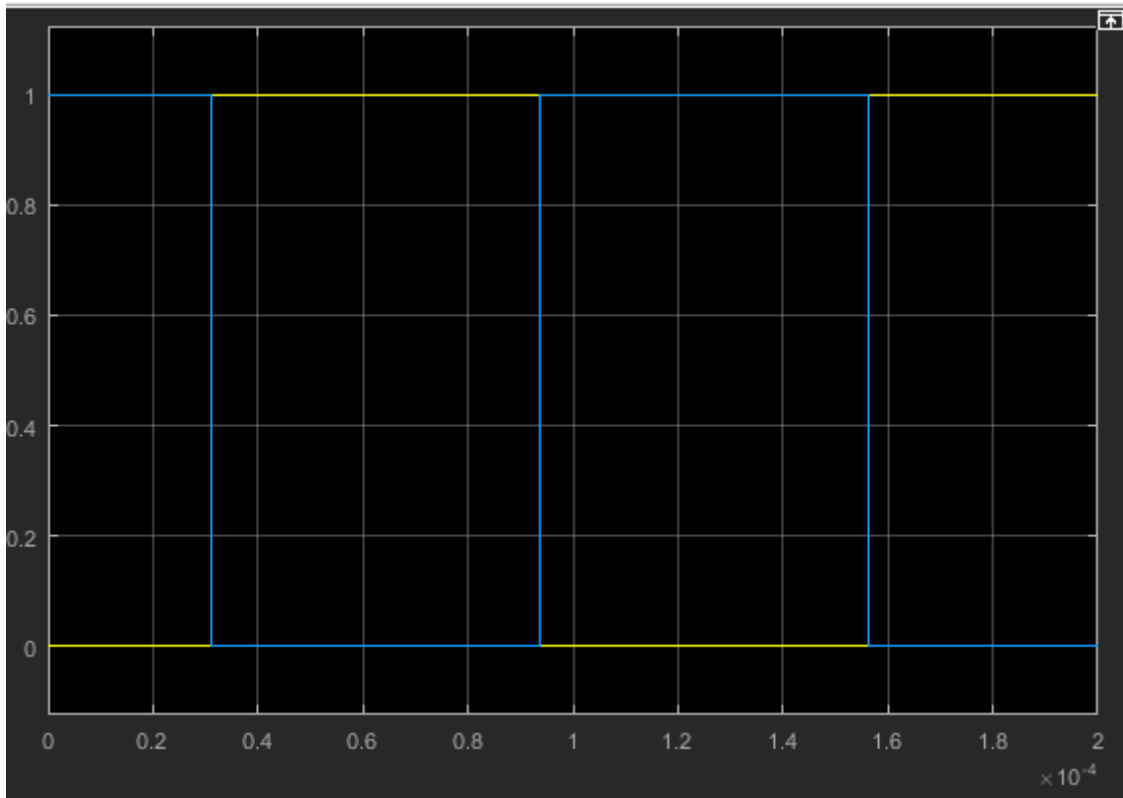


Figure 53: Les deux signaux de commande



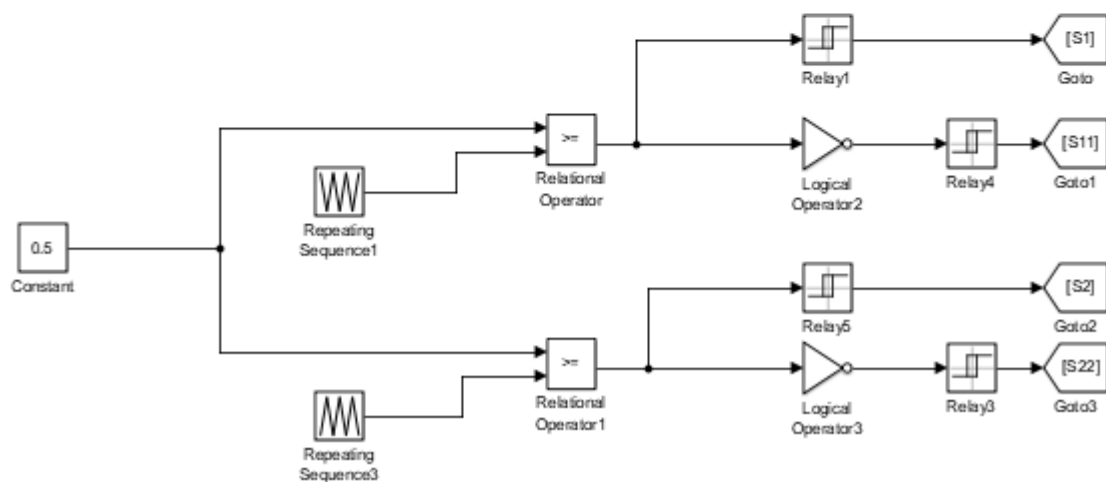
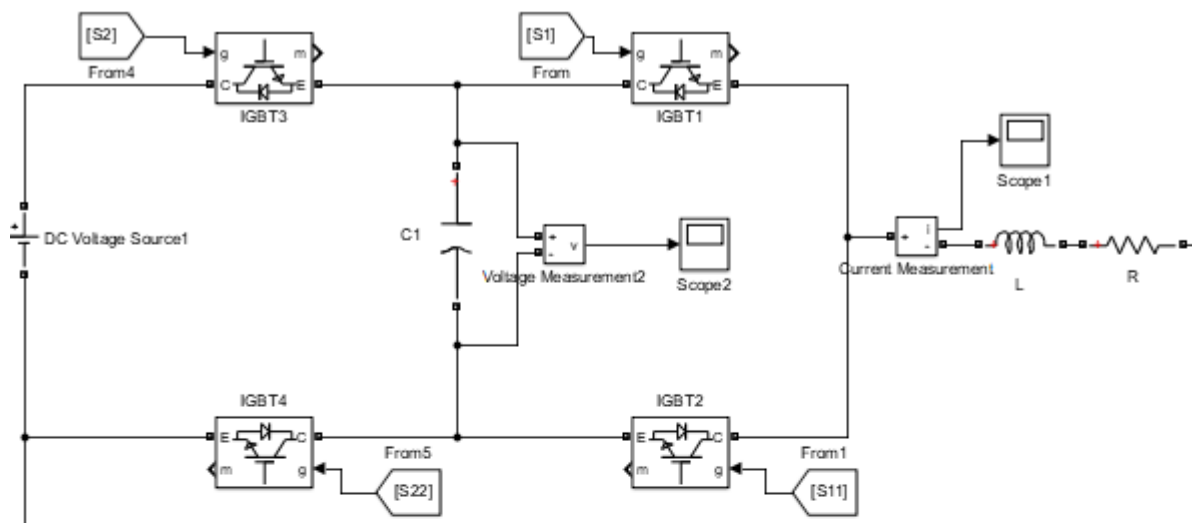


Figure 54: Hacheur à deux cellules sur SIMULINK.

**Résultat de simulation :**

Les figures suivantes montrent respectivement l'allure de la tension aux bornes de condensateur flottant de courant de charge et celle de tension de charge.

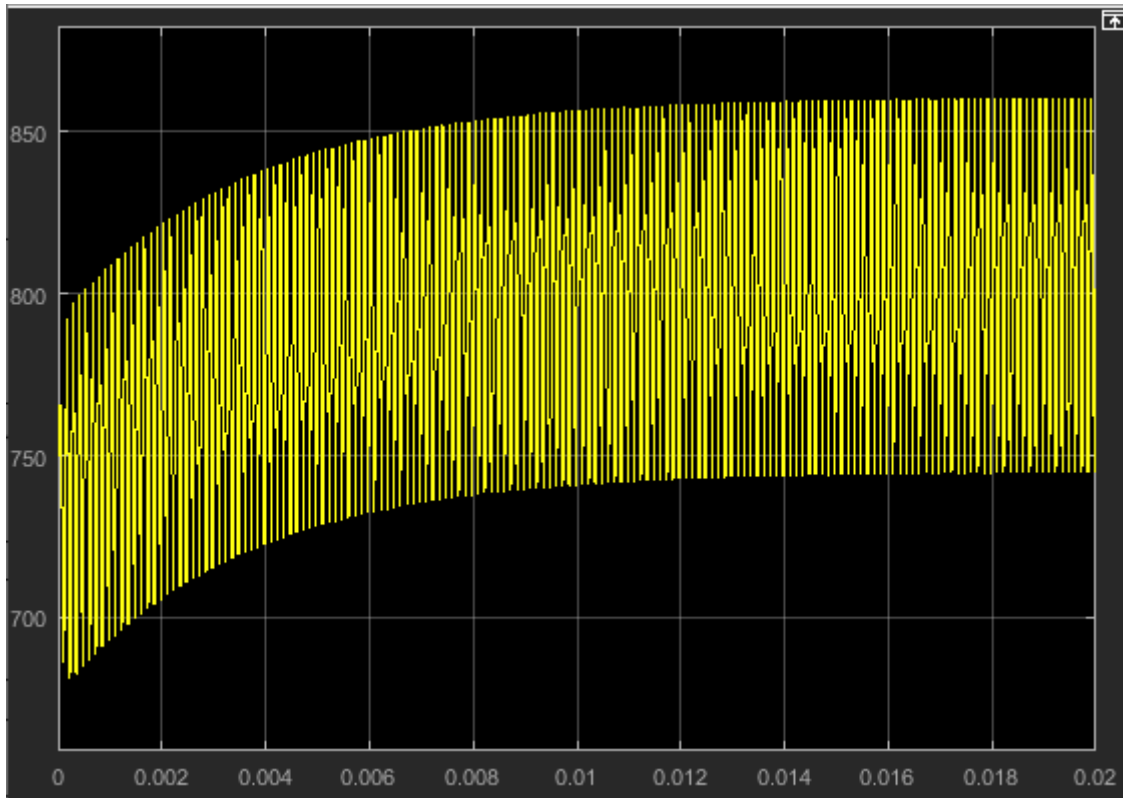


Figure 55: Evolution de la tension aux bornes du condensateur (2 cellules)

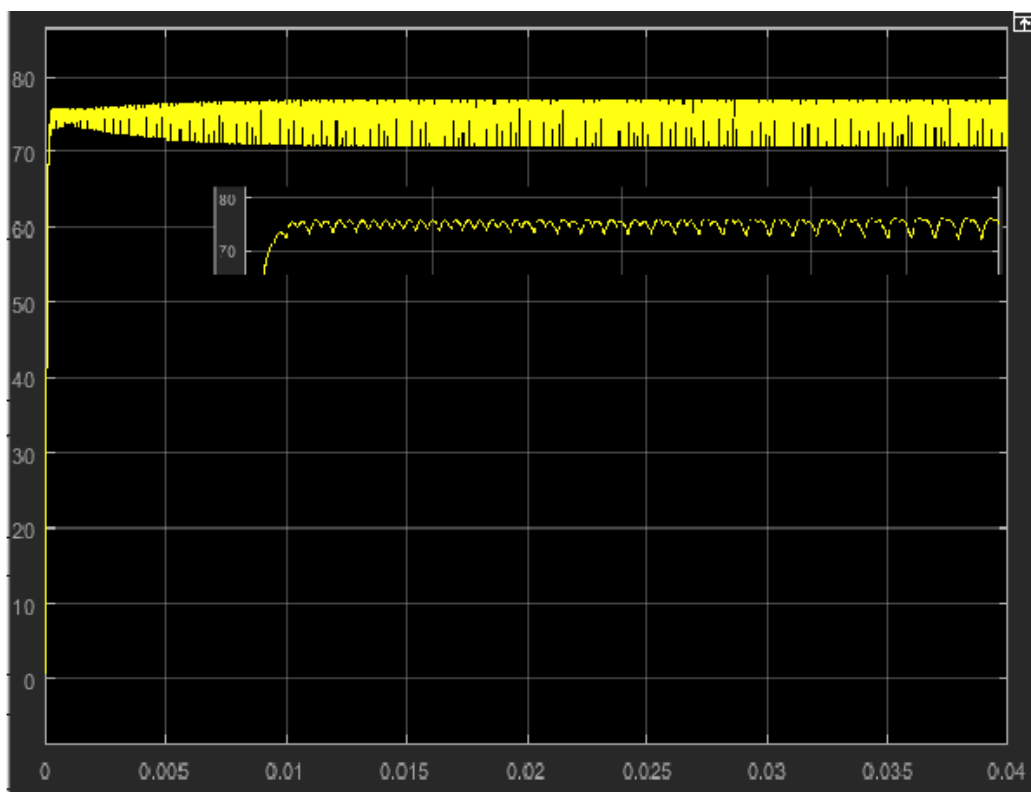


Figure 56: Evolution du courant de charge (2 cellules)

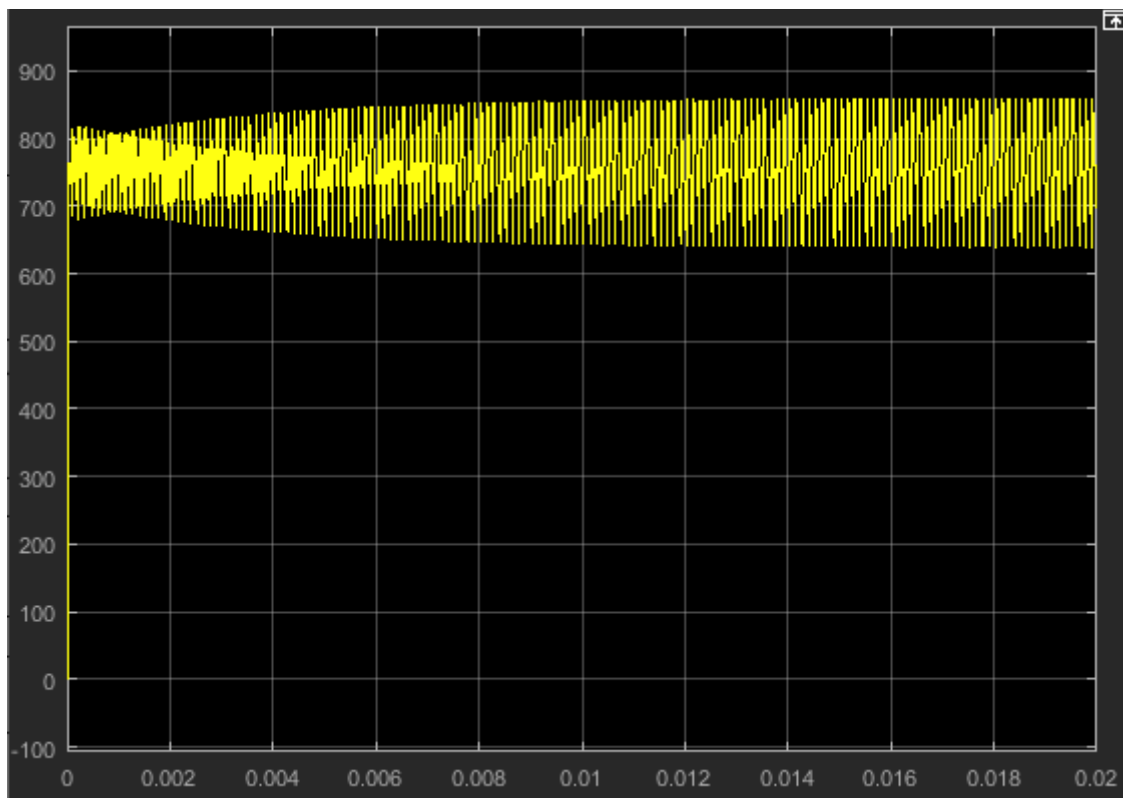


Figure 57: Evolution de tension de charge (2 cellules)

**Simulation d'un hacheur à trois cellules**

Sur les figures suivantes nous présentons les résultats de simulation concernant un hacheur série à deux cellules, alimentant une charge R, L.

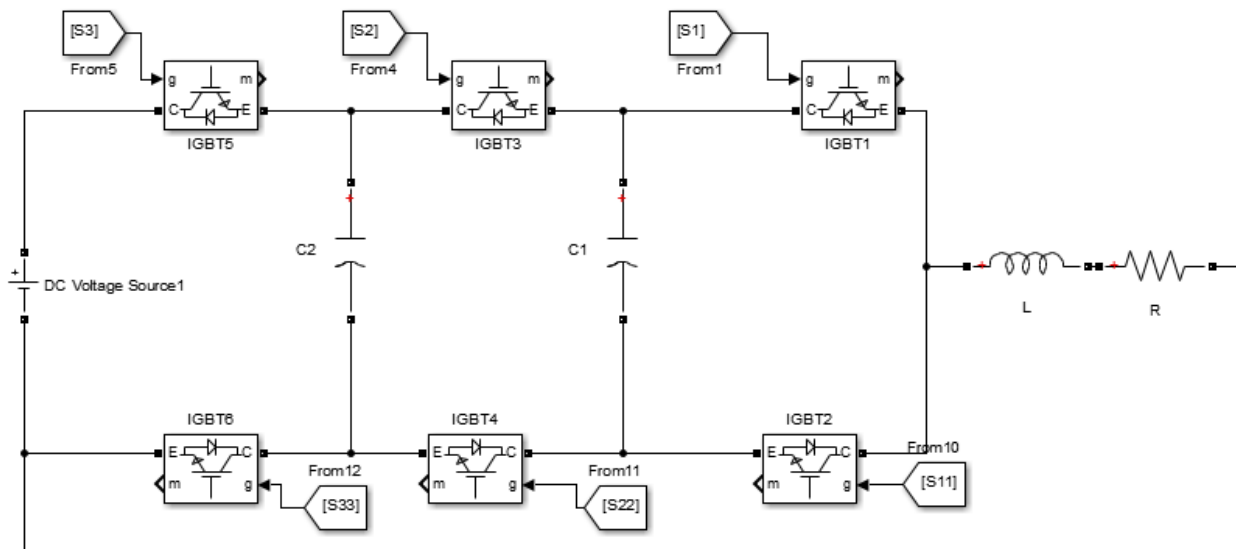


Figure 58: Structure d'un bras d'hacheur multicellulaire série à trois cellules dans SIMULINK

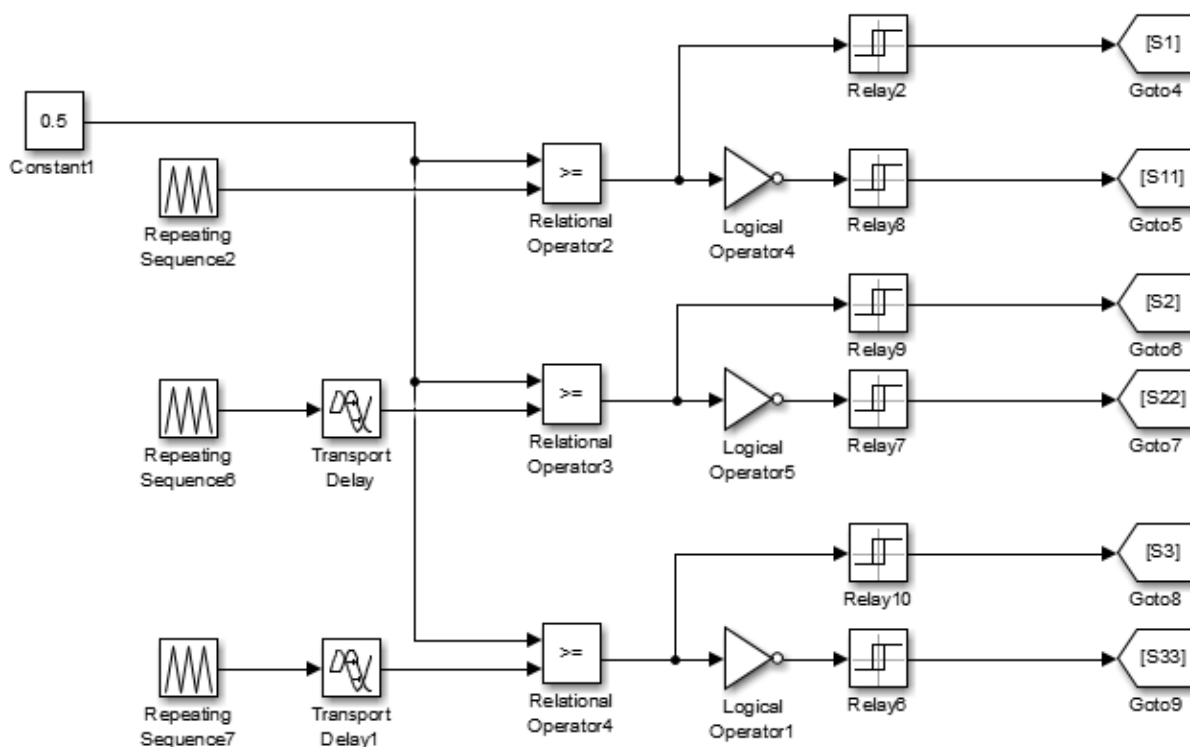


Figure 59: Structure de commande MLI à trois porteuses dans SIMULINK

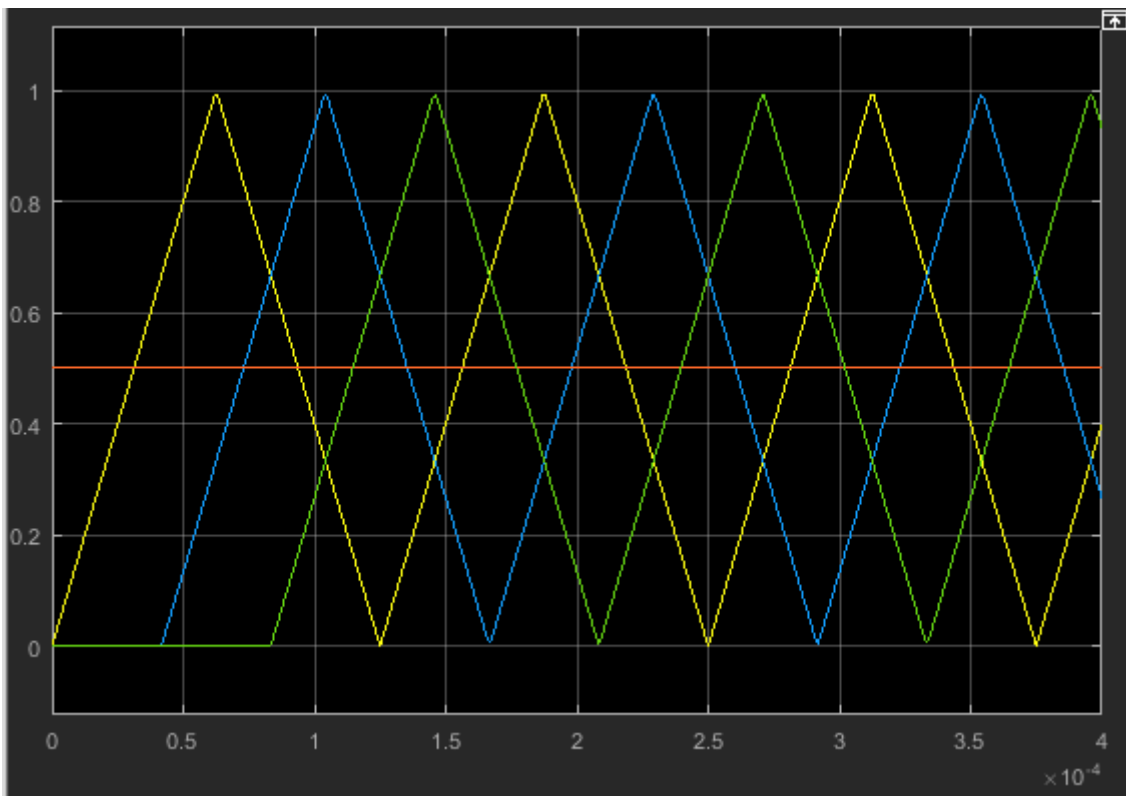


Figure 60: Intersection entre trois porteuses décalées entre eux de  $2\pi/3$  avec un rapport cyclique de 0.5

Dans la commande MLI naturelle, les ordres de commande de chaque cellule sont générés par l'intersection entre une porteuse triangulaire de fréquence  $f_{dec}$ , (la fréquence de découpage est fixée à  $f_{dec} = 16$  kHz) et le signal modulant constant ( $cnt=0.5$ ).

Les résultats de simulation d'un hacheur à trois cellules alimentant une charge R, L sont représentés dans les figures IV.13, IV.14 ,IV.15.

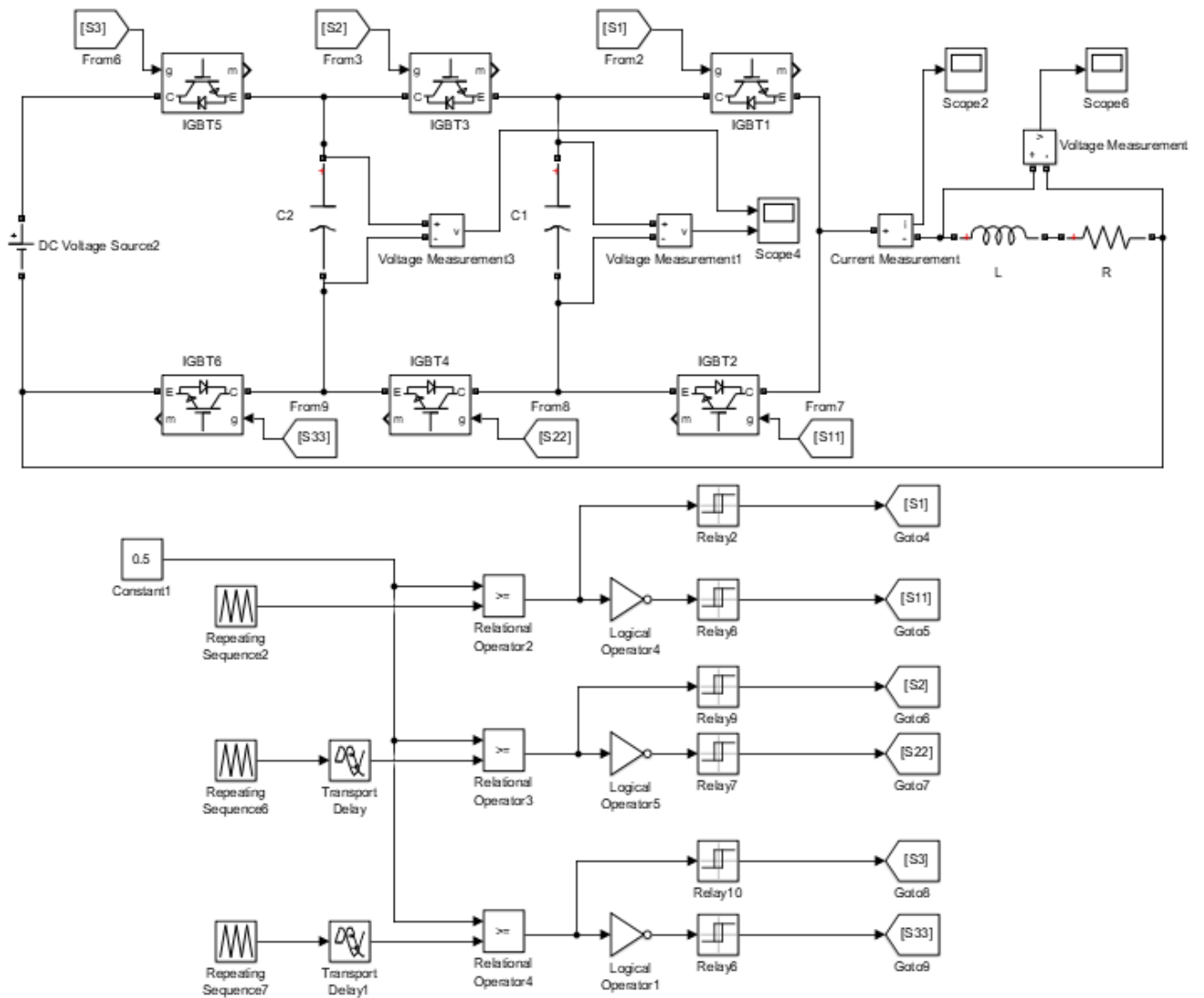


Figure 61: hacheur à trois cellules sur SIMULINK.

Résultat de simulation :

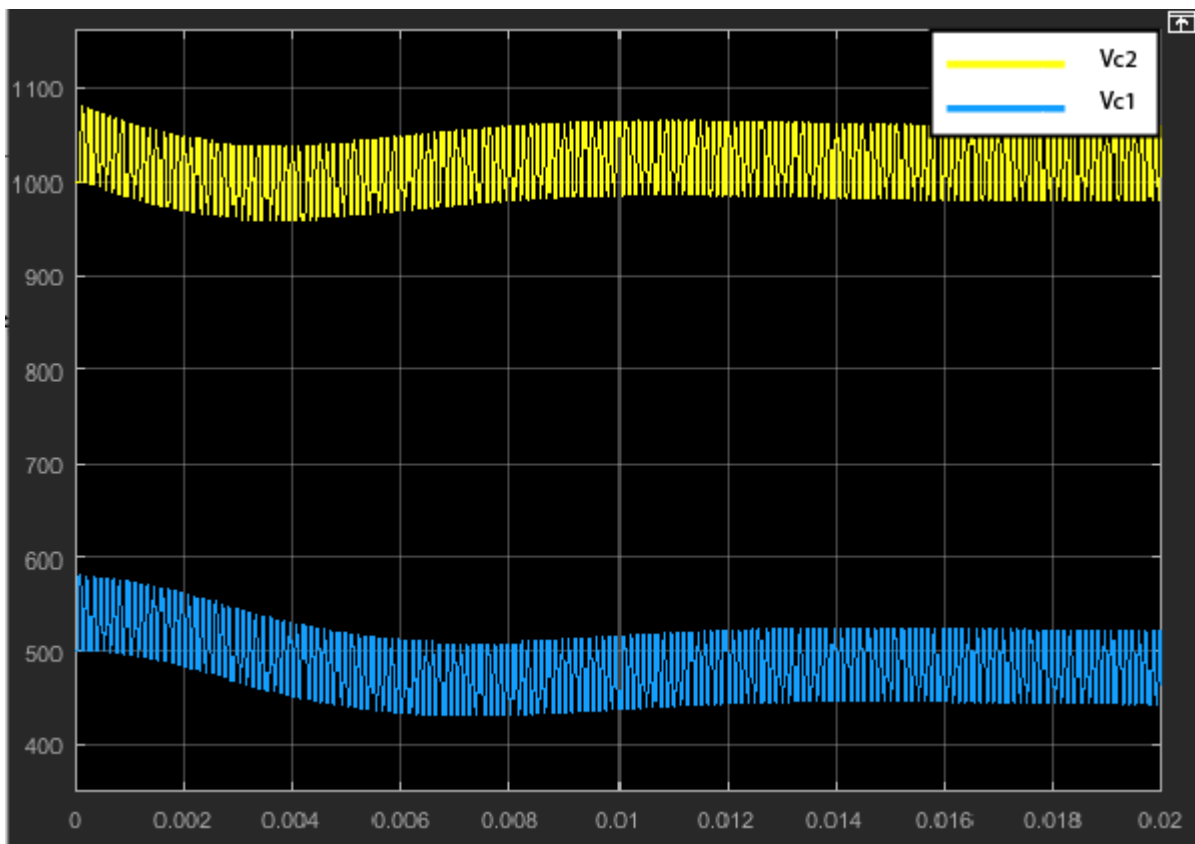


Figure 62: Evolution de la tension aux bornes des condensateurs (3 cellules)

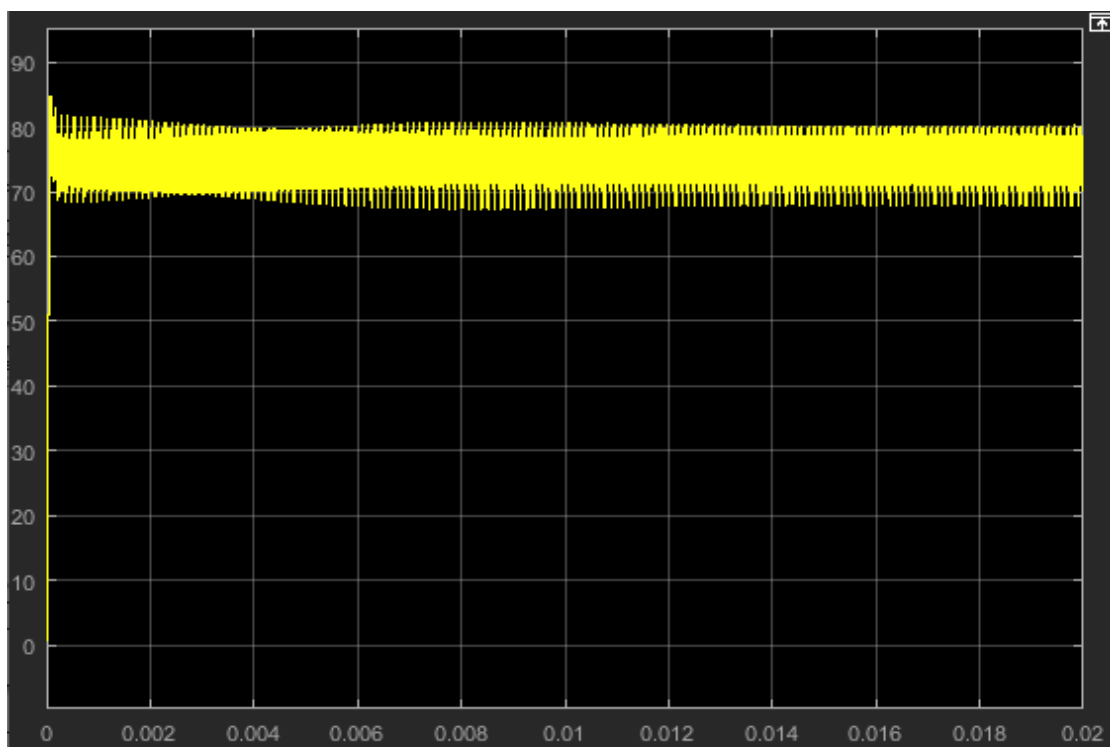


Figure 63: Evolution du courant de charge (3 cellules)

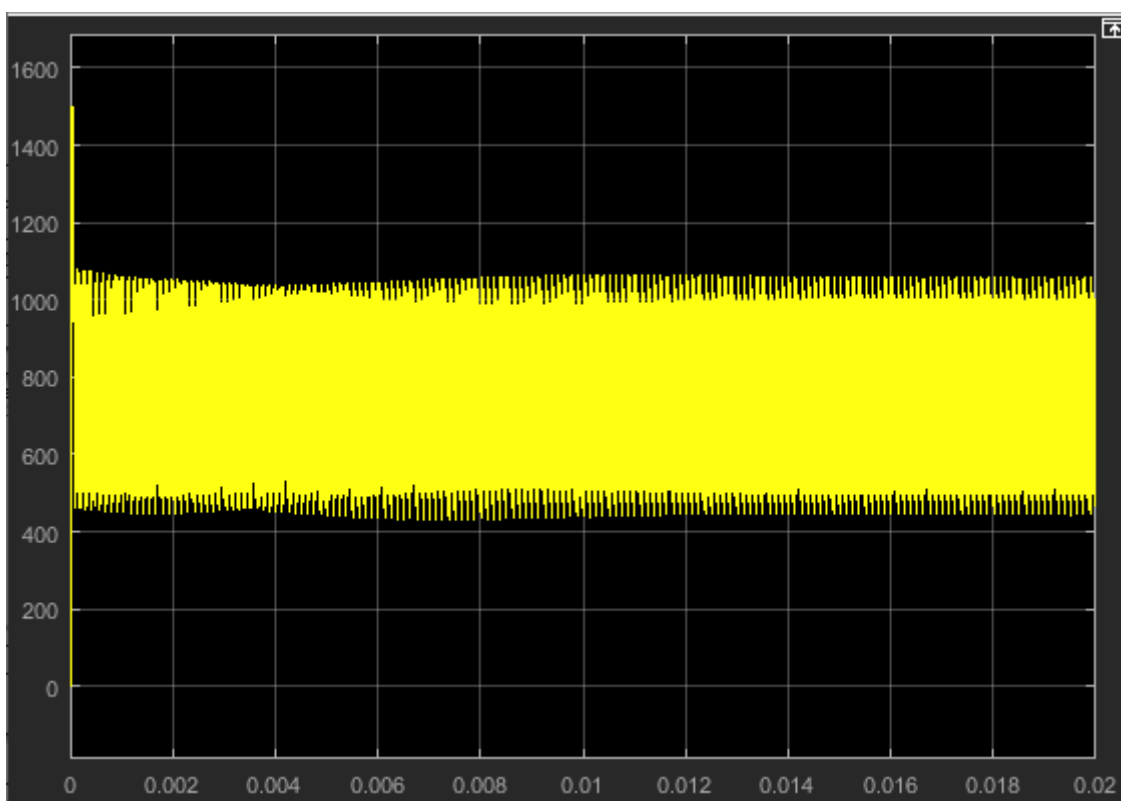


Figure 64: Evolution de tension de charge (3 cellules)



Simulation d'un hacheur à cinq cellules :

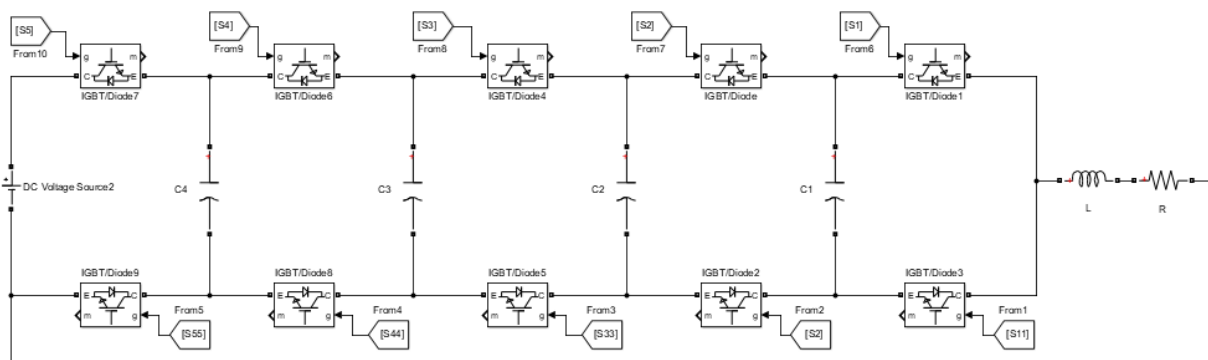


Figure 65: Structure d'un bras d'hacheur multicellulaire série à cinq cellules dans SIMULINK

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation d'un hacheur à cinq cellules alimentant une charge RL, utilisant la commande MLI. Les trois porteuses sont déphasées entre elles de  $2\pi/5$ .

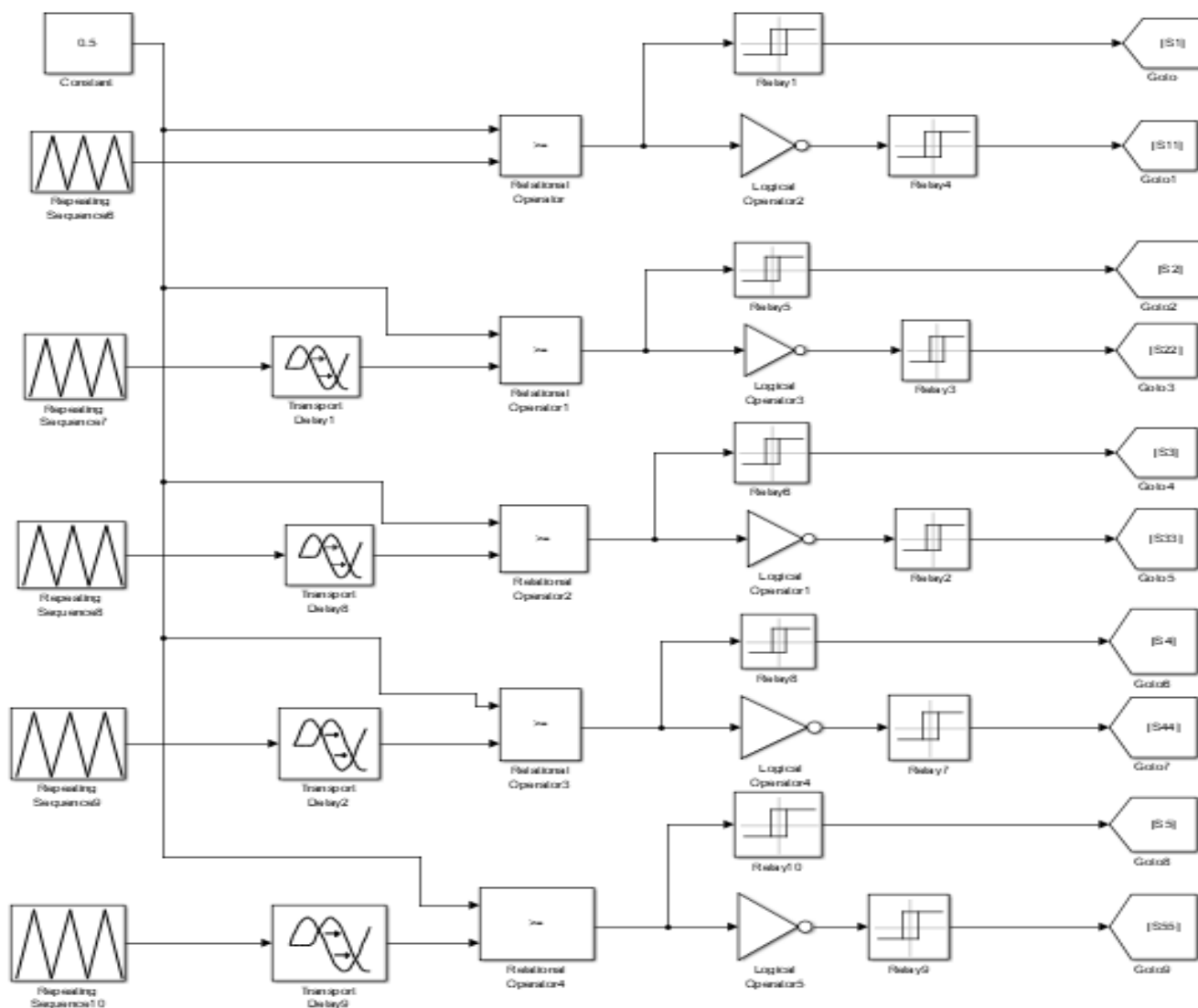


Figure 66: Structure de commande MLI à cinq porteuses dans SIMULINK

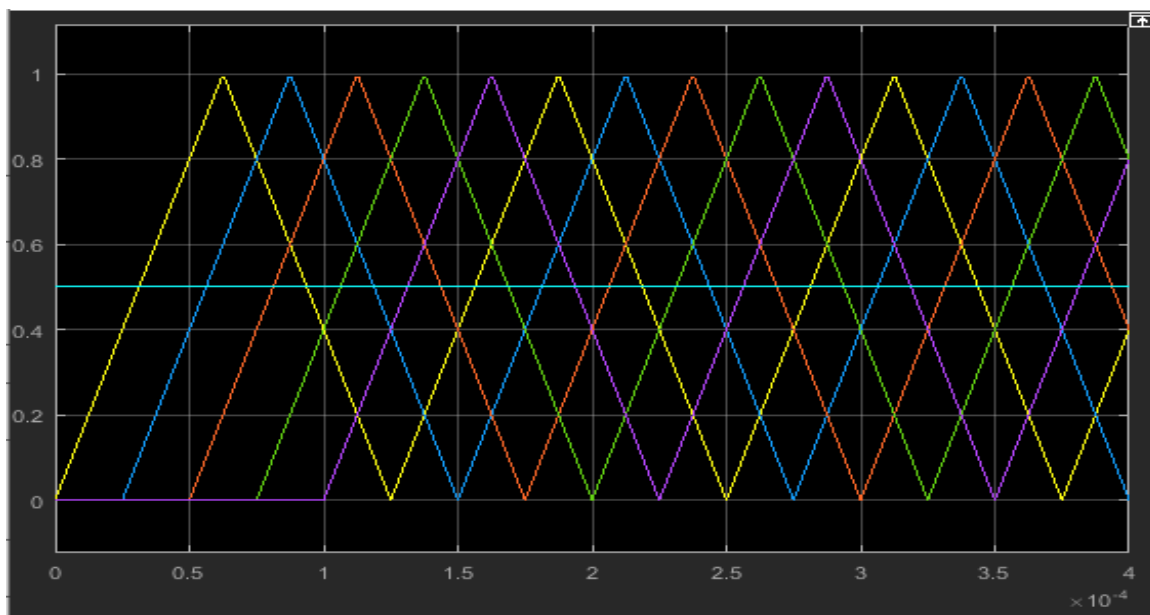


Figure 67: Intersection entre cinq porteuses décalées entre eux de  $2\pi/5$  avec un rapport cyclique de 0.5

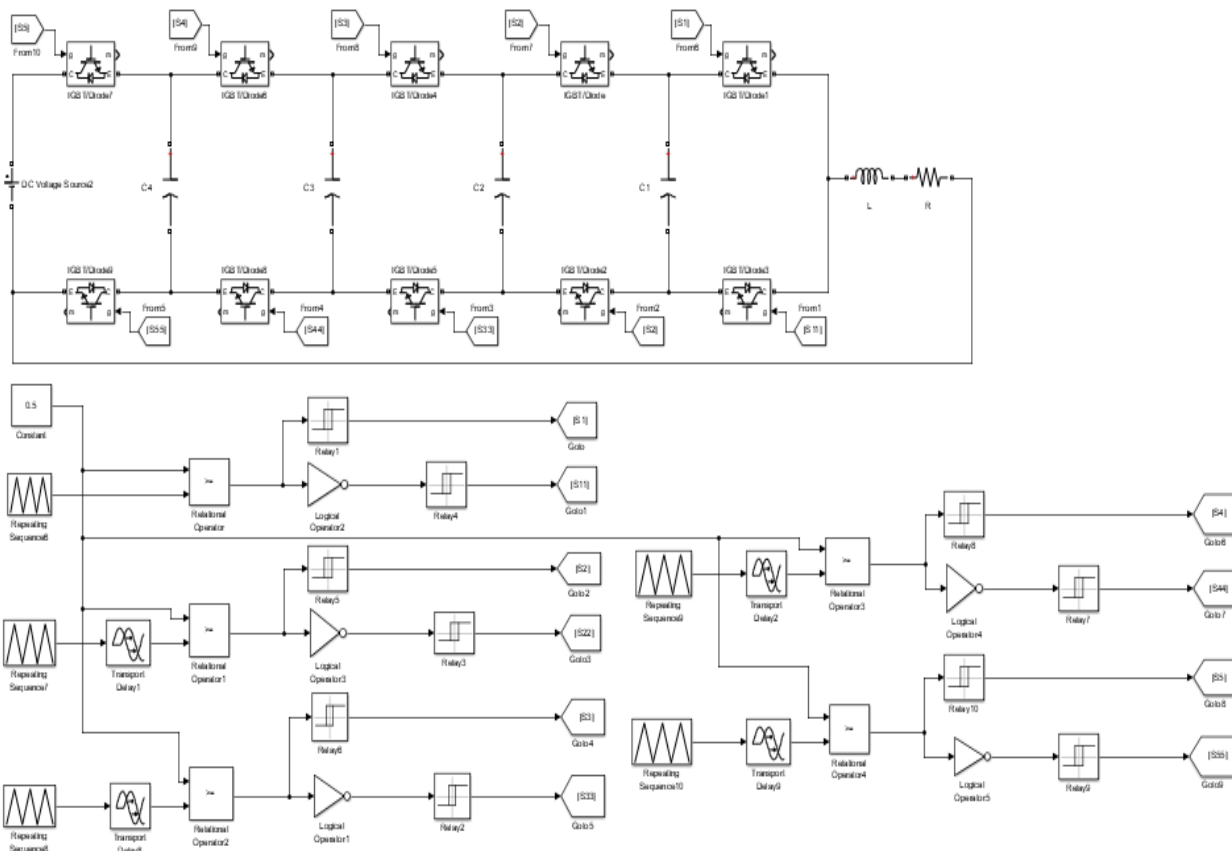


Figure 68: hacheur à trois cellules sur SIMULINK.

Résultat de simulation :

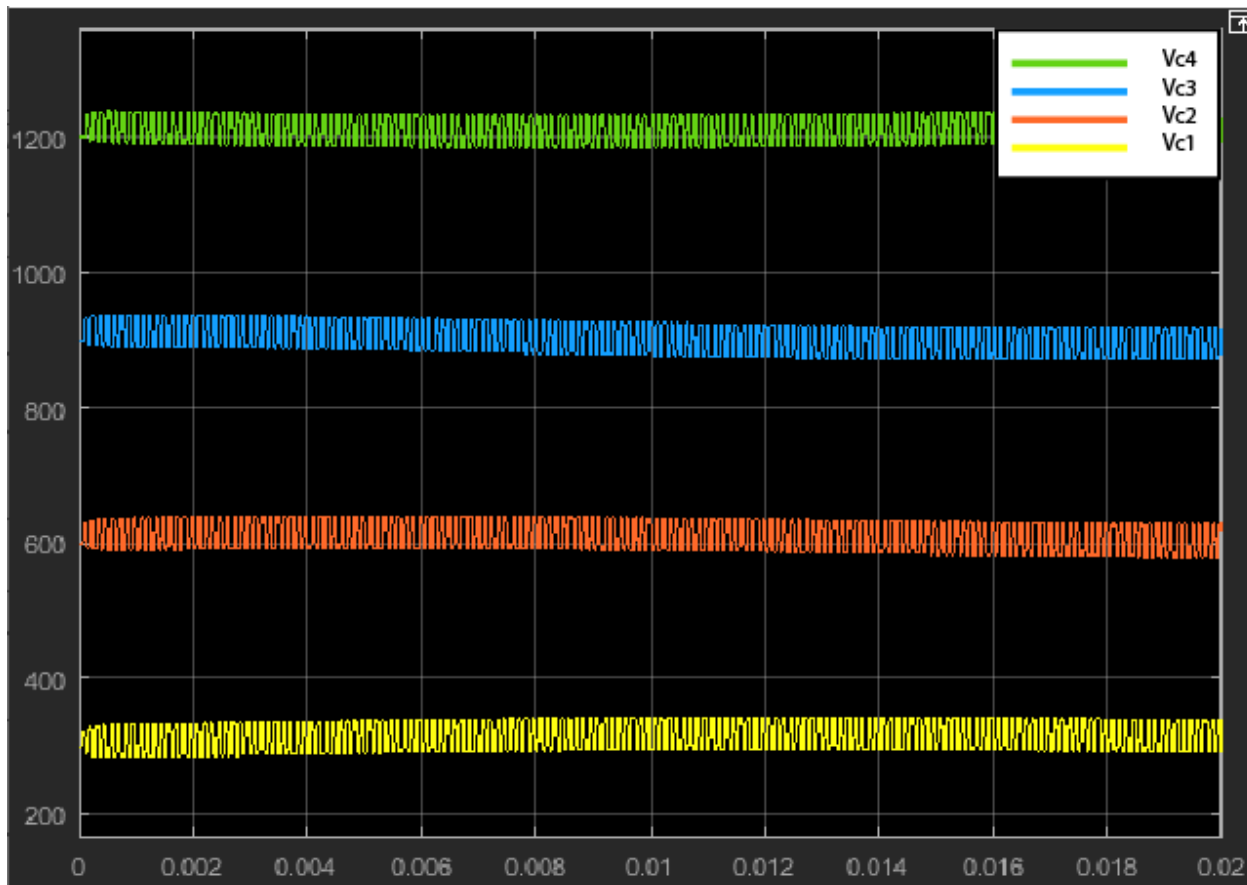


Figure 69: Evolution des tensions aux bornes des condensateurs (5 cellules)

Interprétation :

On peut remarquer que le système évolue vers un état d'équilibre caractérisé par des tensions  $V_{c1}$  et  $V_{c2}$  respectivement 500V et 1000V ( $E/3$  et  $2E/3$ ) dans le cas de 3 cellules (FigureIV.13), et les tensions d'équilibre 300V, 600V, 900V et 1200V ( $E/5$ ,  $2E/5$ ,  $3E/5$ ,  $4E/5$ ) dans le cas d'un hacheur à 5 cellules (Figure IV.20 ).

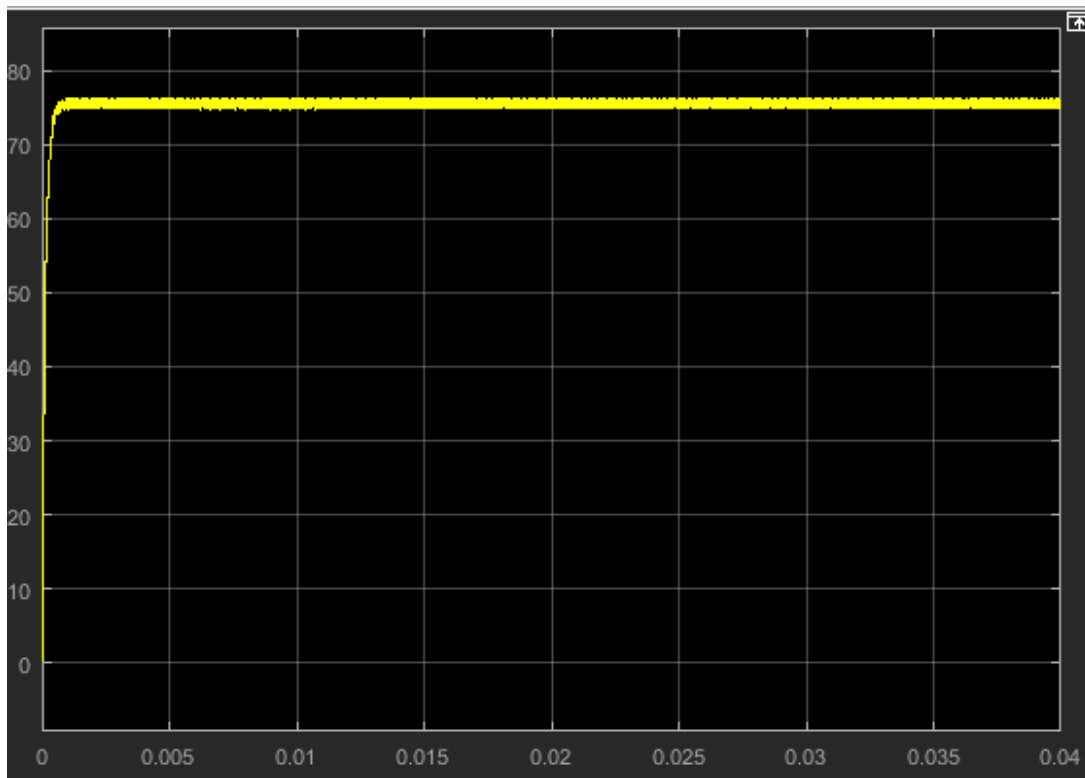


Figure 70: Evolution du courant de charge (5 cellules)

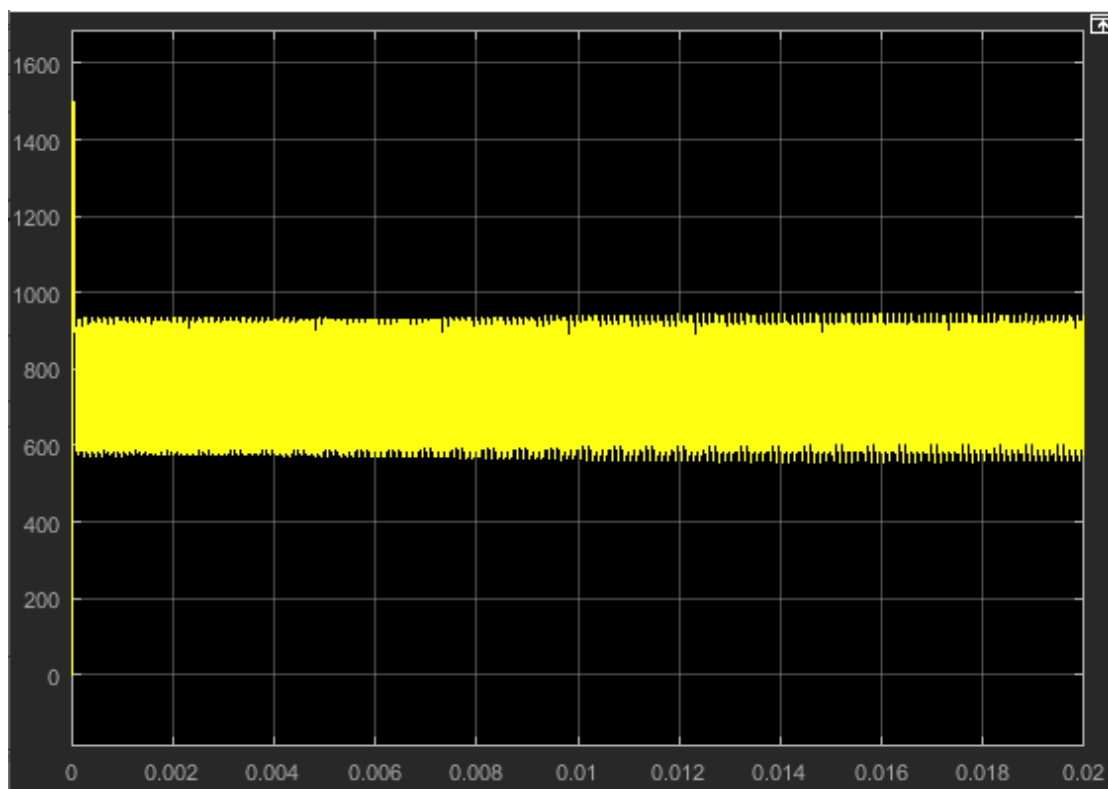


Figure 71: Evolution de tension de charge (5 cellules)

**IV-3- Application de technique de commande linéaire par modulation des rapports cycliques**

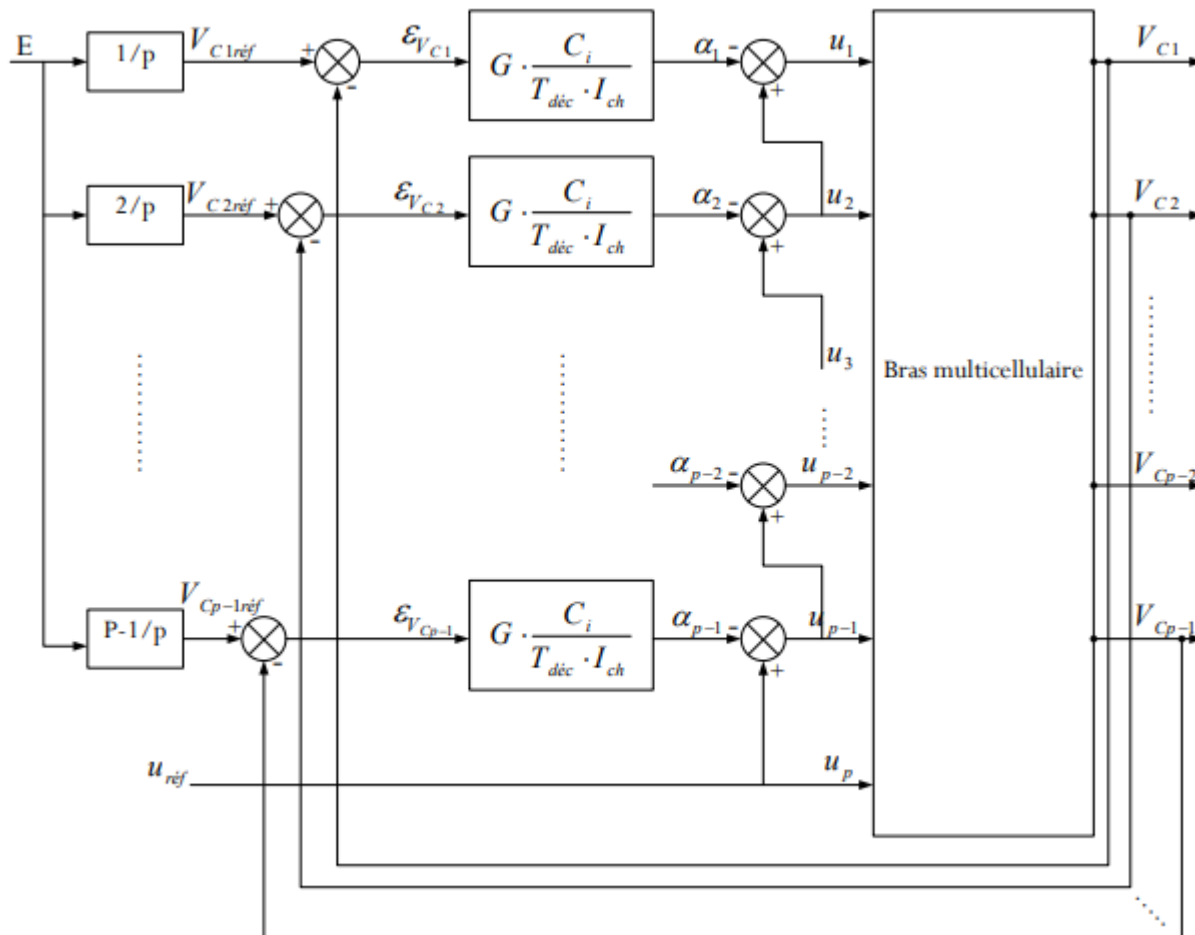


Figure 72: Structure de la loi de commande modulant les rapports cycliques

La loi de commande peut être synthétisée par les équations :

$$u_p = u_{ref}$$

$$u_i = u_{i+1} - G \cdot \frac{c_i}{T_{dec} \cdot I_{ch}} \cdot \left[ \frac{i \cdot E}{p} - V_{Ci} \right] \dots \dots \dots \text{IV.1}$$

Ou i varie de 1 à P-1 et  $u_{ref}$  représente le rapport cyclique de référence permettant de définir le point de fonctionnement

La différence  $\frac{i \cdot E}{p} - V_{Ci}$  correspond à l'erreur existe  $\epsilon_{V_{Ci}}$  sur la tension  $V_{Ci}$  .l'équation IV.1 met en évidence que lorsque l'erreur  $\epsilon_{V_{Ci}}$  est nulle, les rapports cycliques sont égaux :

$$u_1 = u_2 = \dots = u_p = u_{ref} \dots \dots \dots \text{IV.2}$$

En considérant que le courant peut être représenté par sa valeur moyenne sur une période de découpage, il est possible de définir dans le domaine fréquentiel une boucle de contrôle propre à chaque condensateur figure (73).

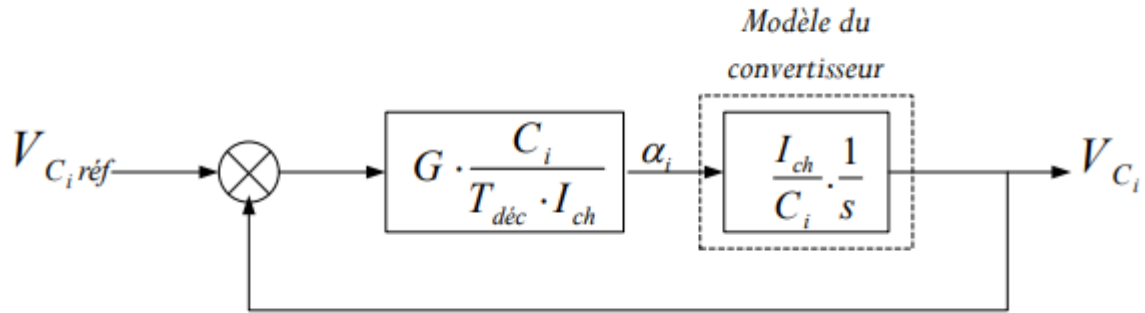


Figure 73: Boucle de régulation de la tension condensateur V<sub>ci</sub>

La fonction de transfert liant  $V_{C_i}$  à  $V_{C_{iref}}$  est du premier ordre et la constante de temps  $\tau$  est définie par  $\tau = \frac{T_{dec}}{G}$ .

$$\frac{V_{C_i}}{V_{C_{iref}}} = \frac{1}{1 + \tau s} \dots \dots \dots \text{IV.3}$$

L'équation (IV.1) montre que pour une erreur donnée  $\varepsilon_{V_{ci}}$ , la régulation saturera d'autant plus vite que le condensateur  $C_i$  et le gain  $G$  seront importants et que le courant  $I_{ch}$  sera faible. Le choix du gain  $G$  s'effectue alors en considérant le mode de fonctionnement suivant :

- La source d'alimentation étant établie à sa valeur de référence  $E$ , on effectue un démarrage du convertisseur (les condensateurs  $C_i$  étant déchargés) avec un rapport cyclique définissant le point de fonctionnement (courant de charge).

A l'instant initial, les erreurs sur les tensions aux bornes des condensateurs  $\varepsilon_{V_{ci}}$  sont maximales et égales à :

$$\varepsilon_{V_{ci}} = i \cdot \frac{E}{P} \dots \dots \dots \text{IV.4}$$

Le rapport cyclique  $u_{p \text{ init}}$  égal à  $u_{réf}$  permet de définir les grandeurs  $u_{i \text{ init}}$  par les relations de récurrence :

$$u_{p \text{ init}} = u_{réf}$$

$$u_{p-1 \text{ init}} = u_{p \text{ init}} - \alpha_{p-1 \text{ inint}} = u_{réf} - (p-1) \cdot \frac{G \cdot C_i}{T_{dec} \cdot I_{ch}} \cdot \frac{E}{P} \dots \dots \dots \text{IV.5}$$

$$u_{1 \text{ init}} = u_{réf} - \alpha_{1 \text{ inint}} = u_{réf} - \frac{(p-1)}{2} \cdot \frac{G \cdot C_i}{T_{dec} \cdot I_{ch}} \cdot \frac{E}{P} \dots \dots \dots \text{IV.6}$$

Ces équations impliquent que les rapports cycliques  $u_{1\text{ init}}$  seront toujours inférieurs à la valeur de référence  $u_{réf}$  dans le cas d'un démarrage :

$$u_{réf} > u_{p-1\text{ init}} > u_{p-2\text{ init}} > \dots > u_{1\text{ init}} \geq 0$$

Le gain G est donc calculé tel que  $u_{1\text{ init}}$  sachant que  $I_{ch} = u_{réf} \cdot \frac{E}{R_{ch}}$  :

$$G = \frac{2 \cdot T_{déc}}{(p-1) \cdot C_i \cdot R_{ch}} u_{réf}^2 \dots \dots \dots \text{IV.7}$$

La constante de temps caractérisant l'évolution en boucle fermée des tensions condensateurs s'exprime alors :

$$\tau = \frac{T_{déc}}{G} = \frac{(p-1) \cdot C_i \cdot R_{ch}}{2} \cdot \frac{1}{u_{réf}^2} \dots \dots \dots \text{IV.8}$$

Cette première expression montre que la constante de temps tend vers l'infini pour  $R_{ch} = \infty$  ou  $u_{réf} = 0$ . A partir de cette expression, il est alors possible de définir une relation liant la constante de temps  $\tau$  à la période de découpage  $T_{déc}$  et au rapport cyclique  $u_{réf}$ . Pour cela, nous considérons que le condensateur  $C_i$  est dimensionné en fonction de l'ondulation de tension maximale à ses bornes  $\Delta V_{C_i}$ :

$$C_i = \frac{T_{déc} \cdot I_{ch}}{p \cdot \Delta V_{C_i}} \dots \dots \dots \text{IV.9}$$

En prenant en compte cette expression dans l'équation (IV.8) et en supposant que l'ondulation  $\Delta V_{C_i}$  est fixée à 10% de  $E/p$  ( $E/p$  correspond à la valeur d'équilibre des tensions interrupteurs), la constante de temps devient :

$$\tau = \frac{p-1}{0.2 \cdot u_{réf}} T_{déc} \dots \dots \dots \text{IV.10}$$

**Simulation :**

Avec les mêmes paramètres utilisés précédemment, cette commande est appliquée sur un hacheur à deux, trois et cinq cellules alimentant une charge R, L, les résultats de simulation sont montrés sur les figures ci-dessous.

**-L'hacheur à deux cellules**

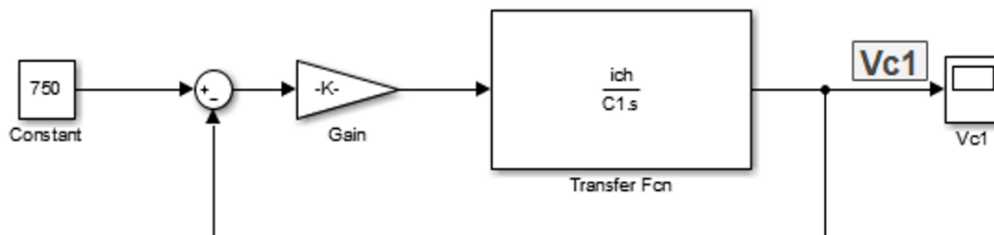


Figure 74: Boucle de régulation de la tension condensateur  $V_{C1}$

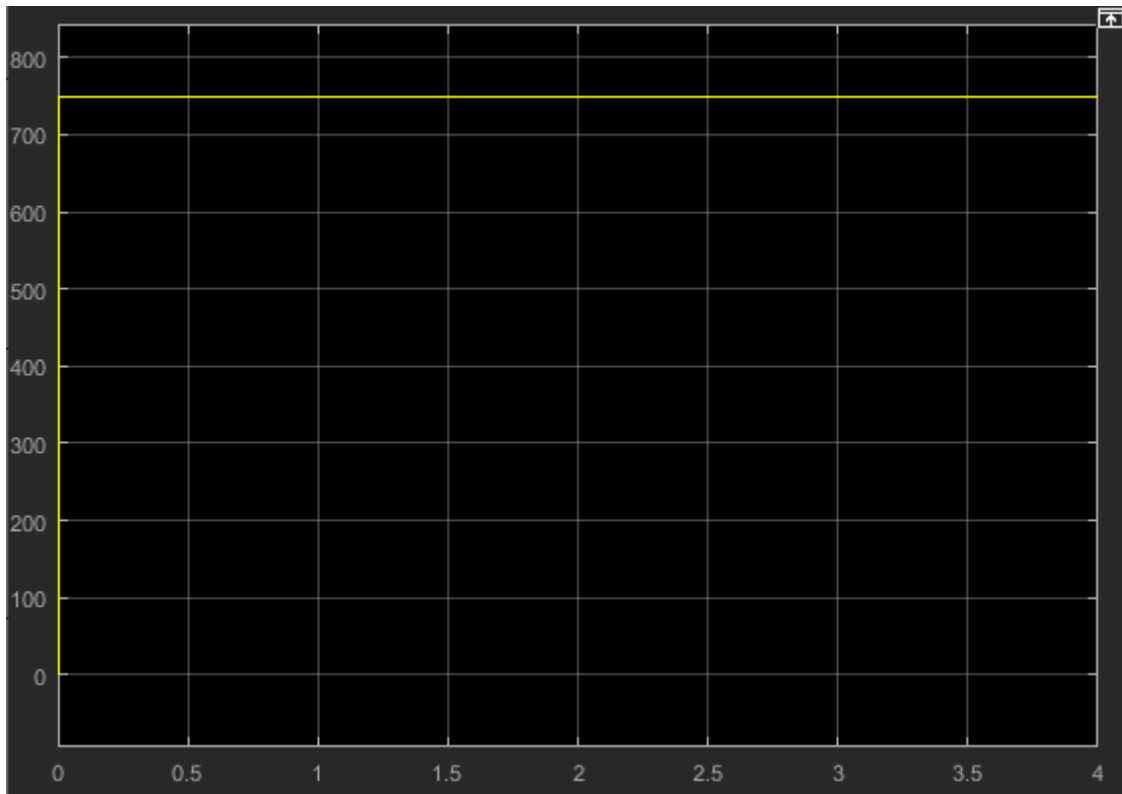


Figure 75: Evolution de la tension aux bornes de condensateur C1

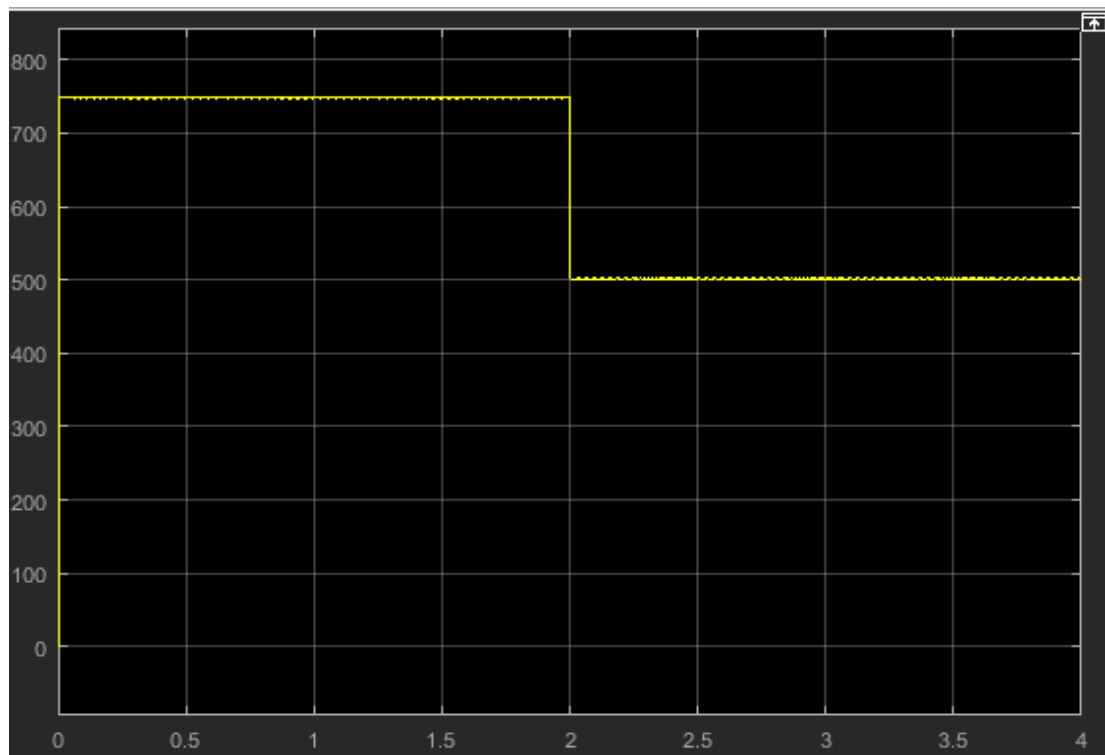


Figure 76: Evolution de la tension aux bornes de condensateur (Variation de la tension de bus)



**Interprétation :**

Il est observable que la tension  $V_{C1}$  converge rapidement vers leur valeur de référence ( $E/2$ ), ce qui améliore l'erreur d'amplitude par rapport à la commande naturelle. Cette amélioration est due à la rapidité de réponse caractéristique de la loi de commande,

Afin de monter l'efficacité de cette commande via la variation de la tension de bus, nous effectuons une variation à  $t=2s$  sur la tension de référence  $V_{C_{réf}}$ , en passant de 750V à 500 V, Les résultats sont montrés sur la figure 76.

**-L'hacheur à trois cellules :**

L'application de la commande linéaire par modulation des rapports cycliques sur un hacheur multicellulaire série à trois cellules série lié à une charge R, L avec les mêmes paramètres utilisés précédemment, donne les résultats ci-dessous :

On a fixé le courant à 120 A, la figure 77 montrent l'évolution des tensions des condensateurs  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$ .

On peut constater que les tensions  $V_{C1}$  et  $V_{C2}$  convergent rapidement vers leur valeur de référence ( $E/3$ ,  $2E/3$ ). Comme il est montré, l'erreur sur l'amplitude de ces deux dernières est améliorée par rapport à la commande naturelle. Cela est dû à la rapidité de réponse qui caractérise la loi de commande, cela aussi est logique puisque l'hacheur multicellulaire série démarre avec des conditions qui sont initialement nulles.

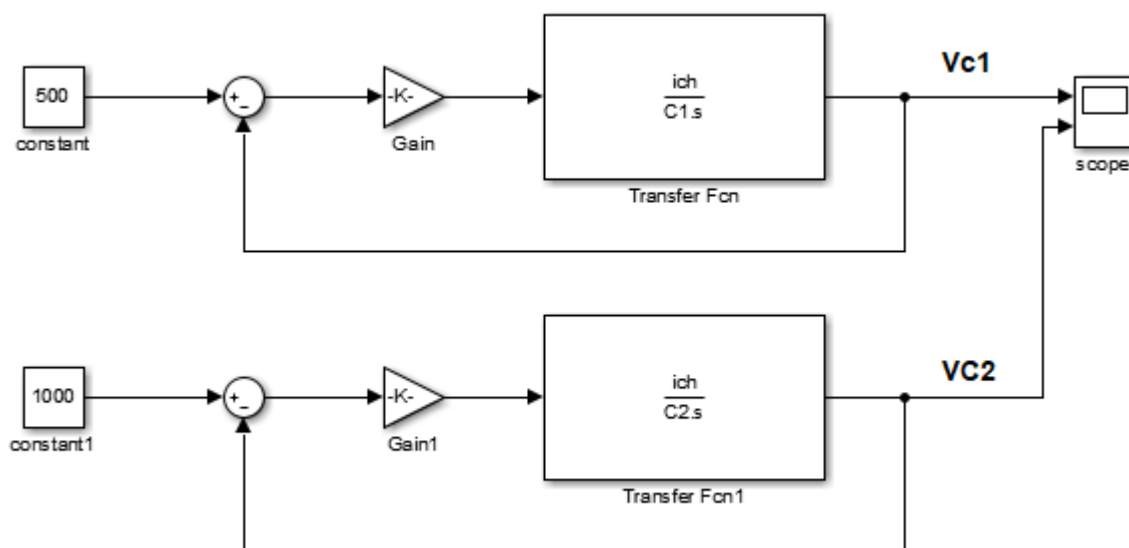


Figure 77: Boucle de régulation des tensions des condensateurs ( $V_{C1}$ ,  $V_{C2}$ ).

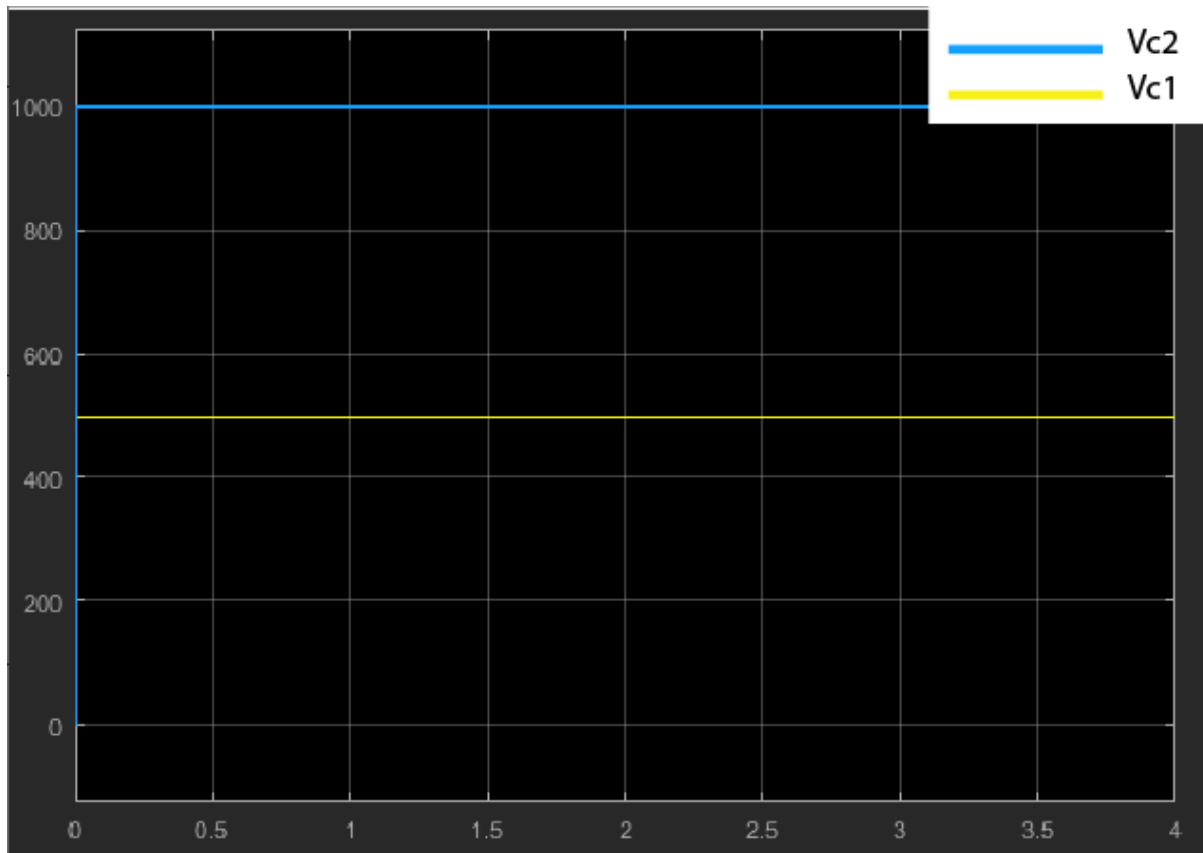


Figure 78: Evolution de la tension aux bornes des condensateurs (C1, C2)

On constate que les tensions évoluent rapidement vers l'état d'équilibre à  $E/3$  et  $2E/3$  avec présence des petites ondulations dans le régime transitoire.

L'hacheur à cinq cellules :

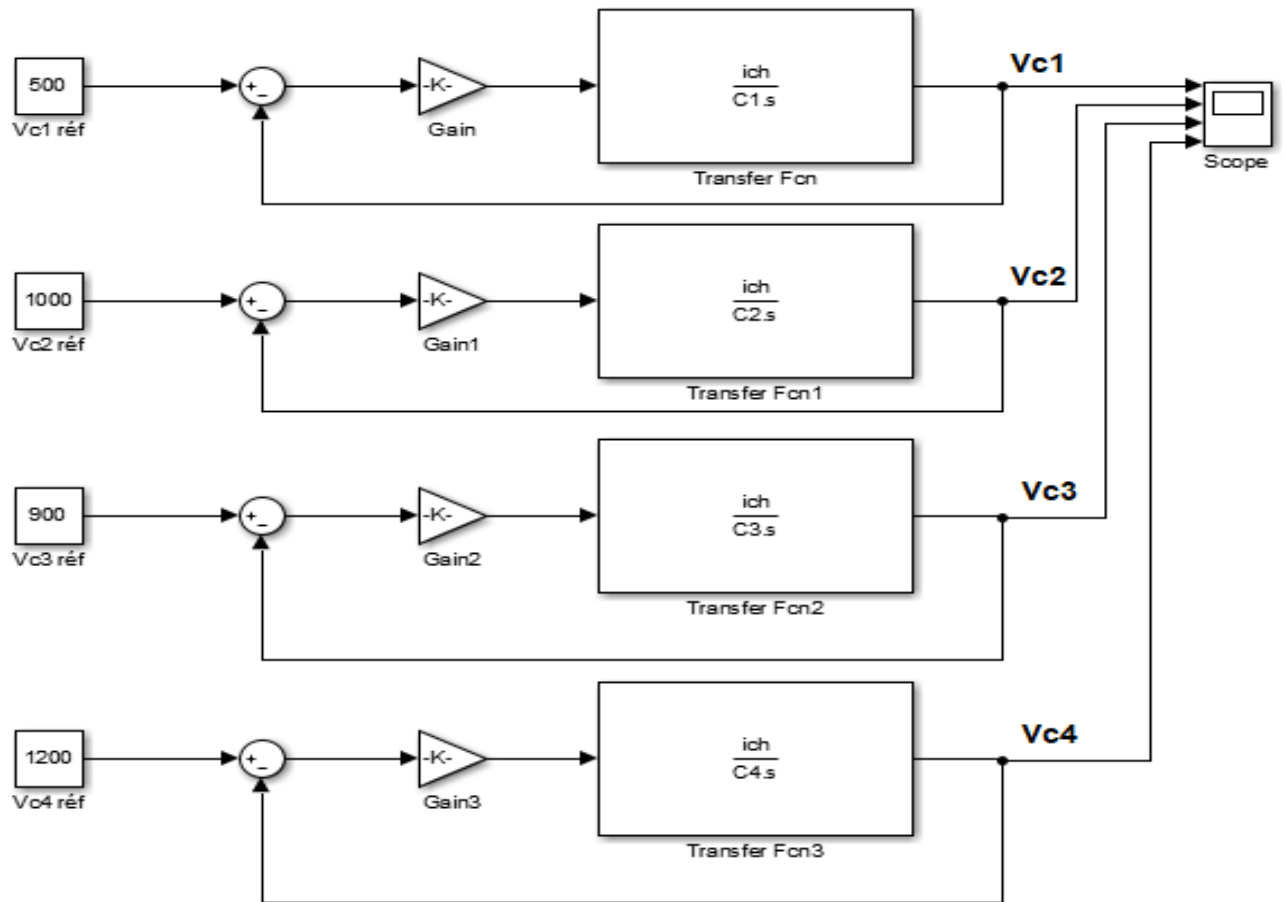


Figure 79: Boucle de régulation de la tension condensateur VC1, VC2, VC3, VC4

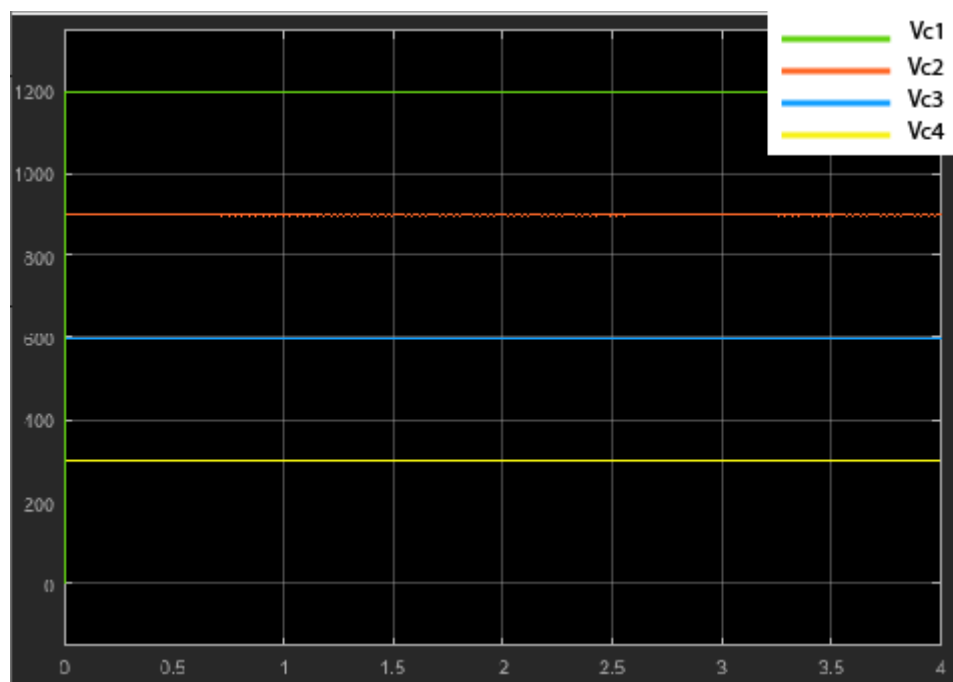


Figure 80: Evolution de la tension aux bornes des condensateurs (C1, C2, C3, C4)

### Interprétation des résultats de simulation :

Pour chaque niveau d'hacheur (deux, trois et cinq niveaux) et pour chaque application de commande nous pouvons faire les constatations suivantes :

- La qualité de la tension de sortie s'améliore avec le passage d'un niveau à un niveau supérieur (de deux cellules à trois et de trois cellules à cinq).
- Les fluctuations des tensions des condensateurs flottants se diminuer d'une façon remarquable avec le passage d'un niveau à un autre
- les tensions des condensateurs flottants suivent les tensions des références cela conduit à l'efficacité de commande linéaire par modulation des rapports cycliques

Les résultats obtenus confirment la bonne performance de cette commande, et cela valide les résultats que nous avons obtenus théoriquement.

#### **IV-4- Conclusion**

Dans ce chapitre, des commandes basées sur le modèle aux valeurs instantanées de l'hacheur multicellulaires série ont été développées. La première commande utilisée c'est la commande naturelle ou la commande par MLI. Cette commande assure un équilibrage naturel des tensions des condensateurs flottants en boucle ouverte en respectant quelques conditions, sauf qu'on a vu qu'elle présente des dynamiques lentes et des dépassements importants en régime transitoire et permanent.

La deuxième commande en boucle fermée toujours basée sur le modèle aux valeurs instantanée a été appliquée sur l'hacheur multicellulaire série, elle est basée sur la modification des rapports cycliques. Cette commande a montré des résultats intéressants en termes de rapidité et de précision et leur robustesse dans le cas de changement des paramètres du système.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

Le travail présenté dans cette mémoire est lié à l'étude et commande des hacheurs multicellulaires séries connecté à une charge RL.

Dans le premier chapitre, nous avons étudié le principe des convertisseurs statiques dans lequel nous avons présenté les différents composants semi-conducteurs (diode, transistors, ...) ainsi que leur rôle important dans le développement de l'électronique de puissance.

Le deuxième chapitre est consacré pour les hacheurs multicellulaires, ses types, principes de fonctionnement et leurs avantages et inconvénients.

En troisième chapitre, d'abord nous avons représenté les différents modèles ainsi que la modélisation des hacheurs à deux , trois et cinq cellules associés à une charge RL .Puis on a expliqué la technique de commande MLI et la commande linéaire par modulation des rapports cycliques appliqué sur le système étudié ,

Dans le dernier chapitres on a réalisé la simulation du système (hacheurs multicellulaires séries +charge) sous MATLAB SIMULINK on augmentant à chaque fois le nombre de cellules de commutations .Puis on a réalisé une commande en boucle fermé sert à améliorer la forme de signale des tensions des condensateurs flottants, et on a fait la comparaison entre la qualité de signal des tensions avant et après la commande. Les résultats de la simulation nous permettent de constater que :

- Le passage d'un niveau à un autre niveau supérieur améliore la qualité des tensions des condensateurs flottants et diminuer les fluctuations, il dégrade aussi les distorsions des tensions de charge et courant de charge.
- Commande linéaire par modulation des rapports cycliques des hacheurs contribue à la réduction des perturbations des tensions des condensateurs flottants.

## Références

- [1] K. y. e. k. said, étude et réalisation d'un hacheur série, 2016.
- [2] k. y. e. k. said, etude et réalisation d'un hacheur série, 2016.
- [3] a. a. b. e. a. mohamed, ondulateurs multiniveaux application on système photovoltaïque.
- [4] a. a. b. e. a. mohamed, commandes des ondulateurs multiniveaux, application on système photovoltaïque.
- [5] B. H. BOUALAM, Commande non linéaire d'un convertisseur multicellulaire, BISKRA, 2019.
- [6] B. H. BOUALAM, Commande non linéaire d'un convertisseur multicellulaire série, Biskra, 2019.
- [7] H. SALAH, Contribution à l'étude et à la commande des structures de conversion d'énergie électrique de type convertisseur multicellulaire, SIDI-BEL-ABBES, 2016.
- [8] C. adel, Contribution à la commande des convertisseurs multicellulaires série, Sétif, 2010.
- [9] M. Gutiérrez, Contribution à la définition de structures optimales, 2001.
- [10] C. Elmetennani, Commande et optimisation par l'approche hybride d'une chaîne de production photovoltaïque à base d'un convertisseur multicellulaire, 2012.
- [11] M. F. M. Y. M. B. S. Hanafi, Nonlinear feedback decoupling control applied to stacked multicellular converter, 2014.
- [12] H. salah, Contribution à l'étude et à la commande des structures de conversion d'énergie électrique de type convertisseur multicellulaire, SIDI-BEL-ABBES, 2016.
- [13] G. G. T. A. M. - A. M. Lienhardt, Stacked Multicell Converter (SMC): reconstruction of flying capacitor voltages, 2005.
- [14] B. masoud, Modélisation et simulation des convertisseurs statiques(application à la structure multicellulaire série), 2010.
- [15] H. SALAH, Contribution à l'étude et à la commande des structures de conversion d'énergie électrique de type convertisseur multicellulaire série, SIDI-BEL-ABBES, 2016.
- [16] G. Gateau, Contribution à la commande des convertisseurs statiques multicellulaires séries, 1997.
- [17] P. Carrere, Etude et réalisation des convertisseurs multicellulaires série à IGBT, 1996.
- [18] O. Tachon, Commande découplante linéaire des convertisseurs multicellulaires série, 1998.
- [19] O. Tachon, Commande découplante linéaire des convertisseurs multicellulaires série, 1998.



- [20] M. Aimé, Evaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques : Application aux nouvelles structures multicellulaires, 2003.
- [21] B. NICOLAS, Contribution à la commande des convertisseurs statiques: définition des lois de commutation à l'aide de la théorie des modes glissants, 1996.
- [22] O. Tachon, Commande découplante linéaire des convertisseurs multicellulaires série, 1998.
- [23] P. Carrere, Etude et réalisation des convertisseurs multicellulaires série à IGBT, 1996.







