



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département De Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Ingénierie de la Maintenance en Instrumentation

Thème

Etude de la commande d'un Onduleur Multicellulaire

Présenté et soutenu publiquement par :

BENALI Mohamed Mehdi. Et BENAÏSSA Sofiane.

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
ARBI Maachia	MCB	IMSI-Université D'Oran 2	Président
AOUIMER Yamina	MAA	IMSI-Université D'Oran 2	Encadreur
TITAH Mawloud	MCB	IMSI-Université D'Oran 2	Examineur

Année 2021/2022

Remerciement

Le présent travail n'est pas seulement le fruit de nos propres efforts, mais aussi les efforts de bien de personne à qui on exprime nos vies remerciement.

Au terme de notre étude, On remercie DIEU de nous avoir donnée le courage et la patience pour fini notre présent projet. Je remercie mon encadrant **Dr**

AOUIMER YAMINA pour ces encouragements.

On tient à remercier et rendre hommage à nos professeurs du département de Maintenance en Instrumentation qui nous ont permis d'accéder à une formation universitaire de qualité.

On tient à remercier aussi qui a pavé notre chemin.

Enfin, à nous ceux qui de près ou de loin ont contribué moralement ou matériellement à l'aboutissement de ce travail, On dit MERCI.

Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce modeste travail de fin

d'étude à :

À mes chers parents : vous représentez pour moi la source de tendance et l'exemple de dévouement qui n'a pas causé de m'encourager ; Vous avez fait plus que des simples parents puissent faire pour que leurs enfants suivant le bon chemin dans leur vie et leurs études et ainsi qu'à l'ensemble des membres de ma famille.

Par la suite, Je dédie cet humble travail avec grand amour, sincérité et fierté :

À tous mes amis, à tous mes professeurs et tous ceux qui complusse ce modeste travail.

À tous nos enseignants depuis nos premières années d'études.

MEHDI ET SOFAINE.

TABLES DES MATIERES

Introduction générale.....	2
CHAPITRE I Etude théorique des Onduleurs Multicellulaire.....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Familles de convertisseurs statiques.....	5
I.3 Onduleurs.....	5
I.4 Définition de l'onduleur.....	6
I.5 Principe de fonctionnement de l'onduleur.....	6
I.6 Classification des onduleurs.....	8
I.6.1 Onduleurs non autonome.....	8
I.6.2 Onduleur autonome.....	8
I.6.2.1 Les Onduleurs (autonomes) de tension.....	9
I.6.2.2 Les onduleurs (autonome) de courants.....	9
I.6.3 Les onduleurs à résonance.....	9
I.6.3.1 Onduleur à résonance parallèle.....	9
I.6.3.2 Onduleur à résonance série.....	10
I.7 Convertisseur multicellulaire parallèle.....	11
I.8 Convertisseur multicellulaire série.....	12
I.9 Etude et analyse d'un convertisseur multicellulaire série.....	14
I.9.1 Relations décrivant le convertisseur multicellulaire série.....	14
I.9.2 Tension bloquée par une cellule.....	14
I.9.3 Courant commuté par une cellule.....	15
I.9.4 Tensions instantanées des condensateurs et de sortie.....	15
I.10 Convertisseurs multicellulaires.....	16
I.10.1 Convertisseurs multicellulaires séries FCMC (Flying Capacitor Multilevel Converters)...	16
I.10.1.1 Principe de base d'un convertisseur multicellulaire série [1].....	16
I.10.1.2 Cas d'un convertisseur à deux cellules [1], [26].....	18
I.10.1.3 Dynamique idéale des tensions des condensateurs flottants.....	20
I.10.2 Convertisseurs multicellulaires superposés SMC (Stacked Multicellular Converters).....	21
I.10.2.1 Principe de base d'un convertisseur SMC 1x2 (3 niveaux).....	22
I.10.2.2 Cas d'un convertisseur SMC 2x2 (5 niveaux).....	24
I.10.3 Convertisseurs multicellulaires parallèles PMC (Parallel Multicellular Converter).....	27
I.10.3.1 Principe de base d'un PMC à 1 cellule de commutation.....	27
I.10.3.2 Cas d'un convertisseur PMC à 2 cellules de commutation.....	29
I.11 Conclusion.....	30
CHAPITRE II Modélisation Des Onduleurs Multicellulaire.....	31
II.1 Introduction.....	32
II.2 Modélisation du convertisseur multicellulaire.....	33
II.2.1 Modèle instantané.....	33
II.2.2 Modèle moyen.....	34
II.2.3 Modèle harmonique.....	35
II.3 Modélisation du convertisseur multicellulaire série.....	35
II.3.1 Modèle de l'évolution.....	35
II.3.2 Hypothèses.....	35
II.3.3 Formulation générale.....	36
II.3.4 Fonctionnement hacheur.....	36
II.4 Le modèle ou valeur moyennes.....	37

II.4.1	Hypothèses	37
II.4.2	Modèle moyen d'un bras multicellulaire série	37
II.5	Modélisation du convertisseur multicellulaire parallèle.....	40
II.5.1	Modèle aux valeurs instantanées.....	40
II.5.1.1	Hypothèses	40
II.5.1.2	Fonctionnement hacheur	40
II.5.1.3	Fonctionnement onduleur	43
II.6	Commande par modulation de largeur d'impulsion.....	45
II.6.1	Principe de base de MLI	45
II.6.2	Caractéristiques de la modulation	45
II.6.3	Différente technique de modulation en MLI	46
II.7	Conclusion.....	50
CHAPITRE III	Simulation D'onduleur à MLI en Simulink.....	51
III.1	Introduction	52
III.2	Commande à plein onde	52
III.3	La technique MLI Multiple	55
III.4	Influence d'amplitude de signal de commande (signal continu)	56
III.5	Influence de fréquence de signal de référence (triangulaire).....	59
III.6	MLI Sinusoïdal.....	60
III.7	Conclusion.....	62
Conclusion Générale.....		64
Bibliographie.....		65

Liste Des Figures

CHAPITRE I

Etude Théorique Des Onduleurs Multicellulaire

Figure .I.1	Familles des convertisseurs statiques.....	5
Figure .I.2	Synoptique d'une conversion continue-alternative.....	6
Figure .I.3	Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).....	6
Figure .I.4	Symbole et signal d'un onduleur.....	7
Figure .I.5	Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1 ^{er} demi cycle.....	7
Figure .I.6	Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2 ^{ème} demi cycle.....	7
Figure .I.7	Signal complet de l'onduleur.....	8
Figure .I.8	Onduleur à résonance parallèle (Monophasée).....	10
Figure .I.9	Signaux de commande et forme d'onde des courants.....	10
Figure .I.10	Onduleur à résonance série (Monophasée).....	10
Figure .I.11	Signaux de commande et forme d'onde des tensions.....	10
Figure .I.12	Convertisseur multicellulaire parallèle.....	12
Figure .I.13	Convertisseur multicellulaire série.....	13
Figure I.14	Cellule élémentaire de commutation.....	15
Figure I.15	Bras multicellulaire à P cellules de commutation.....	16
Figure I.16	Bras de convertisseur multicellulaire série à deux cellules de commutation.....	17
Figure I.17	Bras de convertisseur multicellulaire série à P cellules de commutations.....	17
Figure I.18	Association de deux cellules de commutation.....	18
Figure I.19	Dynamique idéale des tensions flottantes.....	21
Figure I.20	Convertisseur multicellulaire superposé $P \times 2$	22
Figure I.21	Convertisseur multicellulaire superposé 1×2	22
Figure I.22	Configurations possibles du convertisseur SMC 1×2	23
Figure I.23	Convertisseur multicellulaire superposé 2×2	24
Figure I.24	Configurations possibles du convertisseur SMC 2×2	25
Figure I.25	Convertisseur multicellulaire parallèle à P cellules de commutation.....	27
Figure I.26	Convertisseur multicellulaire parallèle à 1 cellule.....	28
Figure I.27	Convertisseur multicellulaire parallèle à 2 cellules.....	29

CHAPITRE II

Modélisation Des Onduleurs Multicellulaire

Figure II.1 Hacheur à P cellules, associé à une charge.....	36
Figure II.2 Structure d'un bras multicellulaire P cellules.....	37
Figure II.3 Evolution des grandeurs électriques au sein d'une cellule i	38
Figure II.4 Représentation du modèle moyen d'un bras multicellulaire.....	39
Figure II.5 Convertisseur multicellulaire parallèle à P cellules de commutation.....	41
Figure II.6 Bras d'un onduleur multicellulaire parallèle à point milieu capacitif de P cellules de commutation.....	43
Figure II.7 Schéma synoptique de la M.L.I.....	45
Figure II.8 Technique d'échantillonnage naturel à un seul front.....	47
Figure II.9 Technique d'échantillonnage à deux fronts.....	47
Figure II.10 Echantillonnage régulier symétrique.....	48
Figure II.11 Echantillonnage régulier asymétrique.....	48
Figure II.12 Comparaison aléatoire.....	49
Figure II.13 Comparaison synchronisée.....	49

CHAPITRE III

Simulation D'onduleur à MLI en Simulink

Figure III.1 Schéma de bloque de simulation d'onduleur en point.....	53
Figure III.2 allures de la tension et courant de la charge (U_{ch} , I_{ch}).....	54
Figure III.3 diagramme de spectre, charge R.....	54
Figure III.4 Allures de tension et de courant d'une charge(R-L).....	55
Figure III.5 présente le schéma de bloque en Simulink, d'MLI multiple.....	56
Figure III.6 impulsion d'mli multiple ($A_c=0.2$; $A_r=[1,-1]$).....	57
Figure III.7 la tension de sortie et le diagramme de spectre d'MLI multiple ($A_c=0,2$; $A_r=[1,-1]$).....	57
Figure III.8 Allure de tension et impulsion de sortie.....	58
Figure III.9 Spectre de la tension de sortie.....	58
Figure III.10 l'allures de technique d' MLI multiple ; $f_r=600\text{hz}$	59
Figure III.11 Spectre de la tension de sortie.....	59
Figure III.12 de technique d'MLI sinusoïdal.....	60
Figure III.13 L'allure de tension et de courant avec charge R.....	61
Figure III.14 L'allures de tension et les spectres d'harmoniques avec charge R.....	61

Liste Des Tableaux

CHAPITRE I

Etude Théorique Des Onduleurs Multicellulaire

Tableau I.1 : Caractéristiques principales de l'association de deux cellules.....	18
Tableau I.2 : Caractéristiques principales de l'association de 2 cellules ($E_1=E/2$).....	19
Tableau I.3 : Définition des grandeurs caractéristiques de l'association de P cellules de commutation.....	19
Tableau I.4 : Caractéristiques principales du fonctionnement de l'onduleur SMC 1x2.....	24
Tableau I.5 : Différentes combinaisons des signaux de commande du SMC 2x2.....	26
Tableau I.6 : Définition des grandeurs caractéristiques du SMC $P \times n$	26
Tableau I.7 : Caractéristiques principales de l'association de deux cellules.....	29
Tableau I.8 : Définition des grandeurs caractéristiques du PMC à P cellules.....	30

CHAPITRE III

Simulation D'onduleur à MLI en Simulink

Tableau III.1 : Analyse de la tension de sortie.....	56
---	-----------

Notions et symboles

Notations :

A	:	Matrice dynamique d'un système d'état continu
B	:	Matrice de commande d'un système d'état continu
Cel_i	:	Cellule de commutation i
Cel_{1i}	:	Cellule de commutation i de l'étage 1
Cel_{2i}	:	Cellule de commutation i de l'étage 2
C_i	:	Condensateur flottant i lié à la cellule de commutation i
C_{1i}	:	Condensateur flottant i lié à la cellule de commutation i de l'étage 1
C_{2i}	:	Condensateur flottant i lié à la cellule de commutation i de l'étage 2
C	:	Condensateur du filtre auxiliaire
E	:	Tension d'alimentation
$F_{déc}$:	Fréquence de découpage
l	:	Indice de numérotation des cellules de commutation
$1i$:	Indice de numérotation des cellules de commutation de l'étage 1
$2i$:	Indice de numérotation des cellules de commutation de l'étage 2
I_{Ci}	:	Courant traversant le condensateur flottant i
I_{C1i}	:	Courant traversant le condensateur flottant i de l'étage 1
I_{C2i}	:	Courant traversant le condensateur flottant i de l'étage 2
I_{ch}	:	Courant circulant dans la charge
I_{li}	:	Courant traversant l'inductance de liaison i
L	:	Inductance du circuit auxiliaire
L_{ch}	:	Inductance de charge
L_i	:	Inductance de liaison i lié à la cellule de commutation i
$L_f h_j(X)$:	Dérivée de Lie de h_j par rapport f
M	:	Indice de modulation
N	:	Nombre d'étage
P	:	Nombre de cellules de commutation
R	:	Taux de modulation
R	:	Résistance du circuit auxiliaire

Résumé

Les convertisseurs multicellulaires proposent des solutions innovantes dans le domaine de l'électronique de puissance puisqu'ils permettent la mise en série ou en parallèle des convertisseurs conventionnels. Ils ont comme principaux avantages la segmentation de la puissance et l'amélioration du contenu spectral. Les convertisseurs multicellulaires série permettent la réduction des contraintes en tension et l'augmentation de la puissance délivrée.

Les travaux de recherche présentés dans cette mémoire visent à développer des techniques pour la commande des convertisseurs multicellulaires série à savoir : La commande MLI.

dans le cadre de ce travail sont vérifiées par voie de simulation à l'aide du logiciel Matlab/ Simulink d'un onduleur monophasé en pont commandé à plein onde et par la technique d'MLI.

Abstract

The multicell converters offer innovative solutions in the field of power electronics since they allow serial or parallel connections of conventional converters. They have as main advantages the segmentation of the power and the improvement of the harmonic spectrum continuum. The series multicell converter allows the reduction of voltage stresses and the increase of the power delivered.

The research presented in this thesis aims to develop control techniques in order to improve the performance of memory converters and the quality of energy delivered at their output, namely: The PWM control in this work are verified by simulation using the Matlab / Simulink of a single-phase bridge inverter controlled at full wave and by the PWM technique.

Introduction Générale

Introduction général

L'électronique de puissance a connu un développement technologique important grâce aux développements des semi-conducteurs de puissance et des nouveaux systèmes de conversion d'énergie. Parmi ces systèmes, les convertisseurs multicellulaires séries, basées sur l'association en série des cellules de commutation élémentaires. Cette structure est apparue au début des années 1990, Permettant d'améliorer le contenu harmonique des formes d'ondes, ainsi que de répartir les contraintes de tension lors de l'utilisation en haute tension, par la connexion de cellules de commutation en série. Afin de bénéficier autant que possible du potentiel important de la structure multicellulaire, sa commande doit assurer la régulation des tensions des condensateurs et l'amélioration de la forme du signal de sortie. La SVM (Space Vector Modulation) apporte des améliorations importantes (amélioration du signal de sortie, diminution des taux d'harmoniques,...) pour les convertisseurs multi-niveaux. Par contre, elle provoque un déséquilibre des tensions générées par les condensateurs du convertisseur multicellulaire série.

Notre travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre aborde une Etude théorique des Onduleurs Multicellulaire.

Le deuxième chapitre sera consacré aux a la modélisation de ses convertisseurs.

Le troisième chapitre sera consacré à la simulation de l'onduleur monophasé en pont commandé à plein onde et par la technique d'MLI à en validant les résultats par des simulations sous logiciel de MATLAB(Simulink).

CHAPITRE I

*Etude théorique des Onduleurs
Multicellulaire*

I.1 Introduction

Une des branches de l'électronique en pleine expansion est l'électronique de puissance qui traite et contrôle l'énergie électrique ainsi que sa conversion en d'autres formes d'énergie afin de fournir des tension et des courants aux différents type de charges selon le application. distingue fondamentalement les conversion suivantes : alternatif/continu, continu/alternatif, alternatif/alternatif, continu/continu et la conversion alternatif /continu/alternatif;c'est le cas particulier des application pour des alimentation ininterrompues (UPS).

L'électronique de puissance a pour avantages : une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. Une discrétion par une réduction des masses et des volumes ainsi que par un fonctionnement ultrasonore des dispositifs.

Les convertisseurs multiniveaux ont permis d'améliorer les performances déjà acquises par les convertisseurs classiques à deux niveaux. Parmi ces avantages, on trouve :

- Amélioration de la forme du signal de sortie du convertisseur multiniveaux (amélioration du THD).
- Utilisation de composants de faible calibre (réduction des coûts).
- Equipements plus fiables et durée de vie des isolants augmentée.

D'autre part, il faut aussi remarquer que la réalisation de convertisseurs multiniveaux pose des contraintes et des problèmes, dont on peut citer [1] :

- Besoin d'un plus important nombre de composants.
- Nécessité d'une répartition équilibrée de la tension d'alimentation pour les interrupteurs mis en série.
- Commande plus complexe.

I.2 Familles de convertisseurs statiques

Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques schéma ci-dessous (Figure I.1) :[2]

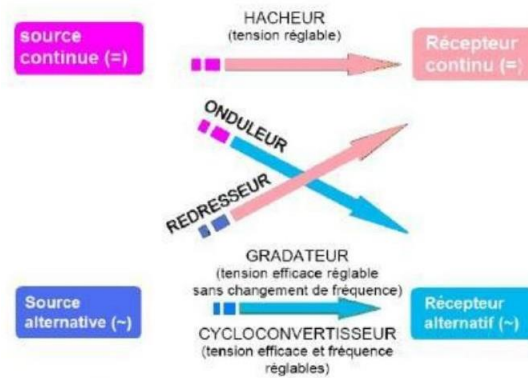


Figure .I.1 Familles des convertisseurs statiques.[2]

Une notion importante en électronique de puissance comme en électrotechnique est la notion de réversibilité. Un convertisseur statique d'énergie est dit réversible lorsque l'énergie peut transiter dans les deux sens (source → récepteur ou récepteur → source) de manière naturelle ou commandée.

Structure des convertisseurs

- **Le gradateur :**

Le gradateur est un montage qui permet de faire varier la valeur de la tension efficace aux bornes d'une charge telle qu'un moteur sans changer la fréquence de l'onde alternative de la source.

- **Le hacheur:**

Le hacheur permet d'alimenter une charge sous une tension continue réglable à partir d'une source continue fixe.

- **Le redresseur :**

Le redresseur est la conversion d'une tension alternative en une tension continue.

I.3 Onduleurs

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques permettant l'échange d'énergie entre une grandeur continue et une grandeur alternative

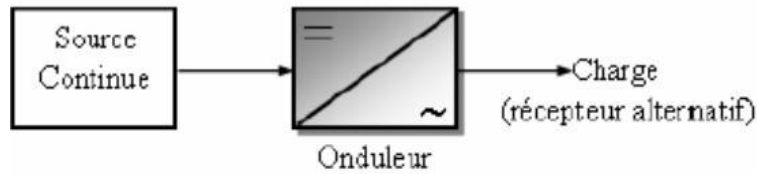


Figure .I.2 Synoptique d'une conversion continue-alternative

On obtient une tension alternative aux bornes de charge en inversant périodiquement le branchement de la source de tension continue aux bornes de la charge grâce aux interrupteurs électroniques .Il faut donc découper la tension d'entrée et l'applique tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre sens au récepteur. Par une séquence adéquate des semi-conducteurs, il est donc possible de produire à la sortie du convertisseur une tension alternative de valeur moyenne nulle. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternative selon la commande imposée. La fréquence de changement de connexions donne la fréquence de ce signal alternatif.[3]

I.4 Définition de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. Figure (I.3)représente schéma de principe de l'onduleur.[4]

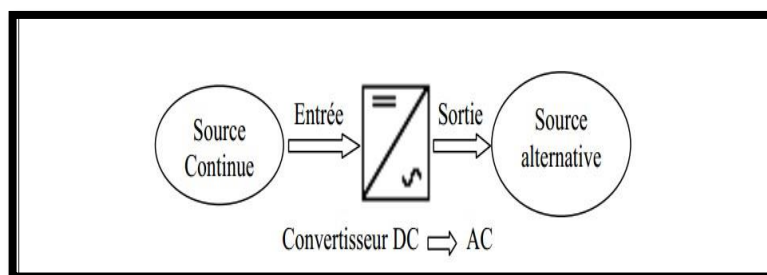


Figure .I.3 Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

I.5 Principe de fonctionnement de l'onduleur

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative a partir d'une tension continu comme le montre la figure (I.4), on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion.[2][5]

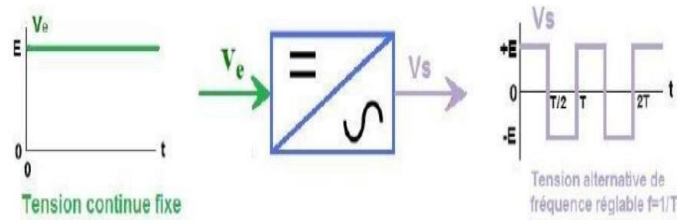


Figure .I.4 Symbole et signal d'un onduleur

L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.

Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources.[2][5]

Quand S1 – S2 sont Fermé (On) et S3 – S4 sont Ouvert (Off) pour $t_1 < t < t_2$ on obtient une alternance positive $U(t) = V_{dc}$ comme la montre la figure (I.5) ci-dessous :

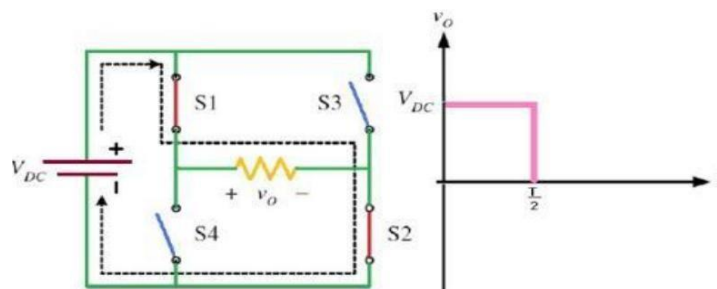


Figure .I.5 Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demi cycle.[2]

Quand S1 – S2 sont Ouvert (Off) et S3 – S4 sont Fermé (On) pour $t_2 < t < t_3$ on obtient une alternance négative $U(t) = -V_{dc}$ comme la montre la figure (I.6).

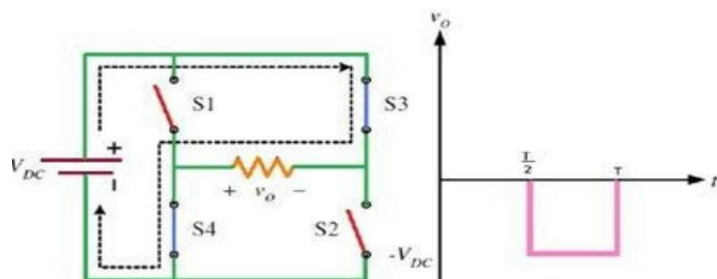


Figure .I.6 Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2ème demi cycle.[2]

Pour obtenir le signal résultant sur la période complète qui est présenté sur la figure (I.7) .
en forme de due alternance

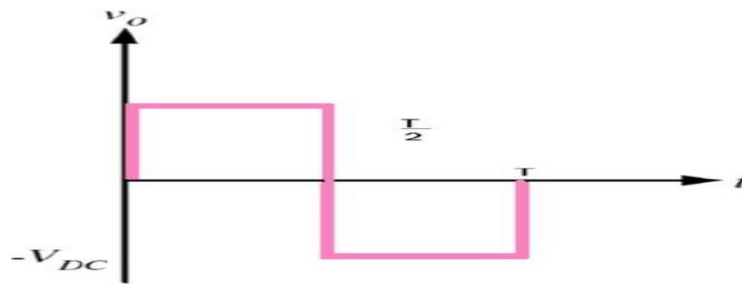


Figure .I.7 Signal complet de l'onduleur

I.6 Classification des onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu- alternatif, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

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

Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge « ou encore onduleur à résonance ». [6]

I.6.1 Onduleurs non autonome

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif.[7]

I.6.2 Onduleur autonome

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer. [8]:

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

I.6.2.1 Les Onduleurs (autonomes) de tension

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension « u » n'est pas affecté par les variations du courant « i » 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' » et donc le courant à l'entrée « i » 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.[8]

I.6.2.2 Les onduleurs (autonome) de courants

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 » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension « u » à ses bornes.[9]

I.6.3 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.[10]

On distingue deux modèles à résonance

I.6.3.1 Onduleur à résonance parallèle

Ce dernier débite sur un circuit RLC résonnant parallèle peu amorti comme l'illustre la Figure (I.8) suivant :

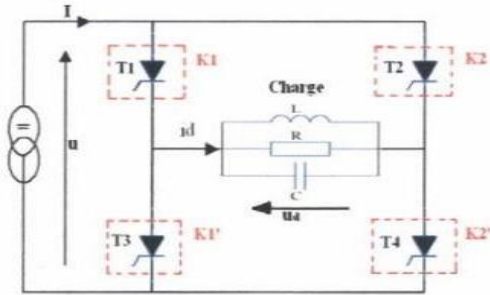


Figure .I.8 Onduleur à résonance parallèle (Monophasée) [4]

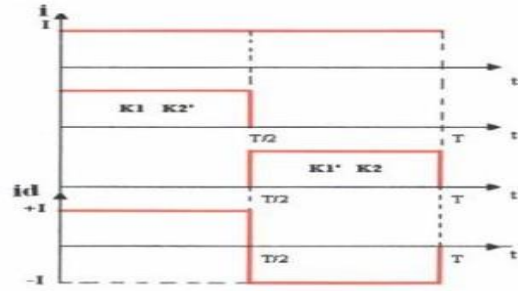


Figure .I.9 Signaux de commande et forme d'onde des courants [4]

Pour cela, on dispose d'une capacité branchée entre les bornes de la sortie, pour s'opposer à la brusque variation de la tension; donc l'onduleur doit être alimenté par une source de courant continu. Il représente donc un cas particulier de l'onduleur de courant, dont la Figure(I.9) donne les signaux de commande et les formes d'ondes des courants.[11][12]

I.6.3.2 Onduleur à résonance série

Celui-ci débite sur un circuit RLC résonant série peu amorti la Figure (I.10) Dans ce cas, on dispose d'une inductance placée en série dans la charge, pour s'opposer aux discontinuités du courant I, donc l'onduleur doit être alimenté par une source de tension. Il représente donc un cas particulier de l'onduleur de tension. La Figure (I.11) représente les signaux de commande et les formes d'ondes des tensions. [4]

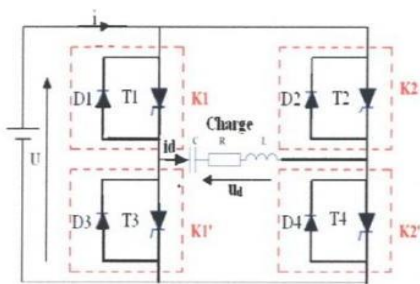


Figure .I.10 Onduleur à résonance série (Monophasée) [4]

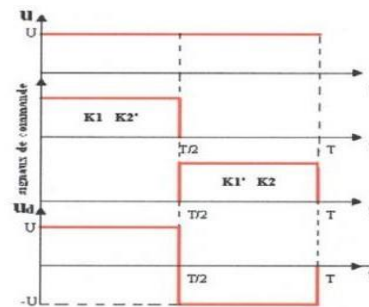


Figure .I.11 Signaux de commande forme d'onde des tensions [4]

I.7 Convertisseur multicellulaire parallèle

Les convertisseurs multicellulaires parallèles sont utilisés dans des applications très variées, comme les microprocesseurs, le réseau de puissance automobile ou les onduleurs de secours de forte puissance. Les principales motivations de la mise en parallèle des cellules de commutation sont :

- La possibilité d'atteindre des puissances inaccessibles avec des composants uniques,
- L'utilisation de composants de calibre plus faible, et par conséquent plus performants,
- L'amélioration des formes d'ondes à l'entrée et à la sortie du convertisseur par une augmentation du nombre de degrés de liberté,
- La réduction du coût total du convertisseur, car des composants de calibres plus faibles peuvent être utilisés.

Le principal inconvénient des convertisseurs multicellulaires parallèles est dû aux problèmes que peut engendrer un parallélisme massif. Ces problèmes sont :

- L'existence de fortes ondulations de courant dans les bras du convertisseur ;
- Le déséquilibre des courants de bras dû à la moindre imperfection du convertisseur.

Une topologie classique du convertisseur multicellulaire parallèle (CMP) repose sur une association de p cellules de commutation interconnectées par l'intermédiaire d'inductances indépendantes, appelées aussi inductances de liaison [13] (Figure I.12). Les ordres de commande des cellules de commutation ont le même rapport cyclique et deux cellules adjacentes ont les ordres de commande déphasés de $2\pi/p$. Les tensions délivrées par les p cellules de commutation sont des tensions carrées de niveau 0 et $+E$, et déphasées de $2\pi/p$. Les p tensions constituent un système de tensions équilibrées (tensions de même fréquence fondamentale et de même contenu harmonique). Les inductances de liaison sont identiques sur chaque cellule et ont pour rôle d'absorber toute différence de tension instantanée entre les cellules. Elles sont toutes parcourues par le même courant moyen, ce qui offre un aspect modulaire très intéressant de ce type de convertisseur.

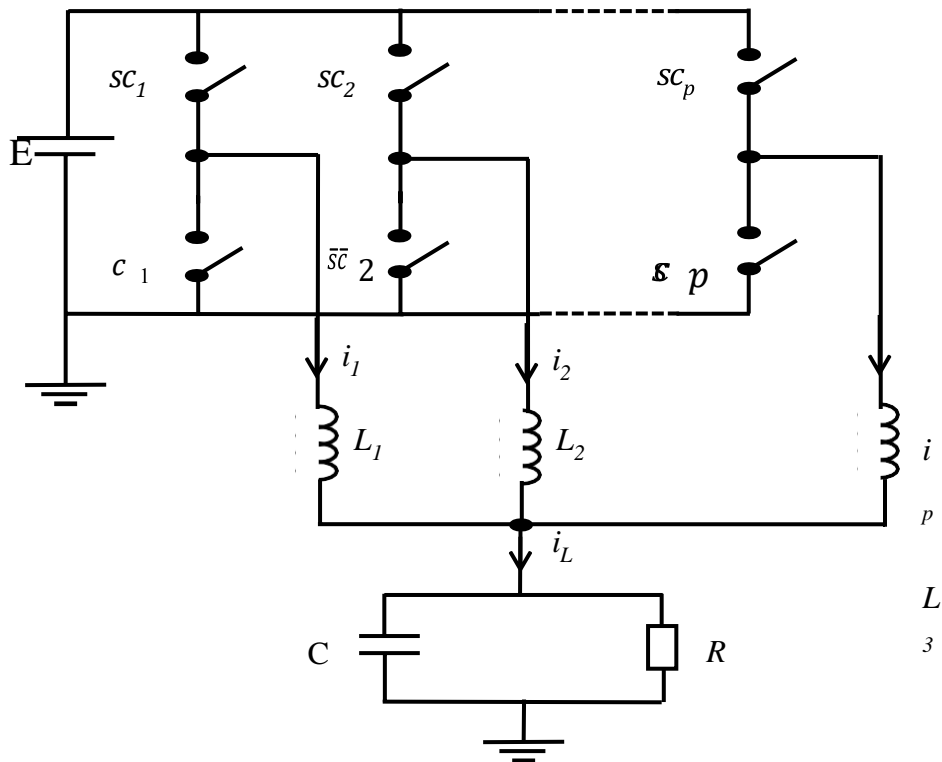


Figure .I.12 Convertisseur multicellulaire parallèle

I.8 Convertisseur multicellulaire série

Le convertisseur multicellulaire série (Figure I.13) est une topologie de conversion d'énergie qui repose sur la mise en série d'interrupteurs commandés. Cette structure est basée sur la mise en série de cellules de commutation entre lesquelles une source de tension flottante est insérée.

Ces sources de tensions flottantes sont réalisées par des condensateurs. La structure du convertisseur multicellulaire série peut être adaptée à toutes les configurations : montage en hacheur ou en onduleur (avec un point milieu capacitif), en demi pont ou en pont complet. La figure I.13 montre le schéma d'un convertisseur multicellulaire série à p niveaux, constitué de $p-1$ cellules. Les principales qualités qu'offre ce type de convertisseurs sont :

La modularité d'une cellule de base permettant de construire toute une gamme de convertisseurs [14].

Le nombre élevé de degrés de liberté lié aux nombres de cellules utilisées.

L'ondulation réduite dans le rapport du nombre de cellules employées [15].

La possibilité de faire fonctionner ce type de convertisseurs en mode dégradé.

Pour conserver un fonctionnement correct du convertisseur multicellulaire série au cours du temps, la commande doit assurer la régulation des tensions des condensateurs flottants.

La régulation permet d'une part de répartir équitablement les contraintes sur chaque interrupteur et d'autre part de conserver les mêmes caractéristiques du point de vue des niveaux de tension. Il existe une commande en boucle ouverte très simple permettant d'assurer la stabilité du convertisseur. Elle est connue sous le nom de commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) ou commande dite "naturelle" [16]. Elle permet l'approximation de la tension de référence de sortie par la réalisation d'une tension moyenne de même valeur sur une période. Il apparaît cependant, que pour certains points de fonctionnement (points critiques), la commande dite naturelle ne permet plus d'assurer la stabilité des tensions des condensateurs, ce qui peut conduire à la destruction du convertisseur. Ce phénomène a déjà été souligné dans des travaux antérieurs [16],[17],[18]. Le besoin de mieux caractériser l'existence d'un tel fonctionnement rend nécessaire une analyse approfondie de la commande de ce type de convertisseur. Dans [19] l'auteur s'est appuyé sur une approche géométrique afin de faire cette analyse. Cette démarche a permis alors une analyse aussi complète que possible. Cela a notamment permis de caractériser les points de fonctionnement critiques pour lesquels les tensions des condensateurs ne sont plus naturellement contrôlées, notamment dans le cas triphasé avec la détermination de l'ensemble des points critiques dans deux cas différents. Cela a également conduit au développement des commandes spécifiques afin d'assurer le contrôle des tensions des condensateurs flottants dans tous les cas de fonctionnement. Par contre, la contrainte de ces convertisseurs est la nécessité d'un grand nombre de condensateurs, notamment pour une configuration triphasée [20].

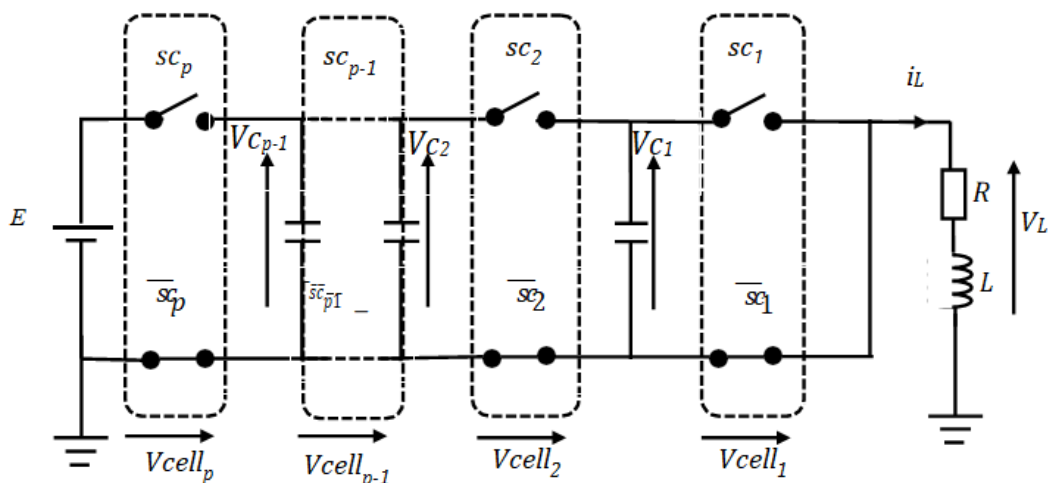


Figure .I.13 Convertisseur multicellulaire série

I.9 Etude et analyse d'un convertisseur multicellulaire série

La modélisation mathématique est une phase essentielle et importante pour prédire le comportement des systèmes physiques. Il est à noter que plusieurs modèles peuvent exister pour un même processus avec des précisions différentes [21], et le choix parmi ceux-ci dépendra de son utilisation (Conception de contrôle, conception ou analyse d'observateur). La dynamique du convertisseur a été décrite par différents modèles fournis par la littérature tels que le modèle instantané, le modèle moyen, le modèle harmonique et le modèle hybride. Dans les sous-sections suivantes, nous reformulons certains modèles mathématiques d'un convertisseur multicellulaire en série qui sera utilisé pour la conception du contrôleur.

I.9.1 Relations décrivant le convertisseur multicellulaire série

Avant de développer les propriétés des convertisseurs multicellulaires série en régime établi, nous allons poser un certain nombre d'hypothèses sur les interrupteurs et les sources qui sont utilisées [16] :

Les interrupteurs sont idéalisés (tension de saturation, courant de fuite et temps de commutation nuls).

Les interrupteurs étant parfaits, les temps morts sont supposés nuls.

Les sources de tension et de courant sont supposées parfaites. Cela signifie que l'impédance série d'une source de tension est nulle et que celle d'une source de courant est infinie.

Le courant est considéré comme constant pendant une période de commutation.

Les deux interrupteurs de chaque cellule ne doivent en aucun cas être passants en même temps pour éviter de court-circuiter les sources de tension. Cela est obtenu grâce au contrôle des deux interrupteurs avec des signaux quasi-opposés en intégrant des temps morts à chaque commutation [22].

I.9.2 Tension bloquée par une cellule

Chaque cellule est encadrée par deux sources de tension flottantes intermédiaires V_{Ck} et V_{Ck-1} avec $V_{C0}=0$ et $V_{Cp}=E$. Donc la tension bloquée par chaque cellule est :

$$V_{Cellk} = V_{Ck} - V_{Ck-1} \quad (\text{I.1})$$

Ces sources de tension flottantes sont faites avec de simples condensateurs. Ces condensateurs doivent imposer la même contrainte en tension sur chaque cellule de commutation, c'est-à-dire :

$$V_{Cellk} = \frac{E}{P} \quad (\text{I.2})$$

Et à partir des équations (1.1) et (1.2) nous pouvons déduire les tensions sur ceux-ci :

$$V_{Ck} = \frac{k.E}{P} \tag{I.3}$$

I.9.3 Courant commuté par une cellule

Le courant prélevé par la source de courant est continu dans le temps, quelles que soient les commutations des cellules, il doit pouvoir circuler. Il est aiguillé par les différentes cellules et, selon les positions des interrupteurs, circule ou non à travers les condensateurs :

$$\begin{aligned} i_{sck} &= sC_k \cdot i_L \\ i_{sck} &= sC_k \cdot i_L \end{aligned} \tag{I.4}$$

I.9.4 Tensions instantanées des condensateurs et de sortie

La tension V_L appliquée à la sortie est le résultat du choix des p commandes sck :

$$V_L = \sum_{k=1}^p sck \cdot v_{cellk} \tag{I.5}$$

L'évolution des tensions internes V_{ck} dépend du courant circulant dans chaque condensateur C_k . Celui-ci est déterminé par la configuration de ses deux cellules adjacentes :

$$i_{Ck} = i_L (s_{ck+1} - s_{ck}) \tag{I.6}$$

$$V_{Ck}(t) = v_{Ck}(0) + \int_0^t \frac{i_{Ck}}{Ck} dt \tag{I.7}$$

A partir des équations (I.5) et (I.7) nous pouvons conclure que dans le cas où les tensions sur les condensateurs sont identiques, il est possible de les contrôler indépendamment de la tension de sortie.

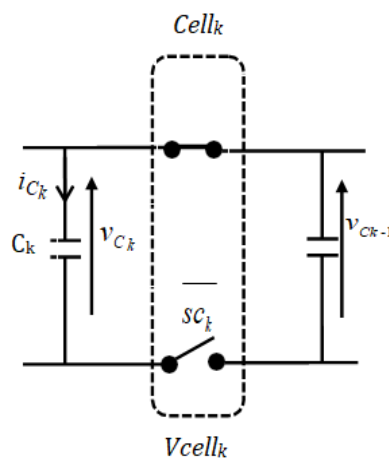


Figure I.14 Cellule élémentaire de commutation

I.10 Convertisseurs multicellulaires

I.10.1 Convertisseurs multicellulaires séries FCMC (Flying Capacitor Multilevel Converters)

Les convertisseurs multicellulaires ont été imaginés dans le double but de générer une tension de sortie multi niveaux, et de réduire les contraintes en tension sur les composants de puissance [23]. La topologie présentée dans la figure (I.15) représente une structure multicellulaire à P cellules de commutation séparées les unes des autres par $(P-1)$ condensateurs flottants [24]. Cette structure peut être adaptée à toutes les configurations (montage en hacheur ou en onduleur, en demi-point ou en pont complet) [25].

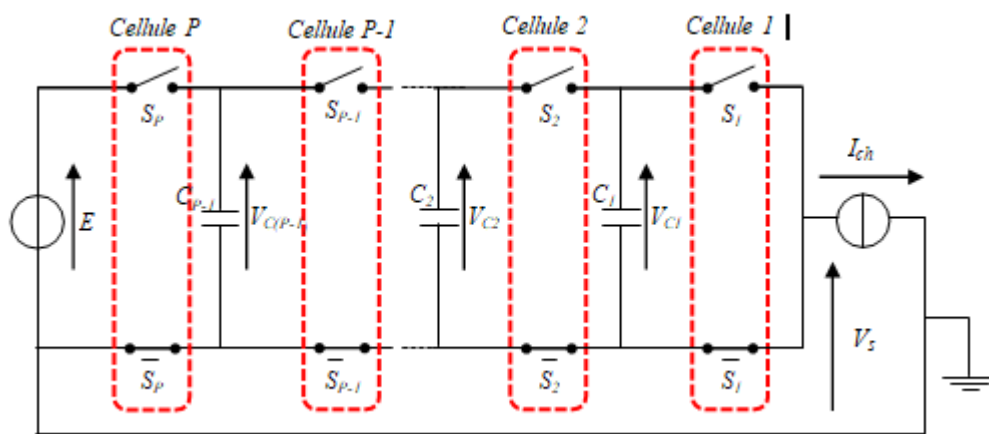


Figure I.15 Bras multicellulaire à P cellules de commutation

I.10.1.1 Principe de base d'un convertisseur multicellulaire série [1]

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 (I.16).

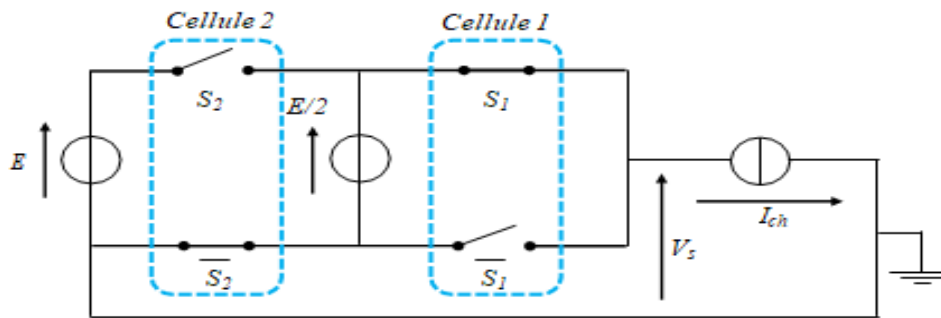


Figure I.16 Bras de convertisseur multicellulaire série à deux cellules de commutation

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 (I.17).

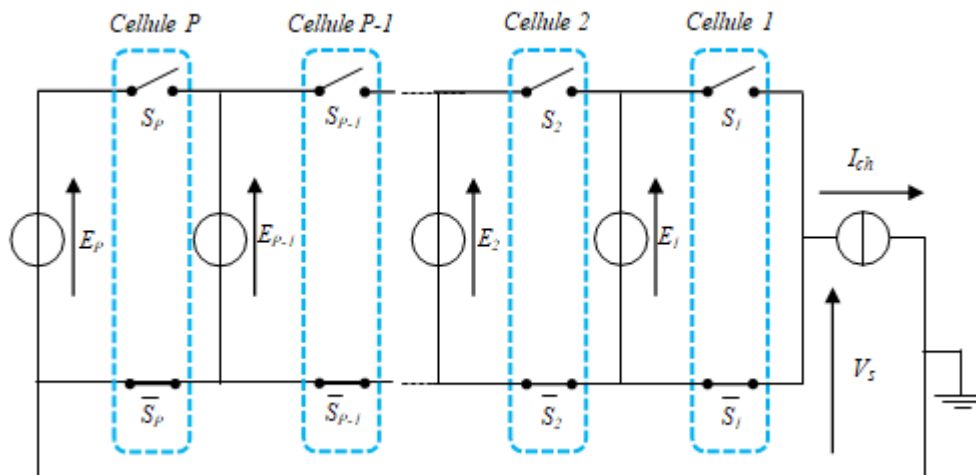


Figure I.17 Bras de convertisseur multicellulaire série à P cellules de commutations

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.

I.10.1.2 Cas d'un convertisseur à deux cellules [1], [26]

La structure de base du convertisseur multicellulaire série commence par l'association de deux cellules élémentaires de commutation, comme présenté sur la figure (I.18).

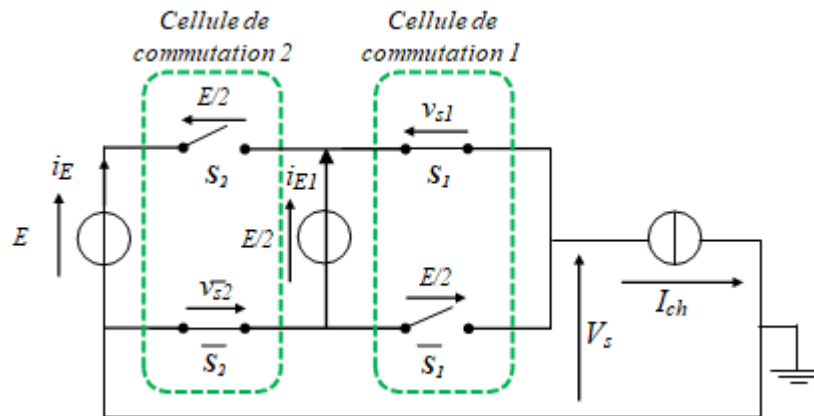


Figure I.18 Association de deux cellules de commutation

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 I.1.

Tableau I.1 : Caractéristiques principales de l'association de deux cellules.

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

Soit :

$$V_s = s_1 (E_1) + s_2 (E - E_1) \tag{I.8}$$

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 E_1 doit être égale à $E/2$. Par ailleurs, cette même valeur de tension va nous permettre d'avoir une tension multi niveaux à la sortie du convertisseur dont les valeurs sont égales à $0, E$ et $E/2$.

Tableau I.2 : Caractéristiques principales de l'association de 2 cellules ($E_1=E/2$).

S_2	S_1	v_{s2}	v_{s1}	V_s
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

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 I.3 :

Tableau I.3 : Définition des grandeurs caractéristiques de l'association de P cellules de commutation.

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 la tension principale d'alimentation	E
Valeur de la source de tension de la cellule i	$V_{ci} = (i/P)E$

Nous avons, également, les expressions suivantes :Tension de sortie

$$V_s = \sum_{i=1}^p (E_i - E_{i-1}) \cdot S_i \tag{I.9}$$

Avec : $E_0 = 0$

Tensions des interrupteurs :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{Si} = (E_i - E_{i-1}) \bar{S}_i \quad (a) \\ V_{Si} = (E_i - E_{i-1}) S_i \quad (b) \end{array} \right. \tag{I.10}$$

Les courants débités par les sources de tension sont :

$$i_{Ei} = (S_i - S_{i+1}) \cdot i_s \tag{I.11}$$

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

$$V_{ci} = \frac{i}{p} E \quad (\text{I.12})$$

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

Tension de sortie :

$$V_s = \frac{E}{p} \sum_{i=1}^P Si \quad (\text{I.13})$$

Tensions des interrupteurs :

$$V_{si} = \frac{E}{p} \cdot Si \quad (\text{a}) \quad (\text{I.14})$$

$$V_{si} = \frac{E}{p} \cdot Si \quad (\text{b})$$

En résumé, l'association de cellules de commutation pour aboutir à une structure multi niveaux obéit à la définition des grandeurs établies sur le tableau I.3 ainsi qu'aux relations (I.12) et (I.14).

I.10.1.3 Dynamique idéale des tensions des condensateurs flottants

Afin d'assurer un bon fonctionnement du convertisseur multicellulaire, la dynamique des tensions flottantes doit suivre celle de la tension d'alimentation principale E , de sorte à maintenir une répartition équitable des contraintes en tension aux bornes des différents semi-conducteurs de puissance de la structure multi niveaux. Cet équilibrage de tensions doit être assuré dans les deux régimes, transitoire et permanent [27]. Il est préférable que les tensions générées par les condensateurs flottants suivent la tension d'alimentation continue selon l'équation I.14.

La figure (I.19) présente une dynamique idéale des tensions des condensateurs flottants dans le cas d'une association de 5 cellules de commutation.

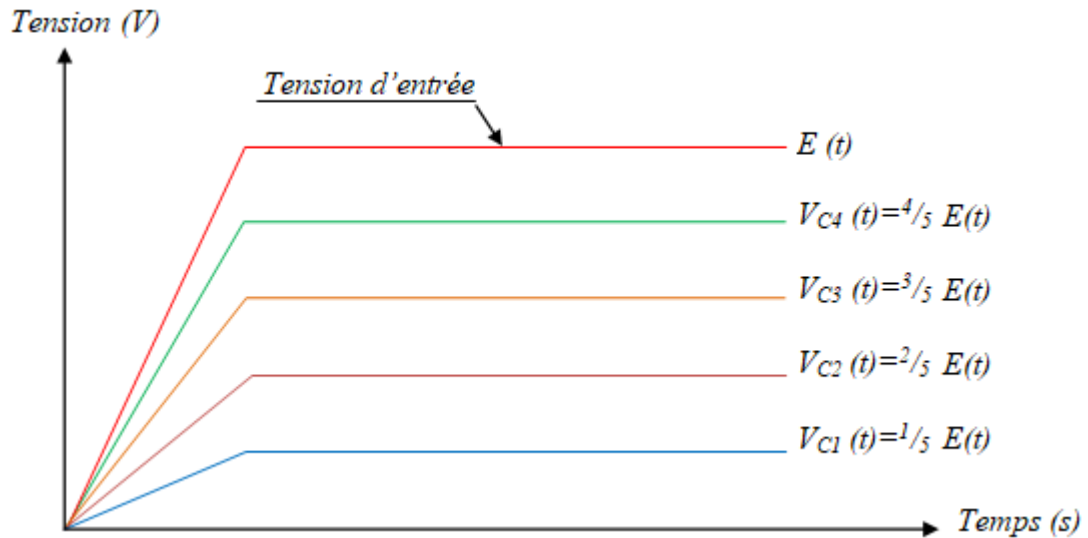


Figure I.19 Dynamique idéale des tensions flottantes

Ainsi, l'évolution de la dynamique des tensions aux bornes des condensateurs doit être similaire à celle de la figure (I.19), 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 [25]:

$$E_{niv}(t) = \frac{E(t)}{i} \quad (\text{I.15})$$

I.10.2 Convertisseurs multicellulaires superposés SMC (Stacked Multicellular Converters)

Le convertisseur multicellulaire superposé (SMC) est apparu au début des années 2000. Il est constitué de n étages. Chaque étage est formé par la connexion en séries de P cellules de commutation séparées entre elles de $P-1$ condensateurs flottants (Figure I.20) [28]. Un convertisseur multicellulaire superposé de n étages et de P cellules est noté SMC $P \times n$. Ce convertisseur permet de générer $(P \times n) + 1$ niveaux.

Cette nouvelle topologie hybride permet de répartir les contraintes en tension du convertisseur entre plusieurs cellules de commutation. Elle permet également de diviser la tension d'entrée en plusieurs fractions de manière à abaisser le nombre de commutation des semi-conducteurs de puissance. Comparativement aux topologies concurrentes dans ce domaine d'application, le convertisseur SMC a d'excellentes performances dynamiques grâce à la multiplication de la fréquence de tension découpée et l'augmentation du nombre de niveaux [29], [30]. De plus, cette topologie permet de réduire considérablement l'énergie

stockée dans les condensateurs flottants par le convertisseur, ainsi que les pertes dans les semi-conducteurs de puissance [31]. La structure multicellulaire superposée peut être adaptée à toutes les configurations : montage en hacheur ou en onduleur.

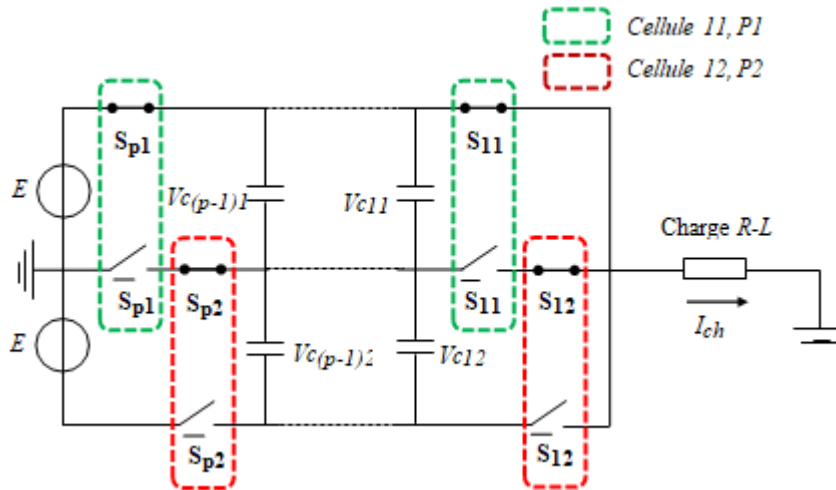


Figure I.20 Convertisseur multicellulaire superposé $P \times 2$

I.10.2.1 Principe de base d'un convertisseur SMC 1x2 (3 niveaux)

La figure (I.21) représente un convertisseur multicellulaire superposé 3 niveaux. Ce convertisseur est constitué de 4 à 6 interrupteurs. Les semi-conducteurs de la branche médiane sont connectés en série et tête-bêche de manière à former un interrupteur bidirectionnel au blocage. La répartition de la contrainte en tension est liée à l'état des interrupteurs (passant ou bloqué) [32].

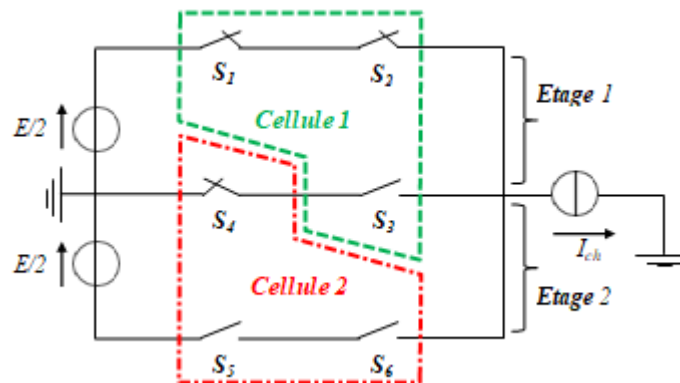


Figure I.21 Convertisseur multicellulaire superposé 1x2

Toutes les configurations possibles du convertisseur SMC 1x2 sont représentées sur la figure (I.22). Les interrupteurs S_1 et S_2 , de même que S_5 et S_6 , peuvent être considérés comme un seul interrupteur du point de vue de la circulation du courant. Les switches S_1 et S_3 (respectivement S_4 et S_5) sont commandés de manière complémentaire [32]:

- Pendant l’alternance positive de la référence, S_4 est toujours amorcé et S_5 et S_6 toujours bloqués. Si S_1 et S_2 sont ON, alors S_3 est OFF et la tension de sortie est fixée à $E/2$ (cas 1); Au contraire, si S_3 est ON, alors S_1 et S_2 sont OFF, et la tension de sortie est égale à 0V (cas 3).
- De manière analogue, pendant l’alternance négative de la référence, S_1 et S_2 sont toujours bloqués et S_3 toujours passant. Si S_5 et S_6 sont amorcés, alors S_4 est OFF et la tension de sortie est fixée à $-E/2$ (cas 2) ; A l’inverse, si S_4 est ON, alors S_5/S_6 sont OFF, et la tension de sortie est égale à 0V (cas 3).
- Le signe du courant de charge détermine si celui-ci circule à travers une diode ou un transistor. Tout comme ceux de l’onduleur NPC, les semi-conducteurs externes ne découpent pas pendant au moins la moitié de la période de modulation.

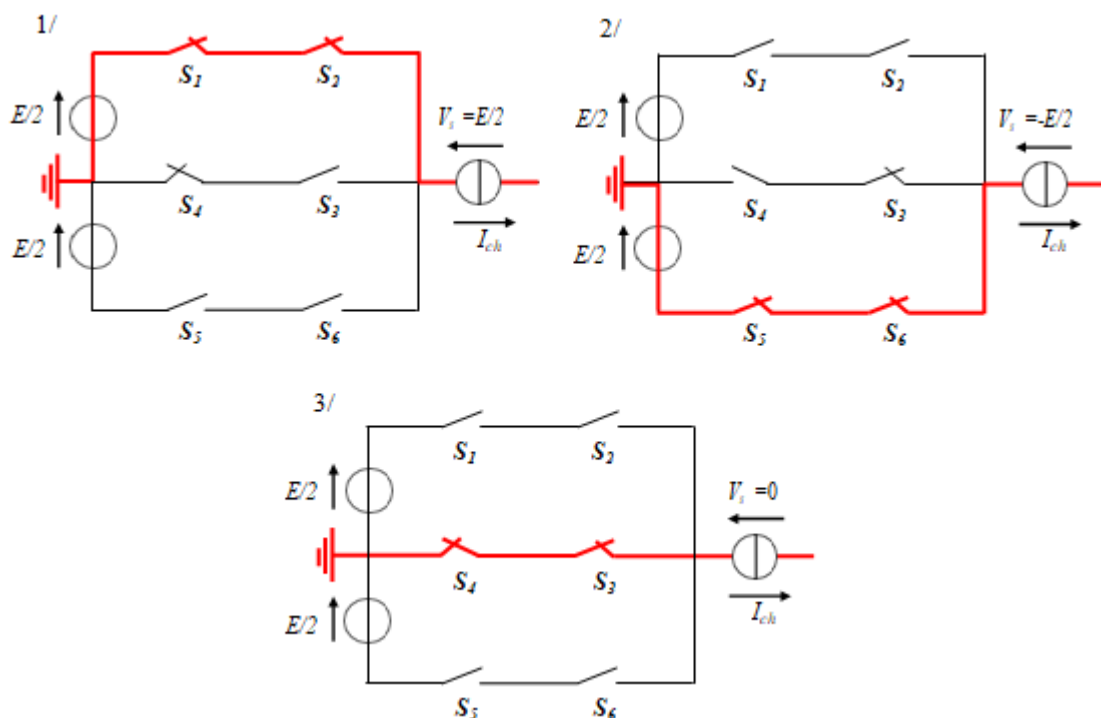


Figure I.22 Configurations possibles du convertisseur SMC 1x2

Le Tableau I.4 résume le fonctionnement du convertisseur SMC 1x2 (3 niveaux) en fonction de la tension découpée requise.

Tableau I.4 : Caractéristiques principales du fonctionnement de l'onduleur SMC 1x2.

S_1	S_2	S_3	S_5	S_6	S_4	V_s
1	1	0	0	0	1	$E/2$
0	0	1	0	0	1	0
0	0	1	1	1	0	$-E/2$

La structure 3 niveaux est toutefois un peu particulière, car elle ne contient aucun condensateur flottant et ne possède pas de redondances au niveau de la commande pour l'obtention des niveaux de tension en sortie [32].

I.10.2.2 Cas d'un convertisseur SMC 2x2 (5 niveaux)

Le convertisseur multicellulaire superposé est une association hybride de cellules de commutation [29], [33] comme présenté sur la figure (I.23). Le convertisseur SMC 2x2 est constitué de 2 étages, de 4 cellules de commutation et de 2 condensateurs flottants.

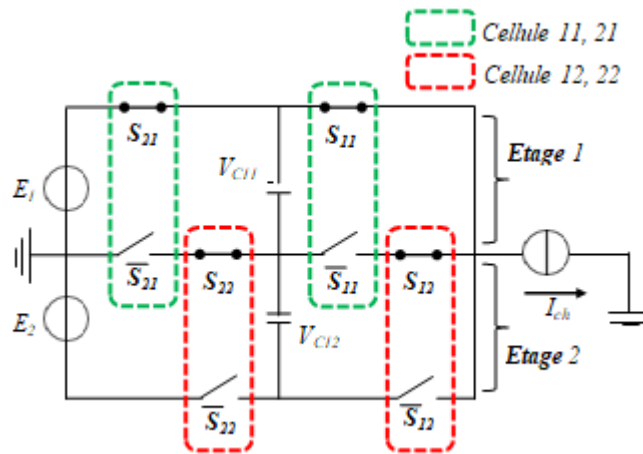


Figure I.23 Convertisseur multicellulaire superposé 2x2

La tension appliquée à chaque cellule de commutation à l'état bloqué est constante est égale à :

$$V_{Celli} = \frac{E}{P}, \quad i \in \{1, \dots, P\} \tag{I.16}$$

Les branches supérieures et inférieures de la structure SMC peuvent contenir un ou deux semi-conducteurs en série [30]. Comme indiqué sur la figure I.13, on a choisi d'utiliser un seul semi-conducteur, ce qui nous oblige à le calibrer pour supporter une contrainte en tension deux fois plus élevée que celle de la branche médiane. Il faut noter que la contrainte en tension de tous les interrupteurs de la structure vaut.

$$V_{inti} = \frac{E}{n.P'} \quad i \in \{1, \dots, P\} \quad (I.17)$$

La figure (I.24) illustre les configurations possibles du convertisseur SMC 2x2. Ces différentes configurations vont nous aider à élaborer le Tableau I.5 qui donne les combinaisons des signaux de commande de la structure 2x2 et la tension de sortie résultante.

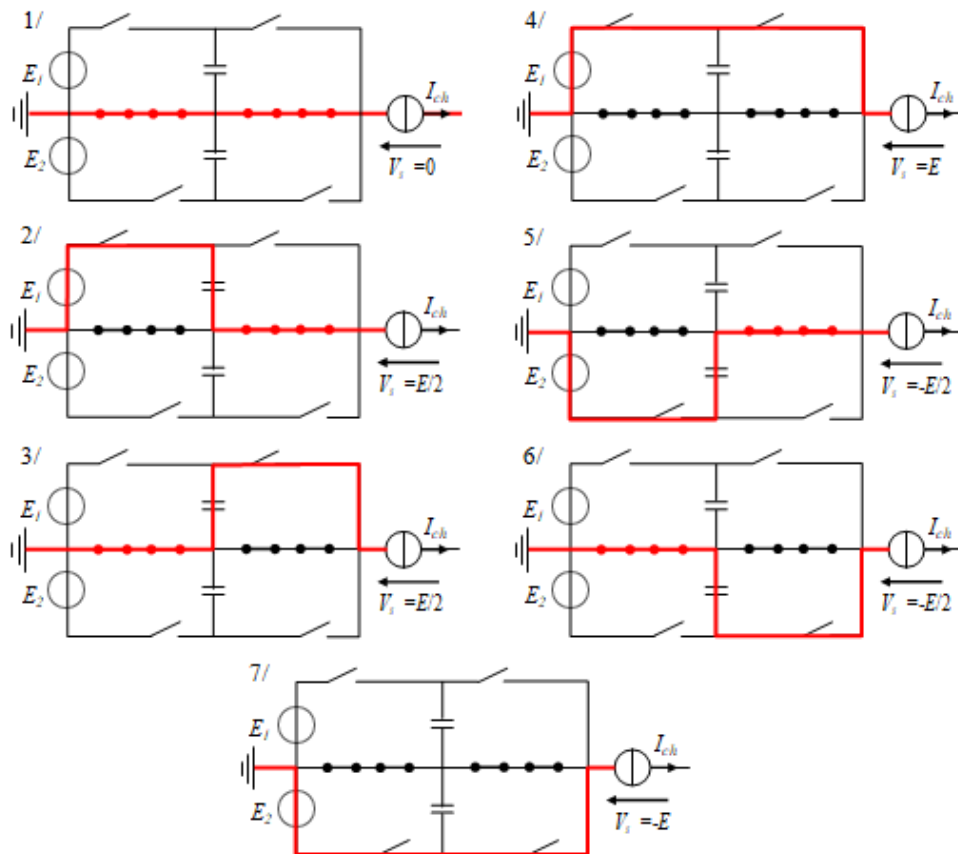


Figure I.24 Configurations possibles du convertisseur SMC 2x2

Tableau I.5 : Différentes combinaisons des signaux de commande du SMC 2x2 avec la tension de sortie résultante d'après la figure (I.24).

<i>Cas n°</i>	<i>S21</i>	<i>S22</i>	<i>S11</i>	<i>S12</i>	<i>V_s</i>
4	1	1	1	1	<i>E</i>
2	1	1	0	1	<i>E/2</i>
3	0	1	1	1	<i>E/2</i>
1	0	1	0	1	<i>0</i>
5	0	0	0	1	<i>-E/2</i>
6	0	1	0	0	<i>-E/2</i>
7	0	0	0	0	<i>-E</i>

On peut généraliser la méthode précédente pour un convertisseur SMC $P \times n$. Les grandeurs caractéristiques de ce convertisseur sont définies dans le tableau I.6 :

Tableau I.6 : Définition des grandeurs caractéristiques du SMC $P \times n$.

Nombre d'étages associés	<i>N</i>
Nombre de cellules associées	$P \times n$
Nombre de condensateurs associés	$(P-1) \times n$
Nombre d'états possibles	$(n+1)^P$
Nombre de niveaux de tension en sortie	$(P \times n)+1$
Valeur de la tension principale d'alimentation	<i>E</i>

La tension aux bornes des condensateurs flottants vaut

$$V_{ci} = \frac{i.E}{n.P} \quad i \in \{1, \dots, P-1\} \tag{I.18}$$

Le fonctionnement du convertisseur multicellulaire superposé est un peu similaire au fonctionnement du convertisseur multicellulaire série car chaque étage du SMC peut être considéré comme un convertisseur multicellulaire série. Alors, l'évolution des tensions aux bornes des condensateurs flottants des étages supérieur et inférieur du convertisseur SMC doit être similaire à l'évolution des tensions aux bornes des condensateurs au niveau du convertisseur multicellulaire série.

I.10.3 Convertisseurs multicellulaires parallèles PMC (Parallel Multicellular Converter)

Le convertisseur multicellulaire parallèle est apparu au début des années 1990. Cette structure repose sur une association de P cellules de commutation interconnectées par l'intermédiaire d'inductances indépendantes, appelées aussi inductances de liaison. Cette topologie permet de diminuer les contraintes en courant sur les interrupteurs d'électronique de puissance car chaque cellule est sous une contrainte qui est égale à I_E/P puisque les cellules sont connectées en parallèle. La figure (I.25) représente un convertisseur multicellulaire parallèle de P cellules de commutation.

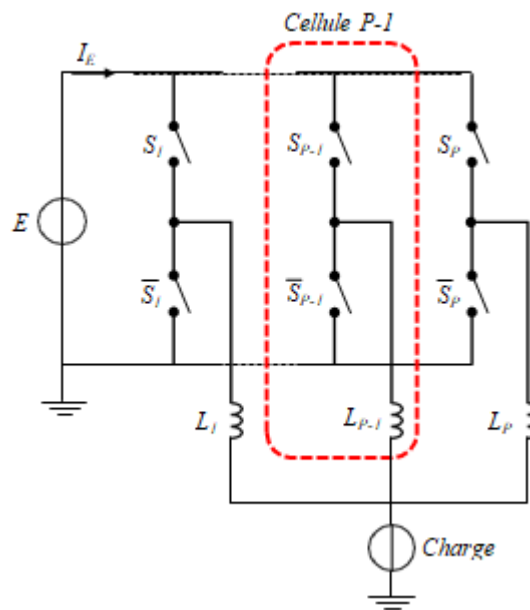


Figure I.25 Convertisseur multicellulaire parallèle à P cellules de commutation

I.10.3.1 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 (I.26). Cette cellule de commutation est similaire à un hacheur abaisseur.

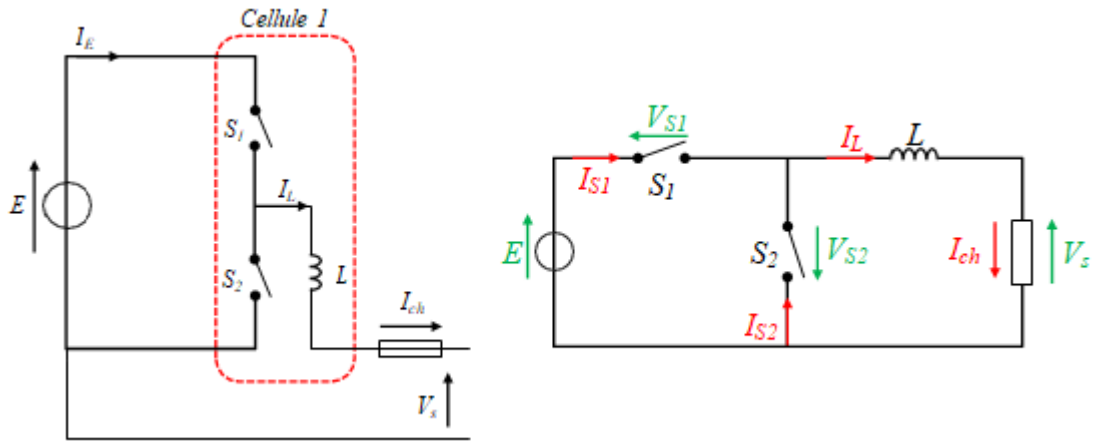


Figure I.26 Convertisseur multicellulaire parallèle à 1 cellule

On peut considérer la cellule de commutation du PMC à 1 cellule comme un système binaire, ce qui nous donne 2^1 états possibles.

- S_1 passant et S_2 bloqué $\left\{ \begin{array}{l} V_S = E \text{ avec } V_{S2} = -E \\ I_E = I_L \text{ avec } I_{S1} = I_L \end{array} \right.$
- S_1 bloqué et S_2 passant $\left\{ \begin{array}{l} V_S = 0 \text{ avec } I_{S1} = E \\ I_E = 0 \text{ avec } I_{S2} = I_L \end{array} \right.$

Si on considère que les sources d'alimentations sont unidirectionnelles en courant et en tension, on peut écrire à partir de la figure (I.26) :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{S1} - V_{S2} = E \\ I_{S1} + I_{S2} = I_L \end{array} \right. \quad \text{(I.19)}$$

Alors, la tension de sortie V_s est exprimée comme suit :

$$V_s = S_1 \cdot E \quad \text{(I.20)}$$

Le courant traversant l'inductance I_L est égal au courant dans la charge I_{ch} :

$$I_L = I_{ch} \quad \text{(I.21)}$$

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

I.10.3.2 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 (I.27) présente un convertisseur multicellulaire parallèle de 2 cellules de commutation.

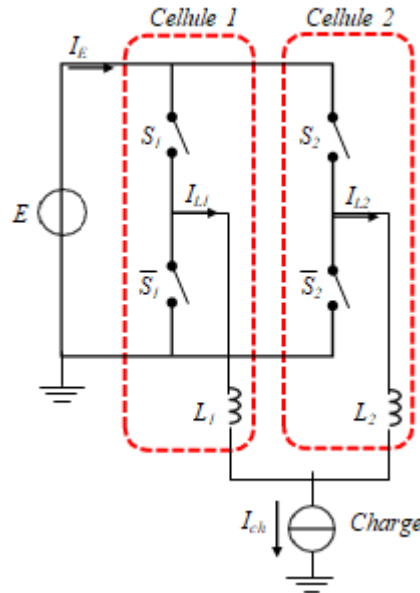


Figure I.27 Convertisseur multicellulaire parallèle à 2 cellules

Chaque cellule de commutation d'un convertisseur multicellulaire parallèle à deux cellules peut prendre deux états possible, soit **0**, soit **1**, ce qui nous donne 2^2 états possibles. Le tableau I.7 résume les caractéristiques principales de ces états.

Tableau I.7 : Caractéristiques principales de l'association de deux cellules.

S_1	S_2	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

Cette méthode d'analyse peut être appliquée à un convertisseur multicellulaire à P cellules de commutations. Le tableau I.8 regroupe les grandeurs caractéristiques d'un PMC à P cellules :

Tableau I.8 : Définition des grandeurs caractéristiques du PMC à P cellules.

Nombre de cellules associées	P
Nombre d'inductance associés	P
Nombre d'états possibles	2^P
Valeur de la tension principale d'alimentation	E
Contrainte en courant appliqué sur chaque cellule	I_E/P

La contrainte en tension appliquée sur chaque cellule est égale à E . Puisque les deux interrupteurs de puissance de chaque cellule de commutation sont en série, alors la contrainte en tension appliquée sur chaque interrupteur de puissance vaut :

$$V_{si} = \frac{E}{2} \quad (\text{I.22})$$

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude détaillée de l'onduleur et le principe de fonctionnement de la configuration de l'onduleur multi niveaux, et nous avons présenté les différents types de convertisseurs multicellulaires.

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 une analyse du fonctionnement des différentes structures multicellulaires.

Le chapitre suivant sera consacré la modélisation du convertisseur multicellulaire.

CHAPITRE II

Modélisation Des Onduleurs Multicellulaire

II.1 Introduction

La modélisation est une étape très importante pour étudier le comportement d'un système complexe. Pour un convertisseur statique, 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.

Il existe, essentiellement, quatre modèles différents pour modéliser un convertisseur multicellulaire. Le choix du modèle est lié à l'objectif visé et le type de commande utilisée.

Ces modèles sont :

Le modèle aux valeurs instantanées.

Le modèle aux valeurs moyennes.

Le modèle harmonique.

Le modèle hybride.

Dans le cadre de ce chapitre, après avoir présenté les quatre modèles, nous utiliserons les deux premiers modèles (le modèle aux valeurs instantanées, et le modèle aux valeurs moyennes).

II.2 Modélisation du convertisseur multicellulaire

La modélisation est une étape très importante dans la simulation, la synthèse de lois de commande, et la conception d'observateurs. La précision de la modélisation est définie selon l'objectif visé.

Un convertisseur multicellulaire série possède p interrupteurs à commander pour régler p grandeurs d'état qui sont les tensions flottantes et le courant de charge. Ces interrupteurs fournissent $2p-1$ degrés de libertés (p rapports cycliques et $p-1$ déphasages). Selon les degrés de liberté utilisés pour la définition d'une stratégie de commande, trois types de modèles ont été développés: Le modèle instantané, le modèle moyen et le modèle harmonique [16].

II.2.1 Modèle instantané

Le modèle instantané prend en compte les commutations des interrupteurs et les valeurs instantanées des variables d'état et de sortie du convertisseur. Pour établir le modèle instantané d'un convertisseur multicellulaire série associé à une charge quelconque, nous prenons un condensateur C_k et ses deux cellules adjacentes. L'évolution de la tension de ce condensateur dépend du courant i_{Ck} qui le traverse, lequel est déterminé par les états des interrupteurs des cellules mentionnées :

$$i_{Ck}(t) = (s_{C_{k+1}}(t) - s_{C_k}(t)) i_L(t) \quad (\text{II.1})$$

La tension sur le condensateur C_k est liée au courant $i_{Ck}(t)$ par la relation :

$$\frac{dV_{Ck}}{dt}(t) = \frac{(s_{C_{k+1}}(t) - s_{C_k}(t))}{C_k} i_L(t) \quad (\text{II.2})$$

Cette expression décrit le comportement de tous les états du convertisseur. Il nous reste à déduire l'expression de la tension de la sortie. D'après la deuxième loi de Kirchoff (loi des mailles), la tension de sortie $v_{\overline{S}_k}(t)$ aux bornes des interrupteurs inférieurs \overline{S}_k , sont définies par :

$$V_{\overline{S}_k}(t) = (V_{C_k} - V_{C_{k-1}}) s_{C_k}(t) \quad (\text{II.3})$$

D'où la tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_L(t) = \sum_{k=1}^p V_{\overline{S}_k}(t) \quad (\text{II.4})$$

$$V_L(t) = \sum_{k=1}^p (V_{C_k} - V_{C_{k-1}}) s_{C_k}(t) \quad (\text{II.5})$$

Avec $V_{C_0}(t) = 0$ et $V_{C_p}(t) = E$.

En regroupant les expressions obtenues sous la forme des équations d'état, nous obtenons :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{sc2(t) - sc1(t)}{C_1} i_L(t) \\ \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{sc3(t) - sc2(t)}{C_2} i_L(t) \\ \frac{dV_{Cp-1}}{dt} = \frac{scp(t) - sc_{p-1}(t)}{C_{p-1}} i_L(t) \\ V_L(t) = \sum_{k=1}^p (V_{Ck}(t) - V_{Ck-1}(t)) \cdot sc_k(t) \end{array} \right. \quad (\text{II.6})$$

II.2.2 Modèle moyen

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 [34],[35].

Dans le modèle aux valeurs moyennes, chaque grandeur dans le modèle exact est remplacée par sa valeur moyenne sur la période de découpage. Ce modèle est continu et permet de faire la synthèse des lois de commande [22].

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

Le modèle moyen d'un convertisseur à p cellules est donné par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{C_1} I_L \\ \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{C_2} I_L \\ \frac{dV_{Cp-1}}{dt} = \frac{\alpha_p - \alpha_{p-1}}{C_{p-1}} I_L \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} (a_1 - a_2) \cdot V_{C1} + \frac{1}{L} (a_2 - a_3) \cdot V_{C2} + \dots + \frac{1}{L} (a_{p-1} - a_p) \cdot V_{Cp-1} + \frac{a_p}{L} E - \frac{R}{L} I_L \end{array} \right. \quad (\text{II.7})$$

II.2.3 Modèle harmonique

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 régime 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) : il contient les résultats sur le calcul et les propriétés des valeurs propres [36]. Il montre que l'équilibrage naturel fonctionne uniquement pour un nombre premier de cellules [16]. La commande fréquentielle basée sur ce modèle permet de réduire le nombre de filtres [37].

Chacun de ces trois modèles peut être utilisé pour synthétiser des lois de commande. Les deux premiers modèles, basés sur une analyse des équations régissant l'évolution des grandeurs d'état en fonction de l'état des interrupteurs du convertisseur, se différencient par la nature de leurs entrées : les rapports cycliques pour le modèle moyen et les signaux de commande pour le modèle instantané. Le modèle harmonique permet quant à lui d'agir sur les p rapports cycliques et sur les $(p - 1)$ déphasages inter-cellules simultanément.

II.3 Modélisation du convertisseur multicellulaire série

II.3.1 Modèle de l'évolution

Le modèle qui va être présenté permet l'étude de l'évolution des différentes grandeurs d'état régissant le fonctionnement du convertisseur multicellulaire série, tout en prenant en compte les commutations des interrupteurs. Il permet aussi de représenter l'état de chacune des cellules de commutation du convertisseur à l'échelle de la période de découpage.

Le modèle aux valeurs instantanées nous permettra de mettre en évidence le phénomène d'équilibrage naturel des tensions générées par les condensateurs.

II.3.2 Hypothèses

Les hypothèses retenues pour la mise en œuvre du modèle aux valeurs instantanées d'un convertisseur 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.
- Le point milieu est idéal (dans le cas d'un onduleur).

II.3.3 Formulation générale

La présence des P cellules ayant chacune deux états possibles (les interrupteurs S_i et \bar{S}_i étant, à tout instant, dans des états complémentaires) implique que le convertisseur peut avoir 2^P configurations possibles.

Le signal de commande associé à l'interrupteur S_i sera noté s_i . Ce signal sera à l'état **1** si l'interrupteur S_i est passant, ou à l'état **0** si l'interrupteur S_i est bloqué.

Ces 2^P configurations peuvent être rassemblées dans un système d'équations différentielles représentant l'évolution des tensions V_{Ci} et du courant de charge I_{ch} .

II.3.4 Fonctionnement hacheur

Nous présentons sur la figure (II.1) un convertisseur à P cellules, associées à une charge $R-L$.

La mise en équation de ce type de structure implique la mise en œuvre suivante :

- $P-1$ équations liées à l'évolution des tensions aux bornes des $P-1$ condensateurs flottants.
- Une équation liée au courant de charge I_{ch} .

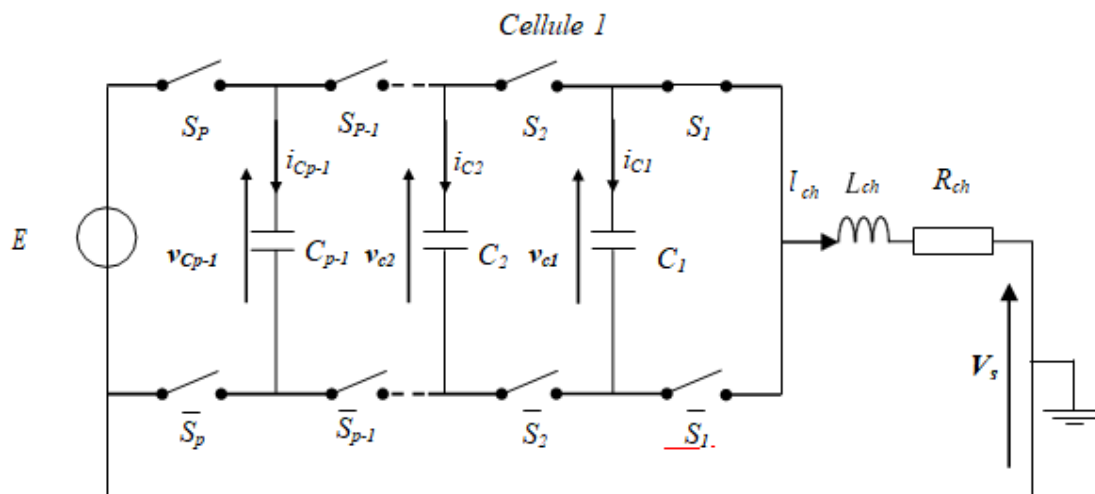


Figure II.1 Hacheur à P cellules, associé à une charge

II.4 Le modèle ou valeur moyennes

Le modèle aux valeurs moyennes est obtenu en remplaçant chaque grandeur par sa valeur moyenne glissante sur une période de découpage T_{dec} . Ce modèle utilise donc le rapport cyclique u_i comme seule information concernant la cellule de commutation, le déphasage du signal de commande n'étant pas pris en compte.

II.4.1 Hypothèses

Les hypothèses retenues pour la mise en œuvre du modèle aux valeurs moyennes d'un convertisseur multicellulaire 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 façons complémentaires.
- Les valeurs des condensateurs flottants C_i sont telles que les tensions à leurs bornes V_{C_i} sont constantes sur une période de découpage.
- Le courant de charge I_{ch} est constant sur une période de découpage et correspond à la valeur moyenne de celui-ci sur cette même période.

La tension d'alimentation E est constante.

II.4.2 Modèle moyen d'un bras multicellulaire série

La figure (II.2) représente la structure d'un bras multicellulaire de P cellules :

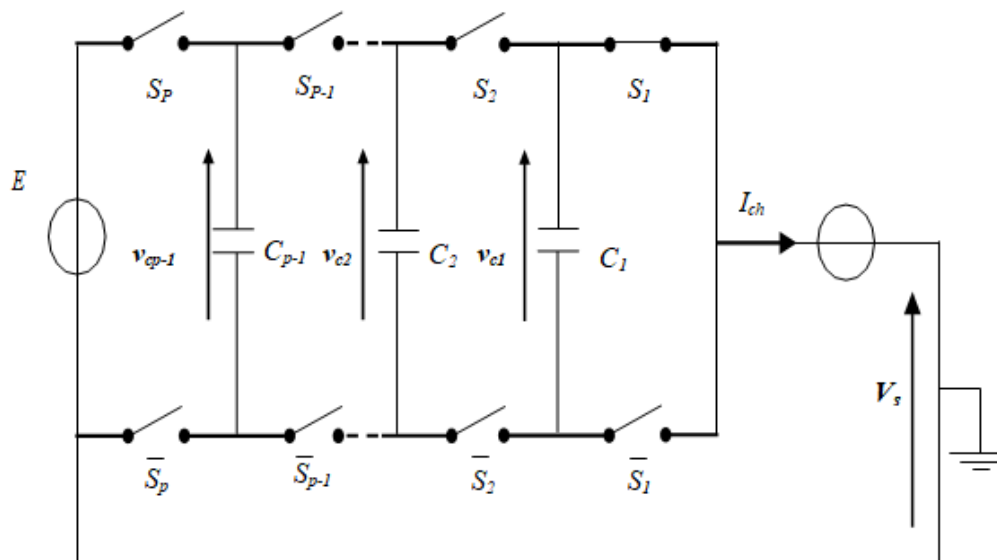


Figure II.2 Structure d'un bras multicellulaire P cellules

L'étude du comportement de la cellule de commutation i nous permet de mettre en évidence l'obtention du modèle moyen.

L'interrupteur S_i de la cellule i est piloté par le signal de commande s_i de fréquence de découpage f_{dec} . Cet interrupteur est à l'état passant pendant la durée u_i .

T_{dec} et à l'état bloqué pendant $[1 - u_i].T_{dec}$.

Nous obtenons ainsi, à la figure(II.3), les formes d'ondes de la tension V_{S_i} aux bornes de l'interrupteur S_i du courant i_{S_i} circulant dans l'interrupteur S_i :

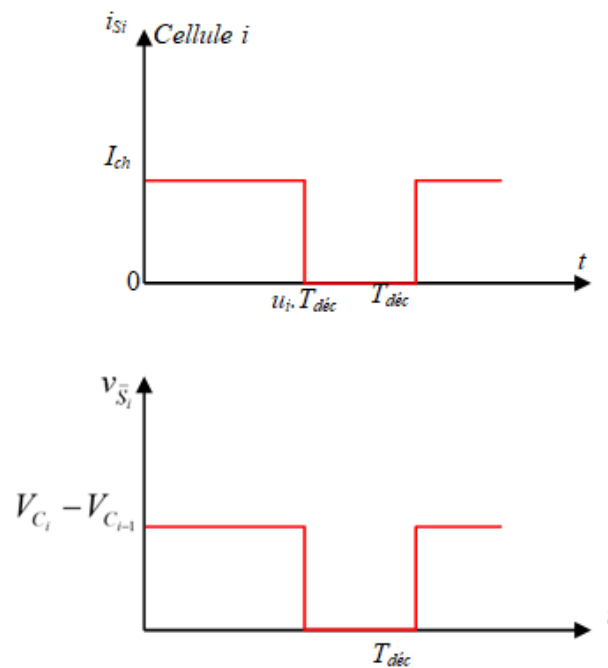


Figure II.3 Evolution des grandeurs électriques au sein d'une cellule i

Ainsi, chaque interrupteur S_i peut être représenté par une source $u_i \cdot [V_{C_i} - V_{C_{i-1}}]$ et chaque interrupteur S_i peut être représenté par une source de courant de valeur $u_i \cdot I_{ch}$. Ces observations nous permettent de définir le schéma équivalent moyen d'un bras multicellulaire figure (II.4).

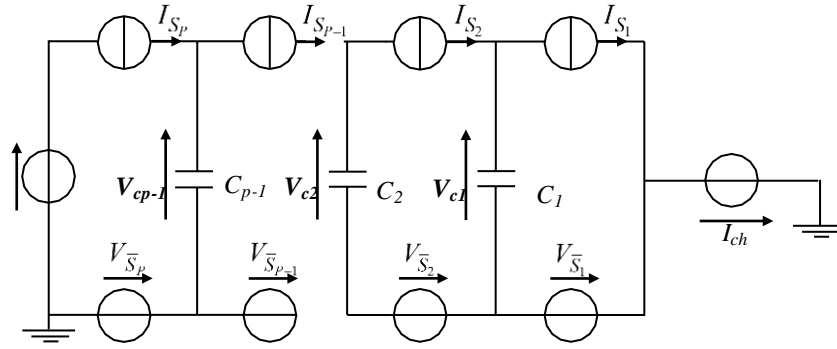


Figure II.4 Représentation du modèle moyen d'un bras multicellulaire

Dans le cas où les rapports cycliques u_i sont identiques sur toutes les cellules et les tensions condensateurs V_{Ci} égales à $i.E/P$, la tension de sortie moyenne V_s est égale à $u_i.E$.

La connaissance des courants moyens parcourant les interrupteurs de deux cellules adjacentes de commutation (cellules $i+1$ et i) nous permet de connaître le courant moyen parcourant le condensateur C_i :

$$I_{C_i} = I_{S_{i+1}} - I_{S_i} = [u_{i+1} - u_i] I_{ch} \quad (\text{II.8})$$

A partir de l'équation de I_{C_i} , nous obtenons l'équation régissant l'évolution de la tension moyenne V_{C_i} aux bornes des condensateurs :

$$\frac{dV_{C_i}}{dt} = \frac{1}{C_i} I_{C_i} = \frac{1}{C_i} [u_{i+1} - u_i] I_{ch} \quad (\text{II.9})$$

Il est possible d'écrire l'équation (II.9) en prenant en compte non plus les rapports cycliques u_i mais leur différence

$$\alpha_i = u_{i+1} - u_i \quad (\text{II.10})$$

En effet, ce sont ces différences qui nous permettent de connaître l'évolution des tensions aux bornes des condensateurs flottants :

$$\frac{dV_{C_i}}{dt} = \frac{I_{ch}}{C_i} \alpha_i \quad (\text{II.11})$$

En écrivant l'équation (II.10) en fonction des grandeurs α_i , la tension de sortie du bras multicellulaire V_s devient :

$$V_s = - \sum_{i=1}^{p-1} \alpha_i \cdot V_{C_i} + U_p \cdot E \quad (\text{II.12})$$

Si la charge est connectée entre le point bas de la source de tension E et la cellule de commutation 1, la tension aux bornes de la charge V_{ch} est égale à la tension de sortie du bras V_s . De plus, si la charge est de type $R-L$, la relation liant les grandeurs de sortie s'écrit :

$$V_{ch} = V_s = R_{ch} \cdot I_{ch} + L_{ch} \frac{dI_{ch}}{dt} \quad (\text{II.13})$$

Nous pouvons, à partir des équations (II.12) et (II.13), déterminer l'équation d'état représentant l'évolution du courant de charge I_{ch} en fonction des grandeurs d'état V_{Ci} , des grandeurs de commande α_i , de la tension d'alimentation E et des paramètres de la charge :

$$L_{ch} \frac{dI_{ch}}{dt} = - \sum_{i=1}^{p-1} \frac{\alpha_i}{L_{ch}} \frac{V_{ci}}{L_{ch}} + U_P \cdot E \cdot \frac{R_{ch}}{L_{ch}} I_{ch} \quad (\text{II.14})$$

Les équations régissant les évolutions des tensions condensateurs (équation II.11) et l'évolution du courant de charge (équation II.14) permettent de définir un système d'état d'ordre P composé de :

- $P-1$ équations représentant les évolutions des tensions aux bornes des condensateurs.

II.5 Modélisation du convertisseur multicellulaire parallèle

II.5.1 Modèle aux valeurs instantanées

II.5.1.1 Hypothèses

Les hypothèses nécessaires à la mise en équation sont les suivantes [38] :

- Les interrupteurs sont idéalisés (tension de saturation, courant de fuite et temps de commutation nuls).
- Les interrupteurs étant parfaits, les temps morts sont supposés nuls.
- Les inductances de liaison des cellules sont dimensionnées pour limiter les variations du courant commuté par chaque cellule; ces courants seront supposés constants sur une période de découpage.
- Les variations des courants moyens des cellules seront supposées lentes vis-à-vis de la fréquence de découpage ainsi que de celles des courants de sorties I_s .
- La source d'alimentation E est supposée continue.
- Le point milieu est idéal (dans le cas d'un onduleur).

II.5.1.2 Fonctionnement hacheur

La figure (II.5) représente un convertisseur multicellulaire parallèle de P cellules de commutations, associés à une charge $R-L$.

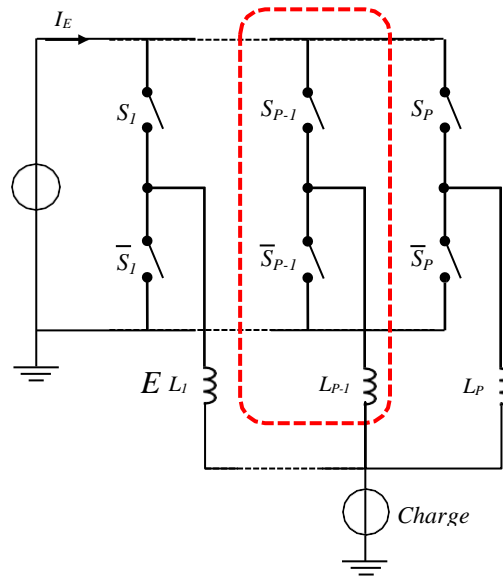


Figure II.5 Convertisseur multicellulaire parallèle à P cellules de commutation

L'évolution du courant qui traverse l'inductance L_i et liée à l'évolution de la tension V_{Li} , cette dernière étant fonction de l'état de la cellule Cel_i et de la tension V_s .

La tension V_{Li} est alors fonction du signal de commande de l'interrupteurs S_i .

$$V_{Li} = S_i \cdot E - V_s \tag{II.15}$$

Puisqu'on connaît la valeur de l'inductance L_i , nous pouvons obtenir l'équation régissant l'évolution du courant I_{Li} :

$$L_i \frac{d}{dt} I_{Li} + R_{Li} I_{Li} = V_{Li} = S_i \cdot E - V_s \tag{II.16}$$

$$\Rightarrow L_i \frac{d}{dt} I_{Li} = - R_{Li} I_{Li} + S_i \cdot E - V_s \tag{II.17}$$

La tension de sortie du bras multicellulaire V_s est fonction du courant I_{ch} et de la nature de la charge. Le courant de charge I_{ch} correspond à la somme des courants qui traversent les interrupteurs.

Ces courants sont définis par :

$$I_s = S_i \cdot I_{Li} \tag{II.18}$$

Ce qui implique que l'expression du courant I_{ch} s'écrit :

$$I_{ch} = \sum_{i=1}^p I_{si} = \sum_{i=1}^p S_i \cdot I_{Li} \tag{II.19}$$

Le courant aux bornes de la charge I_{ch} s'écrit alors :

$$I_{ch} = \frac{V_s}{R_{ch}} + \frac{1}{L_{ch}} \cdot \frac{d}{dt} V_s \quad (\text{II.20})$$

A partir de l'équation (II.20), nous obtenons l'expression générale de l'évolution de la tension de sortie V_s

$$\frac{d}{dt} V_s = (I_{L_1} + I_{L_2} + I_{L_{P-1}} + I_{L_P}) \frac{1}{L_{ch}} - \frac{V_s}{L_{ch} R_{ch}} \quad (\text{II.21})$$

L'évolution des courants I_{L_i} est régie par l'équation (II.21). Ainsi, le système d'équation représentant le modèle aux valeurs instantanées d'un bras multicellulaire parallèle à P cellules fonctionnant en hacheur-dévolteur, associé à une charge R - L est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} I_{L_1} = \frac{-R_{L1} I_{L1} + S_1 \cdot E - V_s}{L_1} \\ \frac{d}{dt} I_{L_2} = \frac{-R_{L2} I_{L2} + S_2 \cdot E - V_s}{L_2} \\ \frac{d}{dt} I_{L_P} = \frac{-R_{LP} I_{LP} + S_P \cdot E - V_s}{L_P} \\ \frac{d}{dt} V_s = (I_{L_1} + I_{L_2} + I_{L_{P-1}} + I_{L_P}) \frac{1}{L_{ch}} - \frac{V_s}{L_{ch} R_{ch}} \end{array} \right. \quad (\text{II.22})$$

A partir des équations (II.22), nous obtenons l'expression de l'équation d'état :

$$\dot{X} = A \times X + B \times S \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$$X = [I_{L_1} \quad I_{L_2} \quad I_{L_P} \quad V_s]^T, \quad S = [S_1 \quad S_2 \quad S_3 \quad S_P]^T$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{R_{L1}}{L_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & -\frac{R_{L2}}{L_2} & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 & -\frac{R_{LP}}{L_P} & -\frac{1}{L_P} \\ \frac{1-S_1}{L_{ch}} & \frac{1-S_2}{L_{ch}} & \frac{1-S_P}{L_{ch}} & \frac{1}{L_{ch} R_{ch}} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \frac{E}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{E}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{L_P} \\ \frac{I_{L_1}}{L_{ch}} & \frac{I_{L_2}}{L_{ch}} & \frac{I_{L_P}}{L_{ch}} \end{pmatrix}$$

II.5.1.3 Fonctionnement onduleur

La figure (II.6) présente un onduleur multicellulaire parallèle de P cellules à point milieu capacitif.

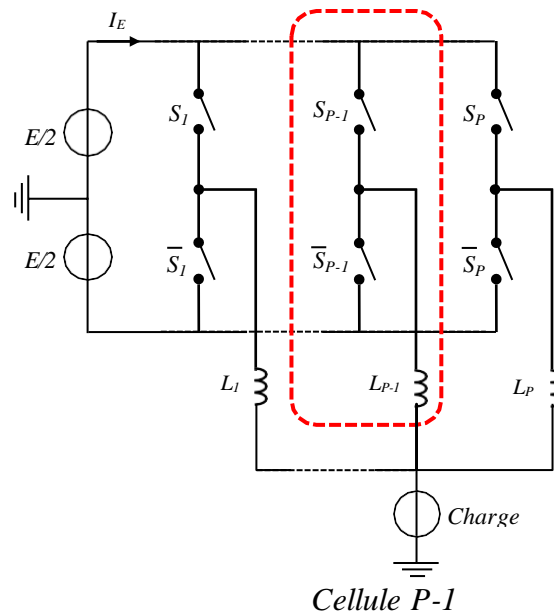


Figure II.6 Bras d'un onduleur multicellulaire parallèle à point milieu capacitif de P cellules de commutation

La tension aux bornes de l'inductance i devient alors :

$$V_{L_i} = S_i \cdot \frac{E}{2} - V_s \tag{II.24}$$

Ce qui donne une nouvelle expression de l'évolution du courant I_{Li} :

$$L_i \frac{d}{dt} I_{Li} = -R_{Li} I_{Li} + S_i \cdot \frac{E}{2} - V_s \tag{II.25}$$

L'évolution des courants I_{Li} est régie par l'équation (II.25). Ainsi, le système d'équation représentant le modèle aux valeurs instantanées d'un bras multicellulaire parallèle à P cellules fonctionnant en onduleur, associé à une charge $R-L$ est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} I_{L1} = \frac{-R_{L1} I_{L1} + S_1 \cdot \frac{E}{2} - V_S}{L_1} \\ \frac{d}{dt} I_{L2} = \frac{-R_{L2} I_{L2} + S_2 \cdot \frac{E}{2} - V_S}{L_2} \\ \frac{d}{dt} I_P = \frac{-R_{LP} I_{LP} + S_P \cdot \frac{E}{2} - V_S}{L_P} \\ \frac{d}{dt} V_s = (I_{L1} + I_{L2} + I_{L_{P-1}} + I_{L_P}) \frac{1}{L_{ch}} - \frac{V_s}{L_{ch} R_{ch}} \end{array} \right. \quad (\text{II.25})$$

Rappelons l'expression de l'équation d'état avec les nouvelles matrices

$$\dot{X} = A \times X + B \times S \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$X = [I_{L1} \quad I_{L2} \quad I_{LP} \quad V_S]^T, \quad S = [S_1 \quad S_2 \quad S_3 \quad S_p]^T$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{R_{L1}}{L_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & -\frac{R_{L2}}{L_2} & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 & -\frac{R_{LP}}{L_P} & \frac{1}{L_P} \\ \frac{1-S_1}{L_{ch}} & \frac{1-S_2}{L_{ch}} & \frac{1-S_P}{L_{ch}} & \frac{1}{L_{ch} R_{ch}} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \frac{E}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{E}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{L_P} \\ \frac{I_{L1}}{L_{ch}} & \frac{I_{L2}}{L_{ch}} & \frac{I_{LP}}{L_{ch}} \end{pmatrix}$$

Où : $E_l = E/2$

II.6 Commande par modulation de largeur d'impulsion

La modulation de largeur d'impulsion (en anglo-saxon pulse width modulation) consiste à adapter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Cette technique peut être considéré comme une extension du principe de la commande par découpage ou la durée des impulsions n'est plus régulière mais choisie de façon à supprimer le maximum d'harmoniques de rangs faibles difficiles à filtrer.

II.6.1 Principe de base de MLI

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'énergie du signal recueil à la sortie de l'onduleur, figure (II.7).

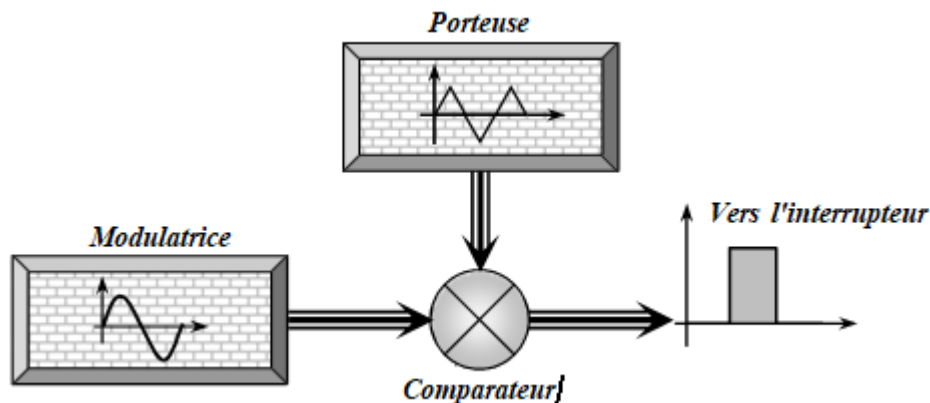


Figure II.7 Schéma synoptique de la MLI

II.6.2 Caractéristiques de la modulation

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

- **Le coefficient de réglage** : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion :

$$M_R = \frac{V_m}{V_p}$$

- **L'indice de modulation** : Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante :

$$M_I = \frac{fp}{f}$$

II.6.3 Différente technique de modulation en MLI

Le principe de base pour la comparaison des deux ondes est un amplificateur fonctionnant en comparateur, le chargement d'état du comparateur est obtenu après chaque intersection des deux ondes, d'où à la sortie on obtient un créneau d'impulsion de largeur variables pour cela on distingue deux procédés pour l'obtention des ondes modulés :

- Fonctionnement en boucle ouverte .
- Fonctionnement en boucle fermée.

a. Modulation en boucle ouverte

Le fonctionnement en boucle ouverte est caractérisé par deux types de modulation : Modulation naturelle et la modulation régulière (uniforme).

b. Modulation d'échantillonnage naturelle

L'échantillonnage naturel est un processus de sélection naturel des points échantillonnés. Le temps d'échantillonnage coïncide avec le temps d'apparences des largeurs d'impulsions modulés. L'échantillonnage naturel comporte : L'échantillonnage naturel à un seul front, figure (II.8) et l'échantillonnage naturel à deux fronts, figure (II.9).

Dans le premier cas l'impulsion modulée est échantillonnée par un seul coté, tandis que dans le deuxième cas, l'impulsion modulée par les deux cotés. L'influence du nombre l'impulsion concernant L'échantillonnage à doubles fronts, est l'amélioration du spectre d'harmonique.

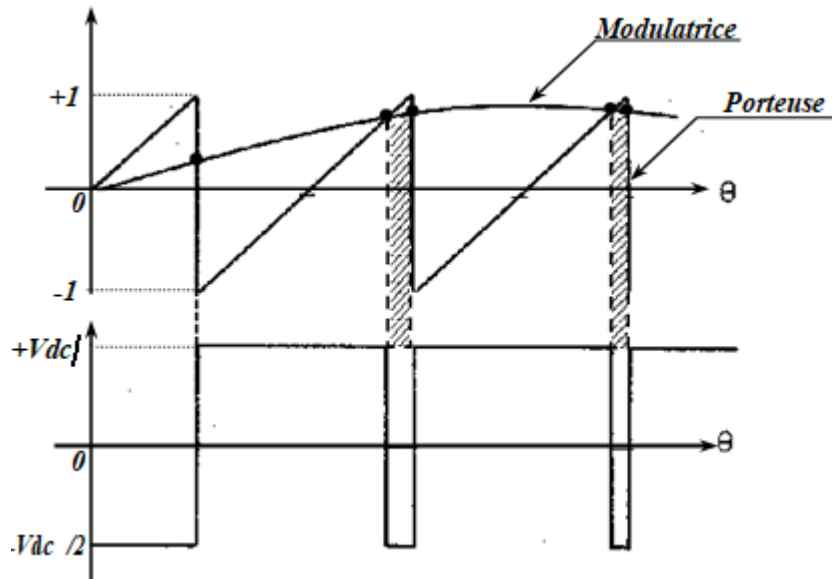


Figure II.8 Technique d'échantillonnage naturel à un seul front

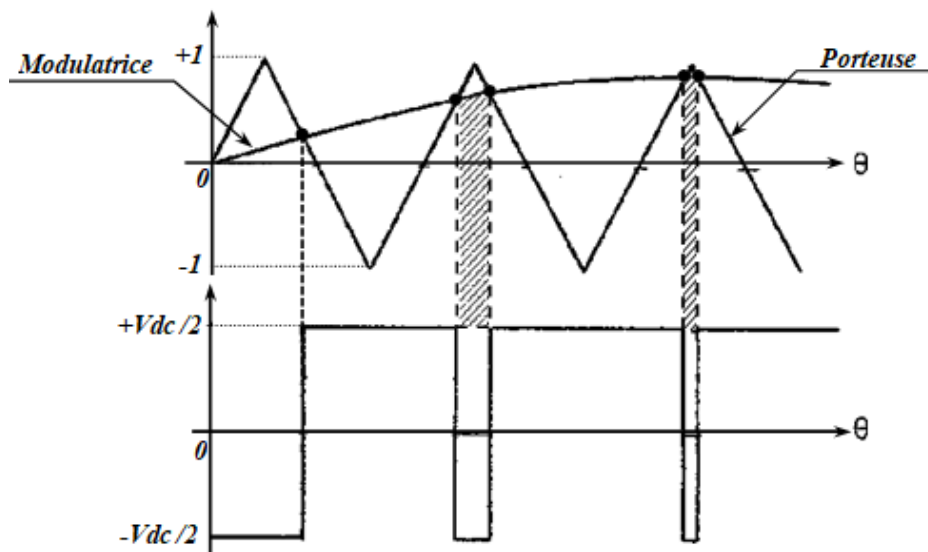


Figure II.9 Technique d'échantillonnage à deux fronts

c. Modulation d'échantillonnage régulier

On appelle ce processus (d'échantillonnage régulier) car ces échantillons ont un espace de temps régulier ou uniforme. Dans ce mode l'intervalle entre deux points échantillonnés successif est constant ; ainsi que l'amplitude du signal modulé reste constante dans tout l'intervalle il existe deux types d'échantillonnage régulier : Echantillonnage régulier symétrique et échantillonnage régulier asymétrique.

- Echantillonnage régulier symétrique

Dans ce cas, les fronts de commutation sont déterminés par l'intersection de l'onde porteuse avec l'onde modulatrice, figure (II.10).

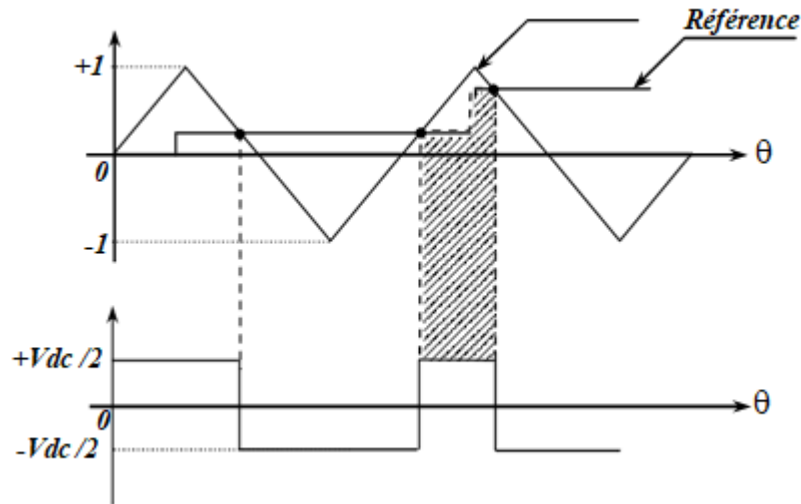


Figure II.10 Echantillonnage régulier symétrique

La technique d'échantillonnage régulier asymétrique au même principe que la technique d'échantillonnage régulier symétrique sauf que l'onde en marche d'escalier est échantillonnée deux fois par cycle de l'onde porteuse, figure (II.11).

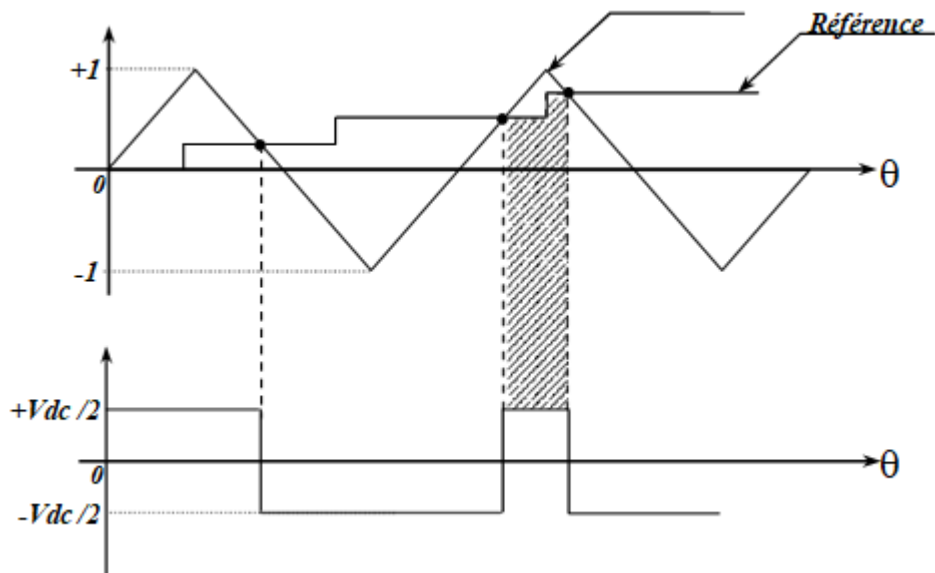


Figure II.11 Echantillonnage régulier asymétrique

d. Modulation en boucle fermée

On a deux types modulation :

- Modulation aléatoire, figure (II.12).
- Modulation synchronisée, figure (II.13).

Dans le premier cas, elle consiste à commander les interrupteurs avec le signal résultant à la sortie du détecteur de seuil, tandis que le deuxième cas elle à le même principe que le premier mais les interrupteurs sont commandés par un signal de sortie d'une bascule de type (D) commandé par une horloge et montée en cascade avec le comparateur assurant ainsi une meilleure cohérence des basculements de commande des interrupteurs

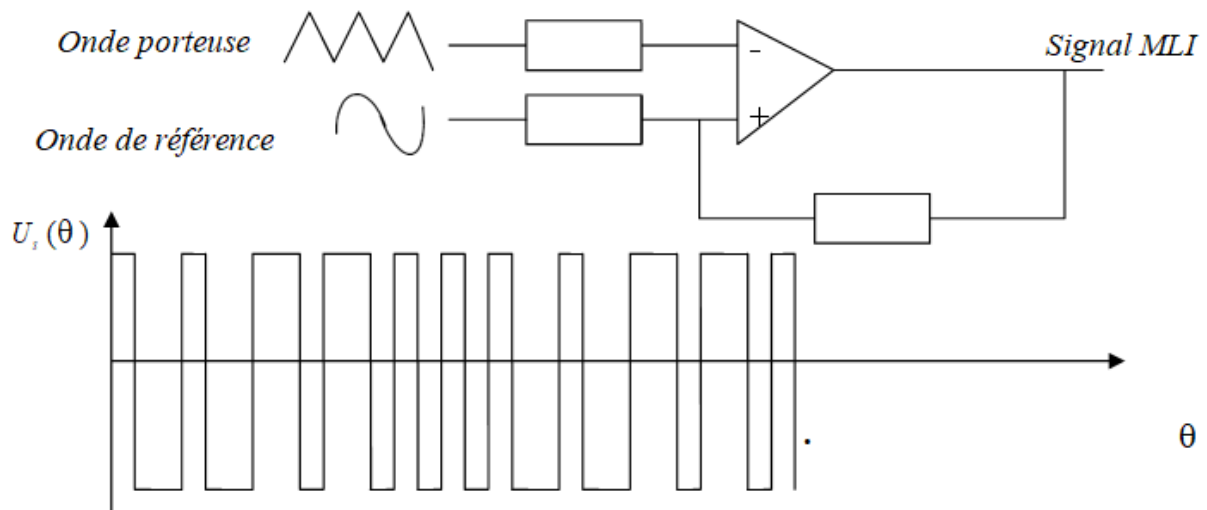


Figure II.12 Comparaison aléatoire

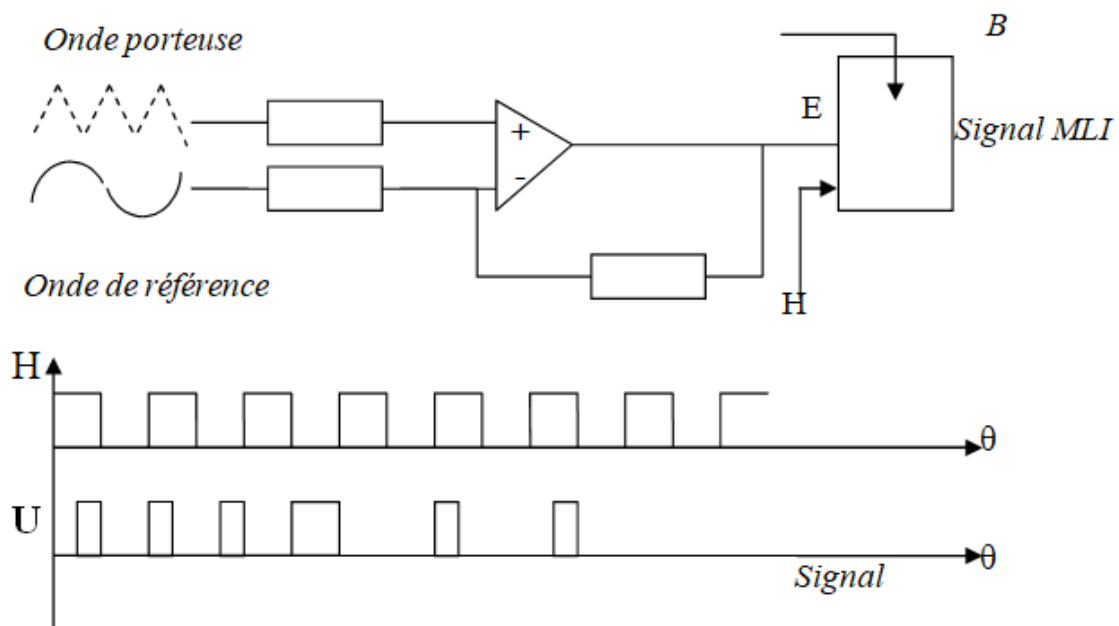


Figure II.13 Comparaison synchronisée

II.7 Conclusion

Ce deuxième chapitre a été consacré à la modélisation de différentes topologies du convertisseur multicellulaire. Après la présentation de différentes modélisations, nous nous sommes intéressés à convertisseur multicellulaire série et parallèle. Ensuite nous avons détaillé le principe de fonctionnement de ce convertisseur, puis nous avons présenté trois modèles mathématiques du convertisseur, qui sont le modèle instantané, le modèle moyen ainsi que le modèle harmonique. Dans le prochain chapitre on va faire simulation D'onduleur à MLI en Simulink.

CHAPITRE III

Simulation D'onduleur à MLI en Simulink

III.1 Introduction

Après l'étude d'onduleur dans le premier chapitre et la modélisation des onduleurs multicellulaires dans le troisième chapitre, on a entamé la simulation de l'onduleur monophasé en pont commandé à plein onde et par la technique d'MLI, à l'aide de logiciel de MATLAB(Simulink).

III.2 Commande à plein onde

La figure (III.1) représente le schéma de bloque d'un onduleur en pont utilisé avec une charge résistive $R=20\Omega$, $E=100V$.

Dans ce cas on appliqué la commande à plein onde sur les interrupteurs qu'ils sont des GTO, ce type d'interrupteur facilite la commutation des interrupteur (fermeture et ouverture) avec la tension de source continue, dont chaque deux GTO sont passant une durée de demi période.

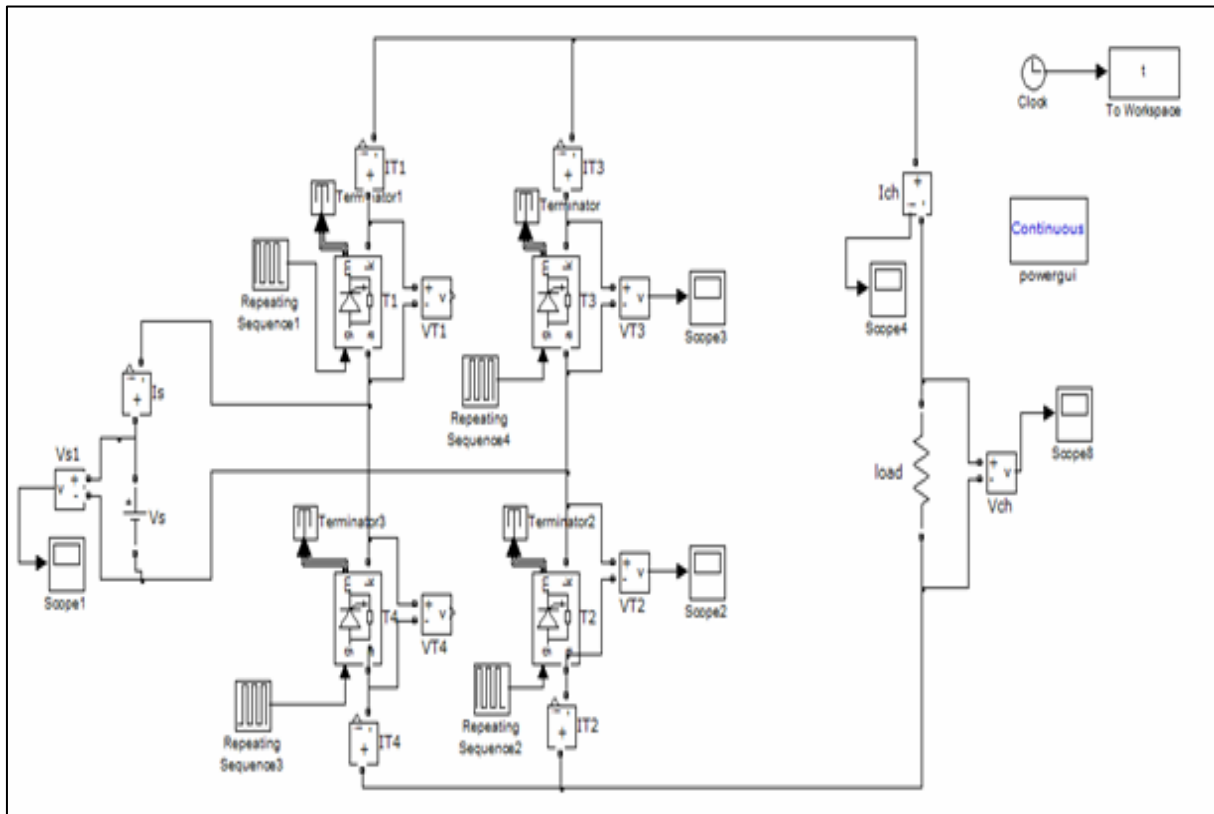


Figure III.1 Schéma de bloc de simulation d'onduleur en point

- **Charge résistive**

La tension d'alimentations $E=100(\text{v})$ tension continue ; La charge résistive ($R=20\text{ohm}$) .

Avec une charge résistive la tension de sortie varié entre 100 et -100 (v) et de fréquence 50 Hz et le courant a le même forme que la tension mais avec une valeur réduite.

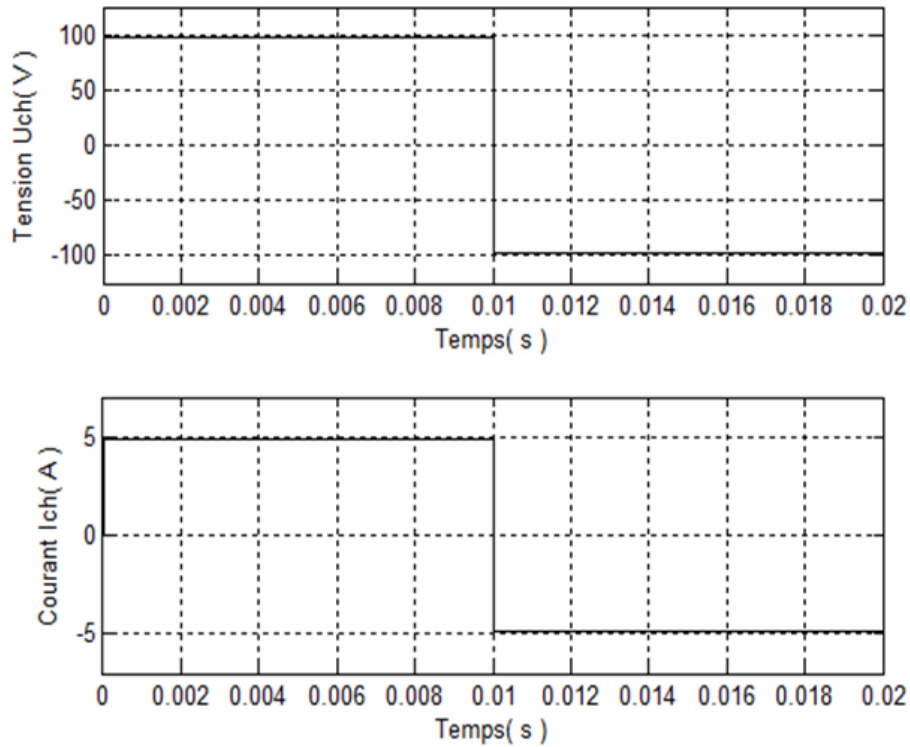


Figure III.2 allures de la tension et courant de la charge (Uch, Ich)

Le diagramme de spectre est tracé à l'aide de bloque en Simulink appelé powergue

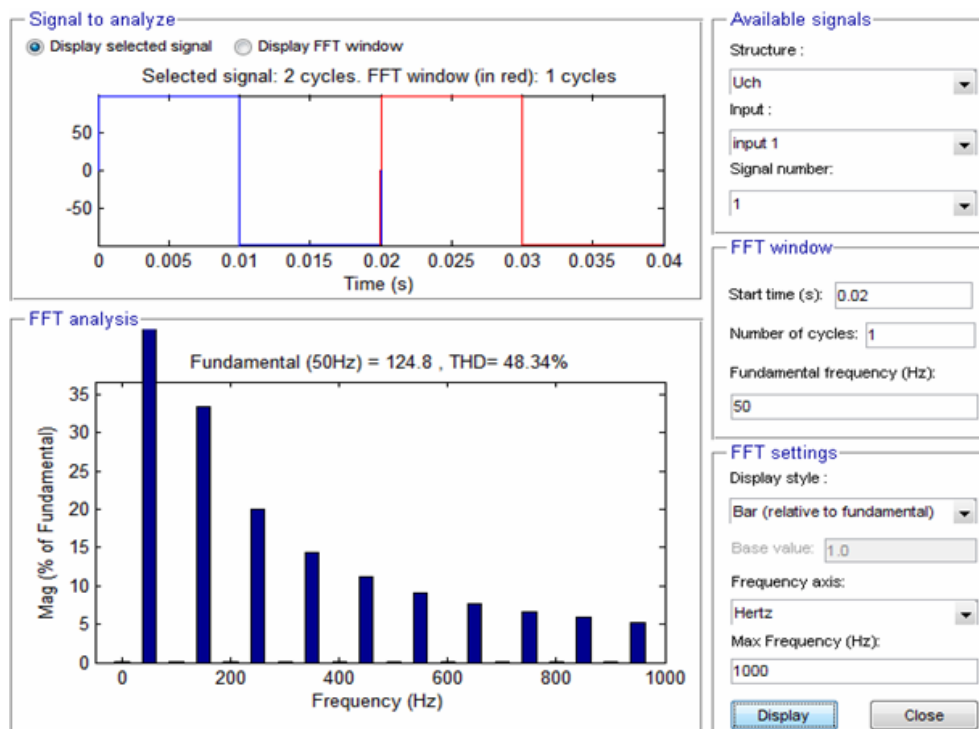


Figure III.3 diagramme de spectre, charge R

Remarque

On remarque que: THD=48,49% et la fondamentale $V_1=124,8v$, les harmoniques impaires avec des amplitudes décroissantes et harmonique paires sont nulles.

- **Charge inductive**

Figure(III.4) :Allures de tension et de courant d'une charge(R-L).

Avec une valeur d'inductance $L=0.2H$, et résistive($R=20ohm$), la tension de sortie ne sechange pas alternative mais non sinusoidale par conséquent le courant est exponentiel

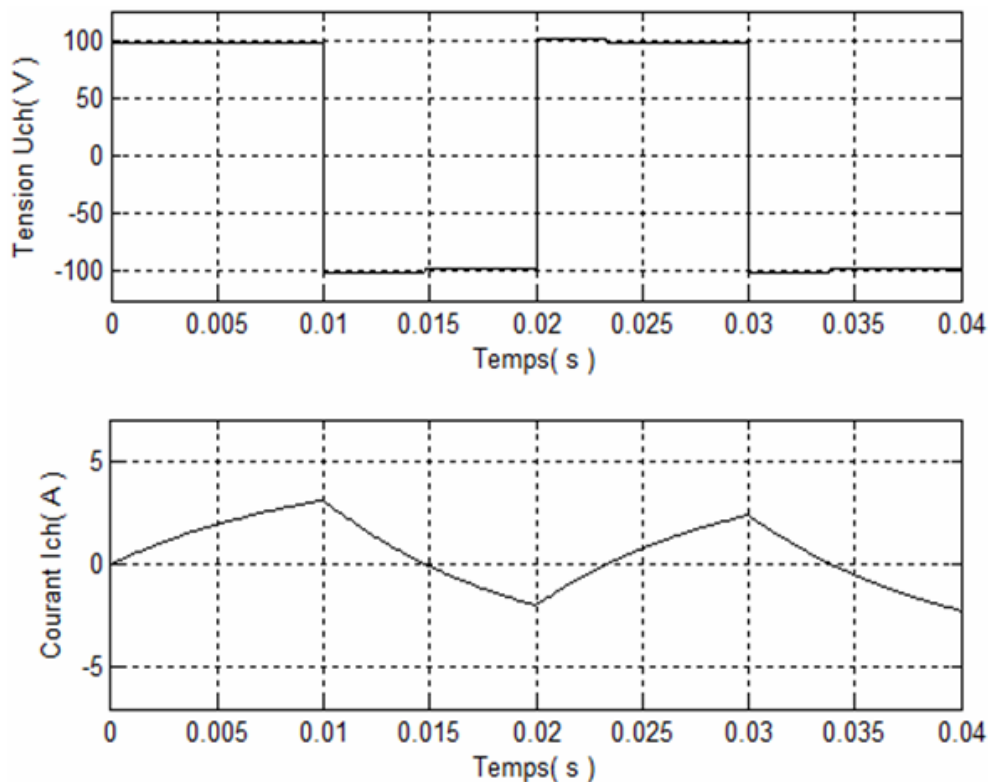


Figure III.4 Allures de tension et de courant d'une charge(R-L)

III.3 La technique MLI Multiple

❖ La technique de la MLI naturelle est réalisée par une comparaison d'un signal continue ou sinusoidal (tension de référence) basse fréquence à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la référence.

La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

❖ Cette technique se caractérise par :

❖ Le fondamental est la même fréquence que signal sinusoidale.

❖ Le nombre d'impulsion dépend du signal de porteuse (particulièrement de sa fréquence).

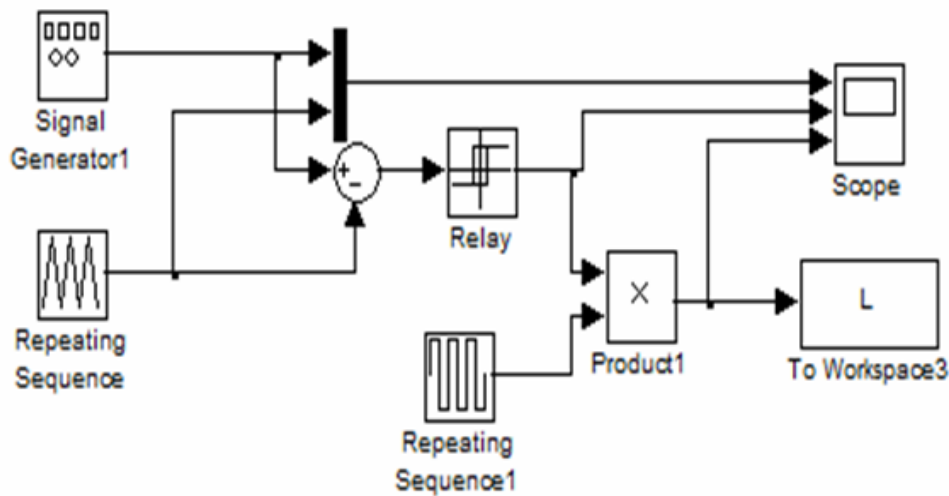


Figure III.5 présente le schéma de bloqué enSimulink, d'MLI multiple

- 1-Relay : ^ p i i régulateur de signaux.
- 2-Rectangulaire : les signaux triangulaire.
- 3-To wcospace3 : Pour afficher les allures.
- 4-Produit : Produit la valeur de fréquence.
- 5-Répéteur de séquence.

III.4 Influence d'amplitude de signal de commande (signal continu)

a) $A_c = 0,2 ; Ar=[1,-1]$:

Les figures (III.6) et (III.7) montre qu'on a obtenu une tension alternative de 8 segments par période.

La valeur de fondamental et de fréquence $f_1= 50\text{Hz}$ et amplitude $V_1=163,7$, le THD=107,94%. La valeur de 3éme et 5éme harmoniques sont réduits.

Tableau III.1 : Analyse de la tension de sortie

Fréquence (Hz)	F1	F3	F5	F7	f9
	50	150	250	350	450
La tension(v)	V1	V3	V5	V7	V9
	163,7	24	25	73	38

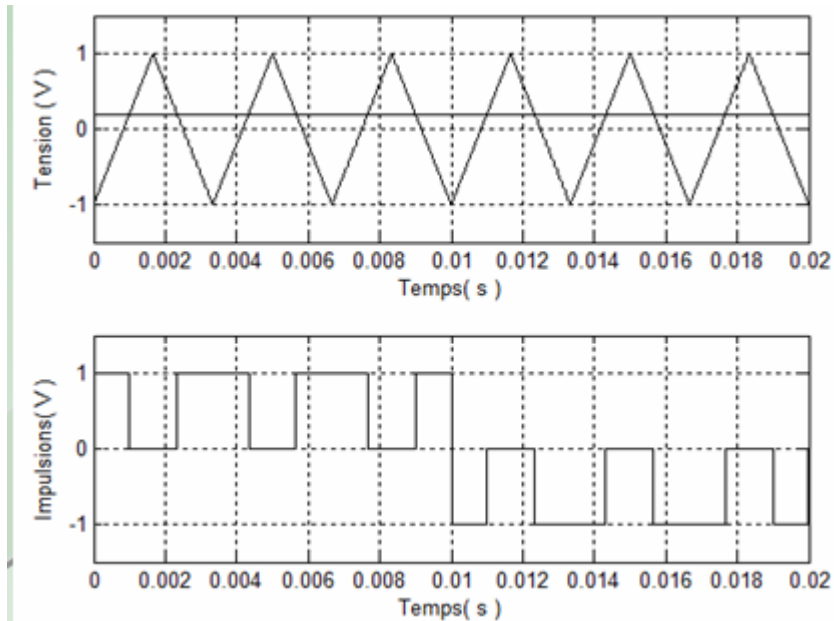


Figure III.6 impulsion d'mli multiple ($A_c=0.2$; $Ar= [1,-1]$)

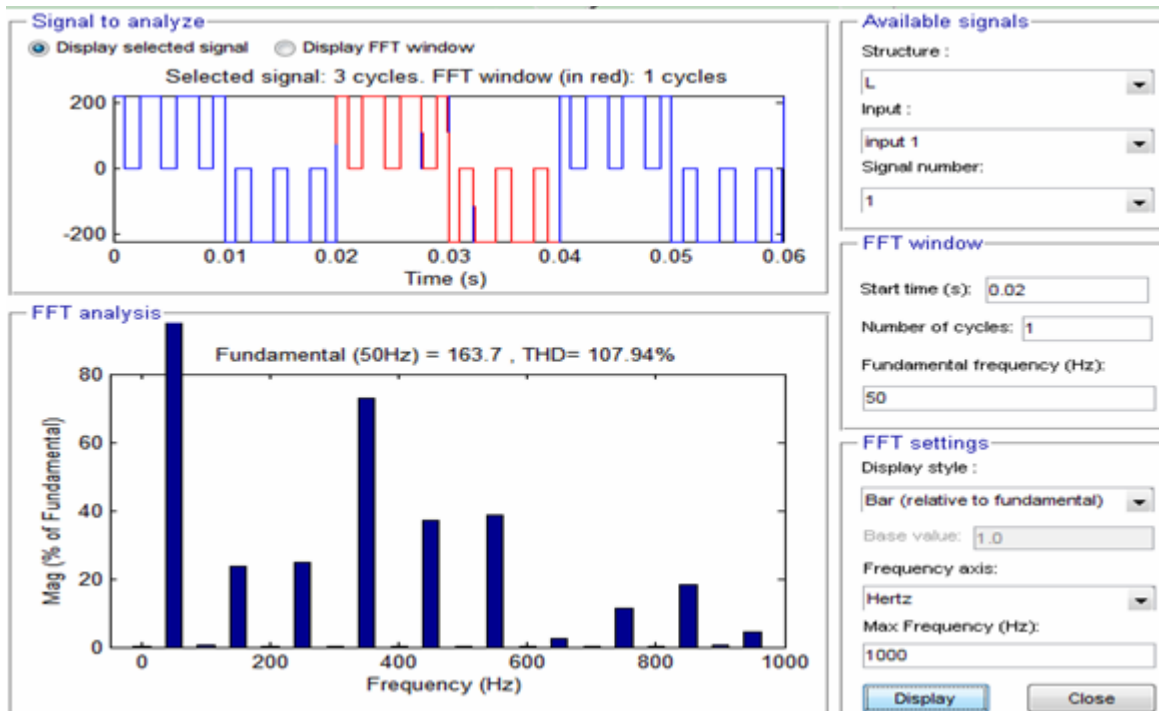


Figure III.7 la tension de sortie et le diagramme de spectre d'MLI multiple ($A_c=0,2$; $Ar=[1,-1]$)

b) $A_c=0.8$; $A_r=[1,-1]$

On observe que l'augmentation d'amplitude de A_c à une valeur de 0.8 élargie l'impulsion par conséquent le nombre reste le même. Voir la figure (III.8) et (III.9) où le THD est décroît et la valeur de tension est de 250,8v, les harmoniques sont importantes.

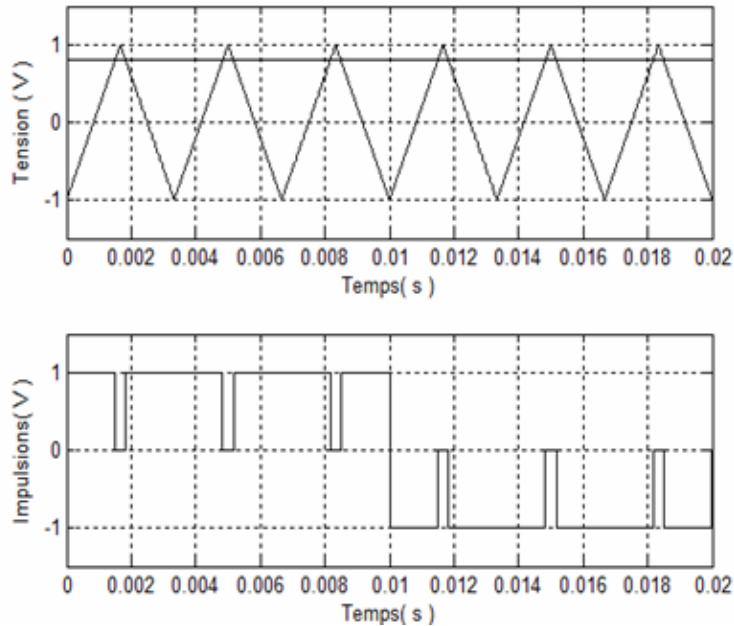


Figure III.8 Allure de tension et impulsion de sortie

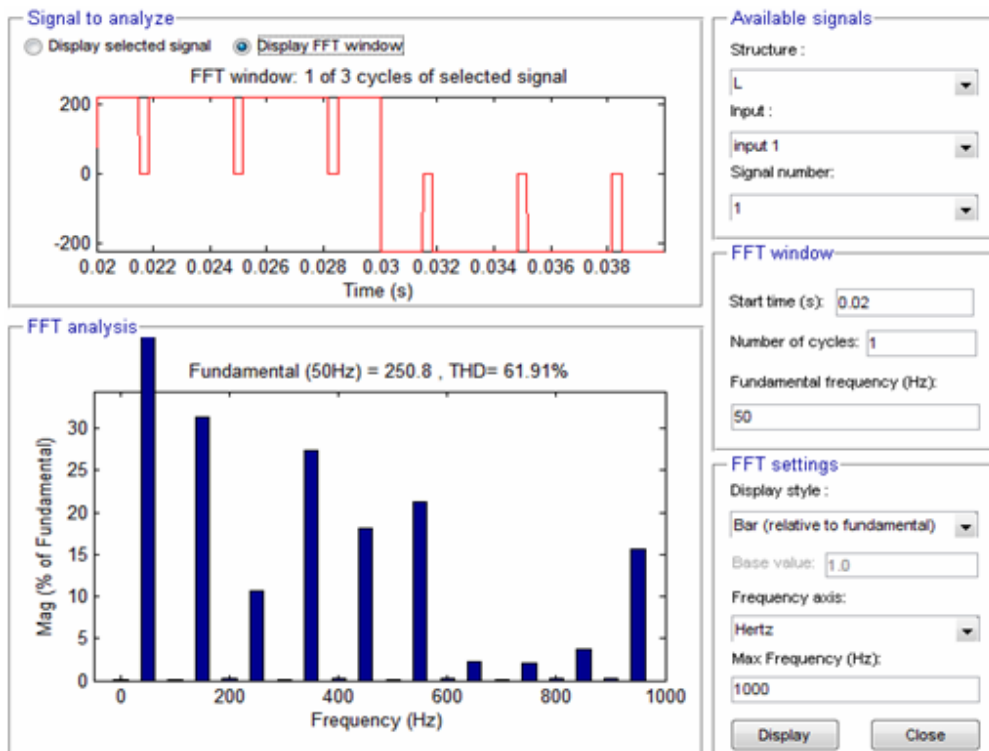


Figure III.9 Spectre de la tension de sortie

III.5 Influence de fréquence de signal de référence (triangulaire)

On fixe l'amplitude de $A_c=0,8$; $A_r=[1,-1]$, $f_c=50\text{Hz}$, et on varie la fréquence de signal triangulaire $f_r=600\text{Hz}$, dans ce cas le nombre d'impulsion s'augmente et le THD a une valeur de 104%. La figure (III.10) et (III.11) tracent les impulsions et la tension de sortie et le spectre.

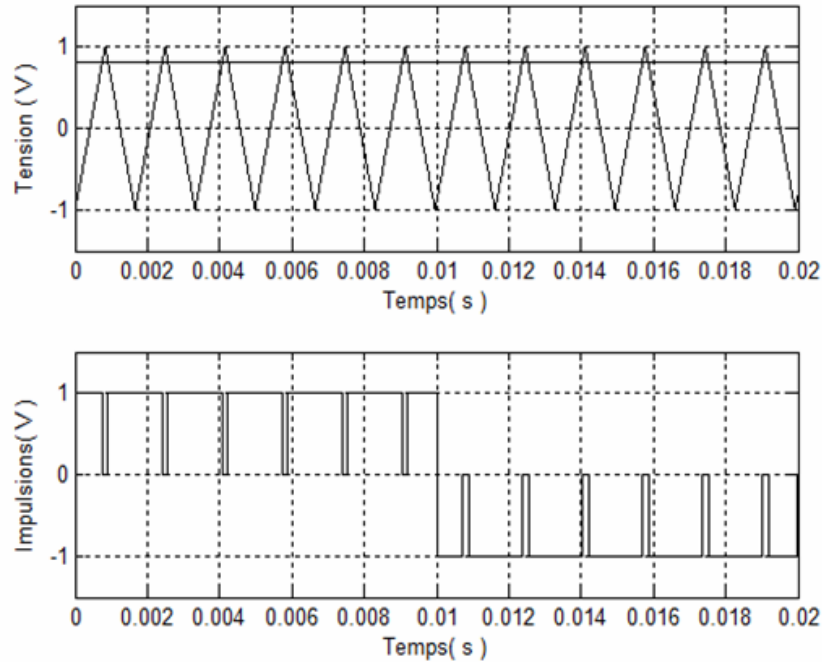


Figure III.10 l'allures de technique d' MLI multiple ; $f_r=600\text{hz}$

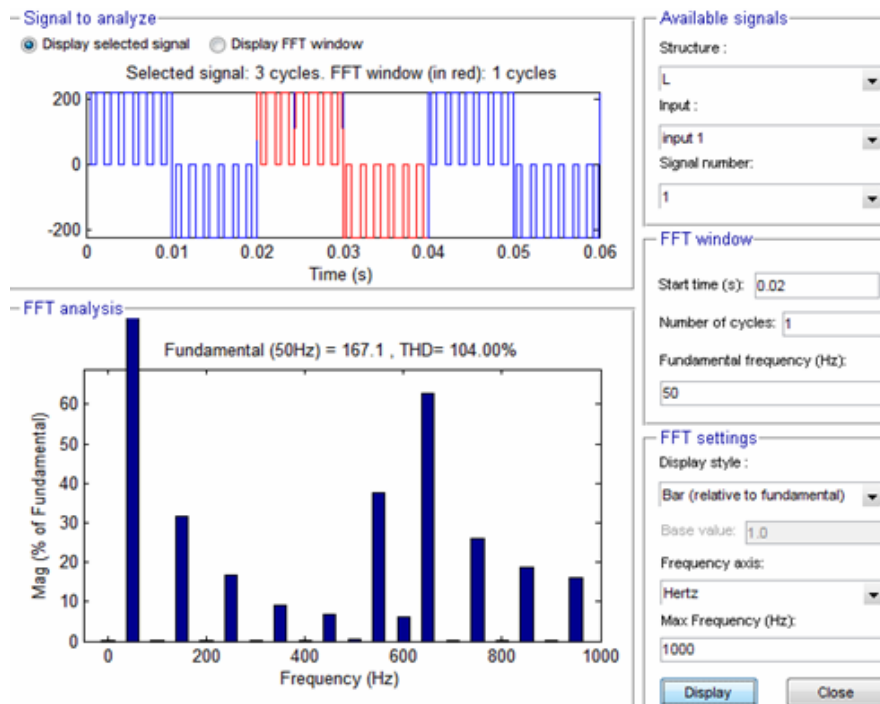


Figure III.11 Spectre de la tension de sortie

III.6 MLI Sinusoïdal

Dans ce cas les signaux de référence est un signal sinusoidale d'amplitude $A_c=0,8$
 La fréquence $f_c=50$ Hz, La fréquence $f_r=600$ Hz, $V_c=0,8\sin\omega t$.

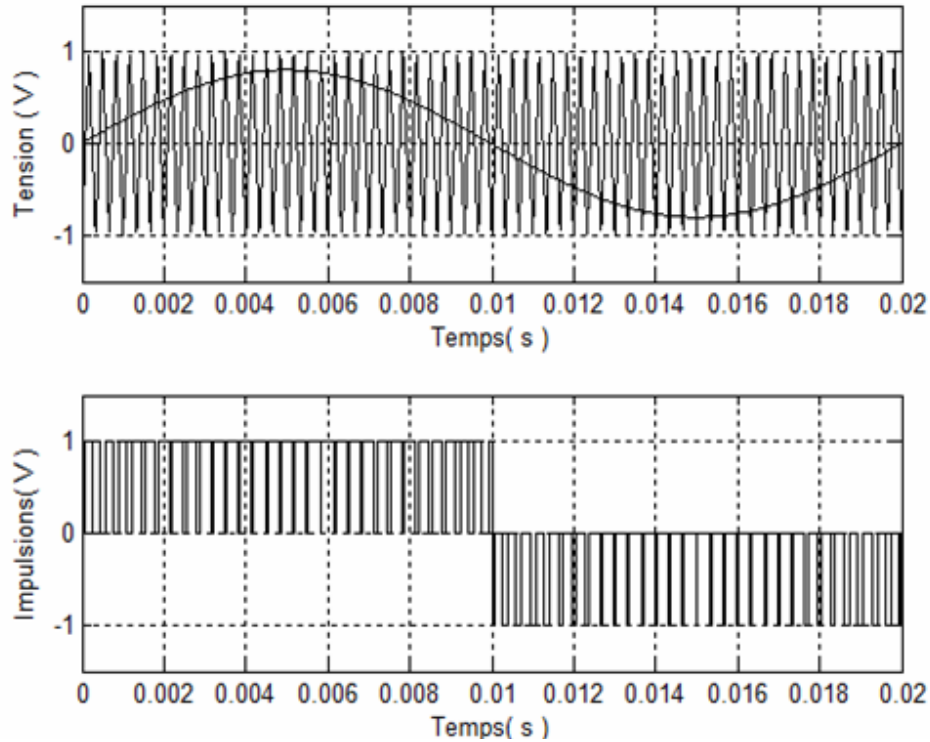


Figure III.12 de technique d'MLI sinusoïdal

- **Charge résistive**

Dans ce type de technique le signal continu est remplacé par un signal sinusoïdal comme se présente la figure (III.12). La figure(III.13)donne la tension pour une charge résistive.

Les spectres sont traces dans la figure (III.14), le fondamentale est de 103,3 et THD est moyen.

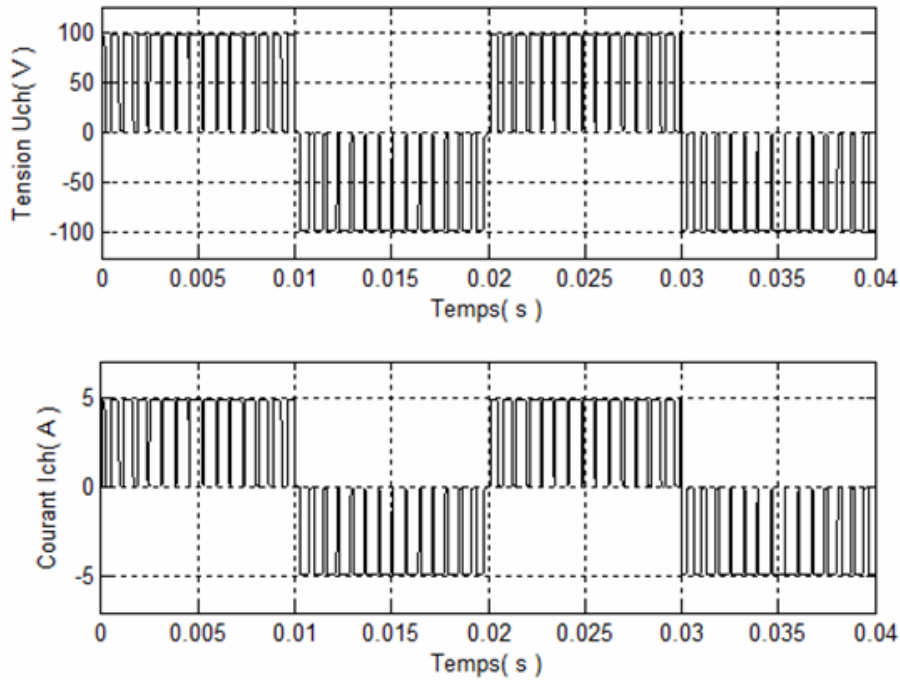


Figure III.13 L'allure de tension et de courant avec charge R

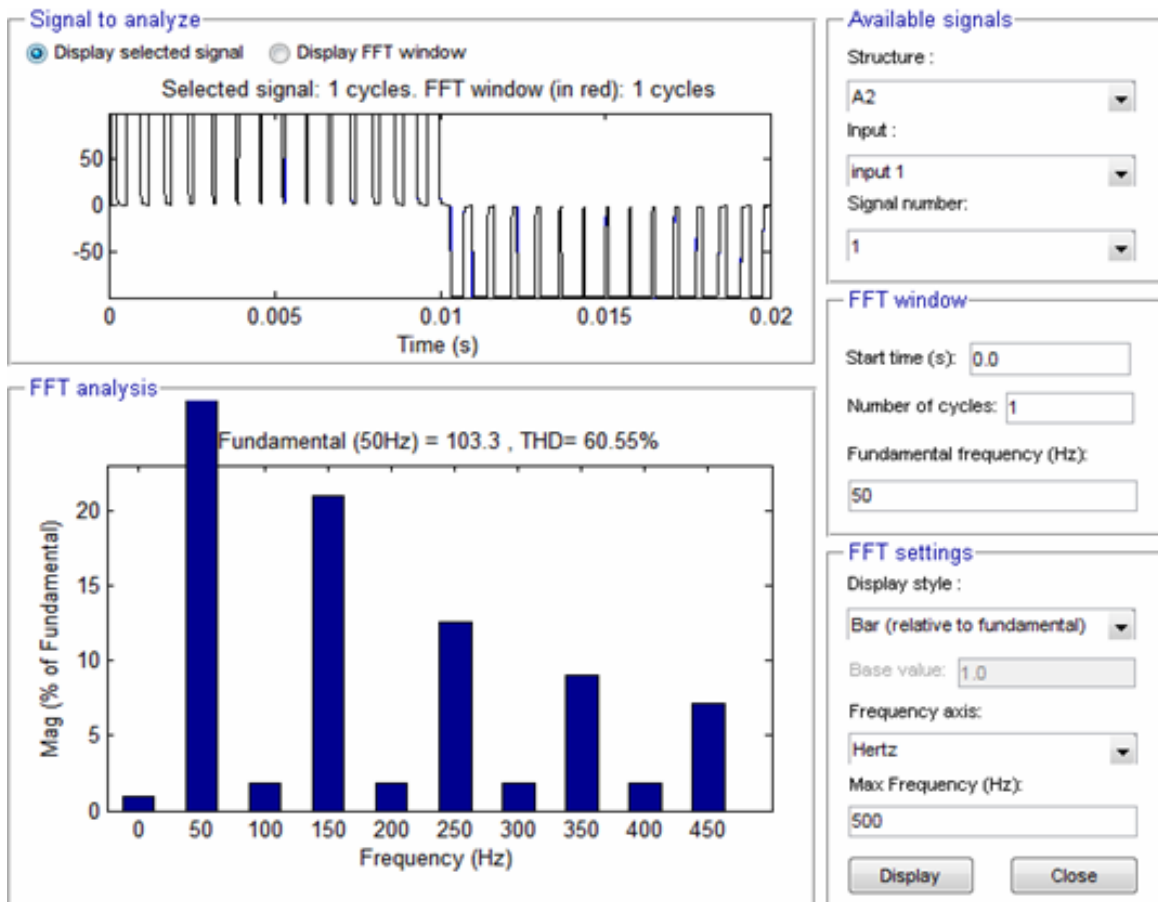


Figure III.14 L'allures de tension et les spectres d'harmoniques avec charge R

III.7 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on a présenté les résultats de simulation de l'onduleur monophasé en pont commandé à plein onde de, charge résistive et inductive par MLI multiple, triangulaire, sinusoïdal.

On remarque que la qualité de l'onde de tension à la sortie d'un onduleur de commandé par la MLI est la meilleure par rapport à celle de la commande sinusoïdale.

Conclusion
Générale

Conclusion Générale

Les travaux présentés dans ce mémoire avaient pour but la contribution à l'étude des convertisseurs multicellulaires sur la base de la simulation.

Pour atteindre cet objectif, nous avons présenté la solution de la commande MLI dû à ses avantages des convertisseurs de puissances et sur la qualité d'énergie. Ce travail est consacré à la commande de la structure multicellulaire série. L'objectif principale travaux réalisés a été l'étude et la mise en œuvre de lois de commande dédiées aux convertisseurs multicellulaires série avec ses deux modes de fonctionnement soit en hacheur ou en onduleur, afin de satisfaire d'une part les contraintes en tension appliquées sur les différents interrupteurs et d'autre part un contrôle robuste du courant de charge, le troisième objectif est d'assurer un THD le plus faible possible du courant de charge pendant le fonctionnement onduleur. Ces objectifs nous ont conduits à étudier diverses lois de commande Après avoir effectué différents tests de performances pour chacune des solutions envisagées. Les résultats obtenus sont fort, encourageants.

Bibliographie

- [1] Chouder, « Contribution à la commande des convertisseurs multicellulaires série », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [2] Amina Merhoum « optimisation des techniques de MLI pour les équipements FACTS A base d'onduleur » mémoire magister ORAN 2013
- [3] Yaichi Mohammed « analyse de la technique de modulation vectorielle SVM (space vector modulation) appliquée aux onduleurs multi niveaux» **mémoire magister** Université Djilali liabes de Sidi-Bel-Abbès 2006
- [4] Boukaroura Abdelkader « Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche Bon-graph »mémoire magister Farhat Abbas de setif 2009"
- [5] Kamal MERABET « Commande MLI D'un onduleur triphasé BASée sur la dispersion de la tension triphasée » thèse Québec a Trois-Rivières 2011
- [6] Mohammad H- Rashid «pomer Electronics circuits prvices, and application»
- [7] F-Brichant « Electronique de puissance Agence parisienne des distributions »
- [8] Berrezzek Farid « Etude des différentes Techniques des commande des onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone » mémoire magister BADJI Mokhtar-ANNABA 2006
- [9] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternatif » (volume 4). Edition tec &doc, 1995.
- [10] S. Guy, « Electronique de puissance la formation de base et leurs pancipales application »7ene édition dunod, paris 1999
- [11] T-wildi « Electrotechnique » 3ene édition de Boeck Univresité (1999)
- [12] Onduleur et harmoniques, cahiers technique, Merli Gerin N°159
- [13] V. Costan, "Convertisseurs parallèles entrelacés: étude des pertes fer dans les transformateurs inter-cellules", Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2007.
- [14] D. Pinon, "Commandes des convertisseurs multicellulaires par mode de glissement", Thèse de Doctorat, Toulouse, INPT, 2000.
- [15] M. F. Escalante Gutiérrez, "Contribution à la definition de structures optimales d'onduleurs pour la commande de machines à courant alternatif par DTC ", Thèse de doctorat, Paris 6, 2001.

- [16] G. Gateau, "Contribution à la commande des convertisseurs statiques multicellulaires série: commande non linéaire et commande floue", Thèse de doctorat, Toulouse, INPT, 1997.
- [17] P. Carrere, "Étude et réalisation des convertisseurs multicellulaires série à IGBT: équilibrage des condensateurs flottants", Thèse de doctorat, Toulouse, INPT, 1996.
- [18] L. Amet, M. Ghanes, J.-P. Barbot, "Direct control based on sliding mode techniques for multicell serial chopper", in American Control Conference, San Francisco, p. 751–756, 2011.
- [19] A. Donzel, "Commande des convertisseurs multiniveaux : Application à un moteur asynchrone" Thèse de doctorat, Inst. Natl. Polytech. Grenoble, 2000.
- [20] D. Florica, G. Gateau, M. Dumitrescu, R. Teodorescu, "A new stacked NPC converter: 3L-topology and control", European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, p. 1–10. 2007.
- [21] M. Benmiloud, A. Benalia, M. Defoort, M. Djemai, "On the limit cycle stabilization of a DC/DC three-cell converter", Control Engineering Practice, vol. 49, p. 29–41, 2016.
- [22] A. A. Boukhtache, "Contribution à la commande d'un système lampe décharge-ballast électronique pour épuration des eaux", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2017.
- [23] T. A. Meynard, H. Foch, « *Multilevel choppers for high voltage applications* ». EPEJ, Vol (2) n°1, pp-45-55, Mars 1992.
- [24] M. Aimé, « *Evaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques : Application aux nouvelles structures multicellulaires* ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [25] C.I. Elmetennani, « *Commande et optimisation par l'approche hybride d'une chaîne de production photovoltaïque à base d'un convertisseur multicellulaire* ». Mémoire de master, Ecole Nationale Polytechnique El Harrach, 2012.
- [26] M. Benadel, « *Modélisation et Simulation des Convertisseurs Statiques (Application à la Structure Multicellulaire Série)* ». Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2010.
- [27] M.F.E. Gutiérrez, « *Contribution à la définition de structures optimales d'onduleurs pour la commande des machines à courant alternatif* ». Thèse de Doctorat, Supélec, 2001.
- [28] S. Hanafi, M.K. Fellah, M. Yaichi, M.F Benkhoris, « *Nonlinear feedback decoupling control applied to stacked multicellular converter* ». Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg, 59, 1, pp. 97-106 (2014).

- [29] G. Gateau, T. A. Meynard, H. Foch, « *Stacked Multicell Converter (SMC): properties and design* ». IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vancouver-Canada, Vol. 3, 2001, pp. 1583–1588.
- [30] G. Gateau, T. A. Meynard, H. Foch, « *Stacked Multicell Converter (SMC): topology and control* ». 9th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'2001), Graz-Austria, 2001, pp. 405–410.
- [31] A. M. Lienhardt, G. Gateau, T. A. Meynard, « *Stacked Multicell Converter (SMC): reconstruction of flying capacitor voltages* », IEEE Industrial Electronics Conference, 2005, pp. 691–696.
- [32] A. M. Lienhardt. « *Etude de la Commande et de l'observation d'une nouvelle structure de conversion d'énergie de type SMC (Convertisseur Multicellulaire Superposé)* ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [33] L. Delmas. « *Etude et mise en œuvre d'une nouvelle structure de Conversion Multicellulaire Superposée (SMC)* ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [34] K. Benmansour, "Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseurs Multicellulaires Série: Approche Hybride", Thèse de doctorat, Cergy-Pontoise, 2009.
- [35] P. Djondiné, "Étude des comportements chaotiques dans les convertisseurs statiques", Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2015.
- [36] P. Davancens, T. Meynard, "Étude des convertisseurs multicellulaires parallèles : I. Modélisation", Journal de Physique III, vol. 7, n° 1, p. 143–160, 1997.
- [37] T. Meynard, H. Foch, "Dispositif de conversion d'énergie électrique à semi-conducteur", Brevet. France, n° 00652, p. 91, 1992.
- [38] P. Davancens, T. Meynard, « *Etude des convertisseurs multicellulaires parallèles* ». J. Phys III France **7**, pp. 143-160, 1997.