

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة بلحاج بوشعيب عين تيموشنت
Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Faculté des Sciences & Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
Filière : ELECTROMECHANIQUE
Spécialité : ELECTROMECHANIQUE

Etude et Commande d'un Convertisseur Multicellulaire

Réalisé par :

- Miliani mohamed el amine
- Soudi mohamed rafik

encadré par :

Mr. bensaïd boubakeur

Membres des jurys

Dr Benazza Baghdadi M.C.B U.A.T Président
Dr Aissou Massinissa M.C.A U.A.T Examineur
Dr bensaïd boubakeur M.A.A U.A.T Encadrant

Année Universitaire : 2020/2021



Remerciement

En premier lieu et avant tous, Nous remercions Dieu le tout-puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de réaliser ce modeste travail.

Tous d'abord, On tient a remercier notre encadrant M BENSAID, Pour la calité de son encadrement exceptionnel et sa disponibilité durant tout la période de travail.

Nous adressons égalment nos sincère remerciement a M AISSA MAMOUN,

M BENZAZZA , M BENAÏSSA ,M AISSOU et M BENMOUSSET,

Pour leur aide , Leur gentillesse , Leurs conseils et leurs encouragement.

Nous remercions vivement tous nos enseignants du département GENIE-ELECTRIQUE pour leurs efforts au cours de nos études universitaires.

Enfin on remercie tous qui ont contribué a la réalisation de ce travail.



Dédicace

Je rends grâce à Dieu de m'avoir donné le courage
et la volonté d'avoir pu terminer mes études.

A mon père MOHAMED et ma mère ZAHRA AZZAR pour leur amour inestimable,
leur sacrifices, leur confiance, leur soutien et toutes les valeurs
qu'ils ont su m'inculquer.

A ma chère soeur AMINA pour ses encouragements permanents, et soutien moral,
A mes chers frères, ABDELKADER et KHIERDDINE pour leur appui et leur encouragement

A femme NARIMANE DAOUD, ma plus grande source de bonheur, je vous dédie
ce travail, qui n'aurait pas pu être achevé sans votre éternel soutien et optimisme.

A imame AZIZE BOUBAKAR et a mon ami ZEHRI ABDELMADJID.

ET enfin un dédicace spécial pour mes enseignant et pour la promotion ELM 2021.

Table des matières

Introduction générale	01
Chapitre I	
Généralité sur le convertisseur multiséculaire topologie	
I.2.1 Introduction	03
I.2.2 Différentes associations de systèmes de conversion	04
I.2.3 Association série de composants semi-conducteurs	06
I.2.4 Association de cellules de commutation	07
I.2.4.1 Convertisseur à structure NPC " clampés par le neutre "	08
I.2.4.2 Convertisseur à structure multicellulaire série	09
I.2.5 Association série de convertisseurs élémentaires	11
I.3.1 Propriétés de la structure multicellulaire série	12
I.3.2 Topologie de la structure	12
I.3.2.1 La cellule élémentaire de commutation	13
I.3.2.2 Propriétés de la structure	14
I.2.6 Modélisation de la structure multicellulaire	17
I.4.1 Modélisation	17
I.4.2 Modèle aux valeurs instantanées	17
I.4.3 Hypothèses	17
I.4.4 Formulation générale	18
I.3.3 Conclusion	20
Chapitre II	
Modélisation du convertisseur multicellulaire	
I-1- Introduction	21
II-2- Présentation des modèles	21
II-2-1 le modèle instantané	21
II-2-2 le modèle ou valeur moyennes	21
II-2-3 le modèle hybride	21
II-3-1 modèle de l'évolution	22

II-3-1-1-Hypothèses	22
II-3-1-2-Formulation générale	22
II-3-1-3- Fonctionnement hacheur	23
II-3-2 le modèle ou valeur moyennes	24
II-3-2-1-Hypothèses	24
II-3-2-2-Modèle moyen d'un bras multicellulaire série	25
II-4- Modélisation du convertisseur multicellulaire superposé	28
II-4-1 modèle aux valeurs instantanées	28
II-4-1-1-Hypothèses	28
II-4-1-2-Formulation générale	29
II-4-1-3- Fonctionnement hacheur	29
II-4-1-4- Fonctionnement onduleur	29
II-4-2-1-Hypothèses	29
II-4-2-2-Modèle moyen d'un bras multicellulaire superposé	29
II-5-1-1-Hypothèses	30
II-5-1-2- Fonctionnement hacheur	30
II-7- Conclusion	32
Chapitre III	
Convertisseur statique	
III.1.Introduction	34
III.2 Convertisseur statique	35
III.2.1 Convertisseur statique de type de courant-continu courant-alternatif	35
III.2.2 Performances des convertisseurs	35
III.3 Effet négatifs des harmoniques	37
III.4 Généralités sur les onduleurs en MLI	37
III.5 Principe de fonctionnement	38
III.6 Classification des onduleurs	40
III.6.1 Onduleur autonome	41
III.6.2 Onduleur non autonome	41
Conclusion général	48
Bibliographie	

Liste des figures

Figure I.1. Différentes structures des convertisseurs	05
Figure I.2. Mise en série des interrupteurs	06
Figure I.3. Convertisseur 3 niveaux à structure NPC	08
Figure I.4. Convertisseur 3 niveaux à structure multicellulaire	09
Figure I.5. Mise en série de convertisseurs élémentaires	11
Figure I.6. Structure multicellulaire série à p cellules de commutations	13
Figure I.7. Association de deux cellules de commutation	18
Figure I.8. Hacheur-dévolteur p cellules associé à une charge R-L	23
Figure II.1 : Hacheur à P cellules, associé à une charge	25
Figure II.3 : Structure d'un bras multicellulaire P cellules.	25
Figure II.4 : Evolution des grandeurs électriques au sein d'une cellule i .	26
Figure II.5 : Représentation du modèle moyen d'un bras multicellulaire	26
Figure II.6 : Convertisseur multicellulaire superposé $P \times 2$.	27
Figure II.8 : Structure d'un bras multicellulaire SMC $P \times 2$ cellules.	28
Figure III.1 : Diagramme des divers types de coupe-isseur's statiques en electrocuve	35
Figure III-2 : Principe de fonctionnement de l'onduleur.	38
Figure III-3: Symbole et signal d'un onduleur	39
Figure III-4 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demi-cycle	39
Figure III-5 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2ème demis cycle Pour obtenir le signal résultant sur la période complète qui est présentée sur la figure	39
Figure III-6 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans la période complète	40
Figure III-7 Onduleur autonome	40
Figure III-8 Onduleur non autonome	41
Figure III-9 Circuit MLI Sinus triangulaire	43
Figure III-10. Modulante	43
Figure III-11. Porteuse triangulaire	43

Figure III-12. Signaux MLI	44
-----------------------------------	-----------

Liste Des tableaux

Tableau I.2.a. : Caractéristiques principales de l'association de deux cellules(Convertisseur 3-niveaux)	14
Tableau I.2.b. : Caractéristiques principales de l'association de 2 cellules ($E_1=E$ et $E_2=E/2$)	15
Tableau I.3. : Définition des grandeurs caractéristiques de l'association de p cellules de commutation	15

Introduction général

Introduction générale

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 introduction sur les convertisseurs séries

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

Le troisième chapitre sera consacré à la simulation d'un convertisseur quatre niveaux avec la technique de MLI à en validant les résultats par des simulations sous logiciel Power Sim.

Et enfin nous terminons notre études par in conclusion et des prospectives

Chapitre I

Généralité sur la topologie du convertisseur multiséculaire

I.1 Introduction

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter une source d'énergie électrique à un récepteur donné. La conception et l'utilisation des convertisseurs statiques pour des gammes de puissance de plus en plus importantes ont amené les concepteurs à étudier plusieurs structures de conversion basées sur des associations de structures élémentaires.

Ces associations de structures élémentaires peuvent être envisagées de différentes manières. La première solution consiste à associer directement des composants semi-conducteurs, afin d'obtenir un « macro-composant » possédant des caractéristiques satisfaisantes en tension et/ou en courant. La deuxième solution consiste à associer des cellules de commutation élémentaires. Enfin, la troisième solution consiste cette fois à associer non pas de cellules de commutation élémentaires mais de plusieurs convertisseurs statiques qui permettra de traiter la puissance souhaitée [6].

I.2 Différentes associations de systèmes de conversion

Depuis plusieurs années, nous assistons à une augmentation des puissances commutées par les convertisseurs statiques afin de répondre aux exigences industrielles. L'augmentation de cette puissance passe évidemment par l'augmentation de la tension et/ou du courant. Compte tenu des imperfections des matériaux conducteurs, c'est en utilisant des tensions élevées et des courant relativement faibles que l'on optimise le rendement dans les applications de fortes puissances.

Toutefois, l'utilisation de ces composants semi-conducteurs à forts calibres en tension ne se fait pas sans contrepartie. En effet, l'augmentation de la tenue en tension d'un composant se traduit par une détérioration importante des caractéristiques statiques et dynamiques. Ceci a donc amené les concepteurs à étudier de nouvelles structures de conversion basées sur des associations de structures élémentaires [2].

1. Associer directement des composants semi-conducteurs (figure I.1 cas a)
2. Associer des cellules de commutations élémentaires (figure I.1 cas b)
3. Associer plusieurs convertisseurs statiques (figure I.1 cas c)

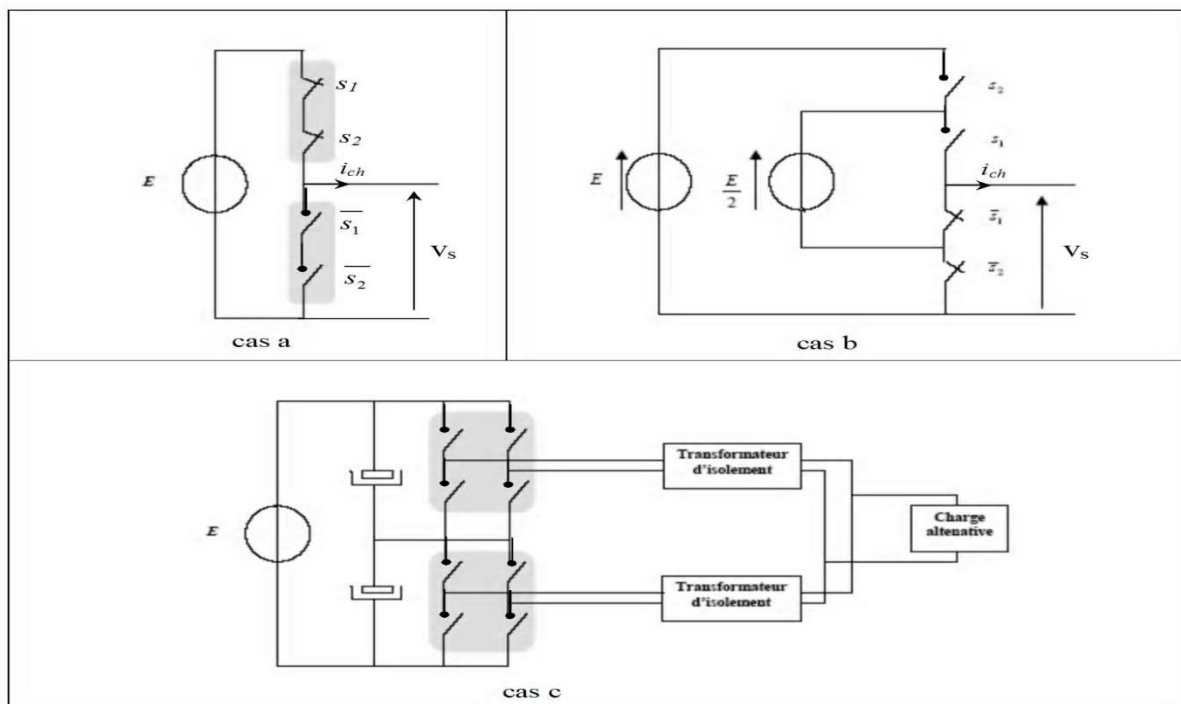


Figure I.1. Différentes structures des convertisseurs

I.2.7 Association série de composants semi-conducteurs

L'étude de la mise en série de composants semi-conducteurs a toujours été un problème délicat car autant les composants actuels sont conçus pour supporter des courants plusieurs fois supérieurs à leurs courant nominal pendant un temps limité, autant ils sont sensibles aux surtensions et les supportent très mal, même pendant un temps très court.

Le schéma de la (figure I.2) représente une cellule de commutation avec une mise en série des interrupteurs. Pour une tension d'entrée E donnée, la tension aux bornes de chaque interrupteur bloquée doit toujours rester égale à $E/2$ aussi bien en régime statique qu'en dynamique. En statique, seuls les courants de fuite fixent les tensions aux bornes des interrupteurs bloqués, que l'on équilibre par l'adjonction des résistances de grandes valeurs. Par contre, en régime dynamique (pendant l'amorçage et le blocage), des déséquilibres sur les tensions aux bornes des interrupteurs apparaissent, dus aux temps de commutation différent pour chaque composant lors de la commutation à l'amorçage, ou encore à l'instant de blocage effectif lors de commutation au blocage.

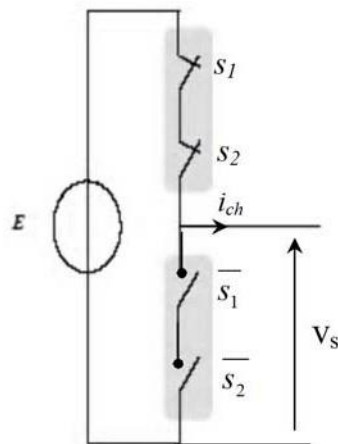


Figure I.2. Mise en série des interrupteurs

La mise en série directe des composants semi-conducteurs permet donc d'obtenir de « macro-composant » ayant une tenue en tension bien supérieur à celle d'un composant élémentaire. D'autre part, les commandes de tous les interrupteurs doivent être synchrones (pour assurer l'équilibrage des tensions) ce qui supprime les degrés de liberté supplémentaires apporter par la mise en série et peut conduire à la génération de $\frac{dV}{dt}$ très importants. Il n'est donc pas

envisageable d'améliorer les formes d'ondes avec ce type d'association [6].

I.2.8 Association de cellules de commutation

Afin de résoudre les différents problèmes dus à la mise en série décrits précédemment, il est possible d'utiliser des convertisseurs multiniveaux qui possèdent l'avantage d'associer des composants semi-conducteurs et permettent une amélioration significative des formes d'ondes en sortie due à l'apparition de différents niveaux de tension à la sortie.

I.2.8.1 Convertisseur à structure NPC " clampés par le neutre "

La première structure multiniveaux est appelée convertisseur « clampé » par le neutre et se trouve présentée dans la figure (I.3). Ce type de technique permet la mise en série des interrupteurs pour des applications haute tension. La répartition de la tension E sur les différents interrupteurs en série est cette fois assurée par des diodes (clamps) connectées à un point milieu capacitif [6].

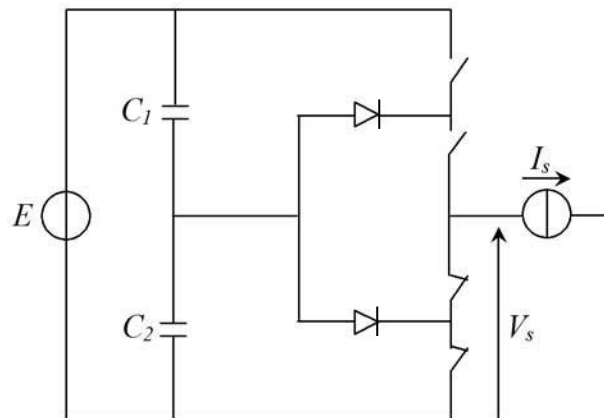


Figure I.3. Convertisseur 3 niveaux à structure NPC

On observe alors que ce convertisseur associé avec une commande décalée permet de faire apparaître trois niveaux de tension pour V_s ($0, \frac{E}{2}, E$) contrairement aux autres associations qui

avec des commandes obligatoirement synchrones ne possèdent que deux niveaux de tension possibles.

Ce convertisseur est donc intéressant par les nouvelles possibilités offertes mais possède néanmoins des limitations très contraignantes :

- La première contrainte est de garder le point milieu à un potentiel constant est égale à $\frac{E}{2}$ afin de garantir une bonne répartition de la tension sur les interrupteurs en série. Il est nécessaire donc de réaliser un asservissement de la tension de ce point milieu à $\frac{E}{2}$.
- Il est possible d'envisager le « clamping » d'un nombre d'interrupteurs plus important à l'aide de sources intermédiaires et de diodes. Les commandes permettant d'assurer la stabilité des sources intermédiaires deviennent alors très complexes. On peut donc difficilement employer cette structure pour plus de deux interrupteurs en série.

I.2.8.2 Convertisseur à structure multicellulaire série

Un deuxième type de convertisseur multiniveaux aussi appelé convertisseur multicellulaire série est apparu au début des années 90 et permet la mise en série d'interrupteurs à l'aide de source de tensions flottantes.

Nous présenterons ici les principaux avantages de ce type de structure. L'analyse du fonctionnement sera détaillée dans la deuxième partie de ce chapitre.

Le schéma de principe est donné en figure (I.4) pour deux cellules de commutation.

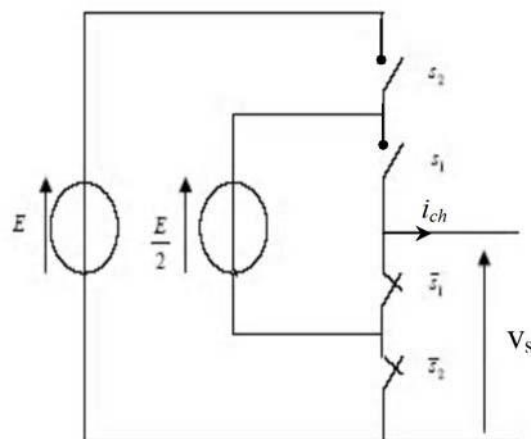


Figure I.4. Convertisseur 3 niveaux à structure multicellulaire

On remarque qu'une source de tension flottante de valeur $\frac{E}{2}$ a été insérée entre les deux

cellules de commutation. Ainsi on assure la répartition de la tension sur chaque interrupteur aussi bien en régime statique qu'en régime dynamique. Ces deux cellules de commutation (s_1, \bar{s}_1) et (s_2, \bar{s}_2) deviennent alors totalement indépendantes. On pourra donc envisager d'effectuer des décalages entre les commandes des cellules sans que cela devient dangereux pour la survie des composants de l'association [6].

Le premier avantage que l'on remarque pour cette application est que l'on pourra utiliser des composants semi-conducteurs ayant une tenue en tension théorique de $\frac{E}{2}$ seulement et donc avoir des interrupteurs ayant de meilleures caractéristiques dynamiques.

Les commandes de chaque cellule de commutation étant indépendantes, on a alors 2^p combinaisons possibles ou p est le nombre de cellules ainsi associées et $p+1$ niveaux possibles pour la tension de sortie V_s . Chaque niveau de tension est alors fraction de la tension d'entrée.

Cette structure est donc particulièrement intéressante car elle permet :

- La généralisation à p cellules sans que la topologie devienne trop complexe,
- L'utilisation de composants ayant une tenue en tension de $\frac{E}{2}$ et se trouve donc particulièrement bien adaptée pour les applications haute tension,
- D'obtenir des niveaux supplémentaires sur la tension de sortie, donc une amélioration notable des formes d'ondes en terme de contenu harmonique,
- D'avoir tous les types de fonctionnement envisageable : hacheur, onduleur de tension et commutateur de courant.

I.2.9 Association série de convertisseurs élémentaires

Une troisième solution d'association consiste à connecter des convertisseurs (figure I.5). Nous rappelons dans ce paragraphe deux exemples d'associations. On peut d'abord par exemple envisager la mise en série d'onduleurs de tension dont les formes d'ondes en sortie sont à valeurs moyenne nulle pour l'alimentation d'une charge alternative. On utilise alors un transformateur d'isolement pour connecter les sorties alternatives de chaque onduleur.

Dans ce cas, l'équilibre statique aux bornes des condensateurs est assuré par le fait que les sorties alternatives sont mise en parallèle et réinjectent donc la même tension d'entrée si les commandes sont identiques à tout instants. Les commandes devront cependant être parfaitement synchrones et cette structure est aussi difficile à mettre en œuvre que la mise en série directe d'interrupteurs ou de cellules de commutations.

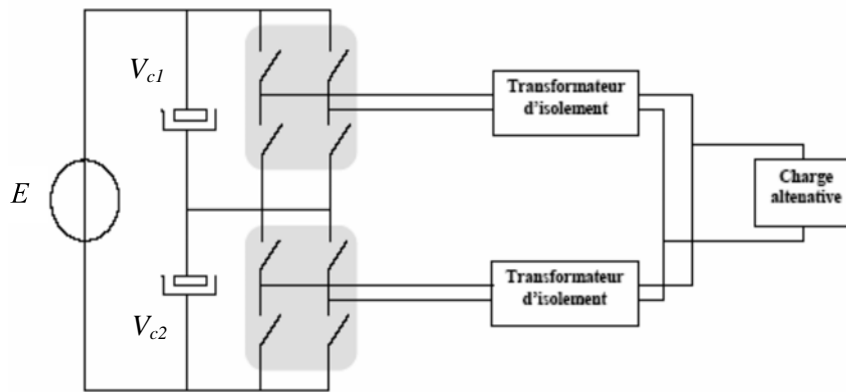


Figure I.5. Mise en série de convertisseurs élémentaires

Dans le cas où on veut alimenter une charge continue nous devons utiliser des redresseurs connectés au travers de transformateurs d'isolement, et on place un élément de filtrage de type LC devant la charge et ce type de structure permet alors d'entrelacer les commandes et ainsi de faciliter les problèmes de filtrage. L'équilibrage des tensions V_{c1} et V_{c2} est naturel grâce à la caractéristique unidirectionnelle en courant des redresseurs.

Une autre solution peut être mise en évidence est l'association de n convertisseurs élémentaires connectés en série par leurs sorties respectives comme représenté dans la (figure I.6). Le principe de cette structure consiste à connecter en série plusieurs convertisseurs monophasés avec des sources de tensions isolées et indépendantes. Le but étant d'obtenir une forme d'onde sinusoïdale composée de plusieurs niveaux de tensions. Les sources de tensions peuvent être assurées par des batteries, des cellules de combustible, des panneaux solaires ou par des condensateurs dont la charge sera obtenue d'une de tension alternative redressée. Sur la (figure I.6) on présente un bras d'onduleur monophasé représentatif de cette topologie.

Chaque onduleur mis en cascade est alimenté par une source de tension indépendante. A la sortie de chaque onduleur on peut avoir trois niveaux différents de tension, $+V_{dc}$, 0 et $-V_{dc}$ à l'aide des différentes configurations des interrupteurs S_i . Les sorties des onduleurs individuels sont connectées en série de sorte que la forme d'onde en sortie du bras est égale à la somme des tensions de chaque onduleur individuel.

Cette structure présente la flexibilité de pouvoir ajouter des niveaux de tensions de manière facile, d'autre part, les éléments de définition des potentiels (diodes et condensateurs) ne sont pas nécessaires.

Du côté des contraintes il faut remarquer qu'une source de tension indépendante est nécessaire pour chaque pont, ce qui limite l'application de ce type de structure. Elle est peut être intéressante pour des applications comme la compensation statique ou le filtrage actif. Aussi on pourrait l'utiliser pour les applications automobiles où la présence des batteries peut être favorable. Egalement, en présence de sources d'énergies renouvelables cette structure pourrait être intéressante.

En résumé, les caractéristiques de cette structure sont :

- a) Parmi les différentes structures multiniveaux, celle-ci utilise le moindre nombre de composants pour le même nombre de niveaux.
- b) Modularité et par conséquence expansion facile du nombre de niveaux.
- c) Plus facile à commander.
- d) Adapté pour des applications où plusieurs sources de tensions sont disponibles.

I.3 Propriétés de la structure multicellulaire série

I.3.4 Topologie de la structure

La structure multicellulaire nommée aussi structure de Meynard et Foch résulte de la connexion de p sources de tensions flottantes placées en série de façon à obtenir $(p+1)$ niveaux discrets de tension de sortie, indexés de 0 à p (noté i). Les sources de tensions sont la tension de bus d'alimentation (tension constante) E et $(p-1)$ condensateurs utilisées comme sources flottantes [4].

Le convertisseur est de p cellules. La fonction de chaque cellule i est représentée par s_i . Le s_i sera également appelé état de la cellule i . Les tensions de condensateurs sont notées par V_{ci} , $i=1\dots p-1$, la tension de sortie par V_s , qui est également la tension de charge.

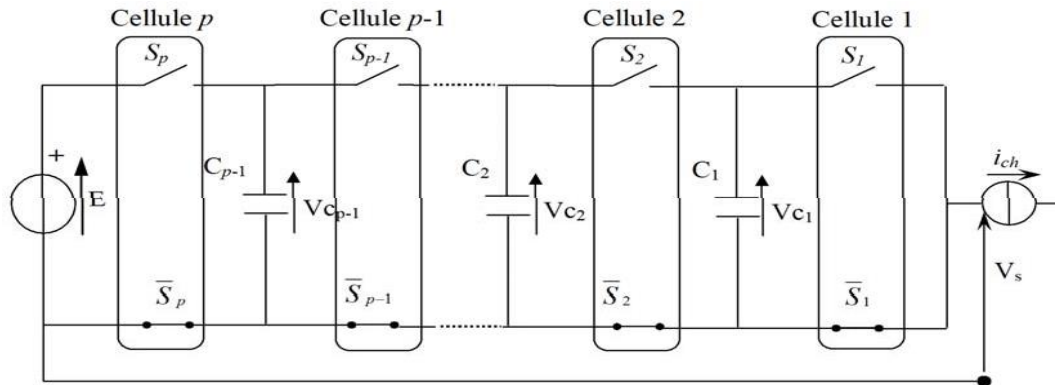


Figure I.6. Structure multicellulaire série à p cellules de commutations

I.3.4.1 La cellule élémentaire de commutation

Le principe d'une cellule élémentaire de commutation a comme bases les règles d'interconnexion de sources suivantes :

1. Une source de tension ne doit jamais être mise en court-circuit, mais elle peut être en circuit ouvert.
2. Une source de courant ne doit jamais fonctionner en circuit ouvert, mais elle peut se trouver en court-circuit.
3. Des sources de même nature ne peuvent pas être connectée entre elles, mais des sources de natures différentes peuvent se connecter entre elles (tension-courant).

Sur la figure (I.6) on trouve le schéma de principe d'une cellule élémentaire de commutation.

Afin de respecter les règles d'interconnexion des sources, les signaux de commande des interrupteurs S et \bar{S} devront être de nature complémentaire, quand l'un est passant l'autre est bloqué. Ainsi, une cellule élémentaire de commutation ne peut présenter que deux états. Par convention la cellule de commutation est dite à l'état 1 lorsque l'interrupteur S est passant. De la même façon elle est dite à l'état 0 lorsque ce même interrupteur est bloqué.

Pour finir la présentation de la cellule élémentaire il nous reste qu'à écrire les équations élémentaires des tensions et des courants caractérisant la cellule d'une telle association :

$$i_{ch} = i_S - i_{\bar{S}} \quad (I.1)$$

$$E = v_S + v_{\bar{S}} \quad (I.2)$$

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

Tableau I.1. Caractéristiques d'une cellule de commutation

Etat	Etat S	Etat \bar{S}	V_S	i_S	$i_{\bar{S}}$	v_S	$v_{\bar{S}}$
1	Passant	bloqué	E	i_S	0	0	E
0	bloqué	Passant	0	0	$-i_S$	E	0

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

I.3.4.2 Propriétés de la structure

La structure de base d'un convertisseur multicellulaire série commence par l'association de deux cellules élémentaires de commutation telle que l'on montre sur la figure (I.7).

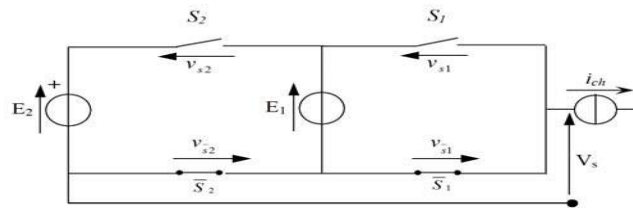


Figure I.7. Association de deux cellules de commutation

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

Tableau I.2.a. Caractéristiques principales de l'association de deux cellules

(Convertisseur 3-niveaux)

Etat cellule 2	Etat cellule 1	v_{S2}	v_{S1}	i_2	i_1	V_S
0	0	$E_2 - E_1$	E_1	0	0	0
0	1	$E_2 - E_1$	0	0	i_S	E_1
1	0	0	E_1	I_S	$-i_S$	$E_2 - E_1$
1	1	0	0	I_S	0	E_2

Soit :

$$V_S = s_1(E_1) + s_2(E_2 - E_1) \tag{I.3}$$

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_2 . 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 $E_2/2$. Par ailleurs, cette même valeur de tension va nous permettre d'avoir une tension multiniveaux en sortie du convertisseur dont les valeurs sont égales à 0, E_2 et $E_2/2$.

Tableau I.2.b. Caractéristiques principales de l'association de 2 cellules ($E_1=E$ et $E_2=E/2$)

Etat cellule 2	Etat cellule 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. Sur le tableau (I.3) on trouve les grandeurs principales pour l'association de p cellules de commutation. Cette définition est basée sur les résultats exprimés sur les tableaux (I.2).

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

Nombre de cellules associées	p
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	$v_{cp} = \frac{i}{p} E$

D'autre part, une fonction de commutation peut être définie afin de connaître la tension de sortie et la tension tenue par chaque interrupteur lors des différents états de l'ensemble de

cellules. La fonction de commutation est définie par une variable binaire, appelée signal de commande s_i , qui représente l'état de i^{me} cellule de commutation :

$$s_i \in \{0, 1\} \quad (I.5)$$

Ayant cette variable on peut déterminer les différentes tensions présentes dans chaque état de l'association multiniveaux. On a les expressions suivantes :

$$\text{Tension de sortie :} \quad V_s = \sum_{i=1}^p (E_i - E_{i-1}) \cdot s_i \quad (I.6)$$

$$\text{avec :} \quad E_0 = 0$$

$$v_{s_i} = (E_i - E_{i-1}) \cdot \bar{s}_i \quad (I.7.a)$$

Tensions des interrupteurs :

$$v_{\bar{s}_i} = (E_i - E_{i-1}) \cdot s_i \quad (I.7.b)$$

Les courants débités par les sources de tension sont :

$$i_{E_i} = (s_i - s_{i+1}) \cdot i_s \quad (I.8)$$

Etant donné la relation entre les différentes sources de tension, (équation I.4), les expressions des tensions citées ci-dessus peuvent être simplifiées :

$$\text{Tension de sortie :} \quad V_s = \frac{E}{p} \sum_{i=1}^p s_i \quad (I.9)$$

$$v_{s_i} = \frac{E}{p} \cdot \bar{s}_i \quad (I.10.a)$$

Tension des interrupteurs :

$$v_{\bar{s}_i} = \frac{E}{p} \cdot s_i \quad (I.10.b)$$

I.4 Modélisation de la structure multicellulaire

I.4.5 Modélisation

La modélisation est un principe ou technique qui permet d'établir un modèle explicatif d'un phénomène ou comportement en recensant les variables ou facteurs explicatifs et l'importance relative de chacune de ces variables. Il y a trois types de modèles : les modèles fonctionnels ou formels, les modèles comportementaux et les modèles physiques.

En électronique de puissance, modéliser un convertisseur statique consiste à faire une représentation plus ou moins abstraite de son fonctionnement dans un but donné. La représentation d'un même objet se diffère en fonction de l'objectif visé (simulation, commande,...), on trouve :

- **Modèle pour la simulation** : Outil précieux pour l'étude et le dimensionnement d'un convertisseur, la simulation peut être réalisée avec des degrés de précision divers. Ce modèle simplifié suppose les composants idéaux, le fonctionnement à fréquence adaptée et les régimes lentement variables,...
- **Modèle pour la commande** : Au niveau de la commande, le modèle de représentation n'est pas unique, il dépend notamment des grandeurs d'entrées/sorties que l'on choisit et des phénomènes que l'on souhaite représenter.
- **Modèle pour l'observation** : Ce modèle peut être qualifié d'exact dans le sens où il véhicule toutes les informations pertinentes.

I.4.6 Modèle aux valeurs instantanées

Le modèle que nous présentons dans un premier temps permet d'étudier l'évolution des différentes grandeurs d'états régissant le fonctionnement des convertisseurs multicellulaires séries tout en prenant en compte les commutations des interrupteurs. Il permet de représenter l'état de chacune des cellules de commutation du convertisseur à l'échelle de la période de découpage et les phénomènes harmoniques liés à la commutation des interrupteurs.

La simulation du modèle aux valeurs instantanées dans l'environnement MATLAB nous permettra de mettre en évidence le phénomène d'équilibrage naturel des tensions condensateurs, l'une des propriétés intéressantes de ce convertisseur [10].

I.4.7 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 et temps de commutation nuls),

- Les interrupteurs d'une même cellule de commutation fonctionnent de façon complémentaire,
- La tension d'alimentation E est constante.

I.4.8 Formulation générale

La présence de p cellules ayant chacune deux états possibles (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 et 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} . Ce système d'équations est bien sûr fonction du type de fonctionnement (hacheur ou onduleur) et de la nature de la charge.

Nous représentons à la figure (I.11) un convertisseur p cellules fonctionnant en hacheur-dévolteur associé à une charge R-L.

La mise en équations de ce type de structure met en œuvre [10]:

- $(p-1)$ équations liées à l'évolution des tensions aux bornes des $(p-1)$ condensateurs flottants,
- Une équation liée au courant de charge i_{ch} .

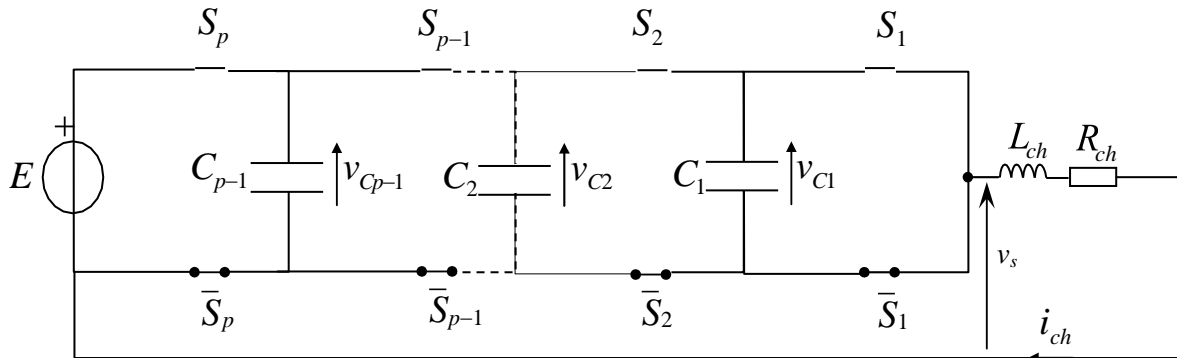


Figure I.8. Hacheur-dévolteur p cellules associé à une charge R-L

L'évolution de la tension aux bornes du condensateur C_i est liée à l'évolution du courant i_{ci} , ce dernier étant fonction de l'état des cellules adjacentes $Cell_{i+1}$, $Cell_i$ et du courant de charge i_{ch} .

Le courant i_{ci} est donc fonction des signaux de commande des interrupteurs s_{i+1} et s_i .

$$i_{ci} = [s_{i+1} - s_i] i_{ch} \quad (\text{I.12})$$

Connaissant la valeur du condensateur C_i nous obtenons l'équation régissant l'évolution de la tension v_{ci} .

$$\frac{d}{dt}v_{ci} = \frac{[s_{i+1} - s_i]}{C_i} i_{ch} \quad (\text{I.13})$$

Le courant de charge est quant à lui fonction de la tension de sortie du bras multicellulaire v_s et de la nature de la charge. La tension de sortie v_s correspond à la somme des tensions aux bornes des interrupteurs \bar{S}_i . Ces tensions qui sont définies par

$$v_{\bar{S}_i} = s_i [v_{ci} - v_{ci-1}] \quad (\text{I.14})$$

ce qui implique que l'expression de la tension v_s s'écrit :

$$v_s = \sum_{i=1}^p v_{\bar{S}_i} = \sum_{i=1}^p s_i [v_{ci} - v_{ci-1}] \quad (\text{I.15})$$

où $v_{cp} = E$ et $v_{c0} = 0$.

Dans le cas d'une charge de type R-L, l'équation donnant l'évolution du courant i_{ch} s'obtient à partir de la tension v_{ch}

$$v_{ch} = v_s = R i_{ch} + L \frac{d}{dt} i_{ch} \quad (\text{I.16})$$

l'expression :

$$\frac{d}{dt} i_{ch} = \frac{v_s}{L_{ch}} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{ch} \quad (\text{I.17})$$

A partir de l'équation (I.15), nous obtenons l'expression de l'évolution du courant i_{ch} en fonction des tensions condensateurs v_{ci} :

$$\frac{d}{dt} i_{ch} = \frac{[s_1 - s_2]}{L_{ch}} v_{C1} + \frac{[s_2 - s_3]}{L_{ch}} v_{C2} + \dots + \frac{[s_p - s_{p-1}]}{L_{ch}} v_{C_{p-1}} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{ch} + \frac{S_p}{L_{ch}} E \quad (\text{I.18})$$

Le modèle aux valeurs instantanées représentant un bras multicellulaire p cellules fonctionnant en hacheur-dévolteur associée à une charge R-L est résumé par le système d'équations (I.19).

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} v_{C1} &= \frac{[s_2 - s_1]}{C_1} i_{ch} \\ \frac{d}{dt} v_{C2} &= \frac{[s_3 - s_2]}{C_2} i_{ch} \\ &\vdots \\ \frac{d}{dt} v_{C_{p-1}} &= \frac{[s_p - s_{p-1}]}{C_{p-1}} i_{ch} \\ \frac{d}{dt} i_{ch} &= \frac{[s_1 - s_2]}{L_{ch}} v_{C1} + \frac{[s_2 - s_3]}{L_{ch}} v_{C2} + \dots + \frac{[s_p - s_{p-1}]}{L_{ch}} v_{C_{p-1}} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{ch} + \frac{S_p}{L_{ch}} E \end{aligned} \quad (\text{I.19})$$

Remarque : *Nous avons choisi comme signaux de commande s_i ceux pilotant les interrupteurs S_i mais nous aurions pu choisir les signaux de commande \bar{s}_i commandant les interrupteurs \bar{S}_i . Les équations s'obtiennent de la même façon que précédemment mais peuvent aussi être directement obtenues à partir des équations (I.18), (I.19) en remplaçant les variables s_i par \bar{s}_i .*

I.5 Conclusion

Au cours de ce premier chapitre, on a présenté différentes topologies de convertisseurs et associations de structures élémentaires qui ont été mises en œuvre.

Nous avons détaillé par la suite la topologie et les propriétés de la structure d'un convertisseur multicellulaire série. Deux modèles de ce convertisseur ont été développés pour permettre de poursuivre deux objectifs différents : dimensionnement de lois de commande (modèle moyen) et validation en simulation de ces lois de commandes dans des conditions proches du fonctionnement réel (modèle instantané).

Chapitre II

Modélisation du convertisseur 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- Présentation des modèles :

II-2-1 le modèle instantané

Le modèle exact ou instantané prend en compte les commutations des interrupteurs et les grandeurs instantanées des variables d'état du convertisseur. Grâce à ce modèle, l'état de chaque cellule de commutation appartenant au convertisseur est représenté à l'échelle de la période de découpage, sans oublier les phénomènes harmoniques liés à la commutation des interrupteurs [TAC 98].

II-2-2 le modèle ou valeur moyennes

Le modèle aux valeurs moyennes utilise le rapport cyclique comme seule information concernant la cellule de commutation. Le déphasage du signal de commande n'est pas pris en considération. Donc, les phénomènes harmoniques ne sont pas mis en évidence [TAC 98], [DON 00], [CAR 96]. Ce modèle sert à mettre en œuvre des lois de commande qui vont être approuvées par simulation, pendant laquelle le modèle aux valeurs instantanées est utilisé.

II-2-3 le modèle hybride

Le modèle hybride d'un convertisseur multicellulaire prend en considération toutes les variables caractérisant cette structure car il permet la prise en compte à la fois des variables continues et des variables discrètes ainsi que l'interaction entre elles. Ce modèle représente une association entre un modèle dynamique continu et un modèle à événements discrets.

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-3-1-1-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-3-1-2-Formulation générale :

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

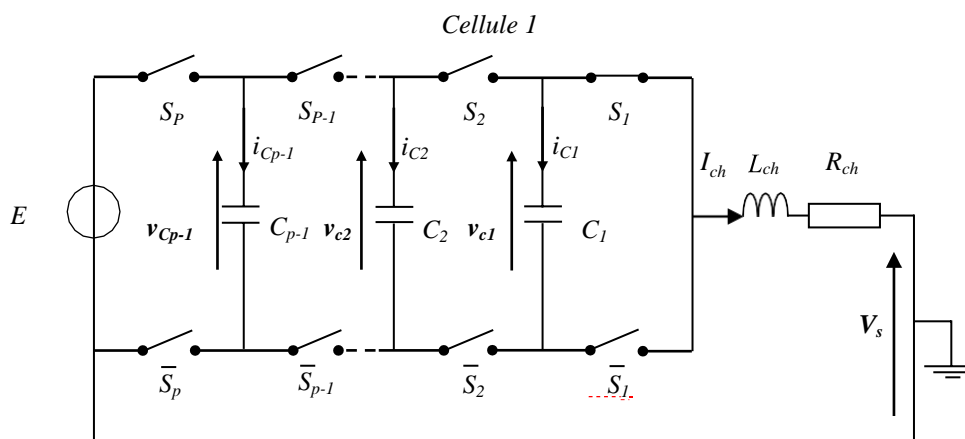
Le signal de commande associé à l'interrupteur S_i sera noté s_i . Ce signal sera à l'état **1** si l'interrupteur S_i est passant, ou à l'état **0** si l'interrupteur S_i est bloqué.

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-3-1-3- 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-3-2 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-3-2-1-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-3-2-2-Modèle moyen d'un bras multicellulaire série :

La figure II.3 représente la structure d'un bras multicellulaire de P cellules :

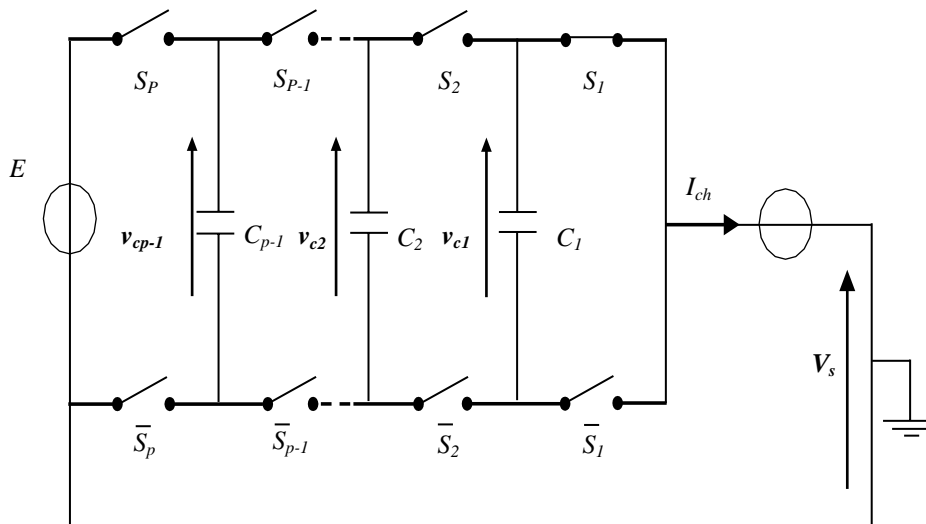


Figure II.3 : Structure d'un bras multicellulaire P cellules.

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.4, les formes d'ondes de la tension V_{si} aux bornes de l'interrupteur S_i du courant i_{Si} circulant dans l'interrupteur S_i :

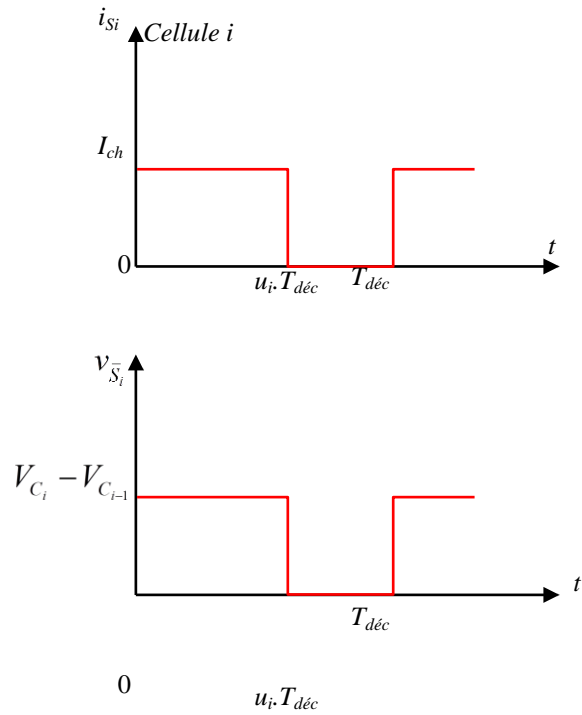


Figure II.4 : Evolution des grandeurs électriques au sein d'une cellule i .

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.5.

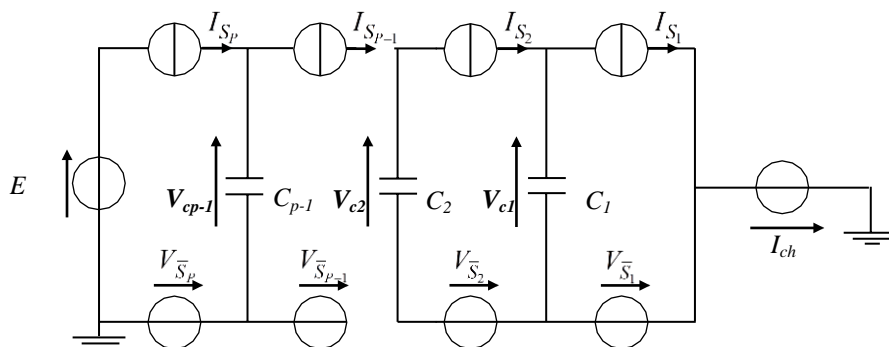


Figure II.5 : Représentation du modèle moyen d'un bras multicellulaire

Dans le cas où les rapports cycliques u_i sont identiques sur toutes les cellules et les tensions

condensateurs V_{C_i} 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 :

$$I_{C_i} = I_{S_{i+1}} - I_{S_i} = [u_{i+1} - u_i]I_{ch} \quad (\text{II.17})$$

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 :

$$\frac{dV_{C_i}}{dt} = \frac{1}{C_i}I_{C_i} = \frac{1}{C_i}[u_{i+1} - u_i]I_{ch} \quad (\text{II.18})$$

Il est possible d'écrire l'équation (II.18) en prenant en compte non plus les rapports cycliques u_i mais leur différence

$$\alpha_i = u_{i+1} - u_i \quad (\text{II.19})$$

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

$$\frac{dV_{C_i}}{dt} = \frac{I_{ch}}{C_i}\alpha_i \quad (\text{II.20})$$

En écrivant l'équation (II.16) en fonction des grandeurs α_i , la tension de sortie du bras multicellulaire V_s devient :

$$V_s = -\sum_{i=1}^{p-1} \alpha_i \cdot V_{C_i} + u_p \cdot E \quad (\text{II.21})$$

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 :

$$V_{ch} = V_s = R_{ch} \cdot I_{CH} + L_{ch} \frac{dI_{ch}}{dt} \quad (\text{II.22})$$

Nous pouvons, à partir des équations (II.21) et (II.22), 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 :

$$\frac{dI_{ch}}{dt} = - \sum_{i=1}^{p-1} \frac{\alpha_i}{L_{ch}} \frac{V_{Ci}}{L_{ch}} + u_p \cdot E - \frac{R_{ch}}{L_{ch}} I_{ch} \quad (\text{II.23})$$

Les équations régissant les évolutions des tensions condensateurs (équation II.20) et l'évolution du courant de charge (équation II.23) 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-4- Modélisation du convertisseur multicellulaire superposé :

II-4-1 modèle aux valeurs instantanées

II-4-1-1-Hypothèses :

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

II-4-1-2-Formulation générale :

La présence des $P \times n$ cellules ayant chacune deux états possibles implique que le convertisseur peut avoir $(n+1)^P$ configurations possibles.

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

L'évolution des tensions V_{Ci1} , V_{C2} et du courant de charge I_{ch} sont représentés dans un système d'équations différentielles qui regroupe les $(n+1)^P$ configurations.

II-4-1-3- Fonctionnement hacheur :

Nous présentons, sur la figure II.6, un convertisseur multicellulaire superposé, à $P \times n$ cellules, associé à une charge $R-L$.

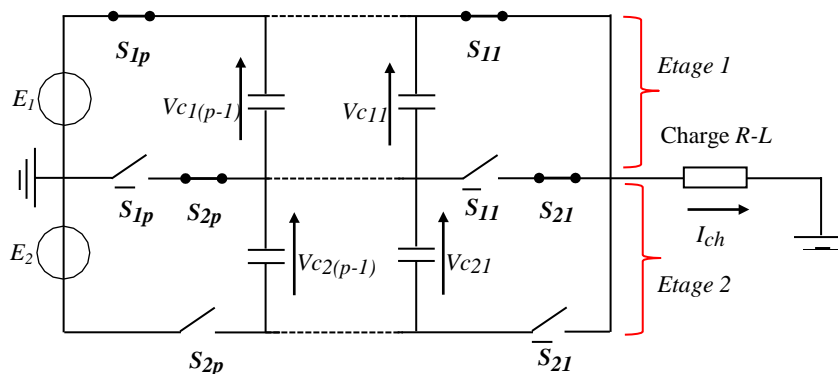


Figure II.6 : Convertisseur multicellulaire superposé $P \times 2$.

La progression des tensions aux bornes des condensateurs C_{1i} , C_{2i} et liée à l'évolution des courants

I_{C1i} , I_{C2i} , ces derniers étant fonction de l'état des cellules adjacentes $Cel_{I(i+1)}$, Cel_{Ii} , $Cel_{2(i+1)}$, Cel_{2i} et du courant I_{ch} .

On peut, alors, dire que les courants I_{C1i} , I_{C2i} sont en fonction des signaux de commande des interrupteurs $S_{I(i+1)}$, S_{Ii} et $S_{2(i+1)}$, S_{2i} .

II-4-2-1-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 façon complémentaire.
- Les valeurs des condensateurs flottants C_{1i} (C_{2i}) sont telles que les tensions à leurs bornes V_{C1i} (V_{C2i}) 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-4-2-2-Modèle moyen d'un bras multicellulaire superposé:

La figure II.8 représente la structure d'un bras SMC de $P \times 2$ cellules :

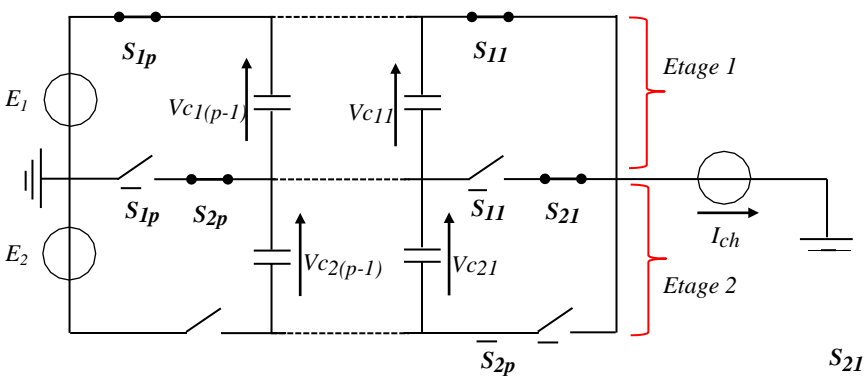


Figure II.8 : Structure d'un bras multicellulaire SMC $P \times 2$ cellules.

Le modèle moyen du convertisseur multicellulaire superposé est obtenu après une étude menée sur le comportement des cellules de commutation $1i$ et $2i$.

Les interrupteurs S_{1i} et S_{2i} des cellules $1i$ et $2i$, respectivement, sont pilotés par les signaux de commande s_{1i} et s_{2i} de fréquence de découpage f_{dec} . L'interrupteur S_{1i} est à l'état passant pendant la durée $u_{1i} \cdot T_{dec}$ et à l'état bloqué pendant $[1 - u_{1i}] \cdot T_{dec}$ (de même pour l'interrupteur S_{2i}).

Nous obtenons, ainsi, à la figure II.9 les formes d'ondes de la tension V_{xi} aux bornes de

l'interrupteur S_i) et du courant i_{S_i} circulant dans l'interrupteur S_i (de même pour la cellule

II-5-1-Modélisation du convertisseur multicellulaire parallèle:

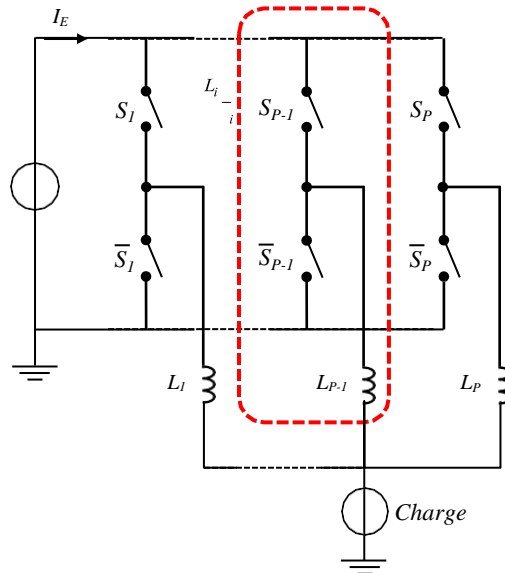
II-5-1-1-Hypothèses

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

- 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.11 représente un convertisseur multicellulaire parallèle de P cellules de commutations, associés à une charge $R-L$



II-6- Mise en évidence de la non-linéarité des convertisseurs multicellulaires :

Après modélisation des convertisseurs multicellulaires, nous avons remarqués qu'ils ont la même forme d'équation d'état :

$$\dot{X} = A \cdot X + B(X) \cdot S$$

Ce qui nous amène à dire que ces structures de conversion d'énergie sont des systèmes non-linéaires parce que, le vecteur d'état X est présent dans la matrice B et cette matrice n'est pas diagonale. En plus, les ordres de commande des différentes cellules influent sur plusieurs variables d'état et vice-versa. Ces remarques prouvent la non-linéarité et le couplage que présentent ces structures.

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 deux modèles en particulier : Le premier est le modèle moyen qui permet le dimensionnement des lois de commande. Le deuxième est le modèle instantané qui est utilisé pour valider ces lois de commande.

Les modèles exposés au cours de ce chapitre montrent une non-linéarité du comportement des convertisseurs multicellulaires, due aux condensateurs inter-cellules pour les deux topologies série et superposée, et également aux inductances des cellules pour la structure parallèle.

Pour améliorer le comportement et les performances des convertisseurs multicellulaires, nous allons leur imposer des techniques de commande intelligentes pour les contrôler.

Le troisième chapitre va être dédié au convertisseur multicellulaire série auquel nous allons associer différentes commandes. Ces techniques de contrôle se divisent en deux catégories : celle en boucle ouverte et celle en boucle fermée.

Chapitre III
Simulation d'un
convertisseur statique

III.1.Introduction

Les convertisseurs statiques constituent, au même titre que les machines à courant continu, un maillon fondamental des systèmes d'entraînement à vitesse variable. Ceux des machines à courant continu sont spécifiques et peuvent être classés en deux grandes familles :

- >Celle fonctionnant à partir du réseau alternatif;
- >Celle alimentée par une source de tension continue, éventuellement créée par redressement à partir du réseau.

L'énergie électrique est surtout distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins. L'électronique de puissance utilise des convertisseurs statiques. Ces derniers utilisent des interrupteurs électroniques.

Exemples:

Conversion AC --> DC : redresseur,

Conversion DC --> AC : onduleur,

Conversion DC --> DC : hacheur.

Dans cette partie on présente une brève description des convertisseurs statiques et description de type de convertisseur statique.

III.2 Convertisseur statique

Avec le développement de l'automatique, de l'électronique et de l'informatique, on peut dire que les convertisseurs statiques remplacent les « machines » utilisant des composants électroniques en commutation. Parmi les avantages de ces convertisseurs :

- Transfert de puissance peut-être contrôlé et même régulé;
- Système moins encombrant et moins lourd;
- Un rendement excellent;
- Grâce à l'automatisation une facilité de mise couvre;
- Protections plus efficaces;
- Grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des composants, un coût relatif en baisse.

Le diagramme ci-après représente les types de convertisseurs.

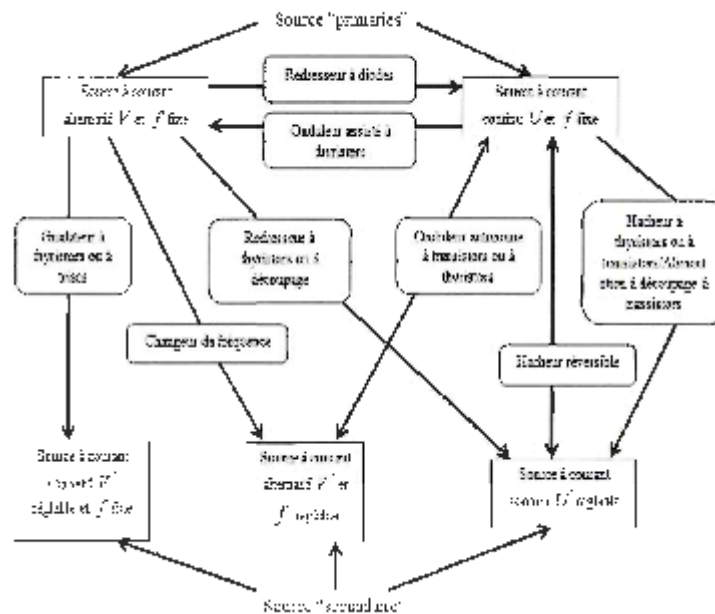


Figure III.1 : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électro puissance.

III.2.1 Convertisseur statique de type de courant-continu courant-alternatif

Un convertisseur continu-alternatif permet d'obtenir une tension alternative (Éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue.

Exemple d'utilisation d'onduleur :

L'onduleur de secours pour le matériel informatique permet d'assurer la continuité de l'alimentation en cas de coupures sur le réseau.

Il permet aussi de filtrer les éventuels défauts de la tension du réseau (parasites ou surtensions).

En ce qui concerne les applications industrielles, nous rencontrerons l'onduleur en sortie des variateurs de fréquence pour alimenter les moteurs asynchrones.

III.2.2 Performances des convertisseurs

La performance des convertisseurs s'évalue en considérant la grandeur du contenu harmonique dans son signal de sortie. Parmi les paramètres de performance se trouvent :

Le facteur d'harmonique, FHn. C'est la mesure de la contribution de la n^{ème} harmonique à la forme d'onde du signal de sortie [9].

Le facteur de la distorsion, FD. C'est la mesure de l'efficacité de l'onduleur pour réduire des

harmoniques désirées sans spécifier les valeurs du filtre de la charge.

Le taux de distorsion harmonique total, TDHT. C'est la distorsion du signal de sortie mesurée par rapport à son composant fondamental. Sa définition en forme d'équation est :

$$TDHT = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2,3,..}^{\infty} V_n^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

III.3 Effet négatifs des harmoniques

Les courants harmoniques n'ont pas d'effet direct sur la consommation énergétique mais ils augmentent les pertes par échauffement dans les installations (transformateurs, câblage, etc.). On peut distinguer leurs effets dans le temps en deux catégories :

Les principaux effets instantanés ou à court terme :

- Le déclenchement intempestif des protections ;
- Les vibrations et bruits acoustiques ;
- Les pertes de précision des appareils de mesure.

Les principaux effets à long terme :

- L'échauffement des sources ;
- La fatigue mécanique des installations ;
- L'échauffement des récepteurs ;
- La destruction de matériel.

III.4 Généralités sur les onduleurs en MLI

Pour des applications de faibles et moyennes puissances, les tensions de forme d'onde carrée ou quasi carrée pourront être acceptables; alors que pour les applications de fortes puissances une forme d'onde sinusoïdale avec un faible taux de distorsion des harmoniques sont exigées. Avec la disponibilité des dispositifs semi-conducteurs de puissance à haute vitesse, l'harmonique contenue dans la tension de sortie peut être minimisée ou réduite significativement par des techniques de commande.

Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles par exemple :

Variateur de vitesse des moteurs à courant alternatif, chauffage par induction, les alimentations de secours, les alimentations non interrompues. L'entrée d'un onduleur peut être une batterie, une tension continue issue des panneaux solaires, ou d'autre source de courant continu obtenu à partir d'un redressement monophasé ou triphasé comme le montre la figure 3.2 ci-dessous.

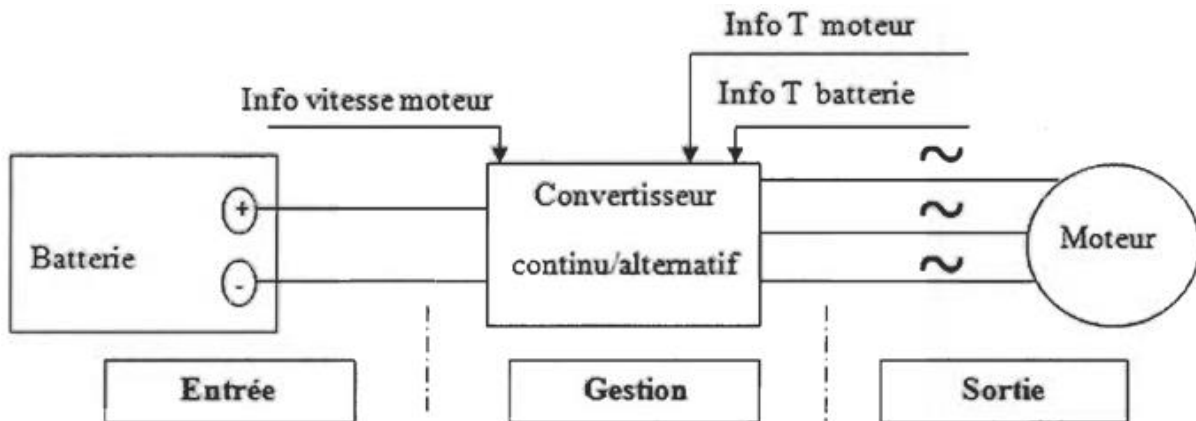


Figure III-2 : Principe de fonctionnement de l'onduleur.

De façon générale, les onduleurs peuvent être classifiés en deux types : les onduleurs monophasés et les onduleurs triphasés. Chaque groupe peut utiliser les dispositifs de commande comme : BJT, MOSFET, MCT, SIT ou commande forcée des thyristors en fonction des applications. Généralement, ces onduleurs utilisent la commande MLI pour produire une tension de sortie alternative. Un onduleur est appelé un «current-fed inverter», (CFI) s'il est alimenté par une source de courant continu (le courant d'entrée est maintenu constant), un «voltage-fed inverter» (VFI) s'il est alimenté par une source de tension continue (la tension d'entrée est maintenue constante), et un «variable de linked inverter», si la tension d'entrée est contrôlable

III.5 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la figure 3.3, on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion

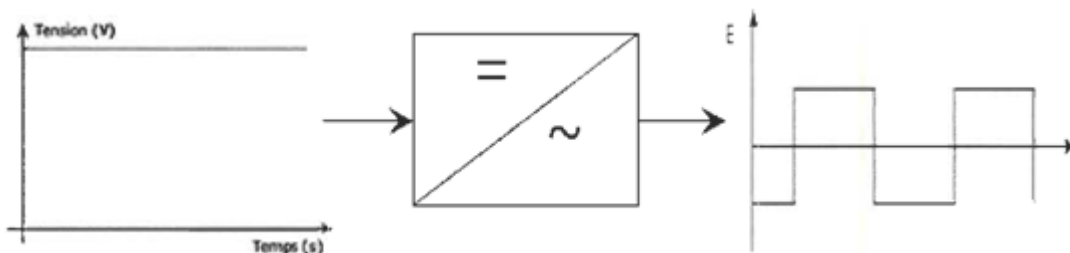


Figure III-3: Symbole et signal d'un onduleur

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 .

Quand S₁, S₄ sont fermés (On) et S₂, S₃ sont ouverts (Off) pour $0 < t < T$, on obtient une alternance positif $U(1)=V$

Comme la montre la figure 3.4 ci-dessous :

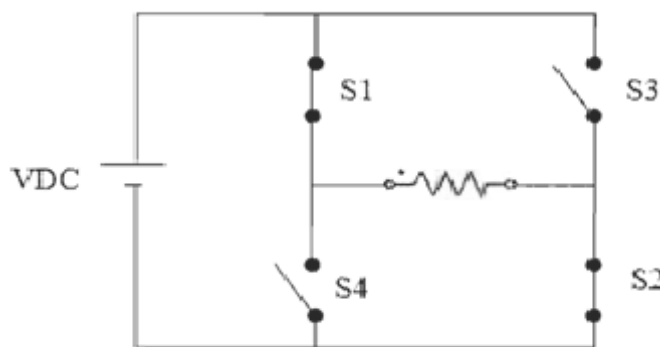


Figure III-4 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demi-cycle

Quand S₁, S₄ sont ouverts (Off) et S₂, S₃ sont fermés (On) pour $T < t < 2T$, on obtient une alternance négative $U(2)=-V$ comme la montre la figure 3.5:

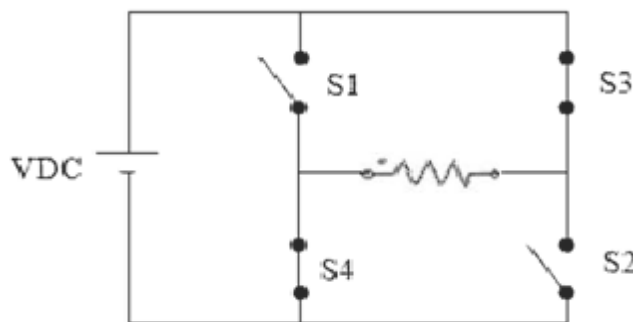


Figure III-5 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2ème demis cycle

Pour obtenir le signal résultant sur la période complète qui est présentée sur la figure 3.6 :

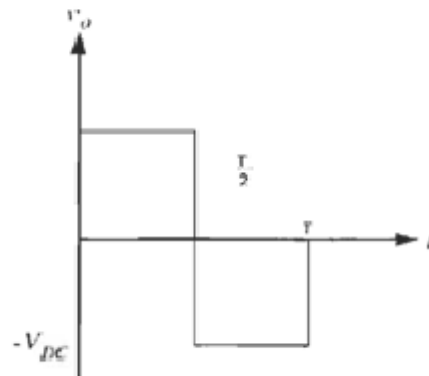


Figure III-6 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans la période complète

III.9 Classification des onduleurs

Il existe plusieurs schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées.

Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

III.2.1 Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutation sont imposés par des circuits externes. La charge est quelconque. Cet onduleur n'est pas réversible.

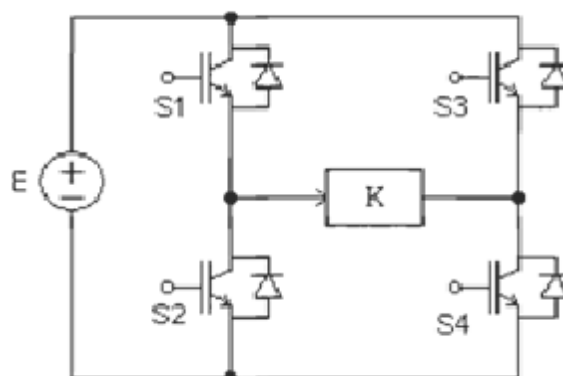


Figure III-7 Onduleur autonome

III.9.2 Onduleur non autonome

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est "naturelle" contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour

moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables.

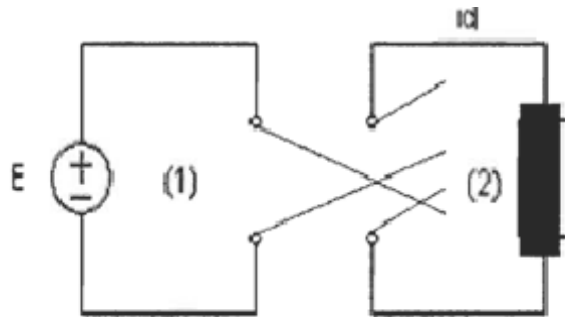


Figure III-8 Onduleur non autonome

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé de la figure 3.11, il est à noter que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires.

En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons obtenir les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit :

$$\begin{aligned} V_{An} &= S_1 V_{pv} \\ V_{Bn} &= S_2 V_{pv} \\ V_{Cn} &= S_3 V_{pv} \end{aligned}$$

(3.2) Où S_1 , S_2 et S_3 désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement
Les tensions composées sont :

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} = (S_1 - S_2)V_{pv} \\ V_{BC} &= V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} - V_{CN} = (S_2 - S_3)V_{pv} \\ V_{CA} &= V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} - V_{AN} = (S_3 - S_1)V_{pv} \end{aligned}$$

On peut écrire l'équation (2.3) sous la forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$$

Les tensions simples sont :

$$V_{AN} = \frac{2}{3}V_{AN} - \frac{1}{3}(V_{BN} + V_{CN})$$

$$V_{BN} = \frac{2}{3}V_{BN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{CN})$$

$$V_{CN} = \frac{2}{3}V_{CN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{BN})$$

$$\begin{pmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{pmatrix} = \frac{V_{PV}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$$

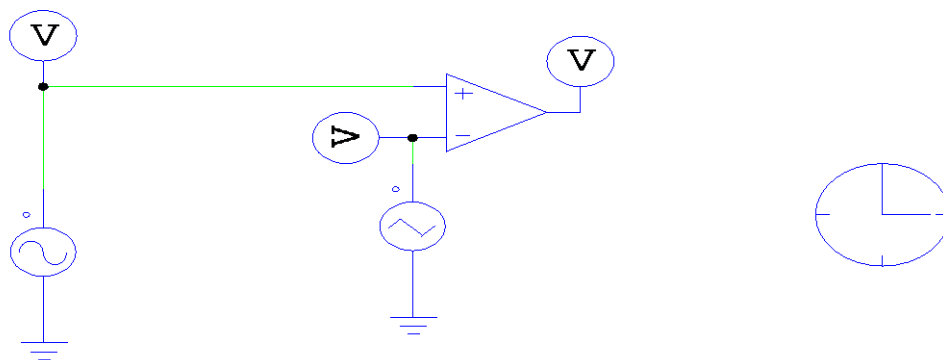
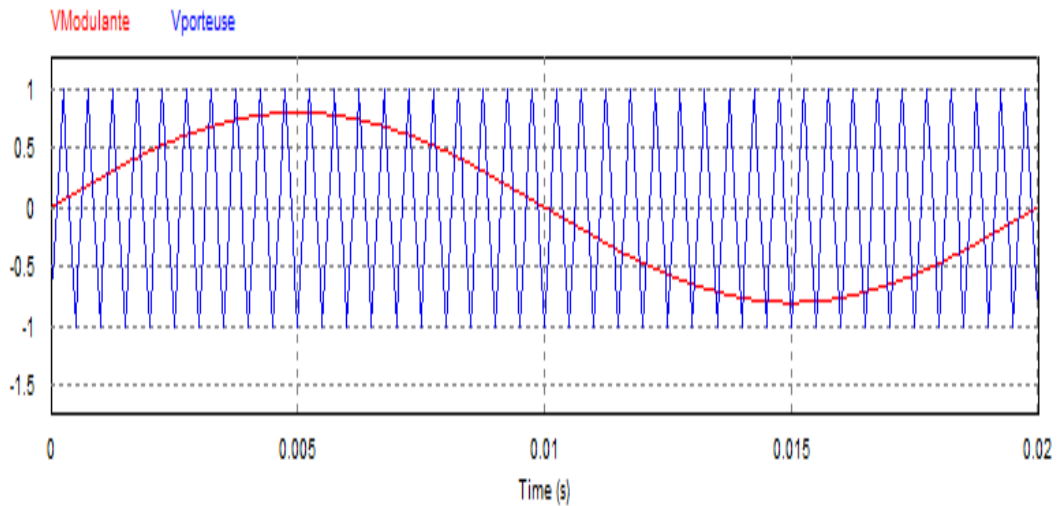
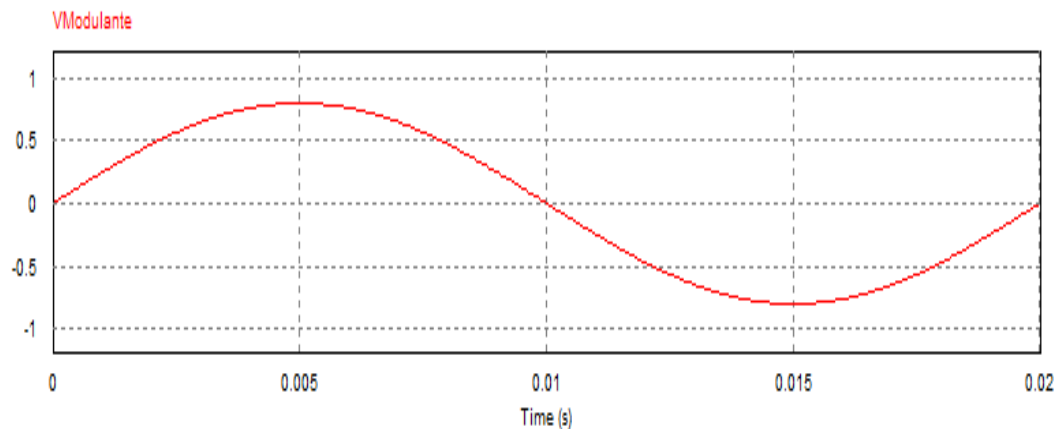
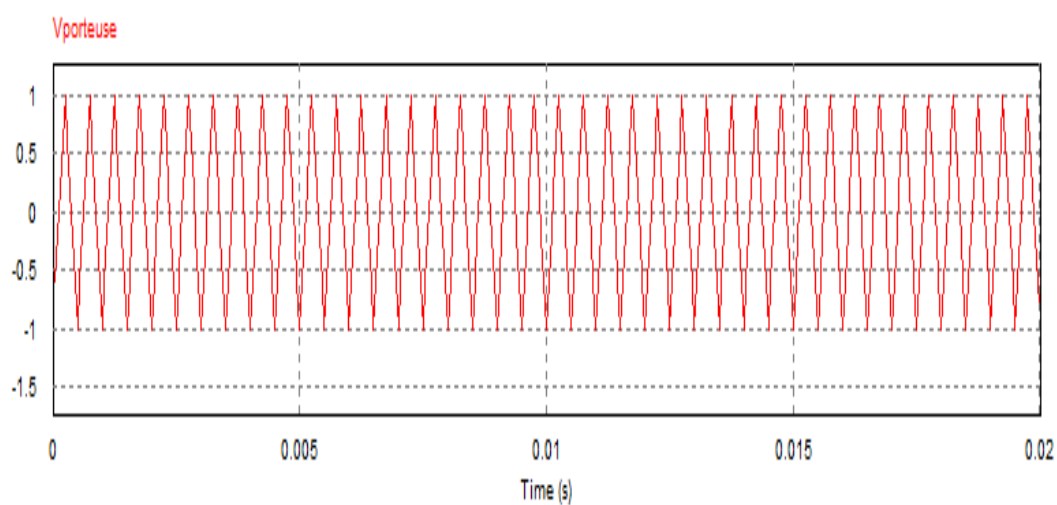
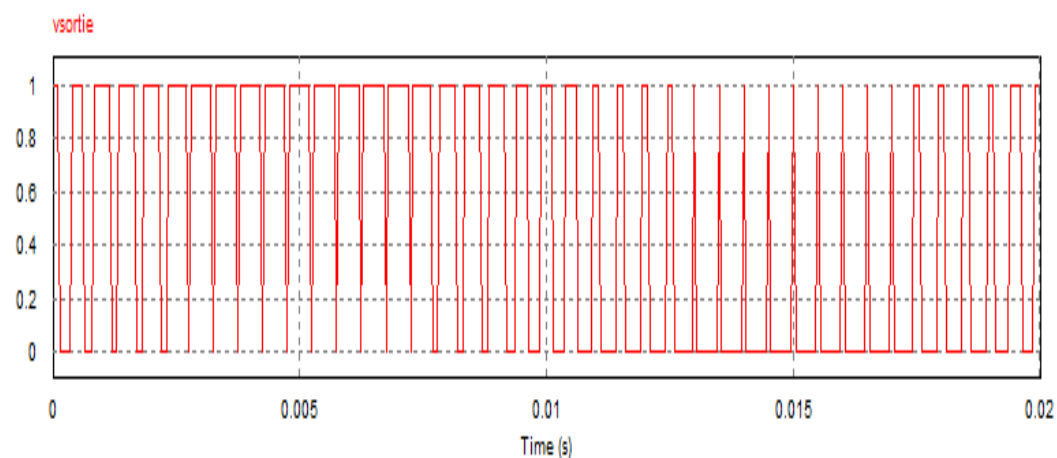
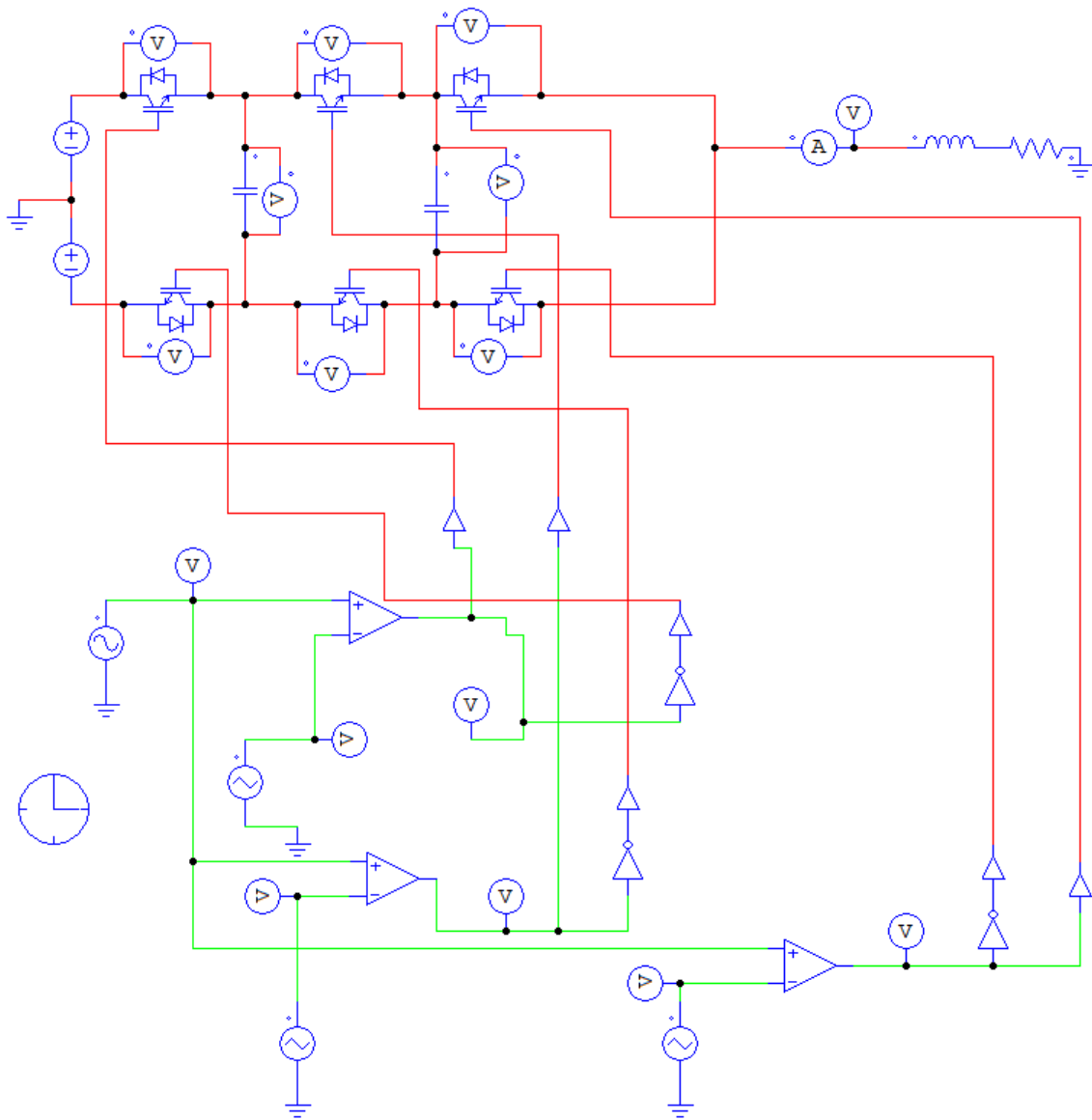
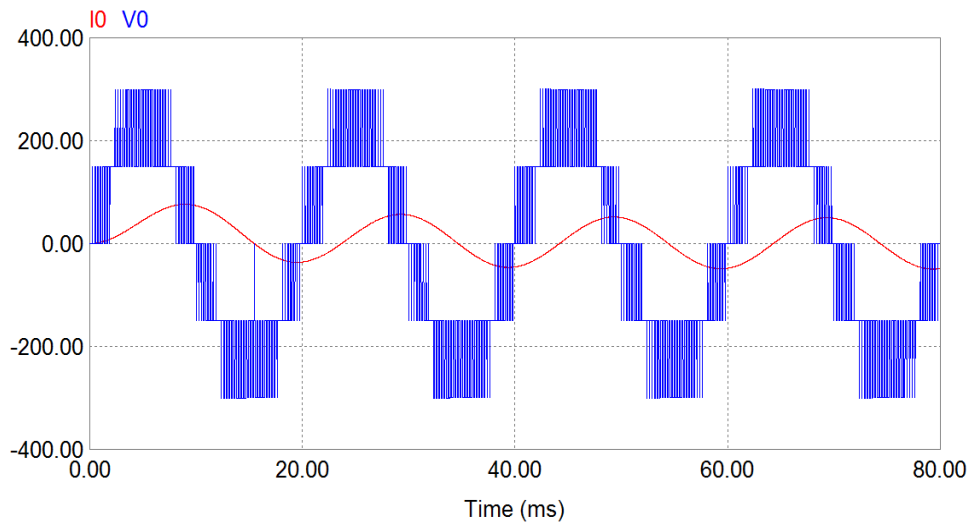
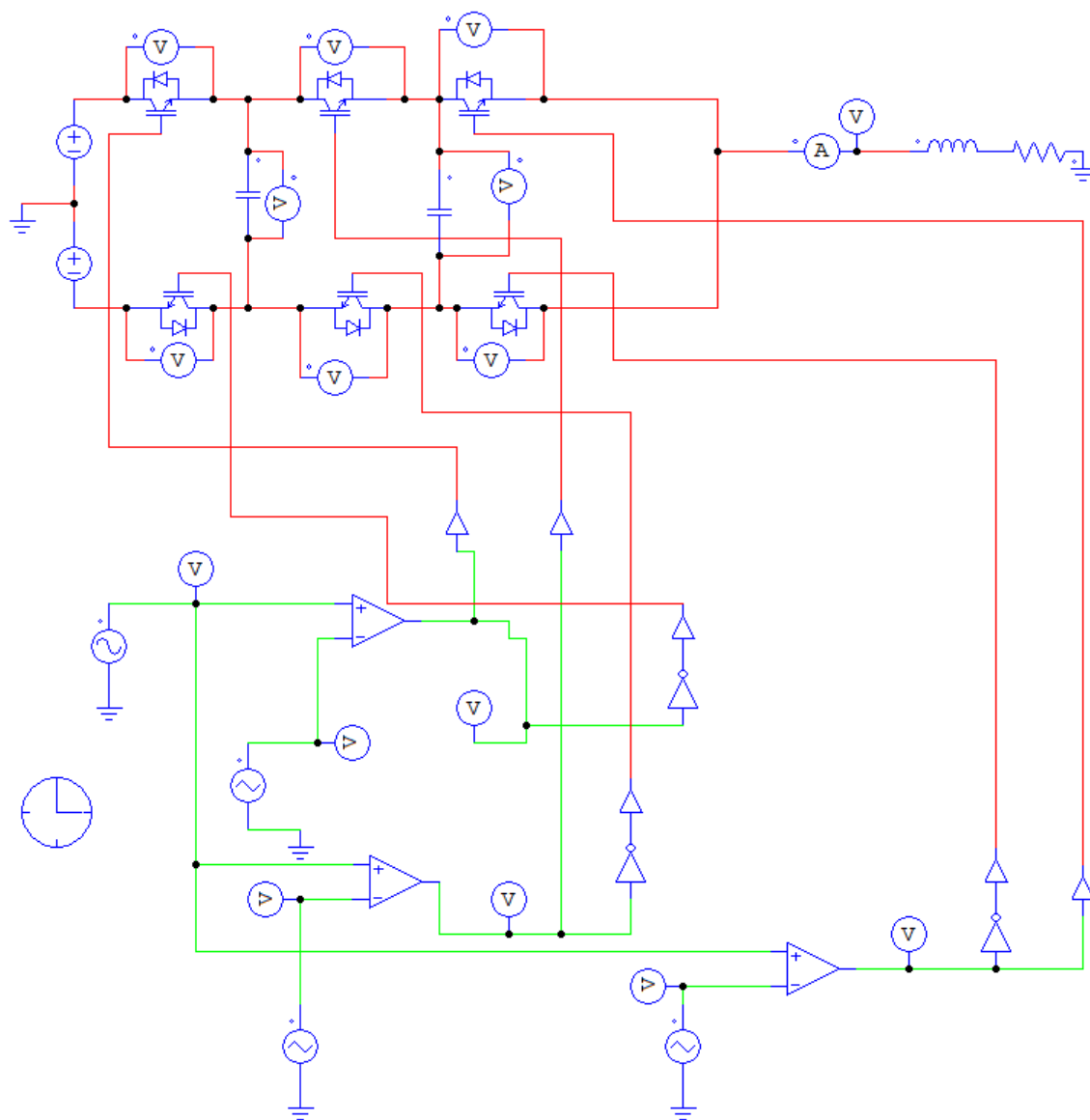


Figure III-9 Circuit MLI Sinus triangulaire

**Figure III-10. Modulante****Figure III-11. Porteuse triangulaire****Figure III-12. Signaux MLI**





Conclusion général

Conclusion général

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 principales 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.

Pour clore notre travail, j'espère que cette étude fera l'objet d'une réalisation expérimentale avec des circuits et pour un futur travail de recherche, nous pouvons proposer toute autre topologie de convertisseur qui permet d'aboutir exploitable et robuste.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Martin AIMÉ. *Évaluation et optimisation de la bonde passante des convertisseurs statiques : Application aux nouvelles structures multicellulaire*. Thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [2] Rédha BENSAID. *Observateur des tensions aux bornes des capacités flottantes pour les convertisseurs multicellulaires série*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2001.
- [3] Philippe CARRERE. *Etude et réalisation des convertisseurs multicellulaire série à IGBT : Equilibrage des condensateurs flottants*. Thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1996.
- [4] Alain DONZEL. *Analyse géométrique et commande active sous observateur d'un onduleur triphasé à structure multicellulaire série*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000.
- [5] Khoukha IMARAZENE. *Application des réseaux de neurones à la commande par élimination d'harmoniques des onduleurs multiniveaux*. Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Alger, 2005.
- [6] Guillaume GATEAU. *Contribution à la commande des convertisseurs multicellulaires série*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1997.
- [7] Miguel F. Escalante GUTIERREZ. *Contribution à la définition de structures optimales d'onduleurs pour la commande de machines à courant alternatif par DTC*. Thèse doctorat, Ecole Supérieur d'Electricité, 2001.
- [8] Régis RUELLAND. *Apport de la co-simulation dans la conception de l'architecture des dispositifs de commande numérique pour les systèmes électriques*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2002.
- [9] Fazel SEYED SAEED. *Investigation and comparison of multilevel converters for medium voltage applications*. Thèse de doctorat, Université Technique de Berlin, 2007.
- [10] Oliver TACHON. *Commande découplante linéaire des convertisseurs*

Bibliographie

multicellulaire série. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, 1998.