

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة بجاية  
Tasdawit n'Bgayet  
Université de Béjaïa

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

*En vue de l'obtention du diplôme de master  
en électrotechnique*

OPTION : Energie Renouvelable

THÈME :

***ETUDE PAR SIMULATION D'UN CONVERTISSEUR  
MATRICIEL INDIRECTE***

Réalisé par :

-CHABOUR Aghylas

-KHETTAL Soufiane

Encadré par :

M<sup>r</sup>: -ALOUI Loucif

*Promotion 2015-2016*

## Remerciement

---

*Grace à Allah le tout puissant, Ce travail a pu être terminé.*

*Nous tenons vivement à exprimer nos profondes gratitude à notre promoteur Mr ALOUI Loucif de nous avoir confié et diriger ce projet.*

*Nos remerciements s'étendent aussi aux membres du jury pour avoir accepté de nous consacrer une partie de leurs temps afin d'examiner et de juger notre travail.*

*Enfin, que tous les enseignants ayant participé à notre formation tout au long du cycle de nos études voient ici notre profonde reconnaissance. Et tout le groupe d'énergie renouvelable avec lequel on a partagé des très bons moments.*

## Dédicace

---

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents

A mes grands parents

A mes deux frères Samir et Nassim

A ma sœur Houa et sa petite famille

A tout ma famille tante et oncle

A tout mes amis en particulier KETIR Samir

A mon binôme Soufiane

A ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études

**Aghylas**

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents

A mes frères zayede , nabil et kherdine

A mes sœurs

A tout ma famille

A tout mes amis en particulier ZIDANE et Tariq

A ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études

**Soufiane**

# SOMMAIRE

# SOMMAIRE

**Notation**

**Liste des figures**

**Liste de tableaux**

**Introduction générale .....1**

## **Chapitre 1 : Généralités sur les convertisseurs matriciels**

**Introduction .....2**

**1.1.État de l'art..... 2**

**1.2. Définition de convertisseur matriciel ..... 4**

**1.3. Avantage des convertisseurs matriciels ..... 4**

**1.4. Inconvénients de convertisseur matriciels ..... 4**

**1.5. Topologie du convertisseur matriciel .....5**

**1.6. Caractéristiques d'un Convertisseur matriciel .....5**

**1.7. Structure du convertisseur matriciel .....6**

**1.8. Fonctionnement du convertisseur matriciel .....7**

**1.9. Protection du convertisseur matriciel .....8**

**1.10. Techniques de commande du convertisseur matriciel.....9**

**1.10.1. Modulation de Venturini.....9**

**1.10.2. Modulation vectorielle .....9**

<b>1.11. Différentes topologies du convertisseur matriciel.....</b>	<b>9</b>
<b>1.11.1. Le convertisseur matriciel direct.....</b>	<b>9</b>
<b>1.11.2. Convertisseur matriciel indirect.....</b>	<b>10</b>
<b>1.11.2.1. Structure du convertisseur matriciel indirecte .....</b>	<b>11</b>
<b>1.11.2.2. Avantage des convertisseurs matriciels indirects .....</b>	<b>11</b>
<b>1.11.2.3 .Autres topologies de l'IMC .....</b>	<b>12</b>
<b>A- Convertisseur Matriciel "Creux" .....</b>	<b>12</b>
<b>B- Le convertisseur Matriciel "très Creux" .....</b>	<b>12</b>
<b>C- Le convertisseur Matriciel "ultra creux" .....</b>	<b>13</b>
<b>D- Le convertisseur Matriciel "a étage inverseur" .....</b>	<b>14</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>15</b>
 <b>Chapitre 2 : modélisation et commande du convertisseur matriciel</b>	
<b>Introduction.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1. Méthode de Venturini.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.1. Définition de la méthode .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2. Principe de la méthode venturini .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2. Etude de convertisseur matricielle indirecte .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.1. Principe de fonctionnement du convertisseur matriciel indirect.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2. L'interrupteur bidirectionnel .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.3. Vecteurs spatiaux de CMI.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3. Commande SVM du CMI .....</b>	<b>23</b>

## Sommaire

---

2.3.1. Commande de l'étage redresseur .....	23
2.3.2. Commande de l'étage onduleur.....	28
2.4. Commande du convertisseur matriciel .....	34
Conclusion.....	35
<b>Chapitre 3 : Simulation d'un convertisseur matriciel</b>	
Introduction .....	36
3.1. Schéma bloc de simulation .....	36
3.2. Considération sur la simulation .....	36
3.3. Résultats de simulation .....	37
3.3.1. Résultat de simulation pour l'alimentation.....	37
3.3.2. Etage redresseur .....	39
3.3.3. Etage onduleur .....	40
3.4. Schéma bloc de simulation avec charge R-L .....	42
Conclusion .....	45
Conclusion générale .....	46
<b>Annexe</b>	
<b>Bibliographie</b>	

# NOTATION

### Principales notation et abréviation

$Q$  : le rapport de transformation entre la tension d'entrée et de sortie du convertisseur matriciel.

$W_E$  et  $W_S$  : Pulsation d'entrée et de sortie respective du convertisseur matriciel.

$W_M$  : Pulsation moyenne.

$V_E$  : Valeur crête de la tension d'entrée.

$V_S$  : Valeur crête de la tension de sortie.

$V_{EM}, I_{SM}$  : Amplitudes de la tension d'entrée et du courant de sortie respective du convertisseur matriciel.

$U_{AB}, U_{BC}$  : Tension composées d'entrée.

$\phi_S$  : Déphasage entre la tension et le courant de sortie.

$\phi_E$  : Déphasage entre la tension et le courant d'entrée.

$U_X \quad U_Y \quad U_Z$  : Tension de sortie

$I_X \quad I_Y \quad I_Z$  : Courant de sortie

$U_A \quad U_B \quad U_C$  : Tension d'entrée

$I_A \quad I_B \quad I_C$  : Courant d'entrée

$k_{31}, K_{32}, K_{33}$  : triple harmonic termes.

$I_{in}$  : Vecteur courant de référence.

$I_{im}$  : Amplitude

$m_R$  : L'indice de modulation du redresseur.

$\theta_{in}$  : L'angle du vecteur courant de référence dans le secteur actuel ou se trouve celui-ci.

## Notation

---

$I_\gamma$  Et  $I_\delta$  : vecteurs actifs Adjacents

$d_\gamma$  Et  $d_\delta$  : rapports cycliques

$T_{sw}$  : Période de commutation

$d_\gamma^R, d_\delta^R$  : Rapports cycliques ajustés de l'étage redresseur.

$V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$  : Les tensions des sortie de l'onduleur.

$V_{out}$  : Vecteur tension de référence.

$V_{om}$  : Amplitude.

$\theta_{out}$  : L'angle du vecteur tension de référence.

$m_1$  : L'indice de modulation du l'onduleur.

$d_\alpha, d_\beta$  et  $d_0$  : rapports cycliques.

$V_\alpha, V_\beta$  : Vecteurs spatiaux adjacents.

$V_0$  : Vecteur de tension nul.

$V_{cd}$  : Tension continu fictive.

$I_{dc}$  : Courant fictif d'entrée.

$\partial$  : Orientation spatial.

R : résistance.

L : inductance.

(I1 I2 I3 ) : courant de charge R-L.

# LISTES DES FIGURES



## LISTE DES FIGURES

### Chapitre 1 : généralités sur les convertisseurs matriciels

Figure 1.1 : structure du convertisseur matriciel .....	5
Figure 1.2 : Structure d'un Convertisseur matriciel triphasé-triphasé idéal .....	6
Figure 1. 3 : Le schéma de principe du convertisseur matriciel .....	7
Figure 1.4 : Circuit de protection d'un convertisseur matricielle .....	8
Figure 1.5 : schéma de convertisseur matriciel direct .....	10
Figure 1. 6 : Structure du convertisseur matricielle indirecte.....	11
Figure 1.7 : Convertisseur matriciel Creux.....	12
Figure 1.8 : Le Convertisseur matriciel très creux .....	13
Figure 1. 9 : Convertisseur matriciel ultras creux.....	13
Figure1.10 Le convertisseur matriciel a étage inverseur .....	14

### Chapitre 2 : modélisation et commande du convertisseur matriciel

Figure 2.1 : Convertisseur matricielle indirecte.....	20
Figure 2.2 : montage a pont de diode .....	21
Figure 2.3 : montage a émetteurs commun .....	22
Figure 2.4 : montage a collecteur commun.....	22
Figure 2.5:Etage de redresseur de CMI .....	24
Figure 2. 6: (a) Les sept positions du vecteur spatial du courant d'entrée, Et (b) la synthèse d'un vecteur de référence dans un secteur donne .....	25
Figure 2.7: Etage onduleur du CMI .....	28
Figure 2.8: (a) Les sept positions du vecteur spatial de la tension de sortie, (b) et la synthèse du Vecteur de référence dans un secteur donne .....	30
Figure 2.9 : Orientation spatial des trois phases a, b, c .....	32

### Chapitre 3 : simulation d'un convertisseur matriciel

Figure 3.1 : Schéma bloc SIMULINK du modèle de CMI.....	36
Figure 3.2 : l'allure des tensions de phase d'entrée.....	37
Figure 3.3 : l'allure des courants de phase d'entrée.....	37
Figure 3.4 : l'allure de la tension et de courant de phase (A) d'entrée .....	38
Figure 3.5 : spectre harmonique du courant d'entrée pour la phase Va .....	38
Figure 3.6 : tension de bus continu pour étage redresseur .....	39
Figure 3.7 : courant de référence pour l'étage redresseur.....	40
Figure 3.8 : tension a la sortie de l'onduleur pour la phase Vsa .....	40
Figure 3.9 : spectre harmonique de tension a la sortie de l'onduleur pour la phase Vsa .....	41
Figure 3.10: tension a la sortie de l'onduleur pour la phase Vsa après zoom .....	41
Figure 3.11 : tension de référence pour l'étage onduleur .....	42
Figure 3.12 : Schéma bloc SIMULINK de CMI avec une charge R-L .....	42
Figure 3.13 : courant de charge de sortie de phase .....	43
Figure 3.14 : spectre harmonique de courant de charge de sortie I1 .....	44
Figure 3.15 : les trois courants de charge .....	44
Figure 3.16 : l'allure de courant Idc .....	45

# LISTE DES TABLEAUX

## LISTE DES TABLEAU

### CHAPITRE 1 :

Tableau 1.1 : Résumé des différentes topologies .....	14
---	----

### CHAPITRE 2 :

Tableau 2.1 : Les combinaisons possibles des interrupteurs de l'étage redresseur (1=actif, 0=inactif) .....	25
---	----

Tableau 2.2 : Commutation possible pour l'étage onduleur (1=actif, 0=inactif .....	29
--	----

Tableau 2.3 : résultat des vecteurs de base .....	33
---	----

# INTRODUCTION

## GENERALE

# Introduction générale

Dans ce projet de recherche nous présentons une étude sur le convertisseur matriciel et ces différents avantages et inconvénient ainsi que son fonctionnement et ses caractéristiques, sa structure et sa protection.

Le convertisseur matriciel est une matrice dont les éléments sont des interrupteurs bidirectionnels arrangée et que chaque ligne de sortie du convertisseur peut être connectée à n'importe quelle ligne d'entrée en évitant le court circuit des lignes d'entrée et le circuit ouvert des lignes de sortie. L'entrée du convertisseur matriciel est considérée comme une source de tension et la sortie comme une source de courant triphasée. Le fonctionnement même du convertisseur matriciel est basé sur la commutation forcée entre les phases d'entrée et l'une des phases de sortie, et le convertisseur matriciel possède plusieurs qualités opérationnelles dont quelques unes sont mises en évidence. Le courant de charge est sinusoïdal et le courant de source ne contient que d'harmoniques d'ordre élevé.

Plusieurs stratégies et technique de modulation existent et sont réparties en deux classes : modulation de venturini et modulation vectoriel

La modulation de Venturini correspond à une résolution mathématique de la matrice des rapports cycliques. Et l'autre modulation synthétise les tensions de sortie à partir des tensions d'entrée et les courants d'entrée des courants de sortie et à séparer entre les deux commandes : le redresseur et l'onduleur, en utilisant la stratégie de modulation vectorielle.

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les convertisseurs matriciels, le second traitera la modélisation et la commande, et enfin le dernier sera consacré à la simulation sous MATLAB/SIMULINK.

Chapitre *I*

GENERALITES

SUR

LE

CONVERTISSEUR

MATRICIEL

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

---

## Introduction

Le convertisseur matriciel est un convertisseur direct de puissance CA/CA constitué exclusivement de semi-conducteurs. Il est également connu sous les noms de convertisseur direct de fréquence (CDF) et de cycloconvertisseur à commutation forcée. Cette solution, dite 'tout silicium', pour la conversion CA-CA, définit une structure matricielle où chaque phase de sortie est reliée à l'une des phases d'entrée par l'intermédiaire d'un réseau d'interrupteurs bidirectionnels. Les ondes de sortie, qui varient en fréquence et en amplitude, sont construites selon un principe d'échantillonnage des signaux d'entrées.

Le convertisseur matriciel possède plusieurs qualités opérationnelles dont quelques unes sont mises en évidence. Le courant de charge est sinusoïdal et le courant de source ne contient que des harmoniques d'ordre élevé, multiples de la fréquence d'échantillonnage. Il permet le réglage du facteur de déplacement du courant de source, ce qui revient à réduire la consommation de puissance réactive et par conséquent à optimiser la dimension et la puissance des équipements installés. L'utilisation d'interrupteurs bidirectionnels permet au flux de puissance de circuler de la source vers la charge et inversement de la charge vers la source. L'un des aspects les plus importants du convertisseur matriciel est qu'il ne nécessite pas d'élément réactif encombrant, lourd et susceptible de défaillance. Pour ces raisons, les industries aéronautique et militaire portent un grand intérêt à ce convertisseur.

## 1.État de l'art

Le concept du convertisseur matriciel fut décrit pour la première fois en 1976. L.Gyugi et B.Pelly proposent la réalisation d'un convertisseur direct, utilisant uniquement des interrupteurs bidirectionnels disposés selon une matrice d'interconnexion. Ils expliquent également le principe de construction de l'onde de sortie.

En 1980, M. Venturini et A.Alesina mentionnent pour la première fois le nom du convertisseur matriciel. Ils décrivent le circuit du convertisseur, en font l'analyse et définissent le concept de matrice de modulation. Ils élaborent un algorithme de commande permettant de calculer les temps de conduction des interrupteurs en fonction de la forme de l'onde de sortie désirée.

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

---

À partir de 1983, toute une série de travaux concernant l'analyse et la commande du convertisseur matriciel a été publiée. J.Rodriguez introduit le concept de lien à courant continu fictif afin d'introduire les commandes à base de MLI, celles-ci étant bien répandues dans la commande des convertisseurs CA-CC/CC-CA usuels. Les méthodes basées sur l'approche du lien fictif sont nommées « méthodes indirectes ».

En 1985, J.Rodriguez et G.Kastner présentent l'analyse du convertisseur matriciel en utilisant la notion de vecteur d'espace. L.Huber et D.Borojevic élaborent, quatre ans plus tard, une commande par modulation du vecteur d'espace.

Parallèlement, en 1987 et en 1989, G.Roy et G.E.April développent un nouvel algorithme scalaire de commande. Plus pratique que celui de Venturini, il permet d'obtenir des résultats sensiblement similaires. La détermination des temps de fermeture, à partir des valeurs instantanées mesurées à l'entrée et à la sortie du convertisseur, conduit à une modulation plus robuste mais nécessite un processeur de calcul rapide.

D'autres travaux sur l'élaboration d'algorithmes de commande ont également été réalisés et peuvent être classés en deux familles : algorithmes scalaires et algorithmes vectoriels.

Depuis 1990, les études menées, ont surtout visé à optimiser les performances des systèmes électromécaniques alimentés via un convertisseur matriciel, à réduire le nombre de semi-conducteurs utilisés dans le convertisseur et à apporter des solutions aux inconvénients que présente un convertisseur matriciel, à savoir la limitation du ratio de tension, et le fonctionnement en régime déséquilibré.

L'un des points déterminant pour assurer l'avenir commercial du convertisseur matriciel réside dans la résolution des problèmes rencontrés lors de la commutation entre deux cellules. Pour assurer un fonctionnement fiable et robuste, des méthodes dites « par étapes » ont vu le jour : par la modification à l'algorithme de commande, ces méthodes réalisent la commutation en passant par des états qui ne comportent pas de court-circuit ou de circuit ouvert.

Présentement, Les convertisseurs matriciels sont toujours dans une phase de développement et suscitent de plus en plus d'intérêt dans la conversion CA/CA à cause de la puissance spécifique élevée du dispositif et de la souplesse de sa commande.

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

---

Les prochaines étapes de son évolution miseront sur l'amélioration de sa fiabilité, la réduction des coûts de fabrication et l'élaboration d'un véritable élément semi-conducteur bidirectionnel [1].

## 2.1 Définition de convertisseur matriciel

Les convertisseurs matriciels (qui sont aussi des cyclo-convertisseurs à commutation forcée) consistent en une matrice dont les éléments sont des interrupteur bidirectionnels arrangés de telle sorte que chaque ligne de sortie du convertisseur peut être connectée à n'importe quelle ligne d'entrée, tout en évitant le court-circuit des lignes d'entrées et l'ouverture du circuit des lignes de sorties.

Le convertisseur matriciel a plusieurs avantages par rapport aux structures traditionnelles. Il est fondamentalement bidirectionnel, donc il renvoie l'énergie vers la source. Il permet aussi d'avoir des courants sinusoïdaux à l'entrée. La taille peut être réduite en comparaison avec les structures conventionnelles puisque il n'est plus nécessaire de grandes capacités ou d'inductances pour emmagasiner de l'énergie réactive.

## 3. Avantage des convertisseurs matriciels

- Une large gamme de variation de la fréquence
- Un spectre de fréquence faible pour les grandeurs d'entrée aussi bien que pour les grandeurs de sortie
- Le facteur de puissance à l'entrée peut être amélioré, de plus il peut être imposé par la commande.
- Possibilité de travailler dans les deux sens donc dans les quatre quadrants du plan tension courant, ce qui permet d'avoir le fonctionnement moteur, aussi bien le fonctionnement générateur

## 4. Inconvénients de convertisseur matriciels

- Commande complexe.
- Difficulté d'isolation galvanique.
- Coût élevé.

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

## 5. Topologie du convertisseur matriciel

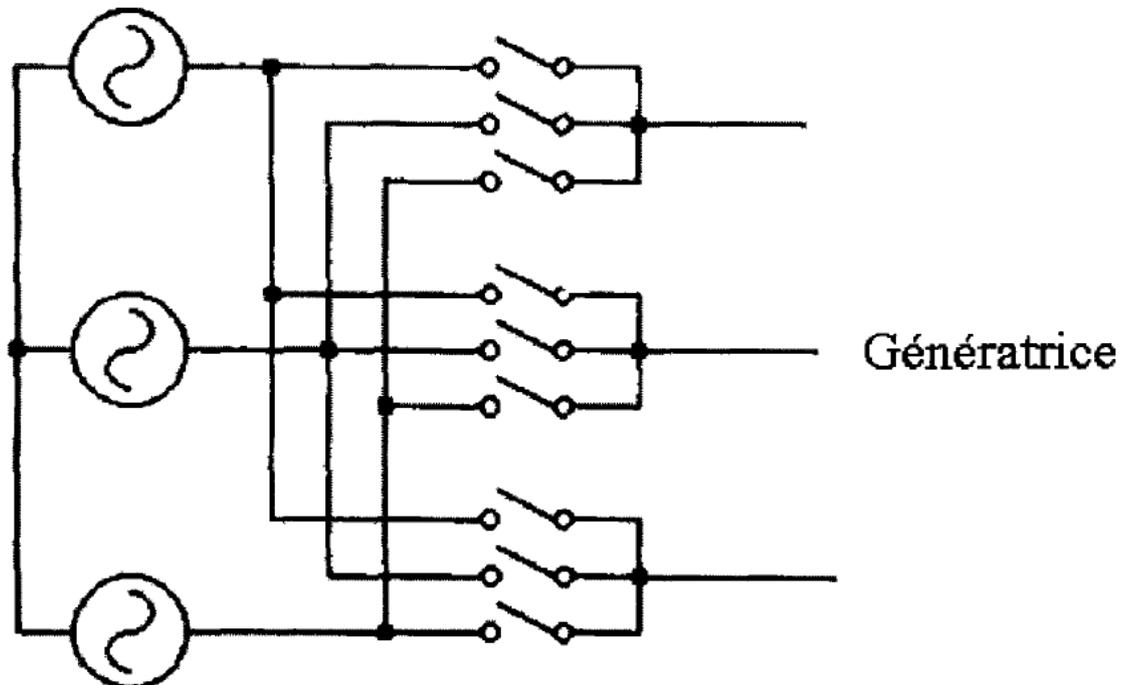


Figure 1.1 : structure du convertisseur matriciel

L'idée fondamentale du convertisseur matriciel est la suivante : Considérant le réseau (entrée) comme une source de tension et la sortie comme une source de courant triphasée. En reliant correctement les bornes de sortie du convertisseur aux bornes d'entrée, on peut imposer le courant d'entrée ainsi que la tension de sortie à la fréquence désirée.

Afin de protéger le convertisseur, les deux règles suivantes de commande doivent être satisfaites: on ne doit jamais permettre à deux (ou trois) commutateurs dans un bras de sortie d'être fermés en même temps. Toutes les trois phases de sortie doivent être reliées en tout temps à l'une des phases d'entrée [2].

## 6. Caractéristiques d'un Convertisseur matriciel

Le convertisseur matriciel effectue une conversion AC/AC de manière directe, c'est-à-dire sans étage de stockage comme dans un convertisseur MLI, ce qui le rend plus fiable. De plus, il absorbe les courants sinusoïdaux provenant du réseau sans consommer de puissance réactive, ce qui permet de

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

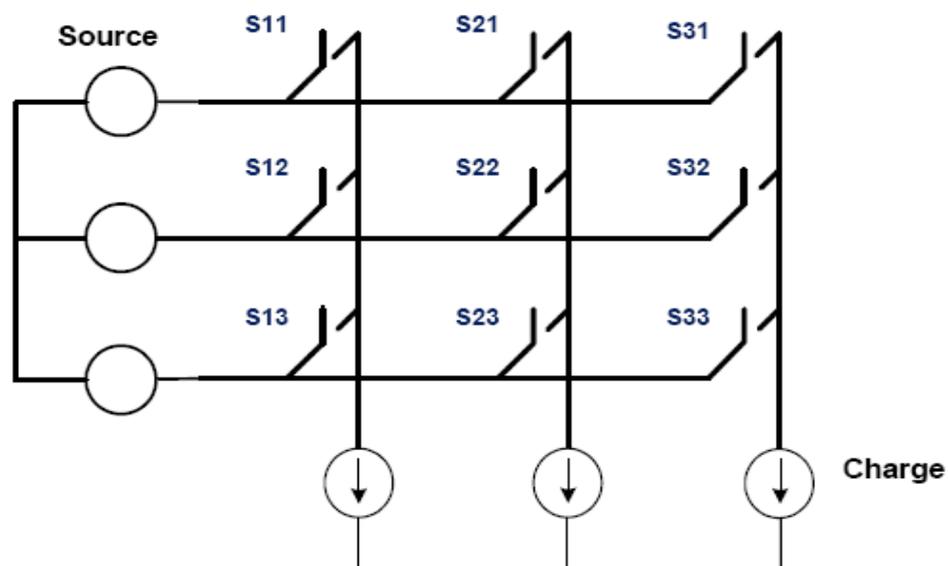
garder un facteur de puissance unitaire. Il permet d'obtenir en sortie des grandeurs sinusoïdales avec une fréquence et une amplitude réglables.

Le convertisseur matriciel est connecté directement au réseau, qui est une source de tension, et sa sortie ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ) est connectée à une source de courant comme un moteur électrique qui est de nature inductive. Il y a ainsi le respect de l'alternance des sources.

La commande électronique du convertisseur doit le protéger contre le court-circuit et les surtensions. Une ou plusieurs sources de tensions peuvent être associée(s) à une ou plusieurs source(s) de courant [3].

## 7. Structure du convertisseur matriciel

La plupart des convertisseurs matriciels sont triphasés-triphasés, ils associent généralement le réseau triphasé (source de tension) à un moteur (source de courant). Ils sont alors constitués de neuf interrupteurs bidirectionnels en courant et en tension connectés de manière à ce que n'importe quelle phase de la source puisse être connectée à n'importe quelle phase de la charge. La **figure1.2** donne la représentation d'un convertisseur matriciel associant trois sources de tensions à trois sources de courants à l'aide d'interrupteurs idéaux. La structure étant parfaitement symétrique et le fonctionnement complètement réversible, il n'y a pas, à proprement parler, d'entrée et de sortie pour ce convertisseur. Ces termes pourront cependant être utilisés pour désigner respectivement le côté réseau (source de tension) et le côté charge (source de courant –moteur [4].



**Figure 1.2** : Structure d'un Convertisseur matriciel triphasé-triphasé idéal

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

## 8. Fonctionnement du convertisseur matriciel

Le fait que la structure du convertisseur matriciel ne contient que des semi-conducteurs, rend ce dispositif vulnérable aux surtensions ou aux surintensités. Afin d'assurer un fonctionnement sûr du convertisseur matriciel, il est nécessaire d'ajouter des éléments réactifs qu'on retrouve dans les circuits auxiliaires comme le filtre d'entrée, le circuit d'écrêtage et le circuit de mise sous tension. Et son fonctionnement est basé sur la commutation forcée « dure » entre les phases d'entrée et l'une des phases de sortie. Il est impératif d'installer un filtre entre la source d'alimentation et l'entrée du convertisseur matriciel pour atténuer les effets de cette commutation. Néanmoins, la présence de ce filtre dégrade les performances du convertisseur et réduit notablement son rendement.

Le convertisseur matriciel est une nouvelle topologie de convertisseurs de fréquence directe. Il permet donc d'obtenir un système triphasé de tensions variables en amplitude et en fréquence à partir des tensions fixes du réseau d'alimentation industriel. Ceci est réalisé par une matrice de neuf commutateurs de puissance reliant chaque phase d'entrée (**A**, **B**, **C**) à chaque phase de sortie (**a**, **b**, **c**).

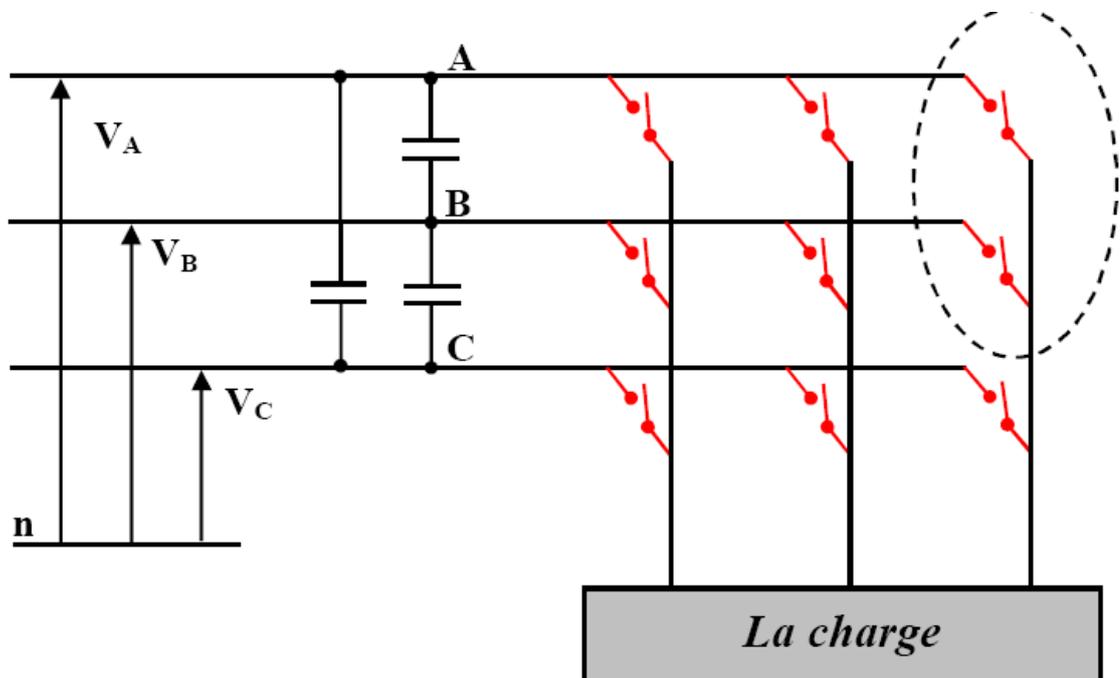


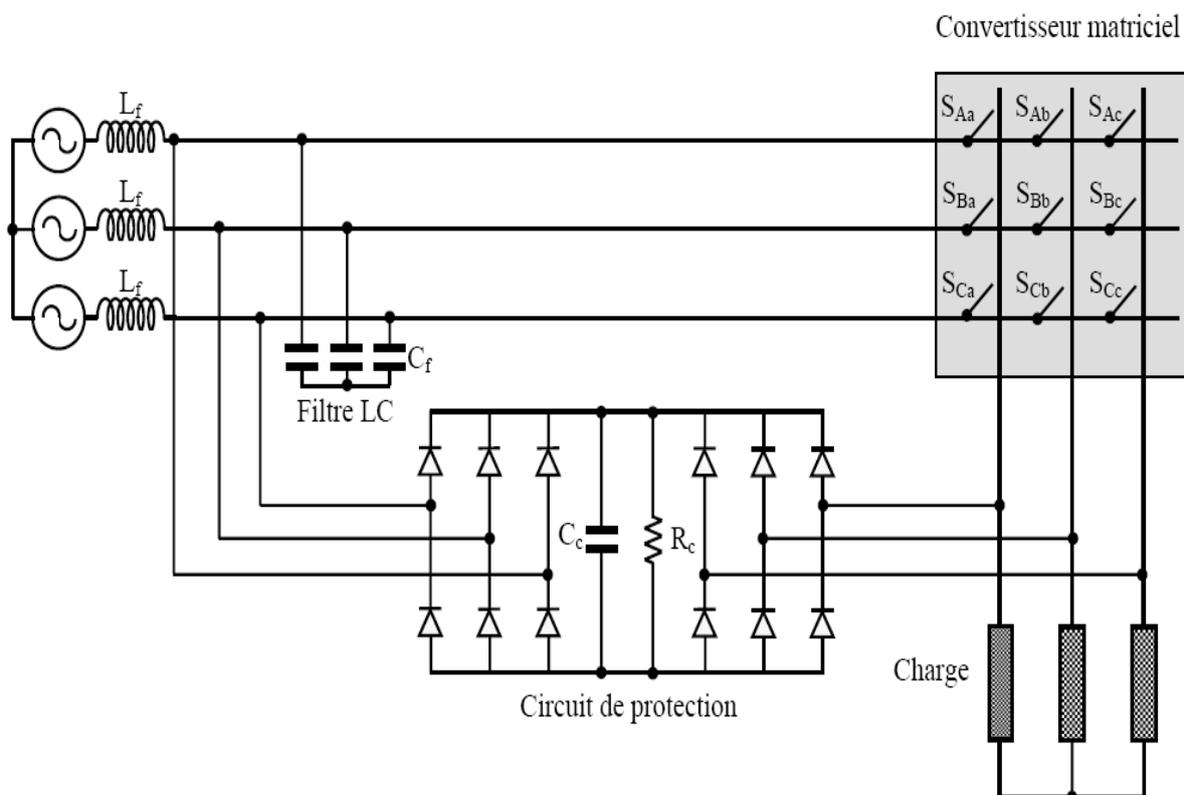
Figure 1.3 : Le schéma de principe du convertisseur matriciel

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

## 9. Protection du convertisseur matriciel

Les stratégies de commutation appliquée au convertisseur matriciel nécessitent la mesure des courants de sortie. Cette mesure se fait soit par capteurs à effet hall soit par shunt. La précision finie des organes de mesure conduit, pour des faibles courants, à une erreur possible sur leur signe, et donc, à des surtensions dues à des ouvertures de ces courants à contre temps. Par conséquent, on peut utiliser un circuit d'écèlement, schématisé par la **figure 1.4** pour protéger le convertisseur contre ces surtensions. Dans ce cas, le pont redresseur à diode lié au réseau charge le condensateur à la valeur crête de la tension composée. Dès que cette valeur devienne supérieure à la valeur crête des tensions composées à la sortie du convertisseur, le pont redresseur relié à la sortie ne conduit pas. Si les tensions de sortie excèdent cette valeur, le pont correspondant relie les bornes de sortie au condensateur et limite la tension à la valeur de la tension aux bornes du condensateur [5].

Ce dispositif d'écèlement destiné aussi bien à protégé le convertisseur contre les surtensions provenant du réseau ou celle venant d'une déconnexion brutale de la charge [5].



**Figure 1.4** : Circuit de protection d'un convertisseur matricielle

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

---

## 10. Techniques de commande du convertisseur matriciel

### 10.1. Modulation de Venturini

La méthode Venturini correspond à une approche mathématique du problème. Elle est basée sur le calcul des temps de connexion de chacune des phases de sorties à chacune des phases d'entrée, de telle manière à assurer une absorption quasi-sinusoïdale des courants d'entrée. Son inconvénient est son gain en tension limité à 0.5, cependant cet obstacle a été surmonté en ajoutant aux références, l'harmonique 3, ce qui a pu augmenter le gain maximal à 0.866.

### 10.2. Modulation vectorielle

La modulation vectorielle consiste à synthétiser les tensions de sortie des tensions d'entrée et les courants d'entrée des courants de sortie et à séparer entre la commande des courants d'entrée et la commande des tensions de sortie, ainsi, on peut représenter le convertisseur matriciel par un circuit équivalent qui comporte un redresseur à l'entrée et un onduleur à la sortie mais sans aucun circuit intermédiaire servant au stockage d'énergie.[6]

## 11. Différentes topologies du convertisseur matriciel

### 11.1. Le convertisseur matriciel direct

Le convertisseur matriciel est une nouvelle topologie de convertisseurs de fréquence directe. Il permet d'obtenir un system émet de tensions variables en amplitude et en fréquence à partir des tensions fixes du réseau d'alimentation industriel. Ceci est réalisé par une matrice d'interrupteurs de puissance bidirectionnels, en courant et en tension, reliant chaque Phase d'entré à chaque phase de sortie. On parle d'une conversion directe de fréquence parce que la conversion est réalisée sans circuit intermédiaire servant à un stockage d'énergie. [6].

Ceci est réalisé par une matrice de neuf (3x3) interrupteurs reliant chaque phase d'entrée à chaque phase de sortie. Le schéma électrique du convertisseur matriciel est montré sur la **figure 1.5** [6].

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

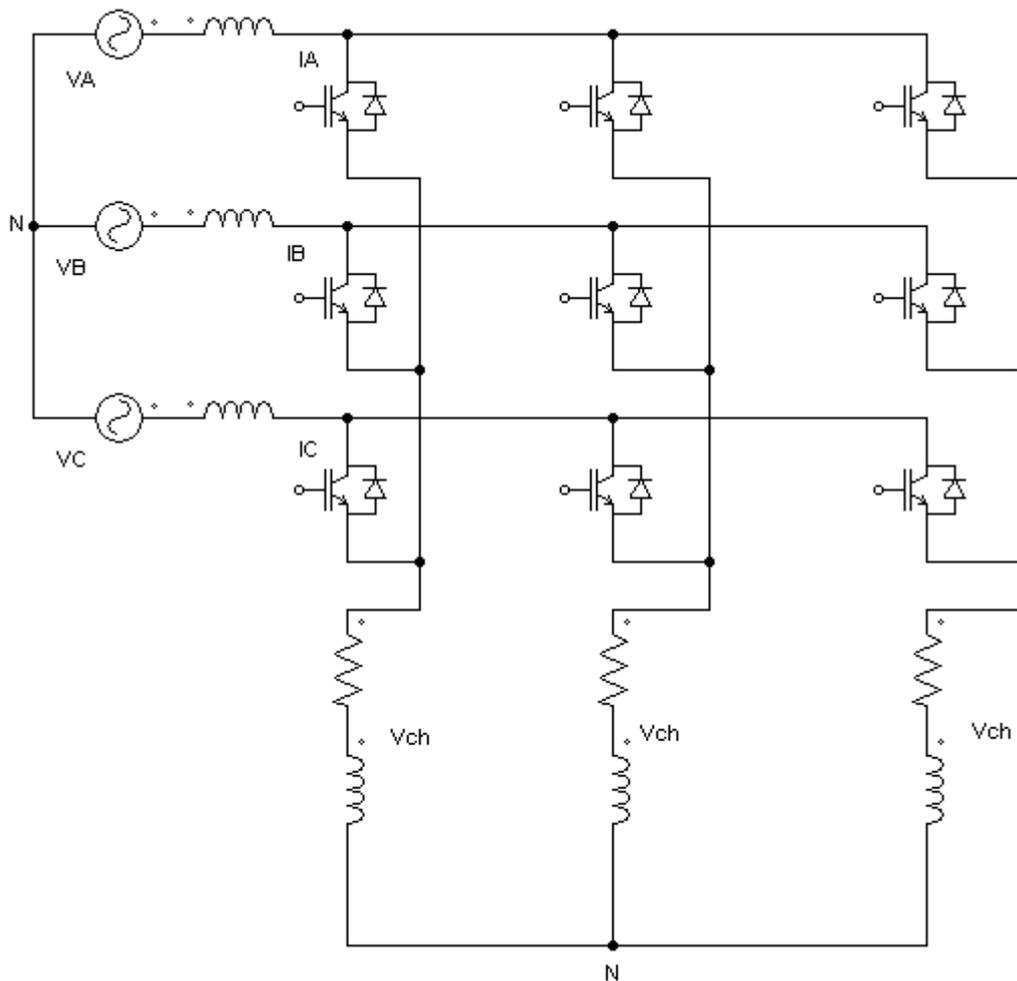


Figure 1.5 : schéma de convertisseur matriciel direct

## Inconvénients des convertisseurs matriciels directs

En effet, les récentes avancées en électronique de puissance ont permis l'émergence du convertisseur matriciel (MC) permettant une conversion directe AC/AC. Jusqu'à présent, l'intérêt pour ce convertisseur était d'une nature plutôt académique et ainsi il existe très peu de produit commercialisé du convertisseur matriciel en adéquation aux efforts fourni dans de nombreux laboratoires de recherche.

Les raisons de cette évolution sont d'une part la complexité élevée de la commande et d'autre part la tension de sortie réduite par rapport aux solutions conventionnelles et autre problème de commutation [6].

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

## 11.2. Convertisseur matriciel indirect

Une autre structure de convertisseur triphasé-triphasé, si une modulation adaptée est utilisée, il n'est pas nécessaire d'utiliser une méthode spécifique pour la commutation.

De plus si l'on considère que les composants sont parfaits, cette structure offre les mêmes performances que la structure directe.

En effet, cette structure ne permet pas de connecter chaque phase de sortie à une phase d'entrée différente, le nombre de vecteur de tension possible en sortie est donc plus faible que pour la structure directe, six configurations possibles avec la structure directe, mais les méthodes de modulation usuelle n'utilisent pas ces configurations.

Cependant, le nombre de composant traversé par le courant est plus grand, les chutes de tensions et les pertes sont donc plus importantes dans la plupart des cas [7].

L'expérience montre aussi que les harmoniques des courants d'entrée sont plus importants avec la structure indirecte qu'avec la structure directe, dans [7], les auteurs imputent ce fait aux imperfections des composants.

### 11.2.1. Structure du convertisseur matriciel indirecte

La conversion indirecte se divise en deux conversions successives, d'abord elle effectue le redressement de la grandeur alternative d'entrée en une grandeur continue au quasi continue qui est ensuite convertie en une grandeur alternative de sortie avec l'amplitude et la fréquence variable, suivant les indications de la Figure (2).

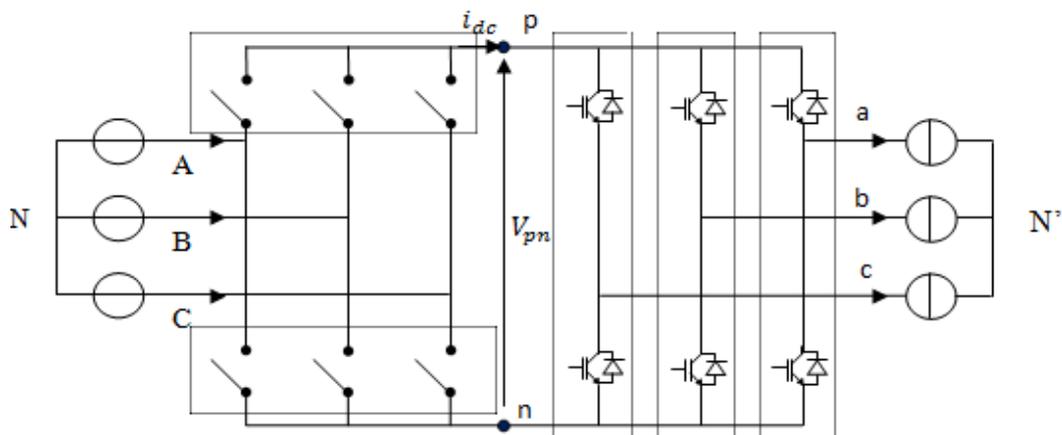


Figure1.6 : structure de convertisseur matriciel indirecte

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

## 11.2.2 Avantage des convertisseurs matriciels indirects

-Le IMC (« indirect matrix converter ») possède les mêmes performances que le convertisseur matriciel classique, à savoir : un bon rapport de tension sortie/entre, fonctionnement en quatre quadrants, facteur de puissance d'entrée unitaire et de forme d'onde sinusoïdale.

-Tous les interrupteurs commutent à courant nul. Par conséquent, ce nouveau convertisseur ne pose plus les problèmes de commutation du convertisseur matriciel direct.

-Ne nécessite pas d'élément supplémentaire de stockage d'énergie, sauf comme pour le convertisseur matriciel, un filtre d'entre [8].

## 11.2.3. Autres topologies de l' IMC

### A- Convertisseur Matriciel "Creux"

Cette structure permet de supprimer trois composants commandables du redresseur par rapport à la topologie précédente.

Deux transistors et quatre diodes (puissance transmise à la charge) conduisent.

Les pertes par conduction seront par conséquent plus importantes par rapport à la topologie précédente IMC.

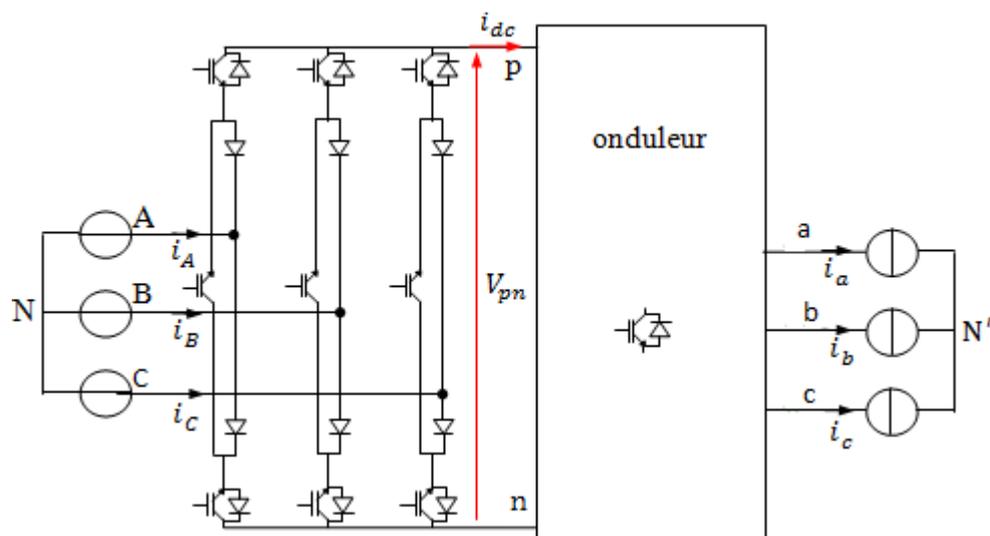


Figure 1.7 : Convertisseur matriciel Creux.

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

## B- Le convertisseur Matriciel "très Creux"

L'étage redresseur est composée de six interrupteurs quatre segment à transistor unique.

Cette topologie permet de limiter à six le nombre de composants commandable (Transistors) pour l'étage redresseur, réduisant ainsi par deux leurs nombre par rapport au redresseur de topologie 'indirect'.

Les pertes par conduction sont plus grandes puisque le redresseur sollicite à chaque instant, deux transistors et quatre diodes.

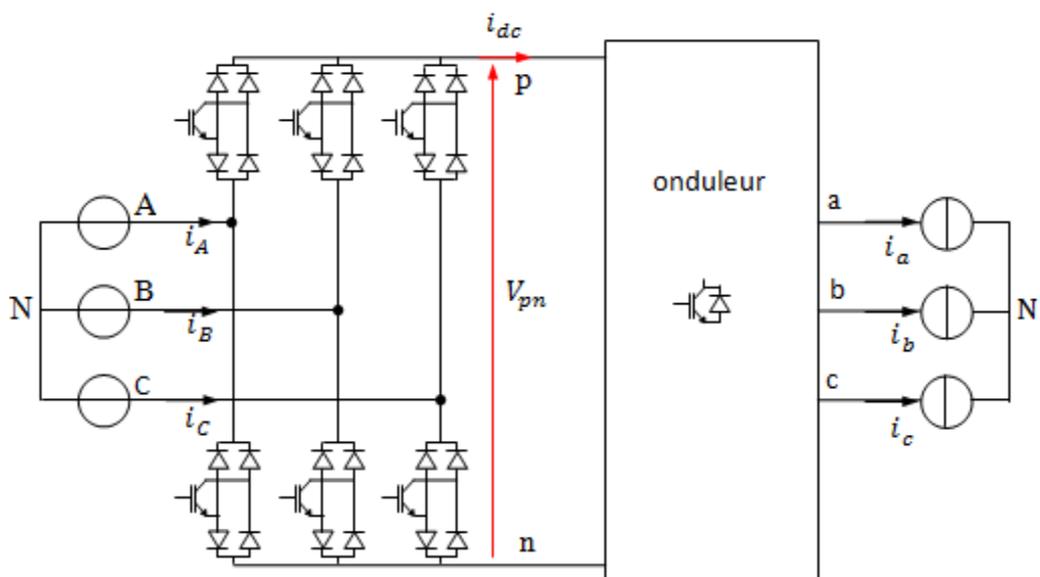


Figure 1.8 : Le Convertisseur matriciel très creux.

## C- Le convertisseur Matriciel "ultra creux"

-Cette topologie limite le nombre d'interrupteurs a son minimum.

-La conduction de deux diodes et d'un transistor par chaque bras commandé.

Le redresseur produit des pertes par conduction similaire à celle générées par le redresseur de la topologie 'très creuse' Contrairement aux autres topologies elle n'est pas réversible en puissance.

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

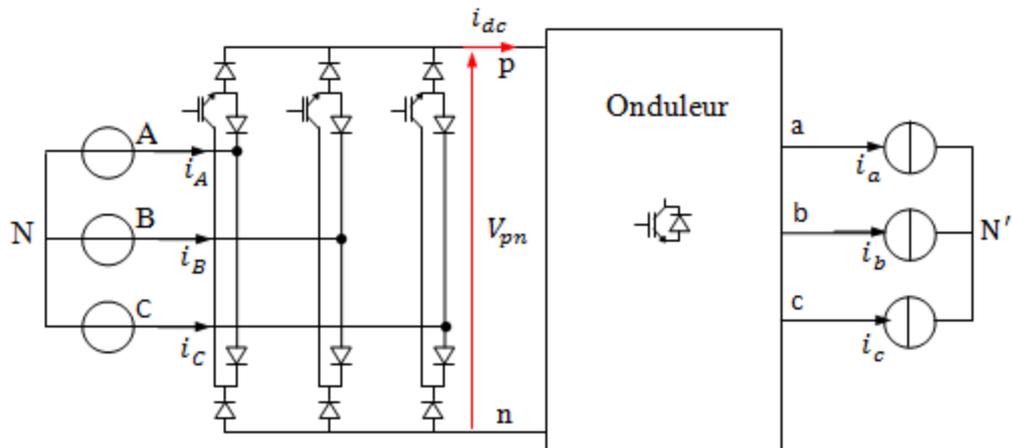


Figure 1.9 : Convertisseur matriciel ultras creux

## D- Le convertisseur Matriciel "a étage inverseur"

- Les interrupteurs sont unidirectionnels en courant.
- Le redresseur permet de récupérer l'énergie grâce à l'énergie inverseur.
- Les pertes par commutation sont importantes.
- Sa commande est complexe.

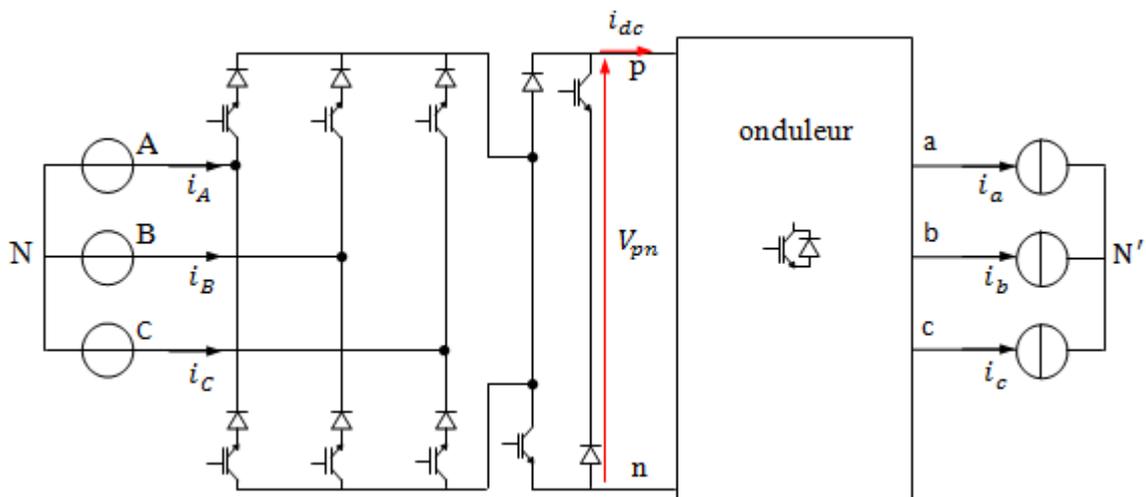


Figure 1.10 : Le convertisseur matriciel a étage inverseur.

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS MATRICIELS

Le tableau suivant résume la différence entre les différentes topologies de convertisseur Matriciel indirect en ce qui concerne le nombre d'IGBT et le nombre de diode qui le Compose [9] :

Topologie	Nombre d'IGBT	Nombre de diode
Indirect	18	18
Creuse	15	18
Très creuse	12	30
Ultra creuse	9	18
A Etage Inverseur	14	14

**Tableau 1.1** : Résumé des différentes topologies

## Conclusion :

Un convertisseur matriciel est un convertisseur de fréquence direct, générant des tensions triphasées variables en amplitude et en fréquence à partir des tensions triphasées rigides d'entrée. Un circuit intermédiaire continu n'est pas nécessaire. Le principe est basé sur une topologie matricielle reliant chaque phase d'entrée à chaque phase de sortie par un commutateur de puissance bidirectionnel.

L'objectif principal de l'étude de ce type de convertisseur est le remplacement des convertisseurs conventionnels à circuits intermédiaires de tension par des convertisseurs intégrés au complet dans un module à semi-conducteurs. Ceci permettrait d'augmenter la durée de vie du convertisseur et diminuerait son volume. Un autre grand avantage du convertisseur matriciel est la symétrie de la matrice, permettant le flux de puissance dans les deux sens et ainsi directement le fonctionnement en quatre quadrants. Les inconvénients du convertisseur matriciel consistent d'abord en une commutation du courant plus délicate à cause de l'absence des diodes à roue libre. En outre, la commande est relativement complexe et le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée est réduit (0.866 par rapport aux convertisseurs indirects conventionnels).

Cette modeste étude nous a permis donc, de comprendre, le principe de fonctionnement, les différentes topologies, les atouts ainsi que les inconvénients des convertisseurs matriciels.

Chapitre II

MODELISATION  
ET COMMANDE  
DE  
CONVERTISSEUR  
MATRICIEL

**Introduction**

La commande du convertisseur matriciel a pour objectif d'imposer des tensions de sorties et des courants d'entrées quasi sinusoïdaux. Plusieurs stratégies ont été développées, la première étant l'algorithme de Venturini.

**2.1. Méthode de Venturini**

**2.1.1. Définition de la méthode**

La méthode Venturini correspond à une approche mathématique du problème .les tensions d'entrée sont considérées comme trois tensions d'amplitude  $V_E$ , de pulsation  $W_E$  déphasées de 120 °. On suppose aussi que les tensions de sortie désirées constituent un système triphasé équilibré d'amplitude  $V_S$ , de pulsation  $W_S$ . Il existe une solution analytique au problème (formes sinusoïdales des signaux) lorsque la condition  $V_S < \frac{1}{2}V_E$  est vérifiée. Cette méthode conduit donc à des amplitudes de tensions de sortie sévèrement limitées. Pour pallier cet inconvénient, des harmoniques de rang 3 sont ajoutée aux tensions de sortie désirées. Dans le cas où le facteur de puissance en entrée doit être unitaire, on obtient alors la relation suivante pour les rapports cyclique :

$$F(t) = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 + 2Q\cos(W_M t) & 1 + 2Q\cos\left(W_M t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 + 2Q\cos\left(W_M t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1 + 2Q\cos\left(W_M t + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 + 2Q\cos(W_M t) & 1 + 2Q\cos\left(W_M t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1 + 2Q\cos\left(W_M t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 + 2Q\cos\left(W_M t + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 + 2Q\cos(W_M t) \end{bmatrix}$$

Et  $Q = \frac{V_S}{V_E}$ .

Cette méthode permet d'obtenir un indice de modulation (rapport du maximum des tensions d'entrée et du maximum des tensions de sortie) pouvant aller jusqu'à 0.866 pour une charge résistive. Ce qui correspond à l'indice de modulation maximal qui peut être obtenu avec ce convertisseur sans distorsions basses fréquence des tensions de sortie.

La relation dans le cas d'un facteur de puissance en entrée différent de 1 est plus compliquée et nécessite la connaissance du facteur de puissance de la charge. De plus, La valeur maximale de Q qui peut être obtenu décroît rapidement lorsque le rapport des tangentes des déphasages en entrée et en sortie  $\frac{\tan(\theta_I)}{\tan(\theta_o)}$  décroît. [10]

On a :

Q : le rapport de transformation entre la tension d'entrée et de sortie du convertisseur matriciel.

$W_E$  et  $W_S$  : Pulsation d'entrée et de sortie respective du convertisseur matriciel.

$V_E$  : Valeur crête de la tension d'entrée.

$V_S$  : Valeur crête de la tension de sortie.

**2.1.2. Principe de la méthode venturini [11]**

La sélection de chaque phase d'entrée durant une séquence forme les signaux (tension de sortie et courant d'entrée) de sortie du convertisseur pour des périodes bien définies dans le temps. La tension de sortie est formée à partir de segments des trois tensions d'entrée et le courant d'entrée est formé de segments des trois courants de sortie.

Dans le but de déterminer le comportement du convertisseur matriciel à des fréquences de sortie inférieurs à la fréquence de commutation, un cycle de commutation peut être défini pour chaque interrupteur.

Ces tensions continues du temps peuvent être utilisées pour définir et comparer les stratégies de modulation. On a alors les systèmes d'équations suivantes :

Tensions de sortie :

$$\begin{bmatrix} U_X \\ U_Y \\ U_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{AX} & F_{BX} & F_{CX} \\ F_{AY} & F_{BY} & F_{CY} \\ F_{AZ} & F_{BZ} & F_{CZ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

Courants d'entrée :

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{AX} & F_{BX} & F_{CX} \\ F_{AY} & F_{BY} & F_{CY} \\ F_{AZ} & F_{BZ} & F_{CZ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_X \\ I_Y \\ I_Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$[U_X \ U_Y \ U_Z]^T$  : Vecteur des tensions modulées

$[U_A \ U_B \ U_C]^T$  : Vecteurs des tensions commutées

$[I_X \ I_Y \ I_Z]^T$  : Vecteurs des courants commutés

$[I_A \ I_B \ I_C]^T$  : Vecteurs des courants modulés

Les équations (1) et (2) peuvent être présentées sous une forme plus compacte ou  $F(t)$  représentent la matrice de connexion :

$$\begin{cases} U_S(t) = [F(t)] \cdot [U_E(t)] \\ I_E(t) = [F(t)]^T \cdot [I_S(t)] \end{cases} \quad (3)$$

Il doit y'avoir seulement une ligne (phase) d'entrée qui peut être connectée à n'importe quelle ligne de sortie du convertisseur matriciel et à n'importe quel moment dans le temps. Cette contrainte peut être exprimée comme suite :

$$\sum_{K=A,B,C} F_{KX} = \sum_{K=A,B,C} F_{KY} = \sum_{K=A,B,C} F_{KZ} = 1 \quad (4)$$

Soit :

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = V_{EM} \begin{bmatrix} \cos(W_E t) \\ \cos\left(W_E t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(W_E t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} I_X \\ I_Y \\ I_Z \end{bmatrix} = I_{SM} \begin{bmatrix} \cos(W_S t + \phi_S) \\ \cos\left(W_S t + \phi_S - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(W_S t + \phi_S + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Avec :

$V_{EM}, I_{SM}$  : Amplitudes de la tension d'entrée et du courant de sortie respective du convertisseur matriciel.

$W_E, W_S$  : Pulsation d'entrée et de sortie respective du convertisseur matriciel.

$\phi_S$ : Déphasage entre la tension et le courant de sortie.

Le but est de trouver une matrice de connexion  $F(t)$  tel que :

$$\begin{bmatrix} U_X \\ U_Y \\ U_Z \end{bmatrix} = Q \cdot V_{EM} \begin{bmatrix} \cos(W_S t) \\ \cos\left(W_S t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(W_S t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = Q \cdot I_{SM} \begin{bmatrix} \cos(W_E t + \phi_E) \\ \cos\left(W_E t + \phi_E - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(W_E t + \phi_E + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Tel que (Q) est le rapport de transformation entre la tension d'entrée et de sortie du convertisseur matriciel.

Une des deux solutions à ce problème trouvée par Alessina et Venturi et adoptée pour la modulation s'écrit :

$$[F(t)] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 + 2Q\cos(W_M t) & 1 + 2Q\cos\left(W_M t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 + 2Q\cos\left(W_M t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1 + 2Q\cos\left(W_M t + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 + 2Q\cos(W_M t) & 1 + 2Q\cos\left(W_M t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1 + 2Q\cos\left(W_M t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 + 2Q\cos\left(W_M t + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 + 2Q\cos(W_M t) \end{bmatrix}$$

Avec  $W_M = W_S - W_E$

L'utilisation de cette méthode nous mène à une valeur maximale de 0.5 pour le rapport de transformation (Q) que le convertisseur puisse atteindre.

La tension maximale de sortie a été augmenté de 86 % de la tension d'entrée par la modification de la tension de sortie désirée, en incluant l'harmonique d'ordre trois de la tension d'entrée et celle désirée.

Dans ce cas, trois fonctions de modulation sont définies :

$$\begin{cases} F_{AX} = \frac{1}{3} + K_{31} + \frac{2}{3 \cdot V_{IM}^2} (U_X + K_{33}) \cdot \left(\frac{2}{3} U_{AB} + \frac{1}{3} U_{BC}\right) \\ F_{BX} = \frac{1}{3} + K_{32} + \frac{2}{3 \cdot V_{IM}^2} (U_X + K_{33}) \cdot \left(\frac{1}{3} U_{BC} - \frac{1}{3} U_{AB}\right) \\ F_{CX} = 1 - (F_{AX} + F_{BX}) \end{cases} \quad (9)$$

Les termes d'harmoniques (3) ajoutés dans les fonctions de modulation sont donnés :

$$k_{31} = \frac{2}{9} \frac{Q}{Q_{MAX}} \sin(W_E t) \sin(3W_E t)$$

$$K_{32} = \frac{2}{9} \frac{1}{Q_{MAX}} \sin\left(W_E t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin(3W_E t)$$

$$K_{33} = -\sqrt{V_{OM}^2} \cdot \left(\frac{1}{6} \cos(3W_s t)\right) - \frac{1}{4} \frac{1}{Q_{MAX}} \cos(3W_E t)$$

$$V_{EM}^2 = \frac{4}{9} (U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{AB} \cdot U_{BC})$$

Avec :

$$W_E t = \arctan \left( \frac{U_{AB}}{\sqrt{3} \left( \frac{2}{3} U_{AB} + \frac{1}{3} U_{BC} \right)} \right)$$

$$V_{SM}^2 = \frac{2}{3} (U_X^2 + U_Y^2 + U_Z^2)$$

$$W_s t = \arctan \left( \frac{U_Y - U_Z}{\sqrt{3} \cdot U_X} \right)$$

Tel que :  $U_{AB}, U_{BC}$  : Tension composées d'entrée.

Pour avoir les fonctions de modulation des deux autres phases de sortie Y et Z, on remplace  $U_X$  par  $U_Y$  et  $U_Z$  respectivement dans le système d'équations (9).

Les indices S et E désignent respectivement la sortie et l'entrée.

### 2.2. Etude de convertisseur matricielle indirecte

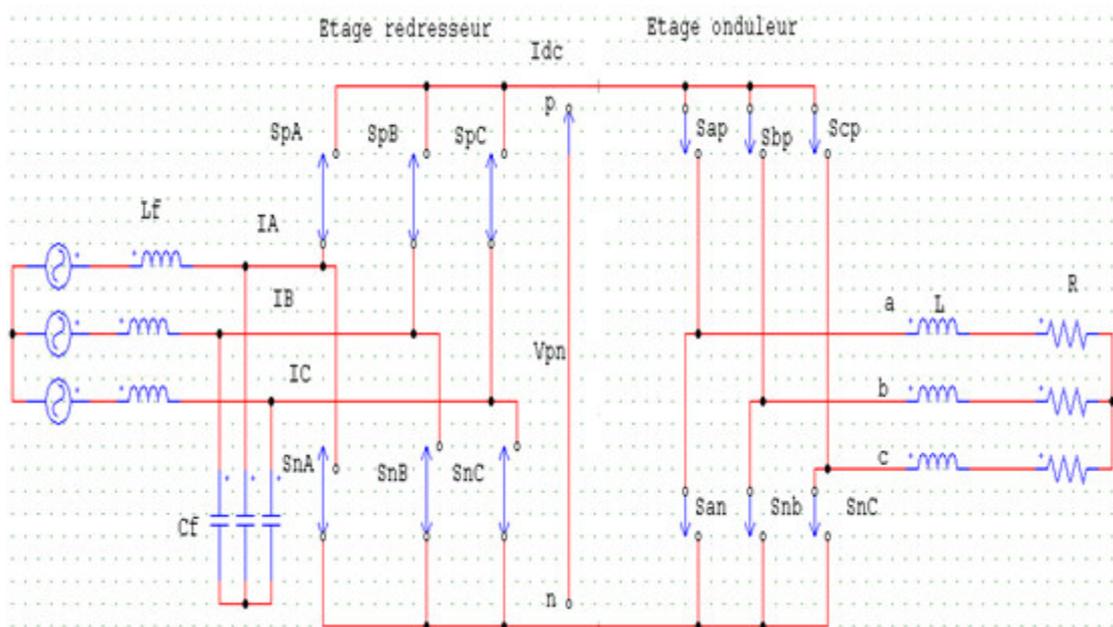


Figure 2.1 : Convertisseur matricielle indirecte

### 2.2.1. Principe de fonctionnement du convertisseur matriciel indirect

Un convertisseur matriciel indirect est une association de deux convertisseurs, Un redresseur composé de six interrupteurs (émetteur commun ou collecteur commun) totalement commandé et directement connecté à un onduleur de tension sans éléments de stockage. Il assure une conversion alternatif-continu suivie d'une conversion continue alternative (AC/DC/AC), [12], [13].

### 2.2.2. L'interrupteur bidirectionnel [14]

L'élément clé de la structure du convertisseur matriciel est l'interrupteur bidirectionnel. Cet interrupteur a la possibilité de conduire le courant et de bloquer la tension dans les deux sens, Il n'existe pas d'interrupteurs bidirectionnels stricto sensu; ils sont réalisés en assemblant des interrupteurs unidirectionnels, essentiellement des diodes et des transistors.

Ils existent deux structures pour réaliser des interrupteurs bidirectionnels à partir de diodes et d'IGBT :

**A. La première :** les interrupteurs sont constitués d'un pont de diode et d'un seul IGBT.

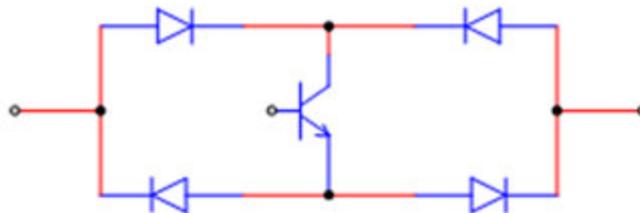


Figure 2.2 : Montage a pont de diode

**B. la deuxième :** les interrupteurs sont réalisés à partir de deux diodes et deux IGBT soit à émetteurs communs ou à collecteurs communs.

#### B.1. Interrupteur à émetteurs commun

Deux diodes et deux IGBT sont nécessaires, Les diodes sont utilisées Pour avoir la capacité de fournir la tension inverse de blocage. Les pertes par conduction sont diminuées car seulement deux semi-conducteurs " diodes et transistors " conduisent. Chaque interrupteur quatre segments, nécessite une alimentation isolée car la commande des drivers est référencée au même potentiel.



Figure 2.3 : Montage a émetteurs commun

## B.2. Interrupteur à collecteur commun

Cette configuration est semblable avec mêmes caractéristiques que la configuration précédente. Sauf que les transistors sont disposés dans une configuration à collecteur commun, et les pertes par conduction sont strictement identiques à celles de la configuration a émetteur commun. Cette topologie nécessite deux alimentations isolées, mais pour la réalisation du convertisseur matriciel, six alimentations isolées suffisent du fait de la mise au même potentiel de certains émetteurs de transistors appartenant à d'autres interrupteurs de même cellule.

La première structure présente l'avantage de ne posséder qu'un semi-conducteur commandé et donc un seul driver par interrupteur. Elle est donc économique mais elle présente deux problèmes:

- le courant traverse trois semi-conducteurs par interrupteur. Les pertes par conduction et chutes de tension sont donc relativement importantes.
- incompatible avec certaines techniques de commutation.

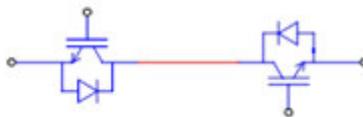


Figure 2.4 : Montage a collecteur commun

### 2.2.3. Vecteurs spatiaux de CMI

Le CMI est constitué de deux étages de conversion de puissance, premièrement il transforme les tensions triphasées d'entrée en une tension continue  $V_{pn}$ . Cet étage de conversion a trois entrées et deux sorties, le nombre de combinaisons possibles des états des interrupteurs est  $3^2 = 9$ . Toutefois, le fait que la tension du bus continu ne peut être négative, trois de ces combinaisons ne sont pas utilisables. En conséquence, il y a en tout 6 combinaisons possibles des états des interrupteurs du premier étage de conversion.

Deuxièmement, il transforme la tension du bus continu en un système de tension triphasé en sortie. Cet étage de conversion a deux entrées et trois sorties, le nombre de combinaisons possibles des états des interrupteurs de cet étage est  $2^3 = 8$ . En résumé, le nombre total de combinaisons possibles des états des interrupteurs d'un CMI est :  $(6 \times 8 = 48)$  [15]

**2.3. Commande SVM du CMI**

La modulation vectorielle (SVM) des convertisseurs d'électronique de puissance est très souvent utilisée dans les entraînements à vitesse variable. L'objectif de cette stratégie de commande est de synthétiser les tensions de sortie par des tensions d'entrée et les courants d'entrée par les courants de sortie. [16][17]

Dans le but de simplifier le raisonnement, on suppose :

- \* Qu'il n'existe pas de filtre d'entrée
- \* La commutation des interrupteurs est supposée parfaite
- \* La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable devant la tension d'alimentation

**2.3.1. Commande de l'étage redresseur [18]**

L'étage redresseur produit non seulement la tension du bus continu à l'étage onduleur mais il doit également maintenir les courants d'entrée sinusoïdaux avec la possibilité de contrôler le facteur de puissance.

On trouve la tension de sortie ( $V_{dc}$ ) de redresseur à partir des tensions d'entrée ( $V_A, V_B, V_C$ ) (2.1). Et les courants d'entrée ( $I_A, I_B, I_C$ ) à partir de courant fictive (2.2).

$$\begin{bmatrix} V_P \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{pA} & S_{pB} & S_{pC} \\ S_{nA} & S_{nB} & S_{nC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{pA} & S_{nA} \\ S_{pB} & S_{nB} \\ S_{pC} & S_{nC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_P \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

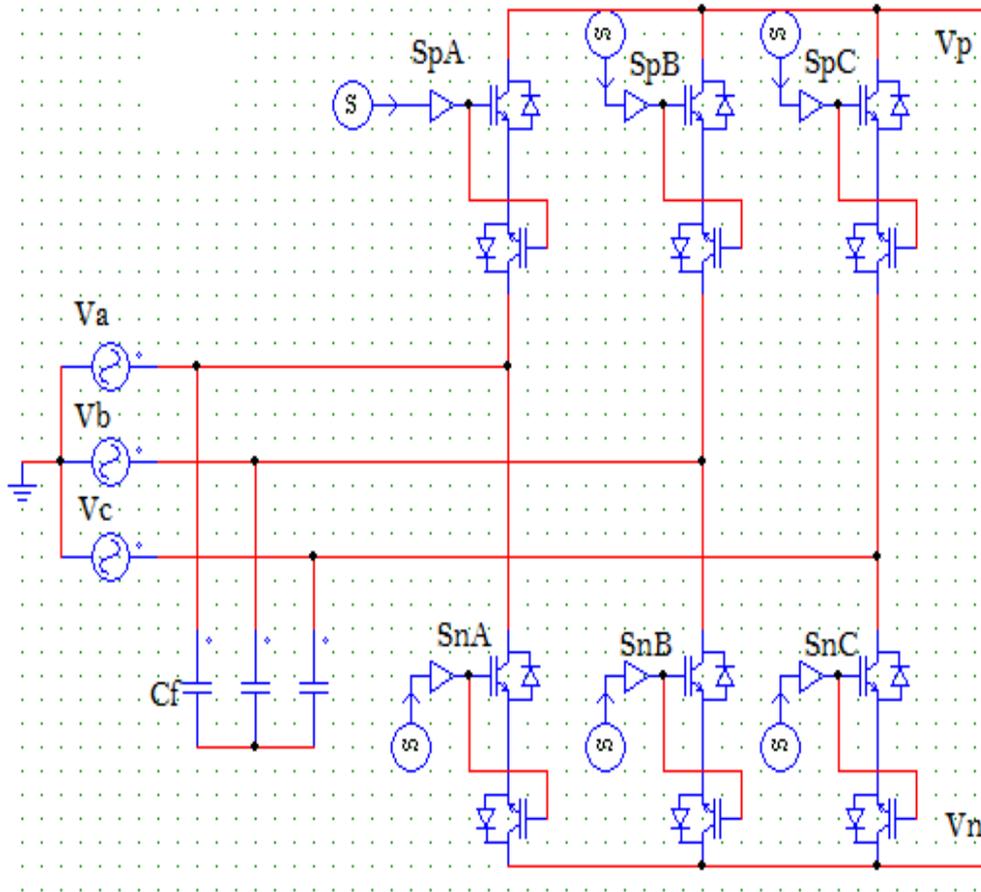


Figure 2.5 : Etage de redresseur de CMI

L'étage redresseur est toujours commandé pour assurer un maximum de tension  $V_{pn}$  de sortie que la modulation sur l'étage onduleur commande le rapport global de transfert de tension. Par conséquent, on peut éliminer le vecteur courant nul. [19]

Les interrupteurs du redresseur  $S_{pA}, S_{pB}, S_{pC}, S_{nA}, S_{nB}, S_{nC}$  peuvent avoir seulement six combinaisons possibles pour éviter le circuit ouvert, ces six combinaisons sont divisées en six vecteurs actifs du courant d'entrée  $I_1$  à  $I_6$ .

Les interrupteurs bidirectionnels du redresseur sont commandés de sorte que les lignes d'entrée ne doivent jamais être en court-circuitées :

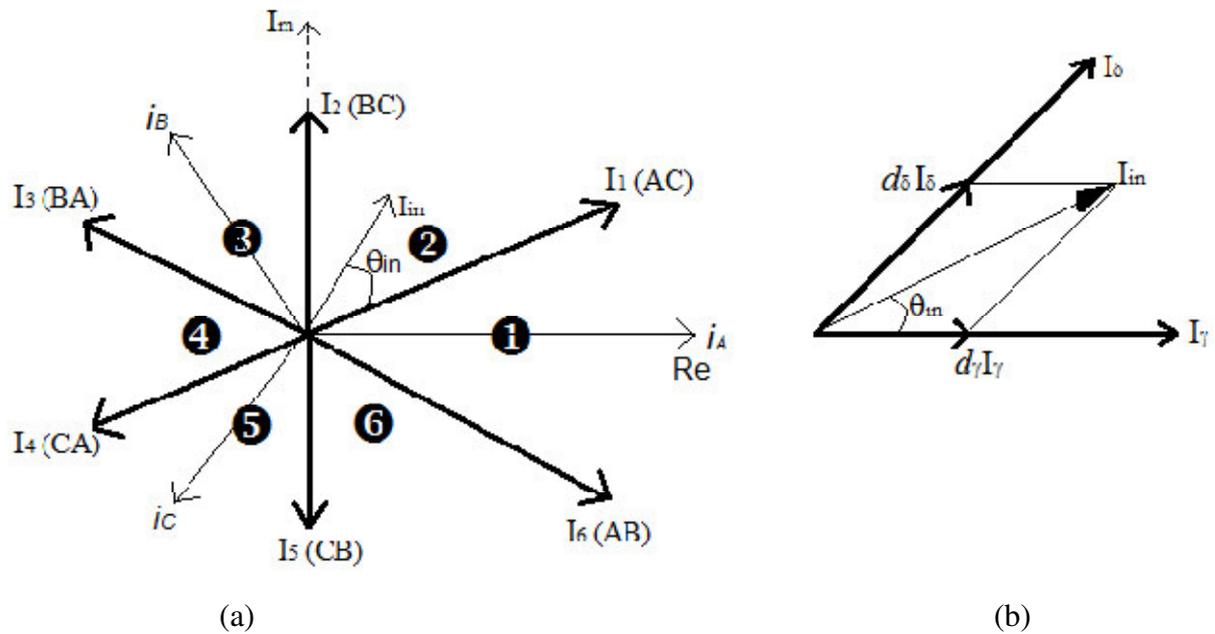
$$S_{qA} + S_{qB} + S_{qC} = 1 \quad \text{Avec : } q \in (p, n) \tag{2.3}$$

Le tableau suivant représente toutes les combinaisons valides des commutateurs de l'étage redresseur ainsi que les tensions de sortie et les courants d'entrée.

Etats des interrupteurs						Tensions de sortie			Courant d'entrée		
$S_{pA}$	$S_{pB}$	$S_{pC}$	$S_{nA}$	$S_{nB}$	$S_{nC}$	$V_p$	$V_n$	$V_{pn}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$
1	0	0	0	0	1	$V_A$	$V_C$	$V_{AC}$	$I_p$	0	$-I_p$
0	1	0	0	0	1	$V_B$	$V_C$	$V_{BC}$	0	$I_p$	$-I_p$
0	1	0	1	0	0	$V_B$	$V_A$	$V_{BA}$	$-I_p$	$I_p$	0
0	0	1	1	0	0	$V_C$	$V_A$	$V_{CA}$	$-I_p$	0	$I_p$
0	0	1	0	1	0	$V_C$	$V_B$	$V_{CB}$	0	$-I_p$	$I_p$
1	0	0	0	1	0	$V_A$	$V_B$	$V_{AB}$	$I_p$	$-I_p$	0

**Tableau 2.1 :** Les combinaisons possibles des interrupteurs de l'étage redresseur (1=actif, 0=inactif).

Par l'application de la SVM voir la figure suivante, il y a six vecteurs actifs du courant d'entrée  $I_1$  a  $I_6$ , en se référant toujours a la figure suivante, les vecteurs du courant d'entrée permettent de déterminer les connections des tensions de phases d'entrée aux bornes P et n du bus continu. Par exemple, le vecteur de référence  $I_{in}$ , deux vecteurs actifs adjacent  $I_7$  et  $I_8$  sont sélectionnés en fonction du secteur ou le vecteur de référence  $I_{in}$  est localisé.



**Figure 2.6 :** (a) Les sept positions du vecteur spatial du courant d'entrée, Et (b) la synthèse d'un vecteur de référence dans un secteur donne.

Pour maintenir un ensemble des courants d'entrée avec un facteur de puissance contrôlable, les tensions d'entrée doivent être synchronisées avec les courants d'entrée. Par l'utilisation de la transformation d'espace vectorielle (SVM), cet ensemble de courants d'entrée peut être transformée en vecteur de courant d'entrée de référence  $I_{in}$ , qui peut être exprimé comme :

$$I_{in} = I_{im} e^{j(\omega_i t - \varphi_i)} = I_{im} \angle \theta_{in} \quad (2.4)$$

Avec :

$I_{im}$  : Amplitude

$\theta_{in}$  : L'angle du vecteur courant de référence dans le secteur actuel ou se trouve celui-ci.

La variable  $\theta_{in}$  : est égale à  $(\omega_i t - \varphi_i)$  où  $\varphi_i$  est le déphasage entre les courants d'entrée

Et les tensions d'entrée.

Pendant une période de commutation,  $I_{in}$  est synthétise a partir des vecteurs actifs Adjacents  $I_\gamma$  et  $I_\delta$  avec les rapports cycliques  $d_\gamma$  et  $d_\delta$  respectivement. Si les courants d'entrée sont considérés constants pendant une période de commutation  $T_c$ , le vecteur Courant de référence est exprimé comme suit :

$$I_{in} = d_\gamma \cdot I_\gamma + d_\delta \cdot I_\delta \quad (2.5)$$

Le calcul des rapports cycliques  $d_\gamma$  et  $d_\delta$  sont relatifs aux courants  $I_\gamma$  et  $I_\delta$ , sont donnés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} d_\gamma = m_R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{in}\right) \\ d_\delta = m_R \cdot \sin(\theta_{in}) \end{cases} \quad (2.6)$$

Avec :

$m_R$  : L'indice de modulation du redresseur.

$$0 \leq m_R = \frac{I_{in}}{I_\gamma} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \leq 1 \quad (2.7)$$

$$\text{Et } 0 \leq m_R = \frac{I_{in}}{I_\delta} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \leq 1$$

$$\text{Ou : } d_\gamma = t_1/t_c \quad \text{et} \quad d_\delta = t_2/t_c$$

Toutefois, le fait que la tension du bus continu ne peut être négative, trois de ces combinaisons ne sont pas utilisables (vecteurs courants nuls). En conséquence, les nouveaux rapports cycliques ajustés de l'étage redresseur sont déterminés par la relation (2.8).

$$\begin{cases} d_{\gamma}^R = \frac{d_{\gamma}}{d_{\gamma} + d_{\delta}} \\ d_{\delta}^R = \frac{d_{\delta}}{d_{\delta} + d_{\gamma}} \end{cases} \quad (2.8)$$

On a La transformation complexe de vecteur courant de référence (2.9) réaliser par l'application de transformation au plan complexe de deux axes ( $\gamma\delta$ ) ou par la multiplication des tensions de phase par l'orientation spatial. Et s'exprimer comme suite :

$$I_{in} = \frac{2}{3} \cdot (I_A + \partial \cdot I_B + \partial^2 \cdot I_C) \quad (2.9)$$

$$I_A = I_0 \sin wt$$

$$I_B = I_0 \cdot \sin \left( wt - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$I_C = I_0 \cdot \sin \left( wt + \frac{2\pi}{3} \right)$$

$I_A, I_B, I_C$  : Courant d'alimentation ou de phase

$\partial$  : orientation spatial

$I_0$  : Amplitude

Grace au vecteur spatial et la synthèse d'un vecteur de referens on a calculé les défèrent temps ( $t_{r1}$  et  $t_{r2}$ ) pour le redresseur ya pas de vecteur nul donc on a que deux période :

$$t_{r1} = a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{in}\right) \cdot T_c \quad (2.10)$$

D'où  $a = \frac{I_{in}}{I_{\gamma} \sin(60)}$

$$t_{r2} = a \cdot \sin(\theta_{in}) \cdot T_c \quad (2.11)$$

Et  $a = \frac{I_{in}}{I_\delta \sin(60)}$  .

### 2.3.2. Commande de l'étage onduleur [20]

De la même manière que l'étage redresseur, on expliquera le principe de fonctionnement de l'étage onduleur.

Dans le convertisseur matriciel indirect dans l'étage onduleur notre but et de trouver les tensions de sortie de l'onduleur sont obtenu a partir de la tension continu fictive  $V_{cd}$  formée par les etats des interrupteur representer par les elements de la matrice [I] (1)

et le courant fictif d'entrée  $I_{dc}$  et formée a partie des courants de charge avec la matrice transposée [I]t (2)

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ap} & S_{an} \\ S_{bp} & S_{bn} \\ S_{cp} & S_{cn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ap} & S_{bp} & S_{cp} \\ S_{an} & S_{bn} & S_{cn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

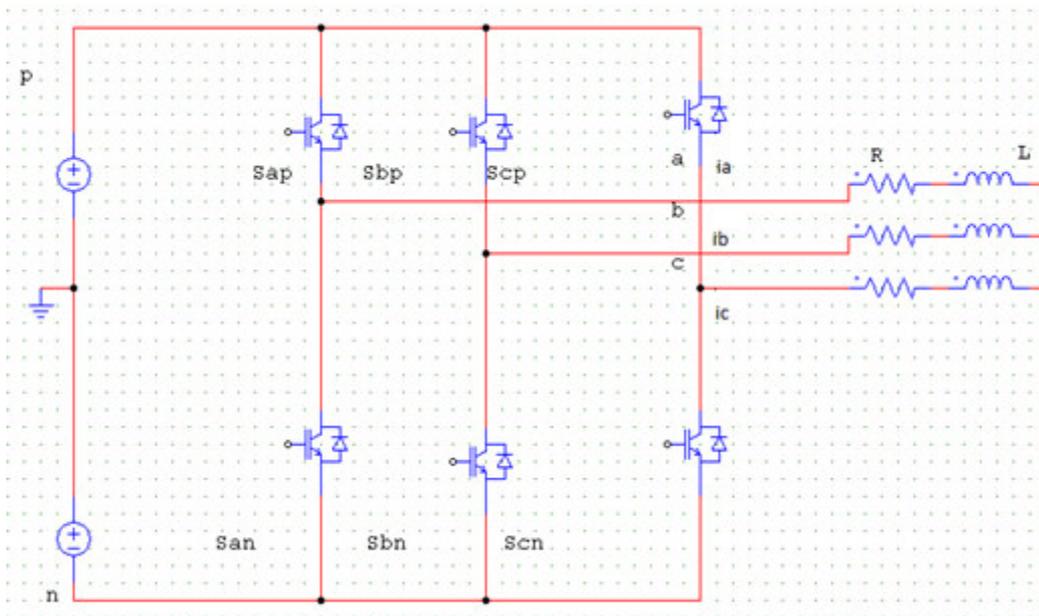


Figure 2.7 : Etage onduleur du CMI

Les commutateurs de l'onduleur sont modules et base sur la contrainte que les commutateurs (interrupteurs) de chaque bras ne doivent jamais être actifs (état 1) ou inactifs (État 0) simultanément et ceci pour éviter un court-circuit

$$S_{jP} + S_{jN} = 1 \quad \text{avec : } j \in \{a, b, c\} \quad (3)$$

Une analyse combinatoire de tous les états (ouvert ou ferme) des interrupteurs de l'onduleur  $S_{ap}, S_{bp}, S_{cp}, S_{an}, S_{bn}, S_{cn}$  permet d'avoir seulement huit combinaisons possibles pour éviter le court-circuit de la tension continue fictive  $V_{pn}$ .

Les huit combinaisons sont divisées en six vecteurs actifs  $V_1$  à  $V_6$  dont deux sont nuls  $V_0$  à  $V_7$ , ce qui permet de calculer les vecteurs de tensions sorties correspondant.

Le tableau suivant résume les états de commutation possible pour l'étage onduleur

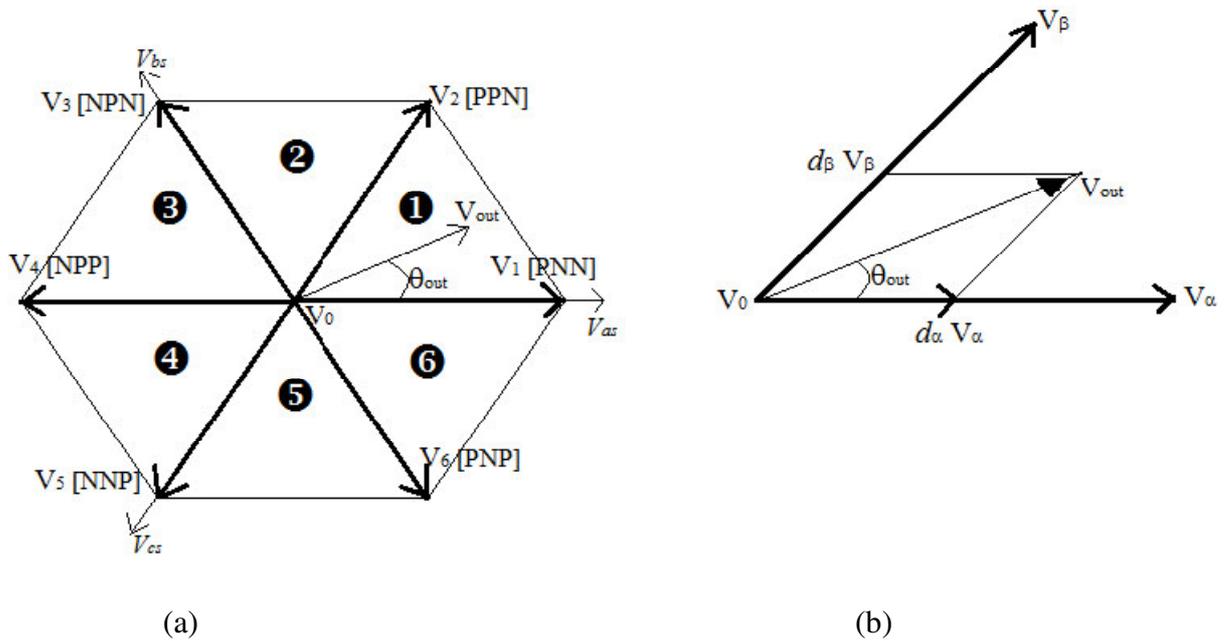
Etats des interrupteurs						Tensions de sortie		
$S_{ap}$	$S_{bp}$	$S_{cp}$	$S_{an}$	$S_{bn}$	$S_{cn}$	$V_{as}$	$V_{bs}$	$V_{cs}$
1	0	0	0	1	1	$(2/3)*V_{pn}$	$-(1/3)*V_{pn}$	$-(1/3)*V_{pn}$
1	1	0	0	0	1	$(1/3)*V_{pn}$	$(1/3)*V_{pn}$	$-(2/3)*V_{pn}$
0	1	0	1	0	1	$-(1/3)*V_{pn}$	$(2/3)*V_{pn}$	$-(1/3)*V_{pn}$
0	1	1	1	0	0	$-(2/3)*V_{pn}$	$(1/3)*V_{pn}$	$(1/3)*V_{pn}$
0	0	1	1	1	0	$-(1/3)*V_{pn}$	$-(1/3)*V_{pn}$	$(2/3)*V_{pn}$
1	0	1	0	1	0	$(1/3)*V_{pn}$	$-(2/3)*V_{pn}$	$(1/3)*V_{pn}$
1	1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0

**Tableau 2.2 :** Commutation possible pour l'étage onduleur (1=actif, 0=inactif).

Les tensions de sortie de l'onduleur générées par les différentes combinaisons des interrupteurs base sur la tension d'alimentation  $V_{pn} = 2V_{dc}$  peuvent être déterminées en utilisant les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{as} = V_{pn} \left( \frac{2}{3} S_{ap} - \frac{1}{3} S_{bp} - \frac{1}{3} S_{cp} \right) \\ V_{bs} = V_{pn} \left( -\frac{1}{3} S_{ap} + \frac{2}{3} S_{bp} - S_{cp} \right) \\ V_{cs} = V_{pn} \left( -\frac{1}{3} S_{ap} - \frac{1}{3} S_{bp} + \frac{2}{3} S_{cp} \right) \end{cases} \quad (4)$$

En utilisant la modulation vectorielle (SVM), la tension de sortie générée par les six premières combinaisons est transformée en six vecteurs spatiaux de tensions de sortie comme il est montré dans la figure suivante :



**Figure 2.8 :** (a) Les sept positions du vecteur spatial de la tension de sortie, (b) et la synthèse du Vecteur de référence dans un secteur donne.

Chaque vecteur de tension se rapporte à la combinaison des interrupteurs, qui présente les connections des bornes de sortie de l'onduleur (a, b et c), au bornes d'entrée (p et n).

L'amplitude de chaque vecteur de tension est proportionnelle à la tension continue  $V_{pn}$ , pour les combinaisons de commutations qui relient toutes les bornes de sortie (a, b et c) à une borne d'entrée continue (p et n), les vecteurs de tensions nuls  $V_0$  sont formés et placés à l'origine du vecteur d'espace **figure 2.8**.

Les tensions triphasées de sortie désirées est transformée en vecteur de tension de sortie référence  $V_{out}$  qui tourne le long d'une trajectoire circulaire avec une fréquence  $W_0$  dans le diagramme de vecteur spatiale en utilisant la modulation vectorielle.

Ce vecteur de référence peut être exprimé sous la forme :

$$V_{out} = V_{om} \angle \theta_{out} \quad (5)$$

Avec :

$V_{om}$  : Amplitude.

$\theta_{out}$  : L'angle de vecteur tension de référence dans le secteur actuel ou se trouve celui-ci.

Le diagramme des vecteurs spatiaux de l'onduleur de tension est divisé en six secteurs, suivant les indications du schéma de la **figure 2.8**. Le vecteur de référence peut être synthétise par deux vecteurs spatiaux adjacents  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$  et le vecteur de tension nul  $V_0$ , dans un secteur donné. Pendant une période de commutation  $T_{sw}$ , le vecteur de référence de sortie peut être synthétise comme suit :

$$V_{out} = d_\alpha V_\alpha + d_\beta V_\beta + d_0 V_0 \quad (6)$$

Le calcul des rapports cycliques  $d_\alpha$ ,  $d_\beta$  et  $d_0$  sont donnees par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} d_\alpha = m_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{out}\right) \\ d_\beta = m_1 \cdot \sin(\theta_{out}) \\ d_0 = 1 - d_\alpha - d_\beta \end{cases} \quad (7)$$

Avec  $m_1$  : L'indice de modulation du l'onduleur.

$$0 \leq m_1 = V_{out}/V_\alpha \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \leq 1$$

$$0 \leq m_1 = V_{out}/V_\beta \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \leq 1 \quad (8)$$

$$\text{Ou : } d_\alpha = t_1/t_c \quad \text{et} \quad d_\beta = t_2/t_c$$

On a la formation de vecteur de tension de référence (9) et réaliser par l'application de transformation au plan complexe de deux axes ( $\alpha\beta$ ) ou par la multiplication des tensions de phase par l'orientation spatial.

$$V_{out} = \frac{2}{3} \cdot (V_A + \partial \cdot V_B + \partial^2 \cdot V_C) \quad (9)$$

$$\text{ET on a: } \partial = e^{-j2\pi/3}$$

$$V_A = V_0 \cdot \sin(\omega t)$$

$$V_B = V_0 \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$V_C = V_0 \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3)$$

$V_A, V_B, V_C$  : Les tensions d'alimentation ou les tensions de phases

$\partial$ : l'orientation Spatial

$V_0$  : Amplitude

Et  $2/3$  si une constante elle est utiliser afin que dans le cas où la composante Homopolaire est nulle, les valeurs crête des phases qui sont associées au vecteur-spatial Soient obtenues par les projections orthogonales du vecteur-spatial sur les axes respectifs a, b, c

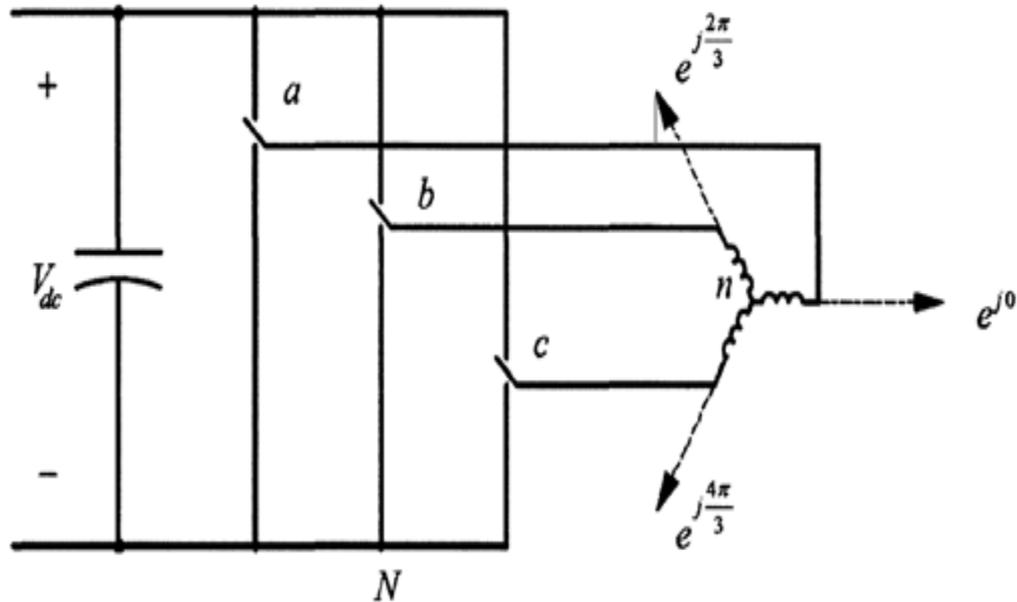


Figure 2.9 : Orientation spatial des trois phases a, b, c

Grace au vecteur spatial et la synthèse d'un vecteur de referens on a calculé les défèrent temps ( $t_1, t_2, t_0, t_7$ ) pour l'onduleur :

$$t_1 = \frac{V_{out}}{V_1} \cdot T_c \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{out}\right)$$

$$\rightarrow t_1 = a \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{out}\right)}{\sin 60} \cdot T_c \tag{10}$$

Et on a :  $V_1 = \frac{2}{3} \cdot V_{dc}$  et  $a = \frac{V_{out}}{\frac{2}{3} \cdot V_{dc}}$

$$t_2 = \frac{V_{out}}{V_2} \cdot T_c \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\theta_{out})$$

$$\rightarrow t_2 = a \cdot \frac{\sin(\theta_{out})}{\sin 60} \cdot T_c \tag{11}$$

Et on a :  $V_2 = \frac{2}{3} \cdot V_{dc} \cdot e^{j2\pi/3}$  et  $a = \frac{V_{out}}{V_2}$

$$t_0 = T_c - \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) \tag{12}$$

$$t_7 = t_0$$

Un tableau qui montre les résultats des vecteurs de base :

c	b	a	État	Vecteur de base
0	0	1	État 1 (001)	$\frac{2}{3}V_{dc}e^{j0}$
0	1	1	État 2 (011)	$\frac{2}{3}V_{dc}e^{j\pi/3}$
0	1	0	État 3 (010)	$\frac{2}{3}V_{dc}e^{j2\pi/3}$
1	1	0	État 4 (110)	$\frac{2}{3}V_{dc}e^{j\pi}$
1	0	0	État 5 (100)	$\frac{2}{3}V_{dc}e^{-j2\pi/3}$
1	0	1	État 6 (101)	$\frac{2}{3}V_{dc}e^{-j\pi/3}$
1	1	1	État 7 (111)	0
0	0	0	État 8 (000)	0

**Tableau 2.3 :** Résultat des vecteurs de base

Pour réaliser la commande du convertisseur matriciel indirect sous les contraintes d'un facteur de puissance réglable à l'entrée, le transit bidirectionnel de puissance et la commutation à courant nul, il faut qu'il y ait une coordination entre la commande des interrupteurs du redresseur et celle des interrupteurs de l'onduleur. La commutation au niveau du redresseur se fait lorsque le courant est nul.

Pour illustrer cette coordination, un cycle de commande durant le secteur I ainsi que les rapports cycliques relatifs à l'étage onduleur peuvent être déterminés par les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{r1} = d_{\gamma}^R * T_c \\ t_{i1} = \frac{1}{2} d_{\gamma}^R * d_0 * T_c \\ t_{i2} = d_{\gamma}^R * d_{\alpha} * T_c \\ t_{i3} = d_{\gamma}^R * d_{\beta} * T_c \\ t_{i4} = \frac{1}{2} d_{\delta}^R * d * T_c \\ t_{i5} = d_{\delta}^R * d * T_c \\ t_{i6} = d_{\delta}^R * d_{\alpha} * T_c \end{array} \right.$$

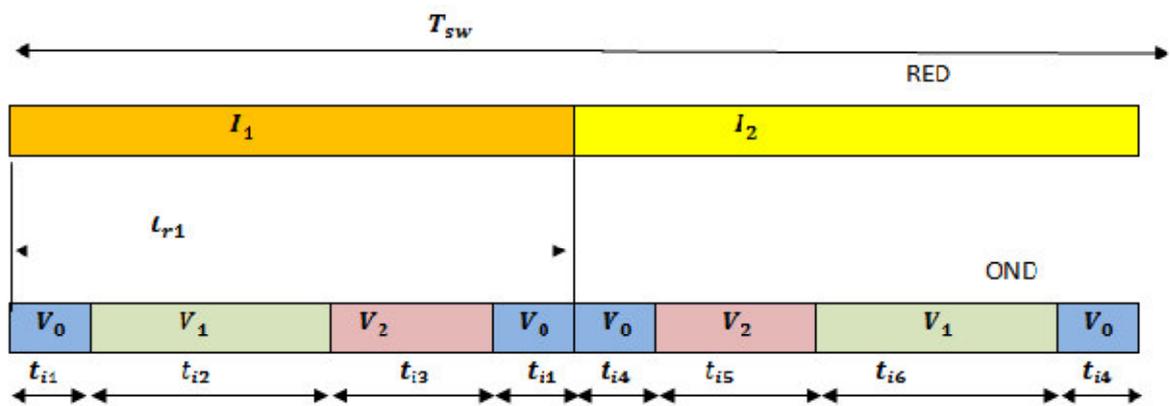


Figure 2.10: Séquence de commutation du convertisseur matriciel indirect dans le secteur I

### 3.4. Commande du convertisseur matriciel :

Pour la commande du convertisseur matriciel il faut maintenant réaliser une double modulation pour le vecteur de la tension de sortie ainsi que pour le vecteur courant d'entrée.

La modulation des courants représente le redressement et la modulation des tensions représente la fonction d'onduleur. Les deux processus sont appliqués simultanément et pour cela les six vecteurs de la modulation de la tension de sortie doivent être choisis en fonction de l'état du redressement cela veut dire qu'il existe 36 combinaisons de vecteurs.

Le rapport cyclique de chaque séquence est déterminé par le produit des rapports cycliques individuels comme suit :

$$d_{\gamma\alpha} = d_{\gamma} \cdot d_{\alpha}$$

$$d_{\gamma\beta} = d_{\gamma} \cdot d_{\beta}$$

$$d_{\delta\beta} = d_{\delta} \cdot d_{\beta}$$

$$d_{\delta\alpha} = d_{\delta} \cdot d_{\alpha}$$

Et le rapport cyclique du vecteur nul est calculé par :

$$d_o = 1 - (d_{\gamma\alpha} + d_{\gamma\beta} + d_{\delta\beta} + d_{\delta\alpha}) \quad (13)$$

Dans le but de minimiser le nombre de commutation, les vecteurs de tension de sortie et courant d'entrée auront neuf séquences et que chaque séquence est calculée en multipliant le rapport cyclique correspondant par la période de commutation  $T_c$  ; cela donnera :

$$\begin{cases} T_{\gamma\alpha} = d_{\gamma\alpha} \cdot T_c \\ T_{\delta\alpha} = d_{\delta\alpha} \cdot T_c \\ T_{\gamma\beta} = d_{\gamma\beta} \cdot T_c \\ T_{\delta\beta} = d_{\delta\beta} \cdot T_c \end{cases} \quad (14)$$

❖ L'établissement de la commande d'un convertisseur matriciel se fait en deux étapes :

- La première étape consiste à établir les temps d'activation des neufs interrupteurs. Plusieurs stratégies de modulation ont été mises au point et sont réparties en deux classes : Les méthodes scalaires et les méthodes vectorielles.
- La seconde étape consiste à traduire en signaux de commande les temps d'activation des semi-conducteurs calculés selon une stratégie de synthèse des séquences de commande. Cette stratégie doit rester indépendante de l'algorithme de commande.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons illustré deux types de commandes, l'algorithme de Venturini pour le convertisseur direct, et la commande SVM pour le convertisseur indirect. Cela nous permet de traduire les modèles mathématiques en modèle Simulink pour pouvoir effectuer ultérieurement un travail de simulation. Cependant afin d'alléger ce travail, nous nous contentons au chapitre suivant, de la mise en œuvre et la simulation sous MATLAB/SIMULINK du convertisseur matriciel indirect.

# Chapitre *III*

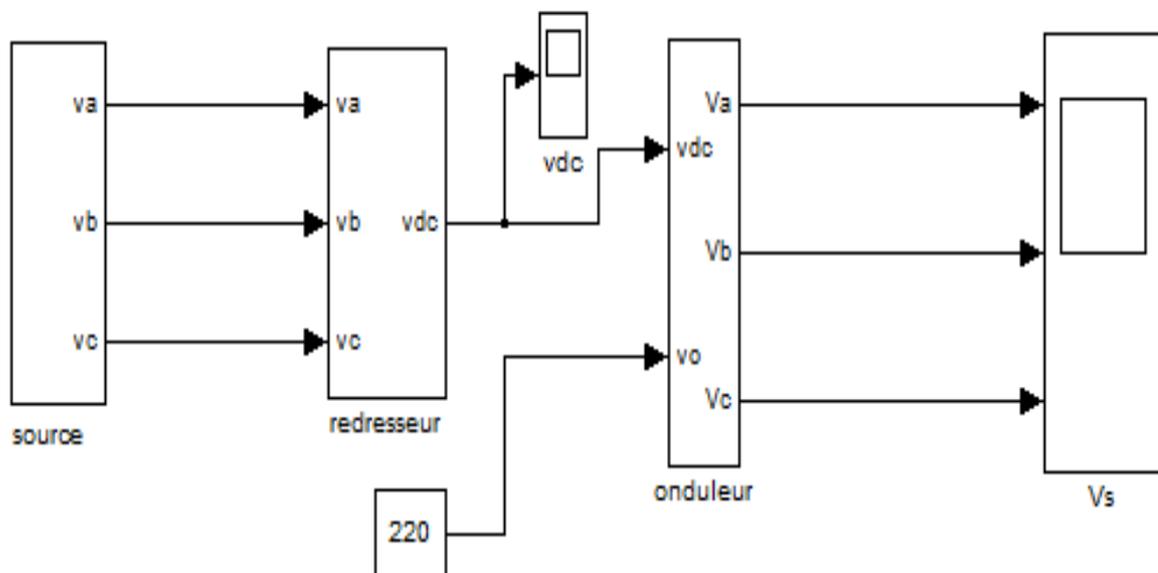
## *SIMULATION DE CONVERTISSEUR MATRICIEL*

## Introduction

Dans ce chapitre nous avons réalisé un modèle de simulation sous MATLAB/SIMULINK du convertisseur matriciel indirecte afin d'obtenir les différentes allures dans les deux étages et par la suite on a ajouté une charge R-L à la sortie de l'onduleur.

L'objectif du travail réalisé est de développer et de valider un modèle mathématique du convertisseur matriciel indirect afin de simuler le comportement en réponse aux algorithmes de commande présentés au chapitre 2.

### 3.1. Schéma bloc de simulation



**Figure 3.1** : Schéma bloc SIMULINK du modèle du convertisseur matriciel indirect

### 3.2. Considérations sur la simulation

Le redresseur choisi étant celui à structure indirecte, la commande est de type SVM (Space Vector Modulation)

- La valeur efficace de la tension d'alimentation est  $V = 220$  v
- La fréquence d'alimentation  $F = 50$  Hz
- la valeur efficace de courant d'alimentation  $I = 20$  A

- La simulation est faite à pas fixe (ode5) égal à  $10^{-5}$ s.

### 3.3 Résultats de simulation

#### 3.3.1 Résultat de simulation pour l'alimentation

Après la simulation on a obtenu les allures de tension et de courant d'alimentation représenté sur les figures suivantes :

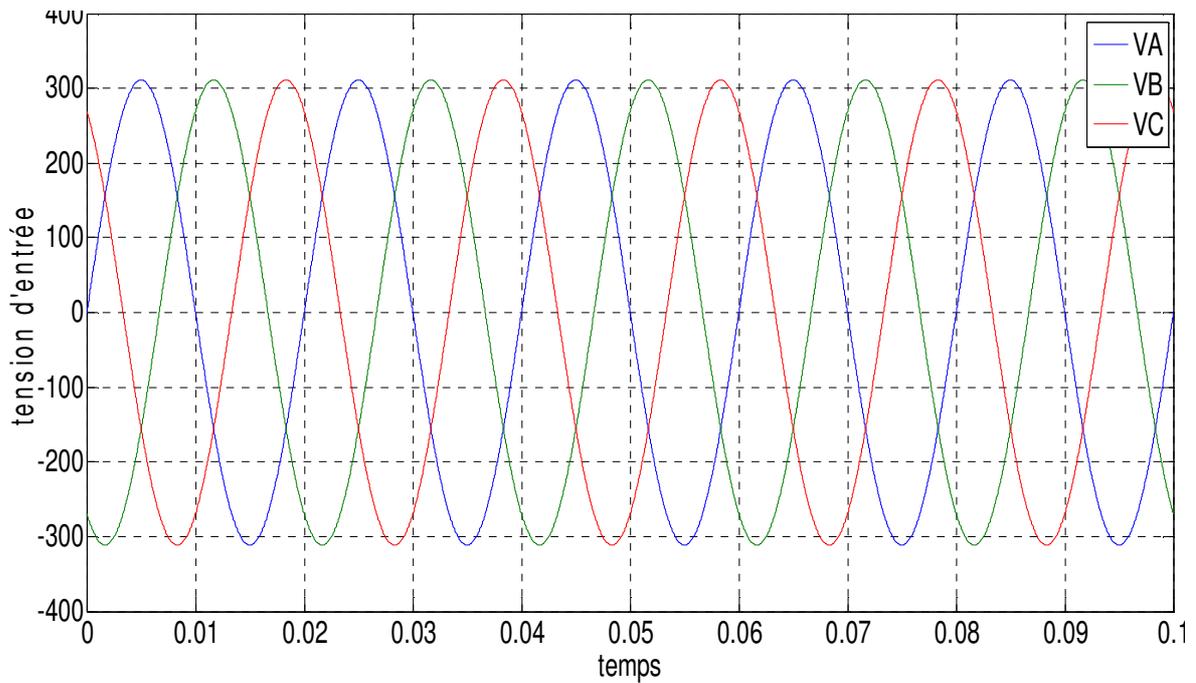


Figure 3.2 : L'allure des tensions de phase d'entrée

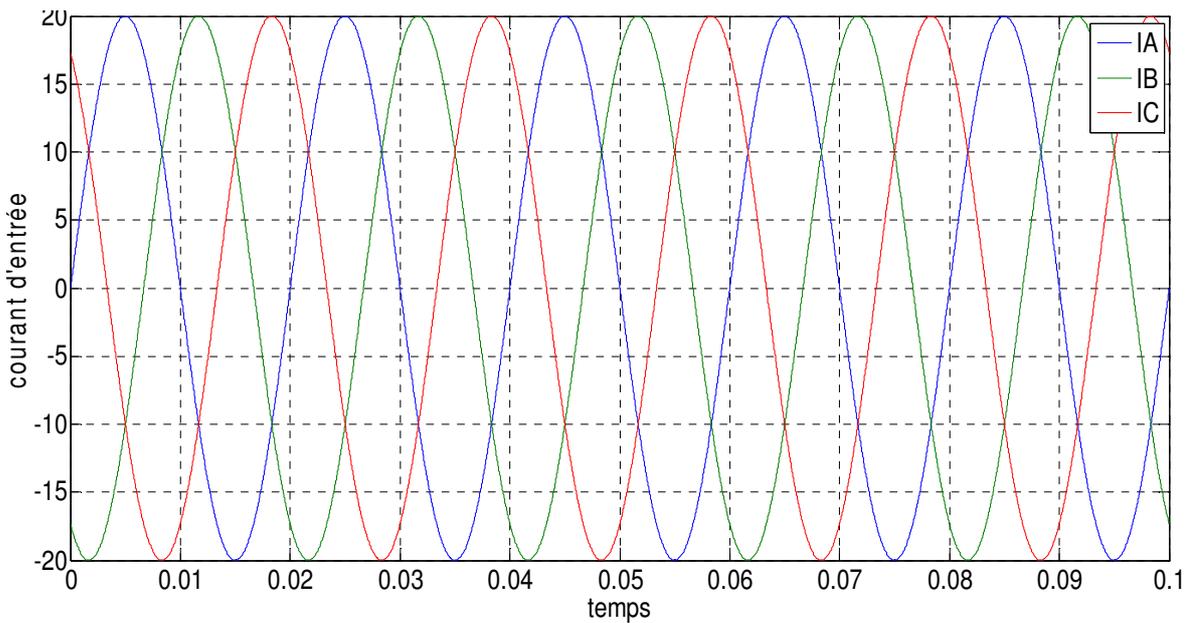
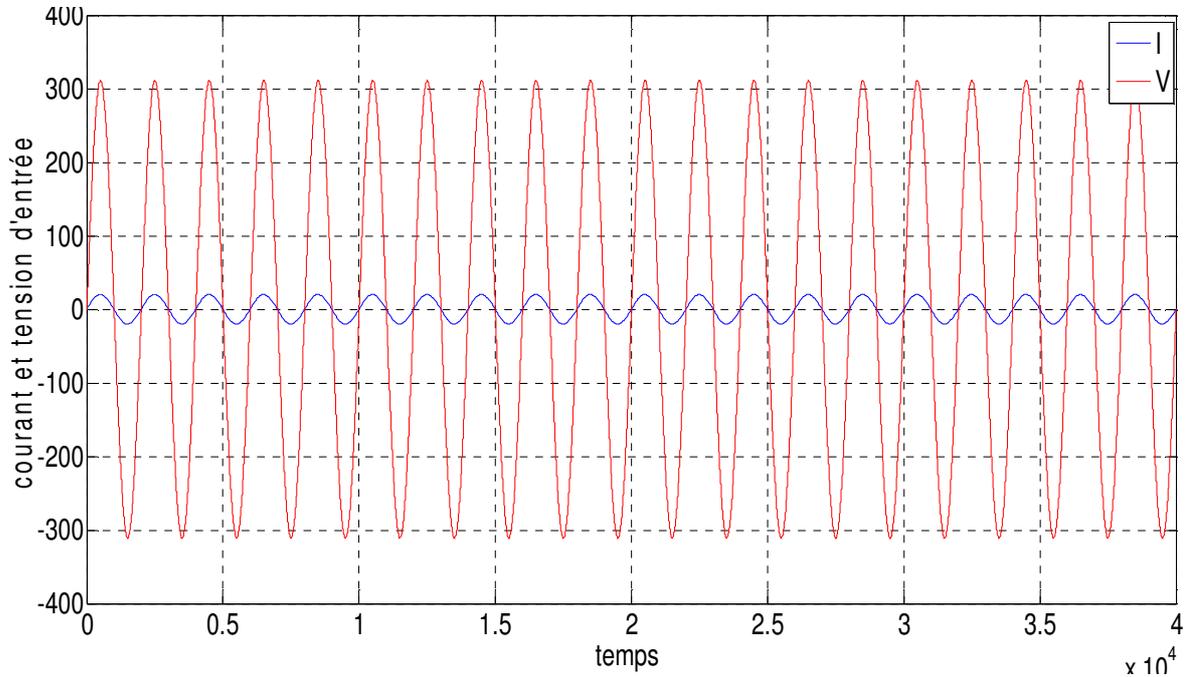
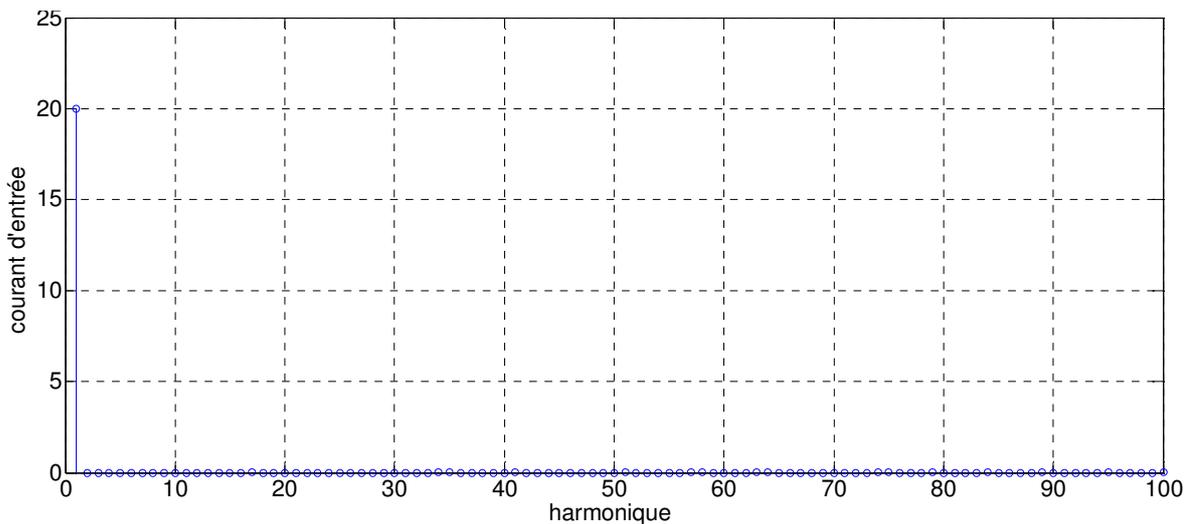


Figure 3.3 : L'allure des courants de phase d'entrée

Les figures (3.2 et 3.3) représentent les tensions de phase d'entrée et les courants de phase d'entrée qui sont sinusoïdales.



**Figure 3.4 :** L'allure de la tension et de courant de phase (A) d'entrée



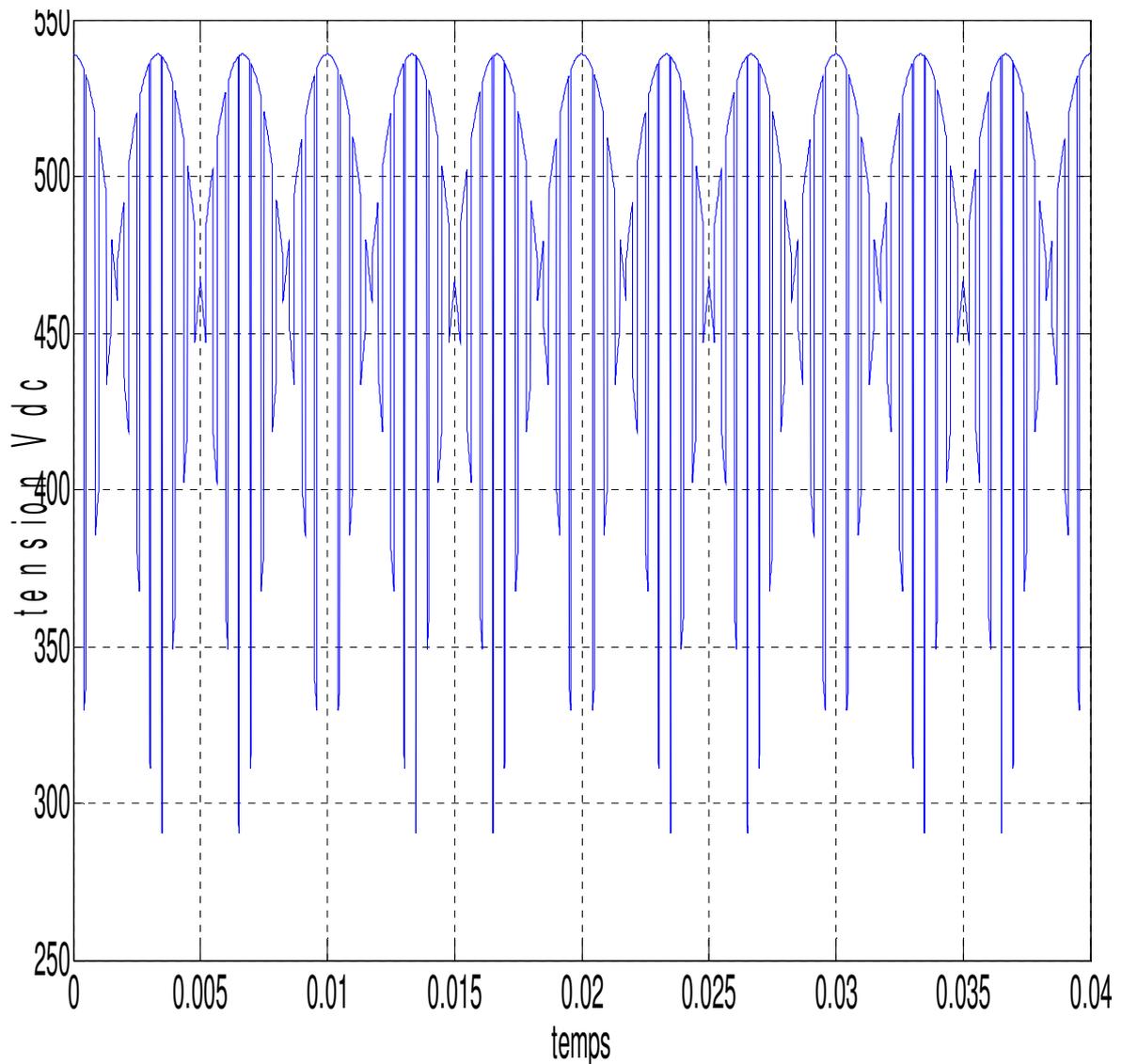
**Figure 3.5 :** Spectre harmonique du courant d'entrée pour la phase Va

Les figures (3.4 et 3.5) représentent la tension et le courant de phase à l'entrée de convertisseur matriciel indirect et le spectre harmonique de courant d'entrée. On remarque

que le courant et en phase avec la tension et la propriété de convertisseur matriciel et de pouvoir contrôler le facteur de puissance en entrée et on remarque l'absence des harmonique car le courant d'entrée est sinusoïdale et pareille pour la tension et sinusoïdale donc le système est linéaire (pas d'harmonique)

### 3.3.2. Etage redresseur

Après la simulation sous MATLAB/SIMULINK sur l'étage redresseur on obtient les résultats suivants :



**Figure 3.6 :** Tension de bus continu

La tension de bus continu est toujours positive et toujours égale à l'une des deux tensions composées d'entrée les plus grandes, ces éléments permettent de valider cette méthode de commande du convertisseur matriciel

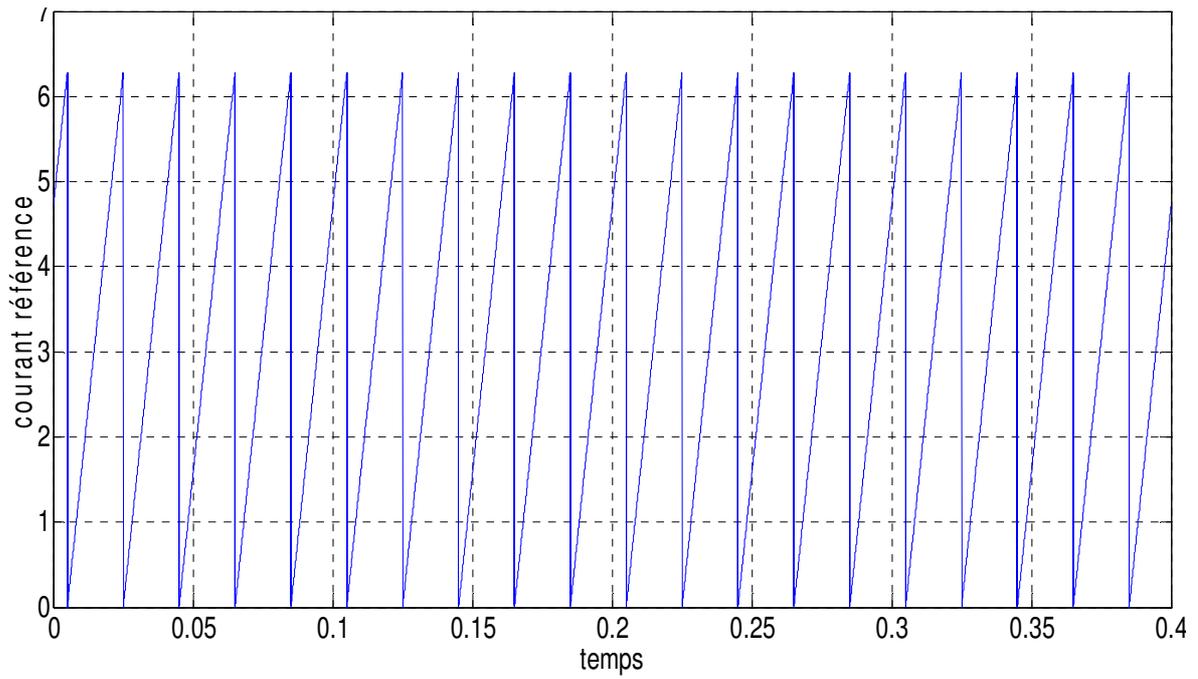


Figure 3.7 : Courant de référence pour l'étage redresseur

### 3.3.3. Etage onduleur

Dans cette étage notre but est de trouver les allures des trois tensions de sortie de l'étage onduleur

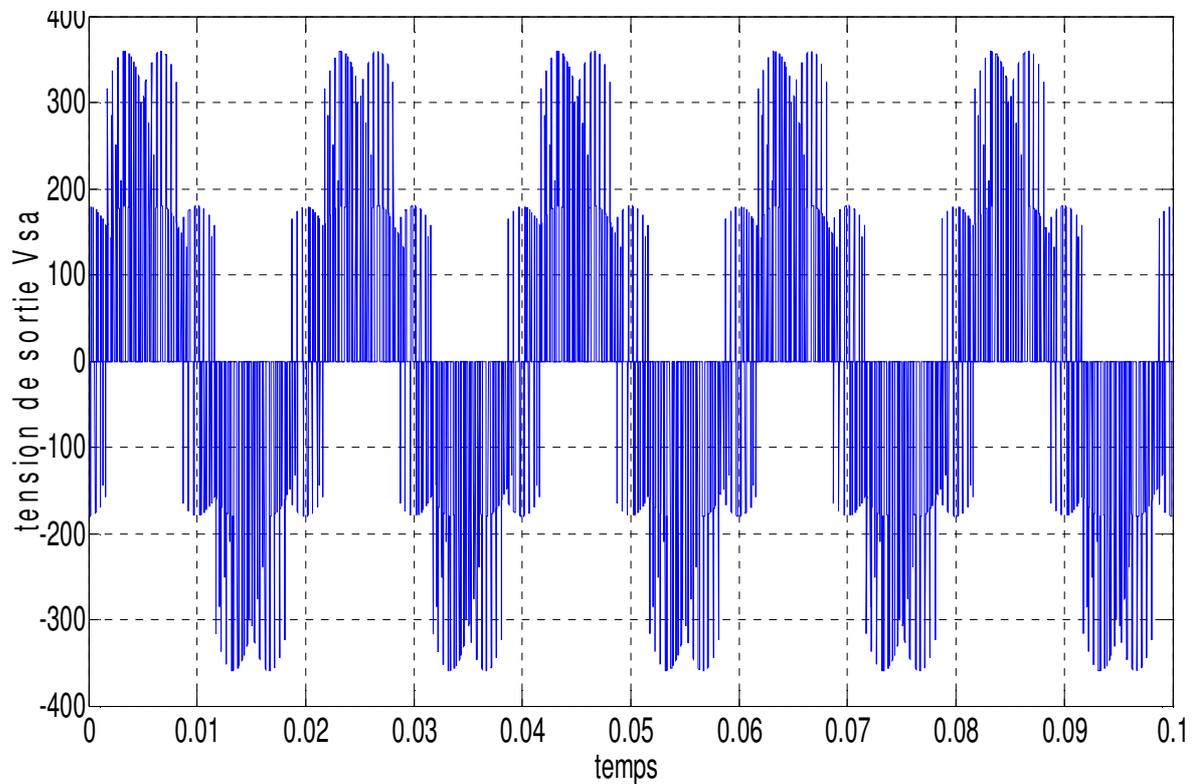


Figure 3.8 : Tension a la sortie de l'onduleur pour la phase Vsa

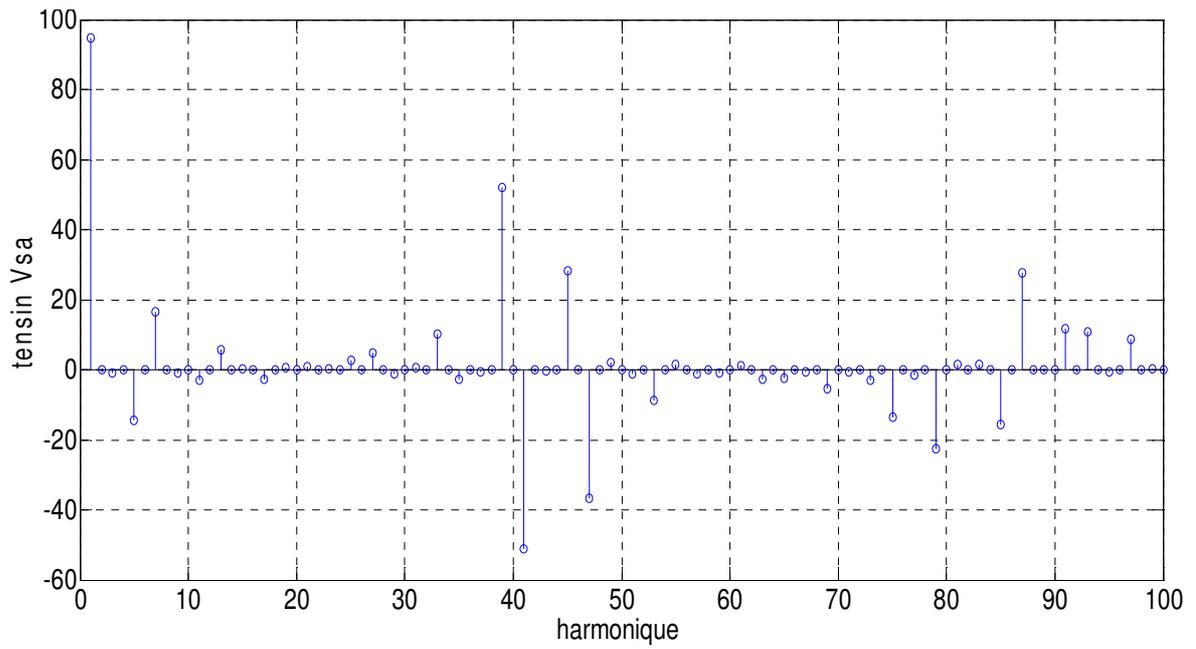


Figure 3.9 : Spectre harmonique de tension a la sortie de l'onduleur pour la phase Vsa

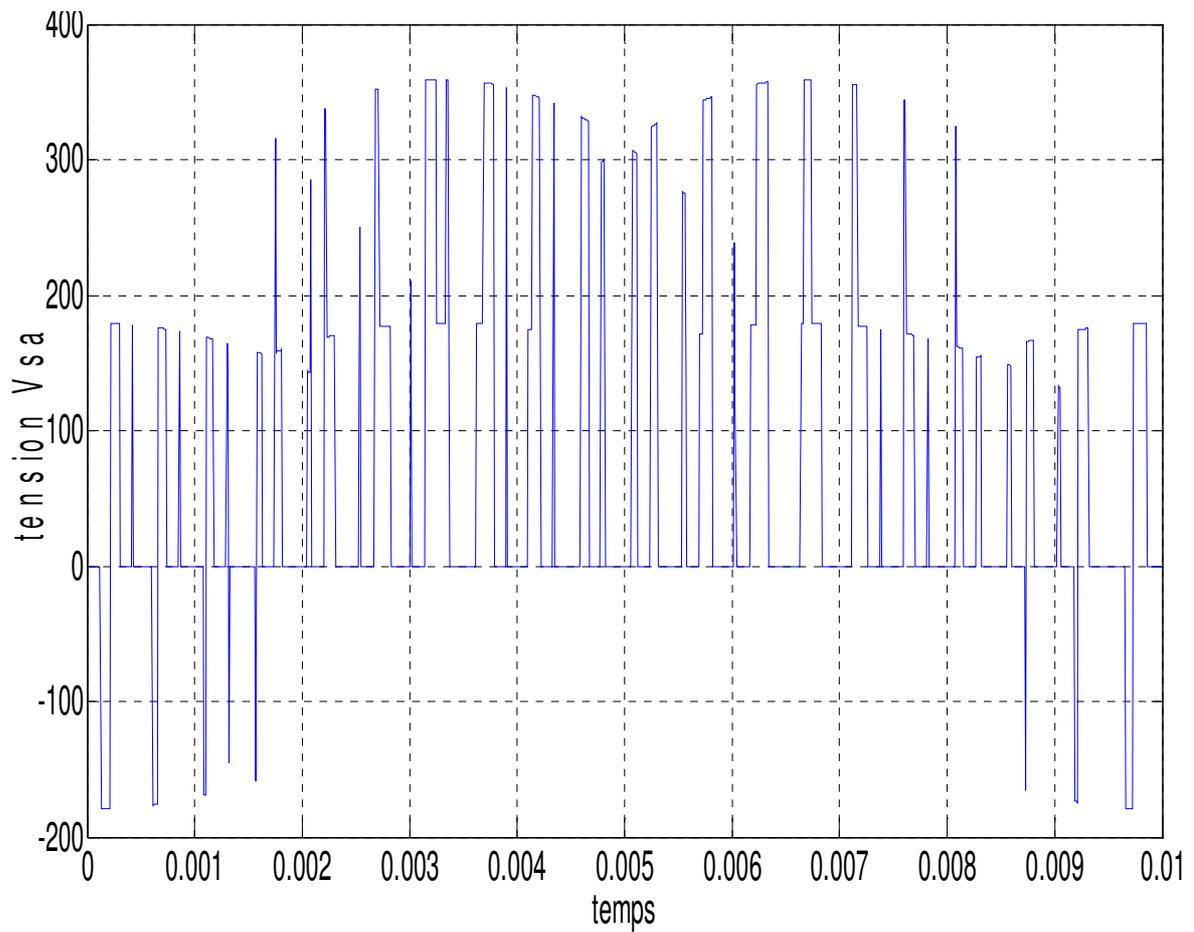


Figure 3.10: Tension a la sortie de l'onduleur pour la phase Vsa après zoom

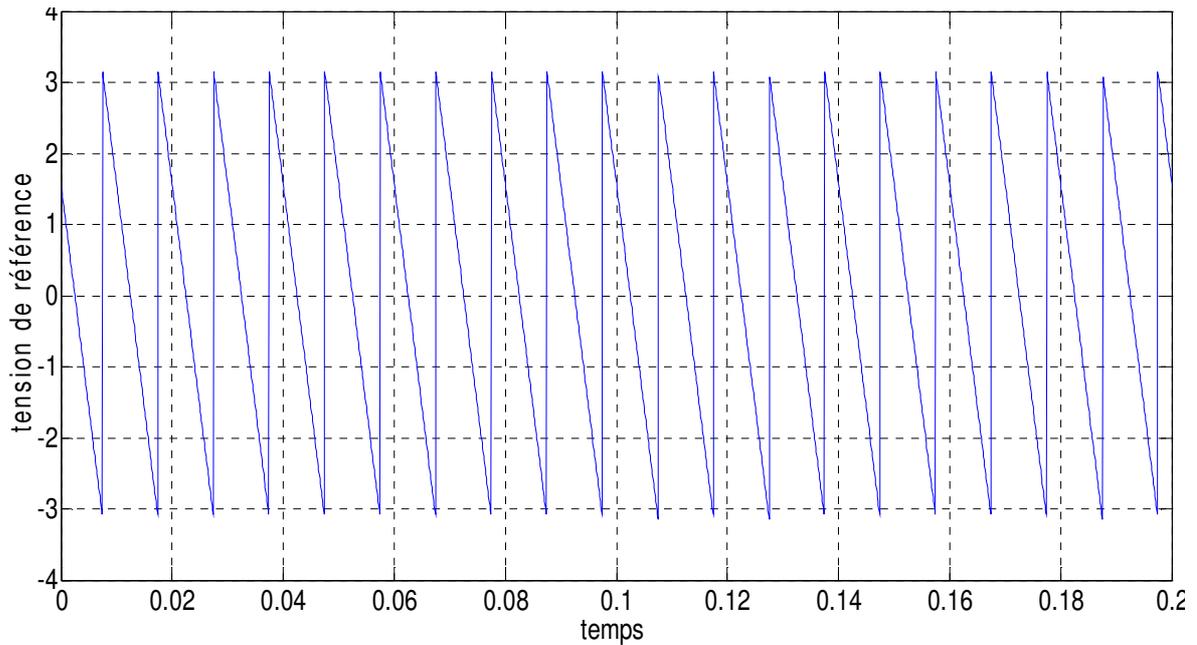


Figure 3.11 : tension de référence pour l'étage onduleur

Les figures (3.8, 3.9, 3.10 et 3.11) montre respectivement la tension de phase a la sortie de convertisseur matriciel indirecte et son spectre harmonique ainsi que son zoom et enfin la tension de référence .on peut constater que la forme de la tension est acceptable malgré l'apparition de quelque harmonique.

### 3.4. Schéma bloc de simulation avec charge R-L

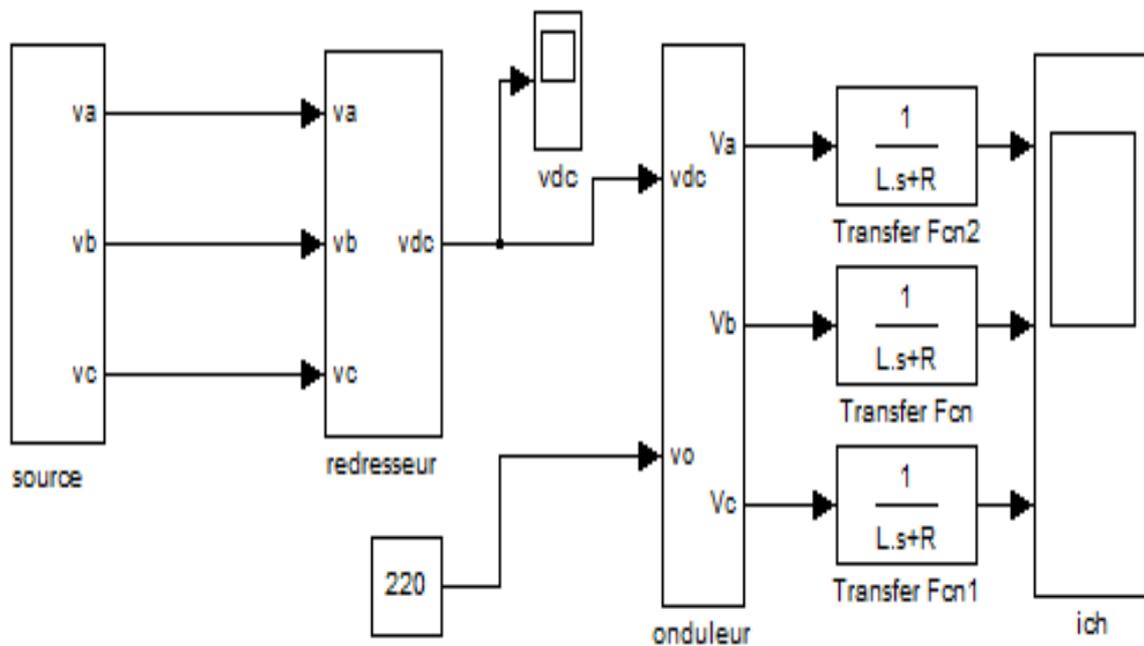


Figure 3.12: Schéma bloc SIMULINK de convertisseur matriciel indirect avec une charge R-L

On ajoute une charge R-L à la sortie de convertisseur matriciel directe qui veut dire à la sortie de l'étage onduleur pour chaque phase.

Et la tension d'une phase :  $V_a = R \cdot I + L \frac{d_i}{d_t} \rightarrow V_a = R \cdot I + PLI$

$V_a = (R + PL) \cdot I \rightarrow I = V_a / (R + LI) = (1 / (LP + R)) \cdot V_a$

Après ajouter ces charge on trouve des courants de charges pour chaque phase (I1, I2, I3)

Et à partir des courants de charge et les interrupteur de l'onduleur (sap, sbp, scp) on trouve le courant Idc et ce courant et donner par l'équation suivante :

$I_{dc} = s_{ap} \cdot I_1 + s_{bp} \cdot I_2 + s_{cp} \cdot I_3$

Et pour la simulation on utilise les paramètres suivants :

- R=1Ω
- L=0.1H

Pour trouver les résultats de simulation des différentes allures qui sont représenté sur les figures suivantes

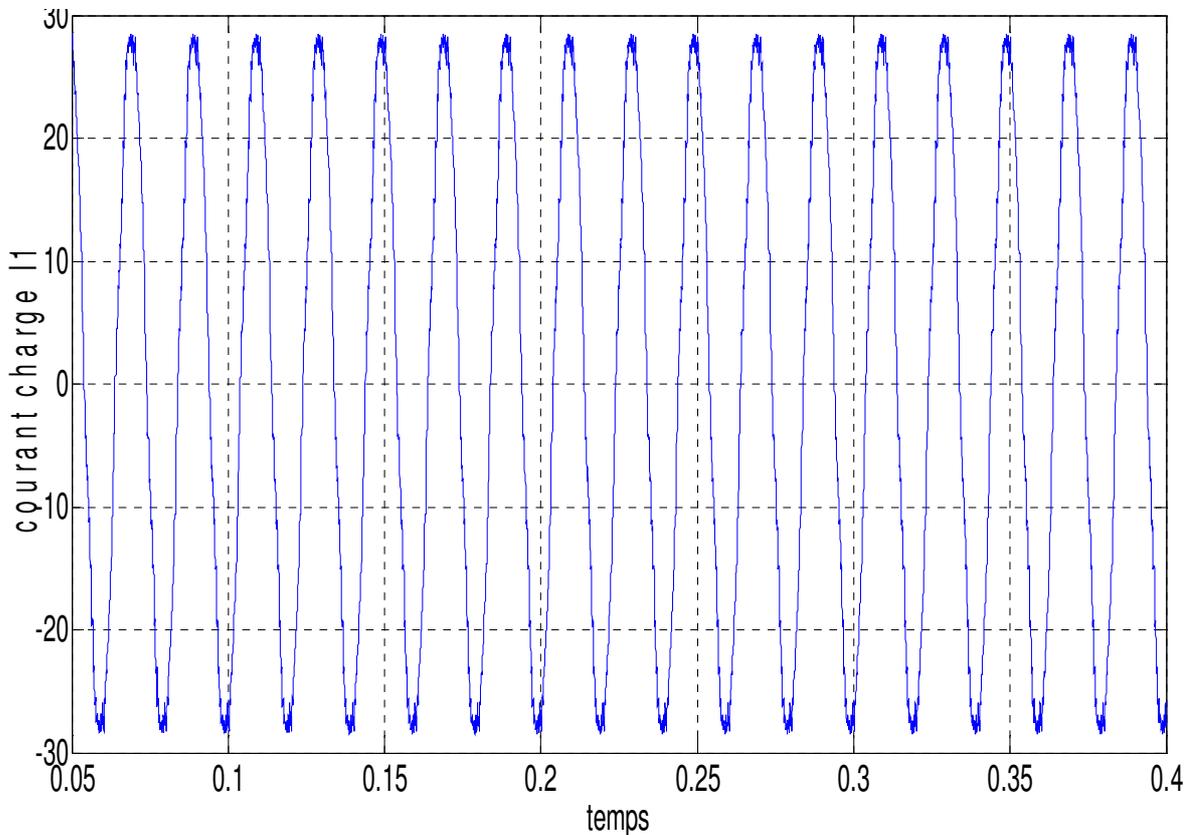
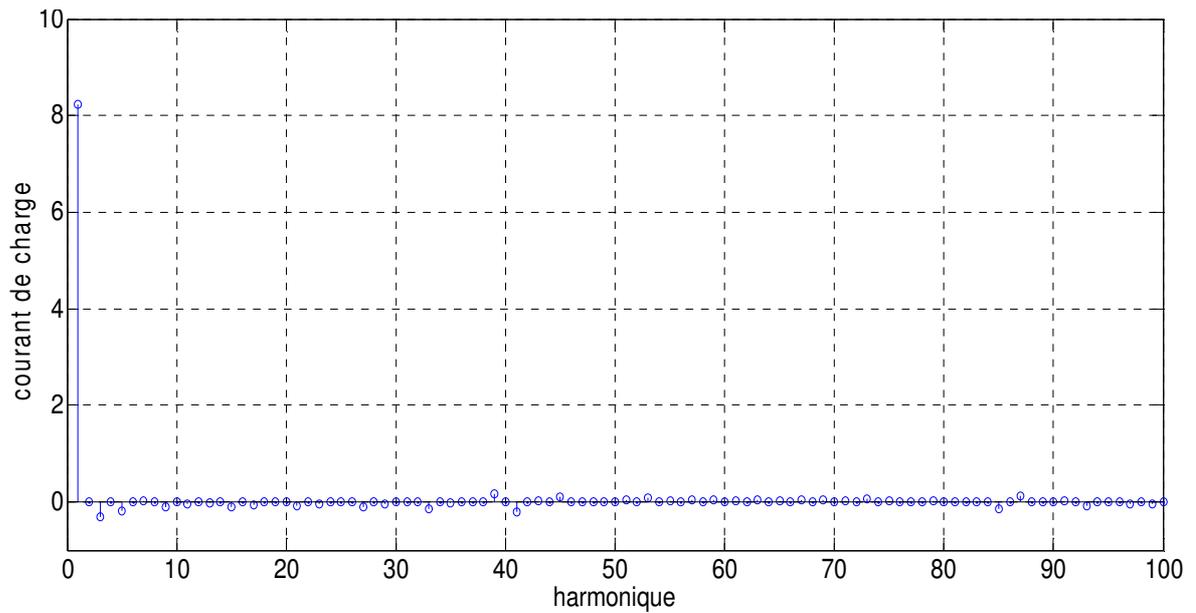
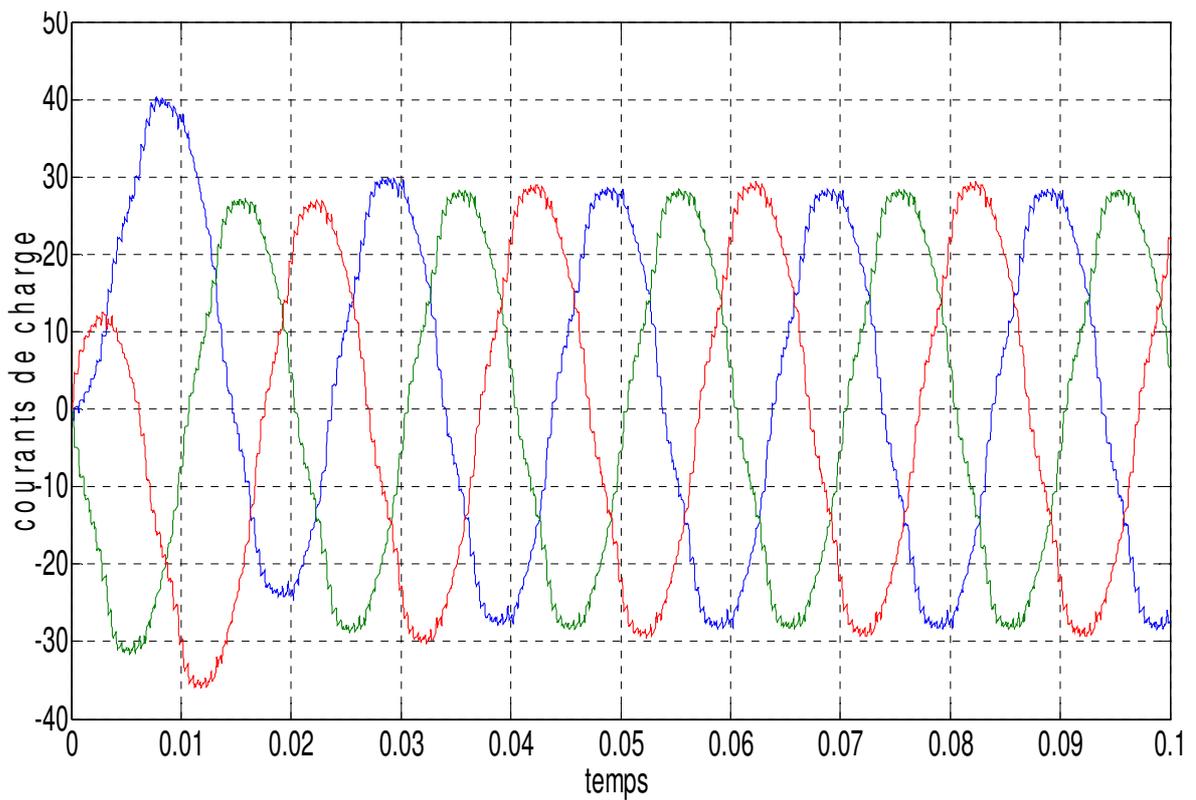


Figure 3.13 : courant de charge de sortie de phase II



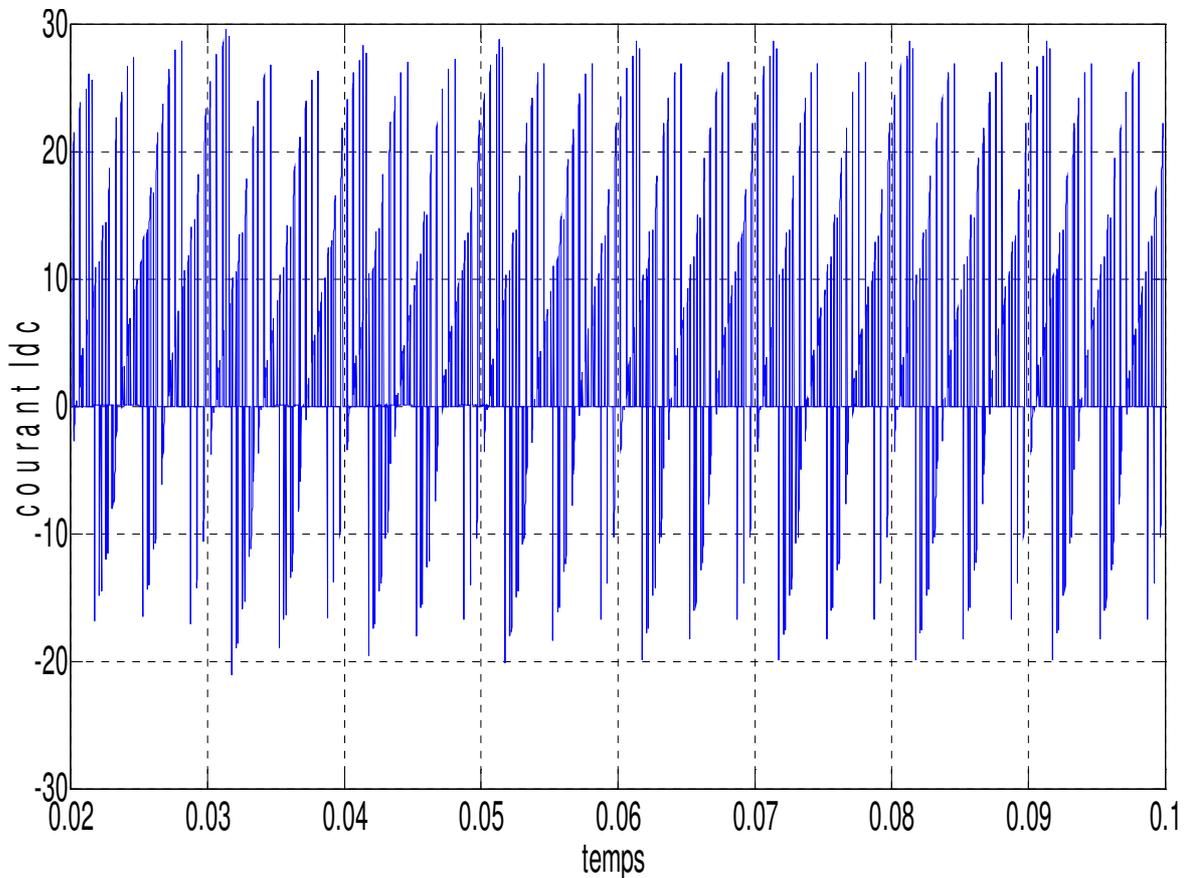
**Figure 3.14 :** spectre harmonique de courant de charge de sortie I1



**Figure 3.15 :** les trois courants de charge

Les figure (3.11, 3.12 et 3.13) représente respectivement le courant de charge de sortie (I1) ainsi son spectre harmonique avec une fréquence d'alimentation 50 Hz pour une charge R-L et les trois courants de charge (I1 I2 I3). On peut constater que la forme

d'onde du courant est très acceptable malgré l'apparition de quelque harmonique d'ordres inférieurs insignifiants. ici le courant n'est pas 100 % sinusoïdale donc le système n'est pas linéaire si pour ça quand constate la présence des harmonique.



**Figure 3.16 :** l'allure de courant Idc

Les figures (3.16) représentent le courant Idc avec une fréquence d'alimentation 50 H.

## Conclusion

Ce chapitre présente les résultats de simulation qui montrent que le convertisseur matriciel indirect satisfait les performances suivantes :

- les formes d'ondes des courants et des tensions sont presque sinusoïdales.
- le convertisseur peut fournir un facteur de puissance unitaire à l'entrée.

Les résultats de simulation montrent que le convertisseur matriciel indirect commandé par la modulation vectoriel possède de bonnes caractéristiques.



# CONCLUSION GENERALE

## CONCLUSION

Un convertisseur matriciel est un convertisseur de fréquence direct, générant des Tensions triphasées variables en amplitude et en fréquence à partir des tensions Triphasées rigides d'entrée. Un circuit intermédiaire continu n'est pas nécessaire. Le Principe est basé sur une topologie matricielle reliant chaque phase d'entrée à chaque Phase de sortie par un commutateur de puissance bidirectionnel.

L'objectif principal de l'étude de ce type de convertisseur est le remplacement des Convertisseurs conventionnels à circuits intermédiaires de tension par des Convertisseurs intégrés au complet dans un module à semi-conducteurs. Ceci Permettrait d'augmenter la durée de vie du convertisseur et diminuerait son volume. De plus, la fabrication de la partie mécanique serait plus simple. Un autre grand Avantage du convertisseur matriciel est la symétrie de la matrice, permettant le flux de Puissance dans les deux sens et ainsi directement le fonctionnement en quatre Quadrants. Les inconvénients du convertisseur matriciel consistent d'abord en une Commutation du courant plus délicate à cause de l'absence des diodes à roue libre. En Outre, la commande est relativement complexe et le rapport entre la tension de sortie Et la tension d'entrée est réduit (0.866 par rapport aux convertisseurs indirects Conventionnels).

# Annexe

**Les paramètres :**

Les paramètres utilisés pour la simulation.

-Tension efficace  $V= 220 \text{ v}$

-courant efficace  $I= 20 \text{ A}$

-la résistance  $R= 1 \ \Omega$

-inductance  $L=0.1\text{F}$

-fréquence nominal  $F_s=50 \text{ HZ}$

-temps commutation  $T_c=\frac{1}{2000} \text{ S}$

-fréquence commutation  $f_c=2 \text{ KH}$

# BIBIOGRAPHIE

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] : LYES AIT OUBELLI, mise en oeuvre d'un modèle générique du convertisseur matriciel dans les environnements EMTP-RV et MATLAB-SIMULINK, ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL, DÉCEMBRE 2011
- [2] : ROBERT THIBAUDI, contrôle de l'énergie injectée dans un réseau électrique par un convertisseur triphasé utilisant un régulateur basé sur un modèle interne sinusoïdal, MONTRÉAL, LE 8 SEPTEMBRE 2006
- [3] : « commande DPC sur un convertisseur matriciel » projet de fin d'étude. IMA5 TUTEUR PHILIPPE DELARUE(2005).
- [4] : thèse doctorat, MELIANI BOUZIANE, Application des techniques intelligentes à la commande d'une machine asynchrone double étoile associée à un convertisseur matriciel (2014).
- [5] : thèse doctorat« BENDOUGA ABDE LHAKIM » contrôle des puissances actives et réactives de la machine à double alimentation, le 10/02/2010 à BATNA
- [6] : K. GHEDA MSI. Contribution a la modélisation et la commande d'un convertisseur De fréquence application a la conduite de la machine asynchrone. These doctorate ENP, Alger. 2008.73
- [7]: M.JUSSILA and H. TUUSSA. Comparison of direct and indirect matrix converters in induction Motor drive. IEEE IECON 2006 annual conference on industrial electronics, page 1621–1626, November 2006.
- [8]: KAI SUN GANG LI. A novel algorithm for space vector modulated two-stage matrix converter. Department of Electrical Engineering, University Beijing.China. 2001
- [9] : F. GRUSON. Modulation naturelle généralisée des convertisseurs matriciels pour la variation de vitesse. Thèse Doctorat de l'école centrale de Lille, 2003.

## Bibliographie

---

[10] : FLORENT MOREL, commandes directes appliquées a une machine synchrone a aimants permanant alimenter par un onduleur triphasée a deux niveaux ou par un convertisseur matriciel triphasée, l'institut national des sciences appliquer de lion, le 6 décembre 2007.

[11] : mémoire fin d'étude, OULEEFKI SOFIANE, étude du convertisseur matriciel application a la conduite de la machine asynchrone double, promotion 2007.

[12] : A. Saad et J. Ghouili M. Khalfallah, A. El afia. Etude comparative des performances De la modulation sinusoïdale régulière et la modulation vectorielle d'un onduleur a Mli. IEEE Transaction, Mai., 2005.

[13] : E.M. Berkouk. Contribution a la conduit des machines asynchrones monophasé Et triphasé alimentées par des convertisseurs directs et indirects. Thèse de doctorat, CNAM, paris. 1995.

[14] : N. Hamrouche A. Gadoum. Analyse des convertisseurs de fréquence indirecte à structure Matriciel. Mémoire de master en électrotechnique, université de Bejaia, 2011.

[15] : N. Makloufi K. Slaouti. Commande d'une machine asynchrone double étoile alimente Par convertisseurs matriciels indirects. Mémoire de master en électrotechnique, universite de Bejaia, 2012.

[16]: M. Jussila. Comparison of space vector modulated direct and indirect matrix converter  
In Low-power application. Tampere University of technology, publication 686.

[17]: R.A. Petrocelli. New modulation method for matrix converters. A thesis submitted To the University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty Of Science and Engineering. May, 2002.

[18]: K. Sangshin and amid A. Toliyat. An apprhoach for matrix converter based induction Motor drive with unity power factor and minimum switching losses. IEEE, Texas A

## **Bibliographie**

---

And M University, College Station.

[19]: M. Yeong Lee. Three-level neutral-point-clamped matrix converter topology. MSc in Electrical Engineering, the University of Nottingham.

[20]: A. Azib. Etude et commande d'une machine asynchrone double étoile alimentée par Convertisseurs matriciels. Mémoire magister en électrotechnique, université de Bejaia, 2009.