

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des nouvelles technologies de l'information et de la communication

Département d'Electronique et des Télécommunications



Domaine : Science et technologie

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation et systèmes

Présenté par :

MOGDAD Zahrat Ennada

LAKAB Abderahman

Thème :

**Commande directe de puissance des
convertisseurs multiniveaux à diodes
flottantes connectés aux réseaux**

Soutenu publiquement devant de jury :

President	KADRI Farid	MAA (U.K. M. Ouargla)
Examineur	CHAIB Ibtissam	MAB (U.K. M. Ouargla)
Encadreur	BOUZIDI Mansour	MCA (U.K. M. Ouargla)
Co-Encadreur	MEHAOUCHI Azeddine	MAA (U.K. M. Ouargla)

Anne université 2022-2023

Remerciement

Remerciant Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mettre en œuvre ce projet.

Nous tenons à remercier notre encadrante, ***Dr. Bouzidi Mansour et Dr. Mehaouchi Azzedine*** maître de conférences à l'Université Kasdi Merbah de Ouargla, qui a fait de gros efforts par ses informations, ses bons conseils, sa bonne orientation et ses encouragements lors de la préparation du sujet.

Nous tenons également à remercier les membres du jury d'avoir accepté l'évaluation de ce travail et cette lettre. Nous tenons également à remercier tous nos collaborateurs qui nous ont soutenus et encouragés dans la réalisation de ce travail. Nous adressons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail, et nous tenons à les remercier.

Merci à tous..

DÉDICACE

A mes chers parents

Quoi que je dise ou que je fasse, je n'arrivai jamais à vous remercier comme il se doit. C'est grâce à vos encouragements, vos bienveillances et votre présence à mes côtés, que j'ai réussi ce respectueux parcours.

Je souhaite que vous soyez fière de moi, et que j'ai pu répondre aux espoirs que vous avez fondé en moi.

A mes chers frères

Merci pour vos soutiens moral, vos confiances et vos conseils précieux, qui m'ont aidé dans les moments difficiles.

Je vous souhaite le bonheur et la réussite dans vos vies.

A toute ma famille et mes amis

À travers ses lignes je ne peux pas vous décrire tous mes sentiments d'amour, le seul mot que je peux dire est merci, vraiment merci beaucoup à toute personne qui a contribué à la réalisation de ce mémoire.

Resumé

Le but de ce travail est de synthétiser et de simuler la stratégie de contrôle direct de la puissance (DPC) pour les convertisseurs à deux, trois et cinq niveaux connectés au réseau. Le DPC repose principalement sur la table de commutation, qui sélectionne les états de commutation appropriés en fonction des erreurs de puissance active/réactive ainsi que de la position du vecteur de tension du réseau. Les états de commutation augmentent en augmentant le niveau du convertisseur, par conséquent, chaque niveau du convertisseur a sa propre table de commutation. Des résultats de simulation basés sur MATLAB Simulink sont fournis pour évaluer le DPC présenté pour les convertisseurs connectés au réseau à plusieurs niveaux.

Mots clés : Contrôle direct de puissance, Onduleur multiniveau, Onduleur connectés au réseau, Table de commutation.

Abstract

The purpose of this work is to synthesize and simulation of the direct power control strategy (DPC) for the two-level, three-level, and five-level grid-connected converters. The DPC is based mainly on the switching table, which selects the suitable switching states based on the active/reactive power errors as well as the position of the grid voltage vector. The switching states increase by increasing the converter level, therefore, each converter level has its own switching table. Simulation results based on MATLAB Simulink are provided to evaluate the presented DPC for multilevel grid-connected converters.

Keywords : Direct power control, Multi-level inverter, Grid-connected inverter, Switching table.

ملخص

الغرض من هذا العمل هو تجميع ومحاكاة استراتيجية التحكم المباشر في الطاقة (DPC) للمحولات المتصلة بالشبكة ذات المستويين والثلاثة مستويات وخمسة مستويات. يعتمد DPC بشكل أساسي على جدول التبديل، والذي يحدد حالات التبديل المناسبة بناءً على أخطاء الطاقة النشطة / التفاعلية بالإضافة إلى موضع متجه جهد الشبكة. تزداد حالات التبديل بزيادة مستوى المحول، وبالتالي، يكون لكل مستوى محول جدول تبديل خاص به. يتم توفير نتائج المحاكاة المستندة إلى MATLAB Simulink لتقييم DPC المقدم للمحولات متعددة المستويات المتصلة بالشبكة.

الكلمات المفتاحية : تحكم مباشر في الطاقة، عاكس متعدد المستويات، عاكس متصل بالشبكة، جدول التبديل.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	I
-----------------------------	---

CHAPITRE I

COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE DE L'ONDULEUR A DEUX NIVEAUX CONNECTE AU RESEAU

1.1.	INTRODUCTION	1
1.2.	CONVERTISSEURS A DEUX NIVEAUX	1
1.2.1.	<i>Modélisation de l'onduleur a deux niveaux</i>	1
1.2.2.	<i>Représentation vectorielle</i>	5
1.3.	MODELISATION D'ONDULEUR CONNECTE AU RESEAU	7
1.3.1.	<i>Réseau électrique</i>	7
1.3.2.	<i>Filtre de raccordement</i>	7
1.4.	COMMANDE DIRECTE DE LA PUISSANCE DE L'ONDULEUR A DEUX NIVEAUX	8
1.4.1.	<i>Sélection du secteur</i>	9
1.4.2.	<i>Contrôleurs à hystérésis</i>	9
1.4.3.	<i>Table de commutation</i>	10
1.5.	RESULTATS DE SIMULATION	11
1.6.	CONCLUSION	15

CHAPITRE II

COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE DE L'ONDULEUR A TROIS NIVEAUX CONNECTE AU RESEAU 16

2.1.	INTRODUCTION	16
2.2.	ONDULEUR NPC A TROIS NIVEAUX	16
2.2.1.	<i>Modélisation de l'onduleur à trois niveaux</i>	16
2.2.2.	<i>Représentation vectorielle</i>	19
2.3.	COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE DE L'ONDULEUR A TROIS NIVEAUX NPC	21
2.3.1.	<i>Sélection du secteur</i>	22
2.3.2.	<i>Régulateurs à hystérésis</i>	23
2.3.3.	<i>Table de commutation</i>	23
2.4.	RESULTATS DE SIMULATION	24
2.5.	CONCLUSION	28

CHAPITRE III

COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE DE L'ONDULEUR A CINQ NIVEAUX CONNECTES AU RESEAU

3.1.	INTRODUCTION	29
3.2.	MODELISATION DE L'ONDULEUR A CINQ NIVEAUX	29
3.2.1.	<i>Fonctions de connexion des demi-bras</i>	31
3.2.2.	<i>Représentation vectorielle</i>	33
3.3.	COMMANDE DIRECTE DE LA PUISSANCE DE L'ONDULEUR A CINQ NIVEAUX :	35
3.3.1.	<i>Sélection du secteur</i> :	35
3.3.2.	<i>Table de commutation</i>	36
3.4.	RESULTATS DE SIMULATION :	40
3.5.	CONCLUSION :	46
	CONCLUSION GÉNÉRALE	47
	REFERENCE :	48

List des figures

Figure (1.1) : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC– AC)	1
Figure (1.2) : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.....	2
Figure (1.3) : Diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux	6
Figure (1.4) : Schéma électrique d'un onduleur triphasé connecté au réseau	7
Figure (1.5) : Schéma de principe de la commande DPC à deux niveaux	8
Figure (1.6) : Principe de fonctionnement de comparateur d'hystérésis	9
Figure (1.7) : Modèle de simulation de l'onduleur connecté au réseau dans MATLAB Simulink.	11
Figure (1.8) : Block de la commande directe de puissance d'un onduleur à deux niveaux.	12
Figure (1.9) : Résultats de simulation des puissances active et réactive et leur référence pour l'onduleur à deux niveaux connecté au réseau	13
Figure (1.10) : Résultats de simulation des tensions du réseau et des courants de lignes d'un onduleur à deux niveaux connectés au réseau.	14
Figure (1.11) : Résultats de simulation du courant i_a , de la tension v_a et du secteur pour un onduleur à deux niveaux connectés au réseau.	14
Figure (2.1) : Structure d'un onduleur triphasé à structure NPC	17
Figure (2.2) : Représentation vectorielle des états de l'onduleur à trois niveaux NPC.....	21
Figure (2.3) : Schéma de principe de la commande DPC d'onduleur à trois niveaux	22
Figure (2.4) : Plant (α, β) divisé en 12 secteurs	23
Figure (2.5) : Schéma block de la commande DPC dans MATLAB Simulink pour l'onduleur trois niveaux	25
Figure (2.6) : Modèle de simulation de l'onduleur connecté au réseau dans MATLAB Simulink	25
Figure (2.7) : Les puissances active et réactive et leur référence pour un onduleur à trois- niveaux connecté au réseau	26
Figure (2.8) : Les tensions de réseau et les courants de lignes	27
Figure (2.9) : (a) : Le courant i_a et la tension v_a , (b) La position de vecteur de réseau (Secteur)	27

Figure (3.1) : Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux.....	29
Figure (3.2) : Onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes.	30
Figure (3.3) : Schéma fonctionnel de l'onduleur à cinq niveaux	31
Figure (3.4) : diagramme vectorielle de l'onduleur à 5 niveau	34
Figure (3.5) : Plan $\alpha \beta$ divisé en 24 secteurs.	35
Figure (3.6) : Influence des vecteurs tension sur les puissances active et réactive instantanées v_g	36
Figure (3.7) : Comparateur d'hystérésis pour l'onduleur a cinq niveaux, (a) pour la puissance active, (b) pour la puissance réactive	37
Figure (3.8) : Block de la commande directe de puissance d'un onduleur à cinq niveaux.....	41
Figure (3.9) : Schéma block de la commande DPC pour l'onduleur cinq niveaux en utilisant MATLAB Simulink.....	41
Figure (3.10) : Résultats de simulation des puissances active et réactive et leur référence pour un onduleur à cinq-niveaux connecté au réseau	42
Figure (3.11) : Résultats de simulation des tensions du réseau et des courants de lignes d'un onduleur à cinq-niveaux connecté au réseau.	43
Figure (3.12) : Résultats de simulation du courant i_a , de la tension v_a et du secteur pour un onduleur à cinq niveaux connecté au réseau	43
Figure (3.13) : Spectre d'harmonique de courant de ligne, (A) : pour l'onduleur à deux niveaux, (B) : pour l'onduleur à trois niveaux, (C) : pour l'onduleur à cinq niveaux.....	44

List des tableaux

Table (1.1) : Etats de l'onduleur et les coordonnées du vecteur v_i dans le plan (α, β)	5
Table (1.2) : Table de commutation de la commande DPC de l'onduleur 2 niveaux.	10
Table (2.1) : Etats d'un bras de l'onduleur à 3 niveaux.	18
On peut représenter le tableau (2.2) dans le plan $\alpha\beta$ sous forme de figure, la figure (2.2) représente le diagramme vectoriel de l'onduleur trois niveaux NPC. On peut remarquer que seuls 19 vecteurs qui forment les 27 états de l'onduleur. Cela est dû aux redondances d'états qui apparaissent près du centre. Par exemple, les états 222,111 et 000 représentent le même vecteur malgré ils sont différents.	
Table (2.2) : Etats de l'onduleur à trois niveaux NPC et les coordonnées du vecteur $(\alpha \beta)$	20
Table (2.3) : Table de commutation DPC pour l'onduleur à trois niveaux	24
Table (3. 1) : Etats d'un bras de l'onduleur à 5 niveaux ($x = a, b$ ou c)	31
Table (3.2) : Table de commutation de la DPC pour l'onduleur a 5 niveaux.....	38
Table (3.3) : THD du courant de ligne et l'ondulation des puissances active et réactive par rapport aux valeurs de bande d'hystérésis H_p et H_q pour l'onduleur NPC à trois niveaux et deux niveaux et cinq niveau.....	45
Table (3.4) : THD du courant de ligne et l'ondulation des puissances active et réactive en fonction de la période d'échantillonnage pour l'onduleur NPC à cinq et trois niveaux et deux niveaux.....	46

List des Symboles

S : surface du module photovoltaïque en mètre carré.

I_{ph} : photo-courant (A).

R_{ph} : Résistances parallèle shunt en ohm.

I_{cc}: courant de court-circuit (A).

R_s : Résistances série en ohm.

α : coefficient de courant en fonction de température (A/C).

E : Eclairage de référence (1000w/mètre carré).

T_{ref} : Température de référence (298 k).

V_{co} : tension de circuit ouvert.

q : charge d'électron (1.6/10puissance 19).

I_{op}: courant optimum (A).

V_{op} : tension optimal (V).

I_{gpt}= diode multi parallel avec thyristor.

V_{AN} , V_{BN} , V_{CN}= les tension entre les borne a,b,c.

α , β = plan divisé en 12 secteur don l'onduleur 2 niveau et en 24 dans l'onduleur a 5 niveau.

S_p et S_q= les régulateur numérique ou l'entre de la table de comutation prendre les valeur 1 ou 0

DC/AC = convertiseur courant alternative vers le courant continue.

S_a S_b S_c ou K₁ K₂ K₃ = diode multi parallel avec thyristor.fermé ou ouvert.

Tita1=sector1 **Tita2**=sector2 **Tita3**=sector3

V₁=vecteur 1 **V₂**=vecteur 2 **V₃**=vecteur 3

I_a=le courant dans le bras a

I_b=le courant dans le bras b

I_c=le courant dans le bras c

V_i =le vecteur

R = résistance

L = inductance

V_{ra}=V_{rb}=V_{rc} = la tension de réseau triphasé

W₀ = la pulsation

f₀ = la fréquence

V_m = la valeur maximale

T_{d1}=T_{d2}=T_{d3}=T_{d4}=T_{d5} = le IGBT de la diode 5 niveau

H_p = H_q = le écart de la bande de hystérèse

I_{hd} = le courant de ligne

Delta (p)/p = l'ondulation de puissance active

Delta(Q)/Q = l'ondulation de la puissance réactive

NPC = Neutral Point Clamped

V_{x0} = la tension de sortie primaire

DPC = contrôle direct de puissance

V_{c1} = la tension de le bras 1

V_{c2} = la tension de le bras 2

V_{c3} = la tension de le bras 3

v_{cj}, j = 1, 2, 3, 4 = tensions aux bornes des condensateurs

P = puissance active

q = puissance réactive

P_{ref} = la puissance de le régulateur hystérèse

Introduction générale

L'énergie est indispensable à tous nos activités, elle ouvre la voie à aux-innovations et à des secteurs nouveaux qui sont autant de moteurs de création d'emplois, de croissance inclusive et de prospérité partagée [1]. Pourtant près de 733 millions d'habitants de la planète vivent sans électricité [2].

L'un des dispositifs clés des convertisseurs de puissance est l'onduleur de tension conventionnel ou multiniveaux connecté au réseau, qui est utilisé pour transformer le courant continu en courant alternatif [3].

Récemment, diverses stratégies de contrôle ont été développées pour améliorer sa fiabilité, son efficacité et sa sécurité par des ingénieurs et des chercheurs. Parmi ces méthodes de contrôle, la stratégie de contrôle direct de puissance est apparue comme une méthode de contrôle appropriée pour les onduleurs connectés au réseau au car elle permet un contrôle efficace et direct des puissances active et réactive, de plus, elle ne nécessite aucun bloc de modulation ou boucles de régulation des courants [4].

De l'autre côté, le contrôle des onduleurs à deux niveaux et à plusieurs niveaux est un sujet très intéressant. Par conséquent, les chercheurs se sont intéressés au développement de plusieurs méthodes de contrôle, parmi lesquelles le contrôle direct de la puissance (DPC) est devenu une excellente technique de contrôle. [2] L'idée principale de la DPC proposée initialement par Ohnishi (1991) et développée ensuite par Noguchi et Takahachi en 1998, est similaire à la commande directe du couple (DTC) des machines asynchrones. Au lieu du flux et du couple, les puissances active et réactive [3].

Le but du contrôle direct de puissance était d'éliminer le bloc de modulation de largeur d'impulsion (MLI) et les boucles de régulations internes des variables contrôlées, en les remplaçant par une table de commutation prédéfinie, dont les entrées sont les erreurs de suivi de référence des puissances active et réactive et la sortie est le vecteur de commande [4, 5].

Les différentes configurations du DPC, définies dans la littérature, se subdivisent en deux catégories :

- **DPC utilisant le vecteur de tension (V-DPC) :** les références [3], [6] et [7] établissent des configurations du DPC basées sur la position du vecteur de tension dans le repère stationnaire.

- **DPC utilisant le flux virtuel** : dans [8], [9] et [10], les configurations détaillées sont basées sur le calcul d'un flux virtuel. Dans [7], les auteurs suggèrent d'associer le principe DPC avec une modulation de largeur d'impulsion vectorielle (SVM) afin d'obtenir une fréquence de commutation constante sans l'utilisation d'une table de commutation [6] .

D'autres structures du DPC basées sur des approches prédictives ont été récemment publiées [11] et [12]. Le principe du contrôle direct de puissance est également étendu à d'autres applications. Dans ce contexte, les références [13, 14] et [11], exploitent le principe du DPC avec un onduleur de tension pour un système de filtrage actif, pour un moteur asynchrone à double alimentation et pour une interconnexion au réseau, respectivement.

Dans ce travail, le vecteur de tension basé sur DPC a été utilisé pour contrôler le flux de puissance active et réactive de l'onduleur connecté au réseau, la DPC a été appliqué pour les onduleurs à deux et trois niveaux. [2]

L'objectif principal de cette travaille est l'analyse et la synthèse de la commande directe de puissance pour les onduleurs multiniveaux. Nous commençons avec l'onduleur conventionnel à deux niveaux, nous passons à l'application du DPC sur les onduleurs à trois et cinq niveaux de structure NPC.

Le premier chapitre présenté la modélisation et le contrôle de l'onduleur à deux niveaux à l'aide du DPC. Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de l'onduleur NPC à trois niveaux ainsi qu'à la synthèse de sa technique DPC. Et le dernier chapitre sera réservé à l'onduleur à cinq niveaux, sa modélisation et son contrôle par DPC, une conclusion de ce travail sera fournie.

Chapitre I

**Commande directe de puissance
de l'onduleur à deux niveaux
connecté au réseau**

Chapitre I

Commande directe de puissance de l'onduleur à deux niveaux connecté au réseau

1.1. Introduction

Avec le développement de l'électronique de puissance et des composants à semi-conducteurs, la technique des onduleurs multi niveaux représente un domaine de recherche important ce dernier lié également à des tensions plus élevées. D'autre part, on cherche à obtenir des grandeurs de sortie ayant une meilleure définition, c'est-à-dire présentent un contenu harmonique réduit [2].

Le premier chapitre sera consacré à la modélisation de l'onduleur conventionnel à deux niveaux, après cela, la stratégie de contrôle de puissance directe pour cet onduleur sera analysée et synthétisée en détail.

1.2. Convertisseurs à deux niveaux

Les onduleurs sont des convertisseurs de type continu-alternatif. Le principe de fonctionnement De ces convertisseurs 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 (1.1), on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion.

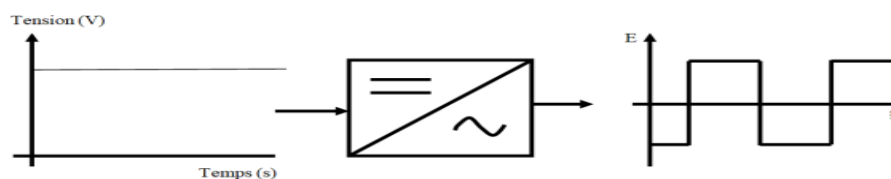


Figure (1.1) : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC- AC) . [2]

Dans ce chapitre, on intéresse par les onduleurs à deux niveaux.

1.2.1. Modélisation de l'onduleur a deux niveaux

L'onduleur deux niveaux est illustré par son circuit de puissance de la Figure (1.2). On doit distinguer d'une part les tensions de branche v_{an} , v_{bn} , v_{cn} mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue v_{dc} des panneaux photovoltaïques, d'autre part, il y a les tensions

de phases v_{an} v_{bn} et v_{cn} mesurées par rapport à un point neutre flottant n. Des tensions simples on peut tirer facilement les tensions composées v_{ab} v_{bc} et v_{ca} Figure (1.2). [2]

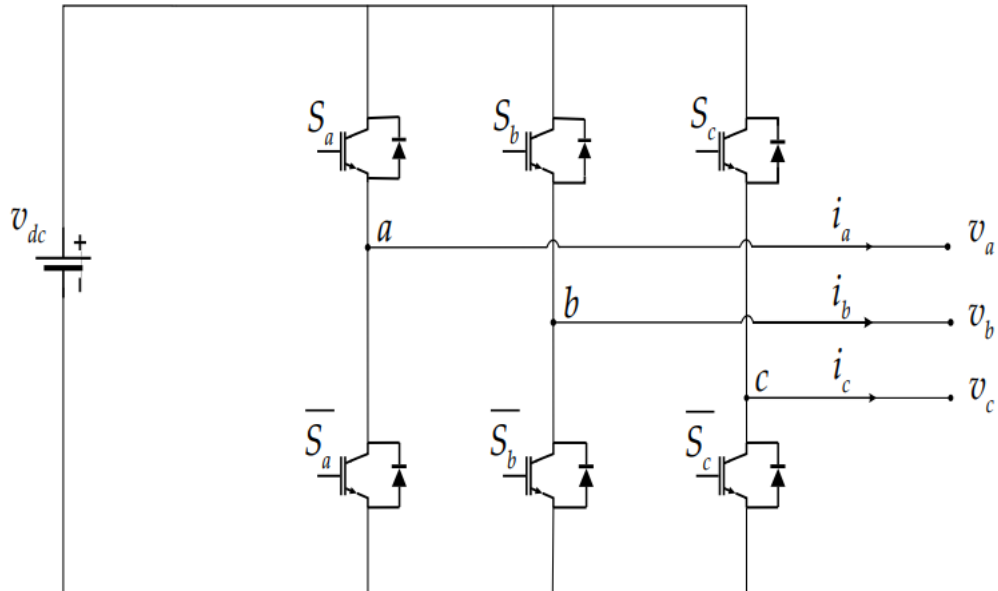


Figure (1.2) : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé . [2]

Pour simplifier l'étude on crée un point milieu o par deux condensateurs fictifs chacune prend la moitié de la tension continue v_{dc}

La structure générale d'un onduleur de tension à deux niveaux est représentée dans (la figure 1.2). L'onduleur est composé de trois bras chacun comportant deux interrupteurs bidirectionnels et entièrement à l'ouverture et à la fermeture.

Dans ce travail on a utilisé des IGBTs misent en antiparallèle avec des diodes pour assurer la circulation bidirectionnelle du courant.

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion. Cette dernière décrit leurs états ouvert ou fermé.

Chaque interrupteur K_{xi} est associé à une fonction de connexion S_{xi} , tel que :

$$S_{xi} = 1 \text{ si } K_{xi} \text{ ferme et } S_{xi} = 0 \text{ si } K_{xi} \text{ ouvert} \quad (1.2)$$

Où $x=a, b, c$ est l'indicateur de phase et $i=1, 2$ est le numéro de l'interrupteur du bras x.

Sachant que la fermeture ou l'ouverture simultanée des deux interrupteurs du même bras conduit au risque de destruction du condensateur et des composants semi-conducteurs soit par sur intensité soit par sur tension, il est indispensable de réaliser une commande complémentaire entre les deux interrupteurs K_{x1} et K_{x2} Figure (1.1). [2]

Ce qui conduit à la relation logique suivante :

$$S_{x2} = \overline{S_{x1}} = 1 - S_{x1} \quad (1.3)$$

L'onduleur de tension à deux niveaux délivre deux niveaux de tensions ($\frac{v_{dc}}{2}$) ou ($-\frac{v_{dc}}{2}$) suivant la fonction de connexion comme illustré dans l'équation suivante :

$$v_{xo} = \frac{v_{dc}}{2} (2S_{x1} - 1) \quad (1.4)$$

Où v_{xo} est la tension simple entre la phase x et le point milieu o. Les tensions composées entre phases v_{xy} deviennent :

$$v_{xy} = v_{xo} - v_{yo} = v_{dc} (S_{x1} - S_{y1}) \quad (1.5)$$

Avec $y \neq x = abc$:

Indicateurs de phases. Les grandeurs que l'on souhaite contrôler grâce à l'onduleur sont les tensions simples côté charge (v_a , v_b et v_c). Pour une charge triphasée équilibrée, ces tensions vérifient la relation suivante :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (1.6)$$

Les tensions phases neutre sont données, en fonction des tensions composées et des tensions phases point milieu, par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{ab} & - & v_{ca} \\ v_{bc} & - & v_{ab} \\ v_{ca} & - & v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

La forme complexe de la tension de sortie est donnée par :

$$v = v_a e^{i0} + v_b e^{-j2\pi/3} + v_c e^{j2\pi/3} \quad (1.8)$$

Après avoir transformé le système triphasé dans un système biphasé par la transformation de Concordia, on peut représenter le vecteur v dans un espace à deux dimensions (α , β) par :

$$v = v_\alpha + jv_\beta \quad (1.9)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Sachant que la fermeture ou l'ouverture simultanée des deux interrupteurs du même bras conduit au risque de destruction des composants semi-conducteurs soit par surintensité soit par surtension, il est indispensable de réaliser une commande complémentaire entre les deux interrupteurs ce qui conduit à la relation logique suivante. [2]

$$S_x = \overline{S_x} \quad (1.11)$$

La tension de sortie peut être écrite sous la forme suivante .

$$S_x = \frac{v_{dc}}{2} (2S_x - 1) \quad (1.12)$$

Les trois tensions phases-point milieu v_{ao} v_{bo} et v_{co} sont exprimées par :

$$\begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{2} \begin{bmatrix} 2S_a & -1 \\ 2S_b & -1 \\ 2S_c & -1 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Les tensions composées entre les trois phases :

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ao} & - & v_{bo} \\ v_{bo} & - & v_{co} \\ v_{co} & - & v_{ao} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a & - & S_b \\ S_b & - & S_c \\ S_c & - & S_a \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Les grandeurs que l'on souhaite contrôler grâce à l'onduleur sont les tensions simples côté charge (v_a , v_b et v_c). Pour une charge triphasée équilibrée, ces tensions vérifient la relation suivante ($v_a + v_b + v_c = 0$).

Les tensions phases-neutre sont données, en fonction des tensions composées et des tensions phases- point milieu, par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{ab} & - & v_{ca} \\ v_{bc} & - & v_{ab} \\ v_{ca} & - & v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Et en fonction des fonctions de commutations par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

La forme complexe de la tension de sortie est donnée par :

$$\vec{v} = v_a e^{j\theta} + v_b e^{j2\pi/3} + v_c e^{j4\pi/3} \quad (1.17)$$

Après avoir transformé le système triphasé a un système biphasé par la transformation de Concordia, on peut représenter le vecteur ρv dans un espace à deux dimensions ($\alpha ; \beta$,) par :

$$v = v_{j\alpha} + jv_{j\beta} \quad (1.18)$$

Ces composantes peuvent être exprimées en fonction des fonctions de connexions par la relation suivante : [2]

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

1.2.2. Représentation vectorielle

Le tableau (1.1) représente les différents états de l'onduleur et les coordonnées du vecteur de tension de sortie v_i correspondant à chaque état dans le repère (α, β) . [2]

Table (1.1) : Etats de l'onduleur et les coordonnées du vecteur v_i dans le plan (α, β) . [2]

S_a	S_b	S_c	v_α	v_β	v_i
0	0	0	0	0	v_0
1	0	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}$	0	v_1
1	1	0	$\sqrt{\frac{1}{6}}v_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}v_{dc}$	v_2
0	1	0	$-\sqrt{\frac{1}{6}}v_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}v_{dc}$	v_3
0	1	1	$-\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}$	0	v_4
0	0	1	$-\sqrt{\frac{1}{6}}v_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}v_{dc}$	v_5
1	0	1	$\sqrt{\frac{1}{6}}v_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}v_{dc}$	v_6
1	1	1	0	0	v_7

Comme on peut le voir, les combinaisons (111) et (000) donnent toujours des vecteurs nuls. La figure (1.3) montre la représentation dans le plan complexe des six vecteurs non nuls, qui peuvent être générés par l'onduleur, et qui forment le diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux ou l'hexagone de commutation Figure (1.3).

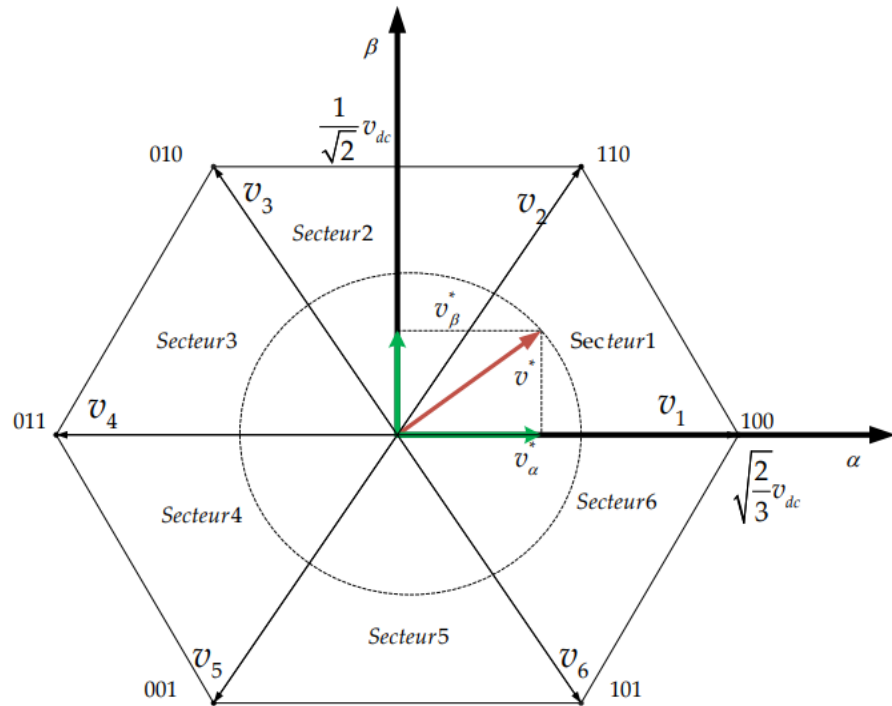


Figure (1.3) : Diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux . [2]

L'objectif de la commande de l'onduleur est de rendre les tensions de sortie v_a , v_b et v_c aussi proches que possible des trois tensions de référence sinusoïdales v_a^* , v_b^* , et v_c^* .

Comme il est illustré dans la Figure (1.3), ces vecteurs peuvent être représentés dans le plan (α, β) par un seul vecteur de référence d'amplitude v_m^* constante et égale à l'amplitude souhaitée des tensions simples, et tournant autour du centre de l'hexagone avec une vitesse angulaire $w = \frac{d\theta}{dt}$ constante correspondante à la pulsation électrique souhaitée. [2]

Ce vecteur est défini par :

$$\mathbf{v}^* = v_m^* e^{i\theta} \quad (1.20)$$

Si on attribue au vecteur de référence v^* uniquement les huit positions discrètes, la tension de sortie sera riche en harmoniques. Afin de réduire le taux d'harmoniques de la tension de sortie de la forme non circulaire de cet hexagone, on impose au vecteur v^* de se positionner à l'intérieur du cercle délimité par l'hexagone. Ainsi, le module maximal admissible du vecteur v^* est : [2]

$$v_{max}^* = v_{dc} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{v_{dc}}{\sqrt{2}} \quad (1.21)$$

L'équation devient :

$$v^* = m \frac{v_{dc}}{\sqrt{2}} e^{i\theta} \quad (1.22)$$

Avec

m : le taux de modulation qui a une valeur entre 0 et 1

et θ : la position angulaire du vecteur calculée comme suit :

$$\begin{cases} \theta = \arctg\left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right) \\ m = \frac{v_m^* \sqrt{2}}{v_{dc}} \end{cases} \quad (1.23)$$

1.3. Modélisation d'onduleur connecté au réseau

1.3.1. Réseau électrique

La figure (1.4) représente le schéma électrique d'un onduleur connecté au réseau à l'aide d'un filtre de raccordement de nature inductive R-L. [2]

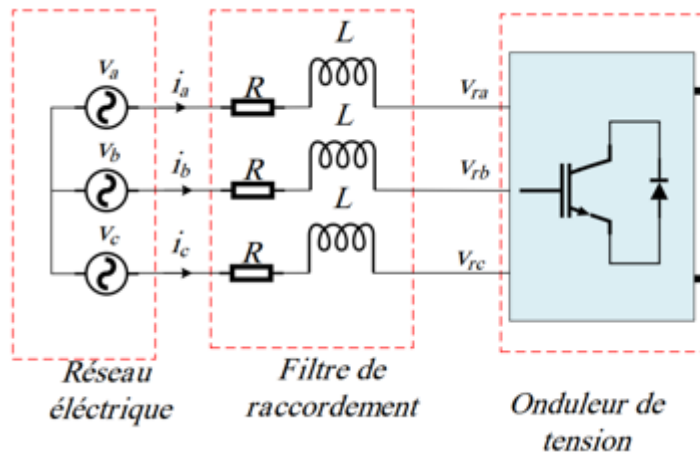


Figure (1.4) : Schéma électrique d'un onduleur triphasé connecté au réseau . [2]

Un réseau triphasé est modélisé par un système triphasé sinusoïdal équilibré comme suite:

$$\begin{cases} V_{ra} = V_m \sin(\omega_0 t) \\ V_{rb} = V_m \sin\left(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{rc} = V_m \sin\left(\omega_0 t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (1.24)$$

Où $\omega_0 = 2\pi f_0$ est la pulsation et V_m est la valeur maximale de tension.

1.3.2. Filtre de raccordement

Le filtre est un filtre de raccordement est constitué de l'inductance parfait L et une résistance R . [2]

On applique la loi de Kirchhoff des tensions pour chaque phase, on déduire les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = L \frac{dia}{dt} + R_{ia} + V_{ra} \\ V_b = L \frac{dib}{dt} + R_{ib} + V_{rb} \\ V_c = L \frac{dic}{dt} + R_{ic} + V_{rc} \end{cases} \quad (1.25)$$

1.4. Commande directe de la puissance de l'onduleur à deux niveaux

La figure (1.5) montre la configuration globale de la commande directe de puissance sans capteur de tension pour un onduleur deux niveaux connecté au réseau. La DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande d'après une table de commutation. Cette dernière est fondée sur les erreurs numérisées S_p , S_q des puissances active et réactive instantanées, fournies par les régulateurs à hystérésis à deux niveaux, aussi bien que sur la position angulaire du vecteur tension de réseau. En fonction de la valeur de cette position, le plan (α - β) est divisé en six secteurs où on doit associer à chaque secteur un état logique d'onduleur. [2]

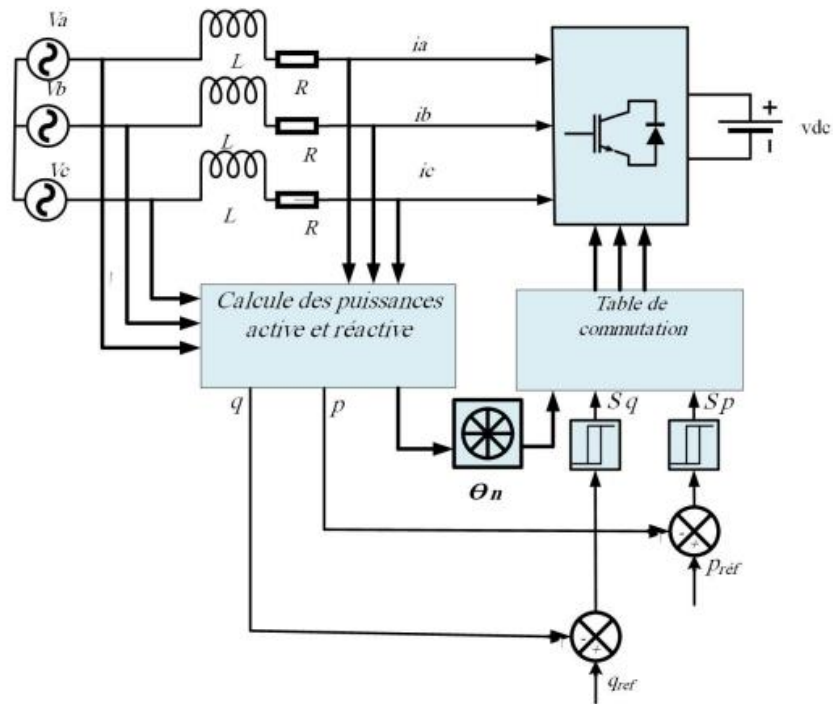


Figure (1.5) : Schéma de principe de la commande DPC à deux niveaux . [2]

1.4.1. Sélection du secteur

La connaissance du secteur de la tension de réseau est nécessaire pour déterminer les états de commutation optimale. Pour cela, le plan de travail (α, β) est divisé en 6 secteurs. Ces derniers peuvent être déterminés par la relation suivante :

$$(n - 1) \frac{\pi}{3} \leq \theta_n < n \frac{\pi}{3}, \quad n = 1, \dots, 6 \quad (1.26)$$

Où n est le numéro du secteur. Le numéro du secteur est déterminé instantanément par la position de vecteur tension donnée par :

$$\theta = \arctg\left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right) \quad (1.27)$$

1.4.2. Contrôleurs à hystérésis

Le contrôle de puissance par hystérésis consiste à maintenir la puissance dans une bande enveloppant sa référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation aux interrupteurs. Illustre le principe de contrôle de puissance par hystérésis à bande fixe à deux niveaux. La différence entre la puissance de référence et celle mesurée est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit l'ordre de commande du bras correspondant du pont Figure (1.6). [2]

Largeur de la bande des régulateurs à hystérésis a un effet considérable sur les performances d'onduleur. En particulier, la distorsion du courant harmonique, et la fréquence de commutation moyenne d'onduleur. [2]

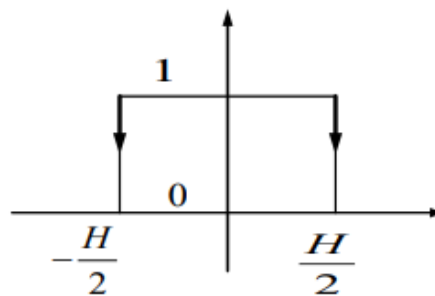


Figure (1.6) : Principe de fonctionnement de comparateur d'hystérésis . [2]

Les sorties des régulateurs à hystérésis données par les variables booléennes S_p et S_q , indiquent les dépassements supérieurs ou inférieurs des erreurs des puissances suivant la logique ci-dessous :

$$S_p = \begin{cases} 1; & P_{ref} - P > H_p \\ 0; & P_{ref} - P \leq -H_p \end{cases} \quad (1.28)$$

$$S_q = \begin{cases} 1; & Q_{ref} - Q > H_q \\ 0; & Q_{ref} - Q \leq -H_q \end{cases} \quad (1.29)$$

Où H_p et H_q sont les écarts des régulateurs à d'hystérésis à deux niveaux.

1.4.3. Table de commutation

Les signaux numériques d'erreurs S_p et S_q et le numéro du secteur de travail sont les entrées de la table de commutation, où les états de commutations S_a , S_b et S_c de l'onduleur sont mémorisés. L'état optimum de commutation peut être choisi à chaque état de commutation selon la combinaison des signaux numériques S_p , S_q et le numéro du secteur. C'est-à-dire, que le choix de l'état optimum de commutation est effectué de sorte que l'erreur de la puissance active puisse être restreinte dans une bande à hystérésis de largeur $2H_p$, et de même pour l'erreur de la puissance réactive, avec une bande de largeur $2H_q$. Pour obtenir de meilleures performances du système, la table (1.2) doit être synthétisée sur la base de la variation de la puissance active et réactive pour différents vecteurs de tension d'onduleur dans chaque secteur. La table de commutation pour l'onduleur à deux niveaux peut être résumé dans le Tableau suivant. [2]

Table (1.2) : Table de commutation de la commande DPC de l'onduleur 2 niveaux. [2]

S_p	S_q	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	$\theta 4$	$\theta 5$	$\theta 6$
0	0	v_5	v_6	v_1	v_2	v_3	v_4
0	1	v_4	v_5	v_6	v_1	v_2	v_3
1	0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
1	1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_1

1.5. Résultats de simulation

Dans cette section, des résultats de simulation sont fournis pour prouver l'efficacité du DPC pour l'onduleur à deux niveaux connecté au réseau. La tension du réseau est de 220 V, 50 Hz (ligne-ligne RMS), l'impédance de couplage est $L=10$ mH, $R=0,25$ ohm, la période d'échantillonnage est de 10^{-5} s, la tension continue est supposée dans ce chapitre une source de tension continue fixe de 600V. [2]

Dans le but d'évaluer le DPC pour l'onduleur à deux niveaux, la puissance active de référence est passée de 1 kW à 2 kW à $t=0,2$ s. La puissance réactive de référence est augmentée de 0 à 500 Var à $t=0,3$ s.

Le modèle de simulation de l'onduleur connecté au réseau est représenté par la figure (1.7) montre le block de la commande directe de puissance d'un onduleur à deux niveaux. [2]

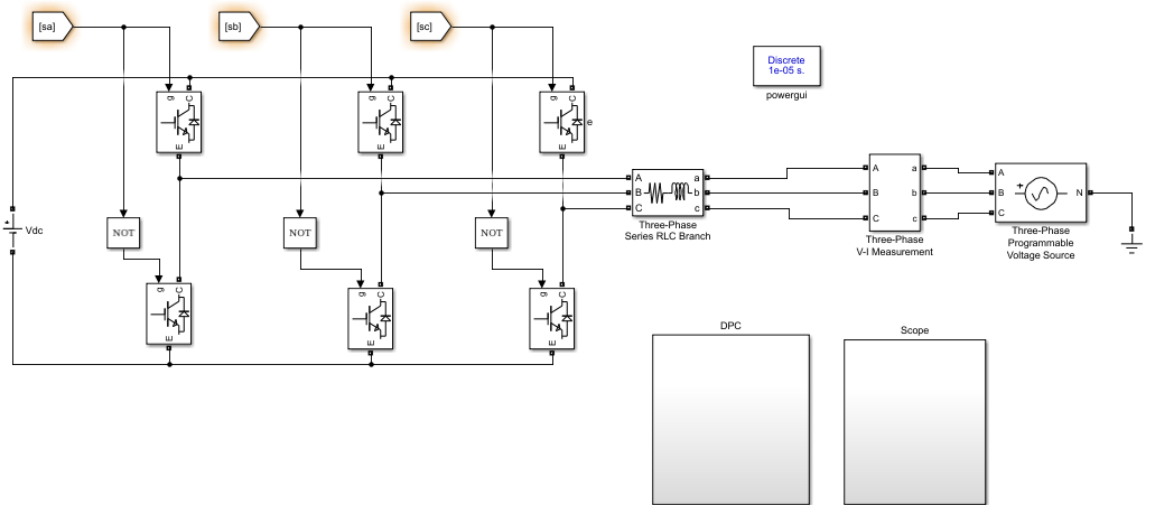


Figure (1.7) : Modèle de simulation de l'onduleur connecté au réseau dans MATLAB Simulink. [2]

Le modèle de simulation de l'onduleur connecté au réseau est représenté par la figure (1.7) , la figure (1.8) montre le block de la commande directe de puissance d'un onduleur à deux niveaux. [2]

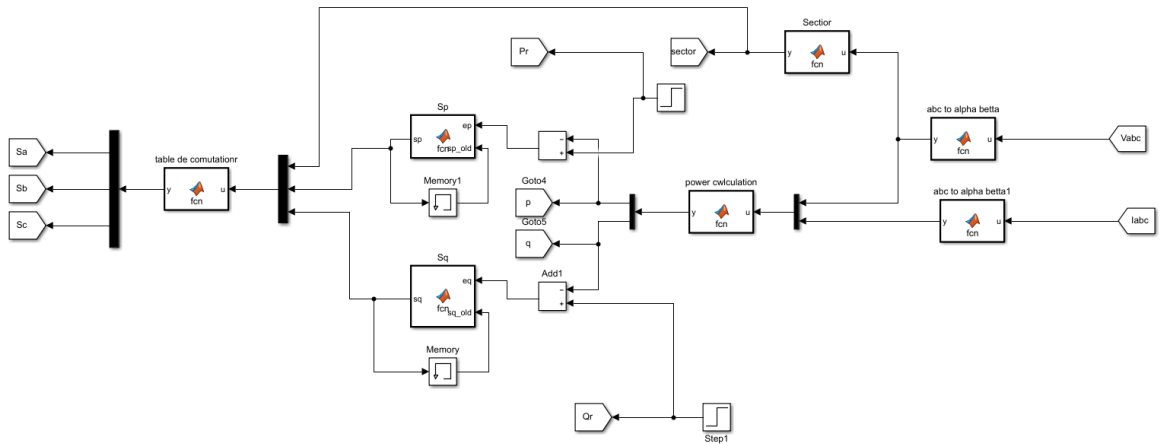


Figure (1.8) : Block de la commande directe de puissance d'un onduleur à deux niveaux. [2]

La figure (1.9) montre les résultats de simulation des puissances active et réactive et leur référence pour un onduleur à deux niveaux connectés au réseau. Les résultats de simulation des tensions du réseau et des courants de lignes d'un onduleur à deux niveaux connectés au réseau sont montrés su la figure (1.10).

A partir de ces résultats, On peut observer que les puissances active et réactive suivent parfaitement leurs valeurs de référence (figure (1.10)). Comme le montre la figure (1.10b), l'amplitude du courant de ligne est augmentée ou diminuée en fonction de la puissance active. La variation de la puissance réactive permet d'avancer ou retarder le courant de ligne par rapport à la tension de réseau correspondante (figure (1.11a)). [2]

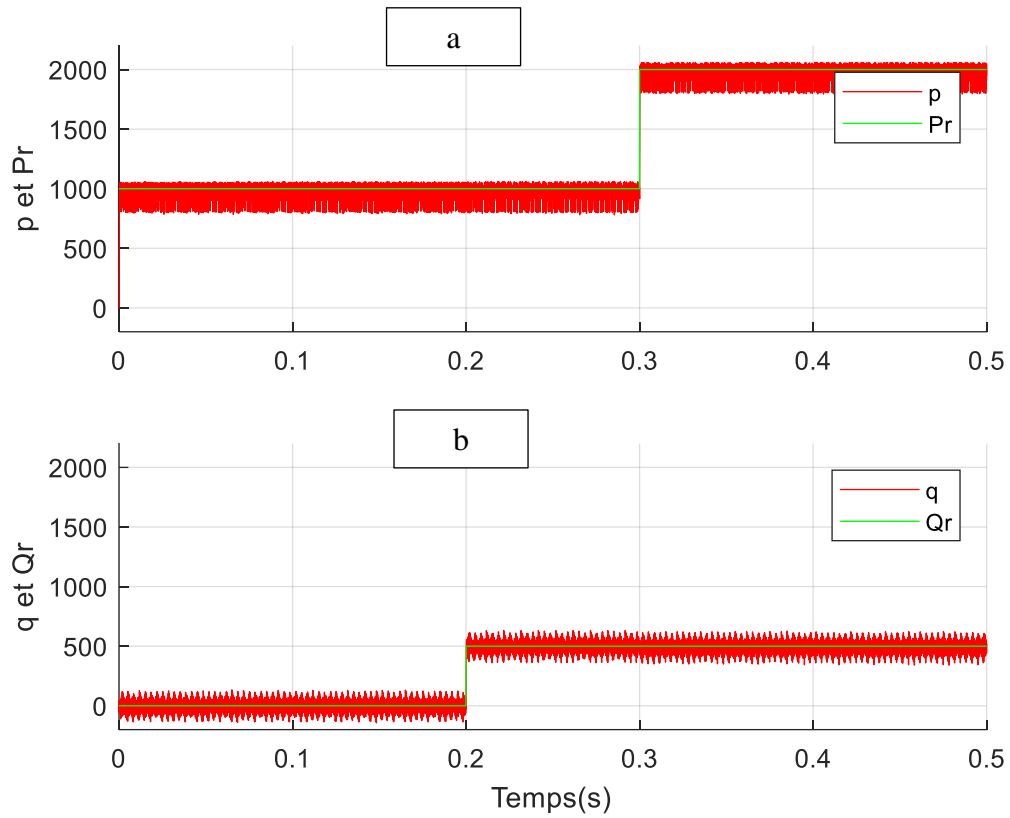


Figure (1.9) : Résultats de simulation des puissances active et réactive et leur référence pour l'onduleur à deux niveaux connecté au réseau . [2]

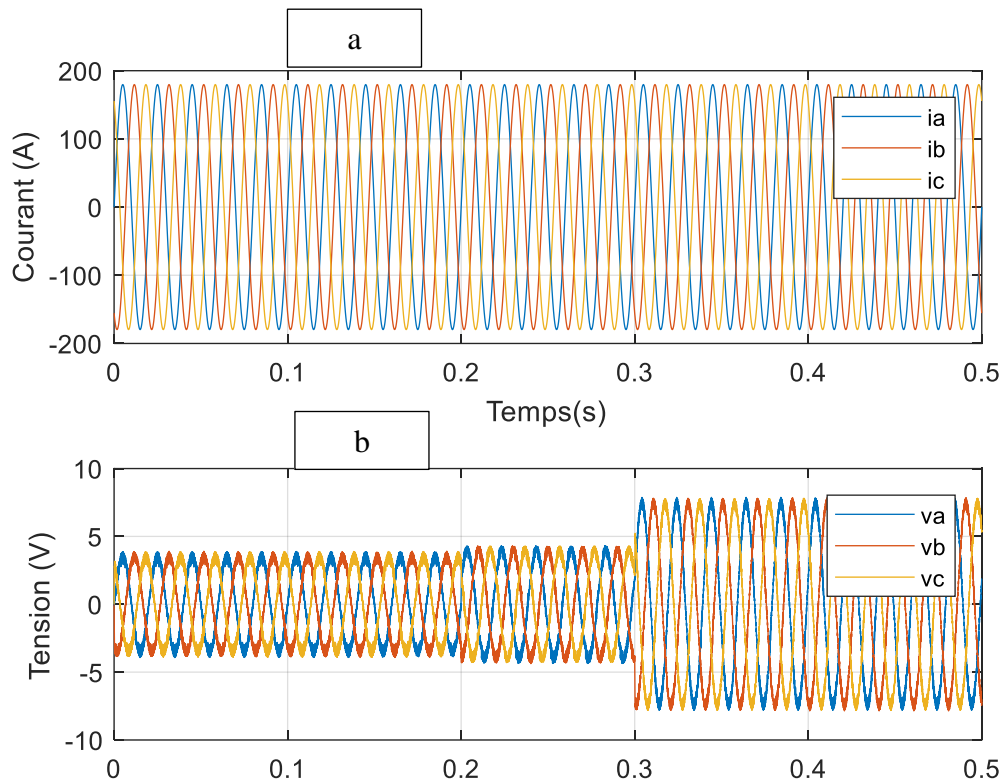


Figure (1.10) : Résultats de simulation des tensions du réseau et des courants de lignes d'un onduleur à deux niveaux connectés au réseau. [2]

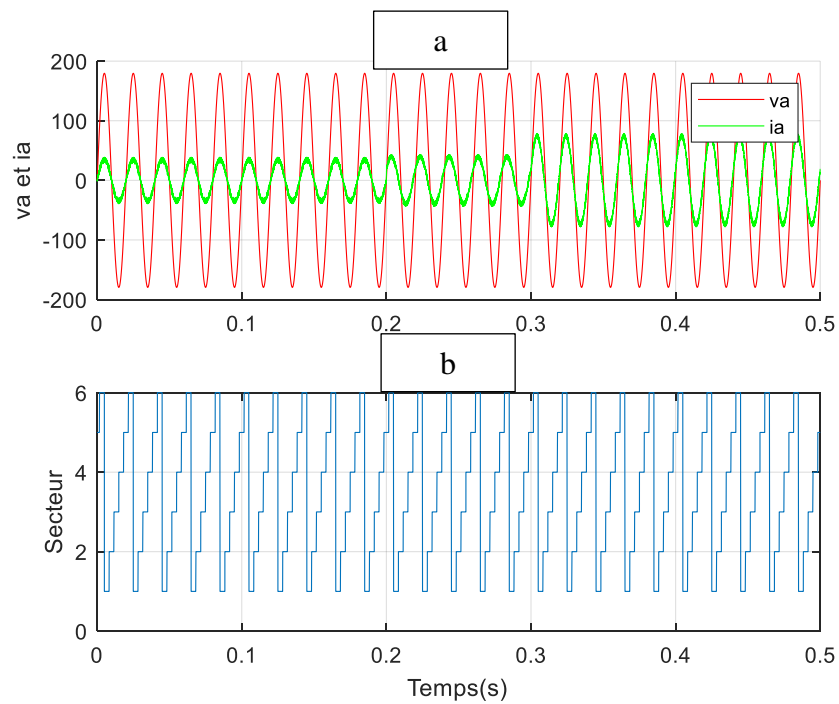


Figure (1.11) : Résultats de simulation du courant i_a , de la tension v_a et du secteur pour un onduleur à deux niveaux connectés au réseau. [2]

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons étudié en détail l'onduleur de tension à deux niveaux connectés au réseau. On a présenté la modélisation de l'onduleur connecté au réseau, en particulier en détaille l'onduleur à deux niveaux, ainsi le réseau et le filtre de raccordement. Ensuite, on a présenté la commande directe de puissance. On a terminé par une étude de simulation.

Chapitre II

**Commande directe de puissance
de l'onduleur à trois-niveaux
connecté au réseau**

Chapitre II

Commande directe de puissance de l'onduleur à trois niveaux connecté au réseau

2.1. Introduction

Il existe plusieurs topologies des onduleurs multiniveaux. La Première topologie a été initialement proposée par A. Nabac en 1981 pour la génération de plusieurs niveaux de tension [1]. Dans ce chapitre, Nous allons étudier en détail l'onduleur de tension à trois niveaux de structure NPC et sa commande directe puissance.

2.2. Onduleur NPC a trois niveaux

2.2.1. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux

La figure (2.1) représente la structure générale de l'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes, appelé aussi onduleur NPC (*Neutral Point Clamped*). Cette structure est composée de deux condensateurs identiques à point milieu commun notée « O » qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique deux niveaux [2].

La tension totale du bus continu vaut v_{dc} , dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux condensateurs qui possèdent alors une tension $v_c = v_{dc}/2$ à leurs bornes (c'est l'hypothèse que l'on retiendra dans cette section). La sortie est reliée à une charge triphasée équilibrée couplée en étoile avec un neutre isolé. L'onduleur possède trois bras a , b et c .

Chacun se compose de quatre interrupteurs totalement commandables ($s_{1x}, s_{2x}, \bar{s}_{1x}, \bar{s}_{2x}$: avec x indice du bras) misent en série, en antiparallèles avec quatre diodes principales afin assurer la réversibilité des courants dans la charge, et deux diodes de clamp (D_{x1} et D_{x2}) connectées au point milieu du bus continu. [2]

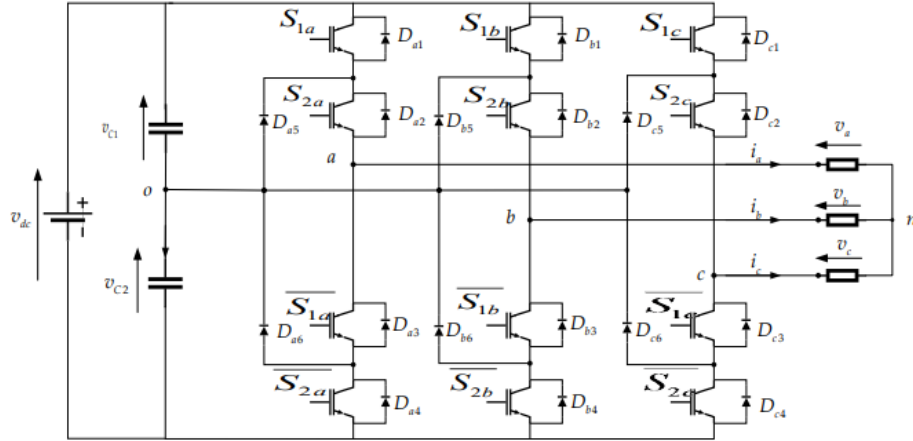


Figure (2.12) : Structure d'un onduleur triphasé à structure NPC . [2]

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion. Cette dernière décrit leurs états ouverts ou fermés. Chaque interrupteur est associé à une fonction de connexion S_{ix} , [1]. Tel que :

$$\begin{cases} S_{ix} = 1 \text{ si fermé} \\ S_{ix} = 0 \text{ si ouvert} \end{cases}$$

Avec : $x = a, b$ ou c , et $i=1, 2$. (2.30)

Nous définissons pour chaque état du bras x une fonction de connexion. Elle est notée et s'exprime au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_x^2 = S_{1x}S_{2x} \\ F_x^1 = S_{2x}\bar{S}_{1x} \\ F_x^0 = \bar{S}_{2x}\bar{S}_{2x} \end{cases} \quad (2.31)$$

Avec $x = a, b, c$ le numéro de l'interrupteur du bras x .

Afin d'éviter la destruction des composants soit par surintensité soit par surtension lors de la fermeture ou l'ouverture simultanées des quatre interrupteurs d'un seul bras, il est indispensable de prévoir une commande complémentaire entre les interrupteurs du même bras. Cette commande complémentaire est définie comme suit [1]

$$S_{(i+2)x} = \bar{S}_{ix} = 1 - S_{ix} \quad (2.32)$$

L'onduleur de tension à structure NPC délivre trois niveaux de tensions $(\frac{v_{dc}}{2}, 0, -\frac{v_{dc}}{2})$ suivant les fonctions de connexion, comme illustré dans l'équation (2.32) . [2]

Table (2.3) : Etats d'un bras de l'onduleur à 3 niveaux. [2]

<i>Etat de l'onduleur</i>	S_{1x}	S_{2x}	v_{xo}
2	1	1	$v_{dc}/2$
1	0	1	0
0	0	0	$-v_{dc}/2$

$$v_{xo} = \begin{cases} \frac{v_{dc}}{2}, si, F_x^2 = 1 \\ 0, si, F_x^1 = 1 \\ -\frac{v_{dc}}{2}, si, F_x^0 = 1 \end{cases} \quad (2.33)$$

L'équation peut être exprimée par la forme suivante :

$$v_{xo} = \frac{v_{dc}}{2} (F_x^2 - F_x^0) \quad (2.34)$$

Et pour les trois tensions phases-point milieu v_{ao} v_{bo} v_{co} , on peut :

$$\begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = v_{dc} \begin{bmatrix} F_a^2 - F_a^0 \\ F_b^2 - F_b^0 \\ F_c^2 - F_c^0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Les tensions composées v_{ab} , v_{bc} et v_{ca} peuvent être exprimées par :

$$\begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ao} & - & v_{bo} \\ v_{bo} & - & v_{co} \\ v_{co} & - & v_{ao} \end{bmatrix} = v_c \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a^2 - F_a^0 \\ F_b^2 - F_b^0 \\ F_c^2 - F_c^0 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Les tensions simples aux bornes de la charge seront données, en fonction des tensions composées puis en fonction des tensions phases-point milieu, Par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{ab} & - & V_{ca} \\ V_{bc} & - & V_{ab} \\ V_{ca} & - & V_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

2.2.2. Représentation vectorielle

Le tableau (2.2) représente les différents états de l'onduleur NPC et les coordonnées du vecteur de tension de sortie v_i correspondant à chaque état.

On peut représenter le tableau (2.4) dans le plan $\alpha\beta$ sous forme de figure, la figure (2.2) représente le diagramme vectoriel de l'onduleur trois niveaux NPC. On peut remarquer que seuls 19 vecteurs qui forment les 27 états de l'onduleur. Cela est dû aux redondances d'états qui apparaissent près du centre. Par exemple, les états 222, 111 et 000 représentent le même vecteur malgré ils sont différents. [2]

Table (2.5) : Etats de l'onduleur à trois niveaux NPC et les coordonnées du vecteur (α β) . [2]

Etat de l'onduleur	v_a	v_b	v_c	v_{ai}	$v_{\beta i}$	V_i
222,111,000	0	0	0	0	0	v_0^a, v_0^b, v_0^c
211,100	$\frac{v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{6}$	$-\frac{v_{dc}}{6}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}v_{dc}$	0	v_1^b, v_1^b
200	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}$	0	v_2
210	$\frac{v_{dc}}{2}$	0	$-\frac{v_{dc}}{2}$	$\sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{8}}v_{dc}$	v_3
221,110	$\frac{v_{dc}}{6}$	$\frac{v_{dc}}{6}$	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{1}{24}}v_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{8}}v_{dc}$	v_4^a, v_4^b
220	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$-\frac{2v_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}v_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}v_{dc}$	v_5
120	0	$\frac{v_{dc}}{2}$	$-\frac{v_{dc}}{2}$	0	$\sqrt{\frac{1}{2}}v_{dc}$	v_6
121,010	$-\frac{v_{dc}}{6}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{6}$	$-\sqrt{\frac{1}{24}}v_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{8}}v_{dc}$	v_7^a, v_7^b
020	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}v_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}v_{dc}$	v_8
021	$-\frac{v_{dc}}{2}$	$\frac{v_{dc}}{2}$	0	$-\sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{8}}v_{dc}$	v_9
122,011	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{6}$	$\frac{v_{dc}}{6}$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}v_{dc}$	0	v_{10}^a, v_{10}^b
022	$-\frac{2v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}$	0	v_{11}
012	$-\frac{v_{dc}}{2}$	0	$-\frac{v_{dc}}{2}$	$-\sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{8}}v_{dc}$	v_{12}
112,001	$-\frac{v_{dc}}{6}$	$-\frac{v_{dc}}{6}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{1}{24}}v_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{8}}v_{dc}$	v_{13}^a, v_{13}^b
002	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}v_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}v_{dc}$	v_{14}
102	0	$-\frac{v_{dc}}{2}$	$\frac{v_{dc}}{2}$	0	$-\sqrt{\frac{1}{2}}v_{dc}$	v_{15}
212,101	$\frac{v_{dc}}{6}$	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{6}$	$\sqrt{\frac{1}{24}}v_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{8}}v_{dc}$	v_{16}^a, v_{16}^b
202	$\frac{v_{dc}}{3}$	$-\frac{2v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}v_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}v_{dc}$	v_{17}
201	$\frac{v_{dc}}{2}$	$-\frac{v_{dc}}{2}$	0	$\sqrt{\frac{3}{8}}v_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{8}}v_{dc}$	v_{18}

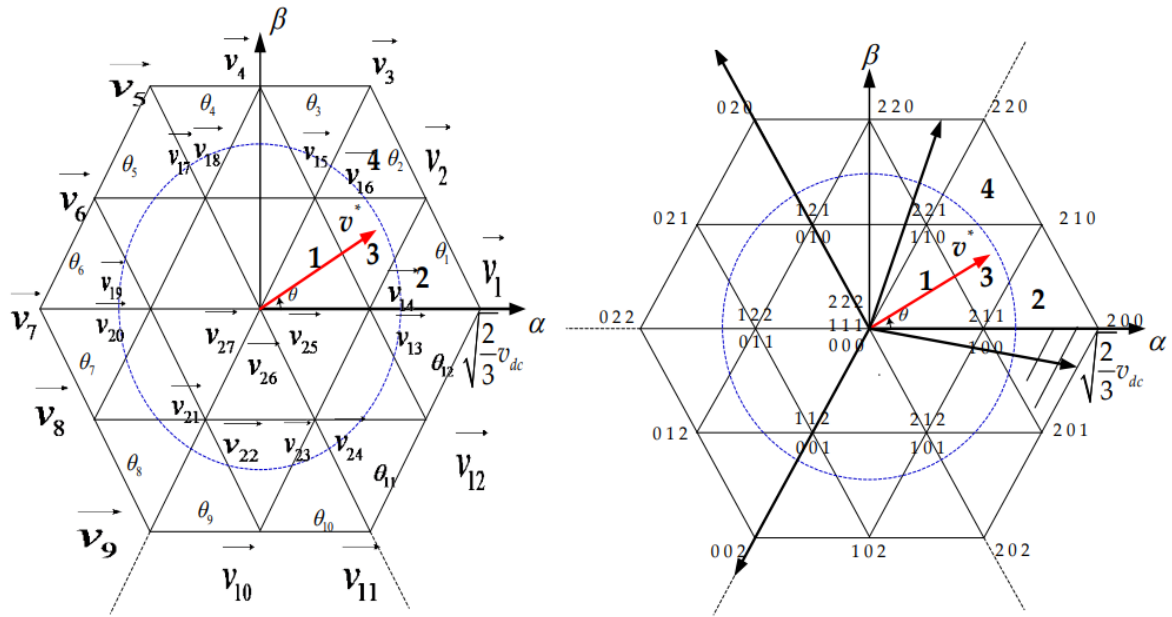


Figure (2.13) : Représentation vectorielle des états de l'onduleur à trois niveaux NPC . [2]

2.3. Commande directe de puissance de l'onduleur à trois niveaux NPC

Le DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande dans une table de commutation. Cette dernière est basée sur les erreurs numérisées S_p , S_q de la puissance active et réactive instantanée fournie par le régulateur à hystérésis à deux étages et la position angulaire de la tension calculée. La figure (2.3) illustre le schéma de principe de la commande DPC de l'onduleur à trois niveaux NPC connecté au réseau. [2]

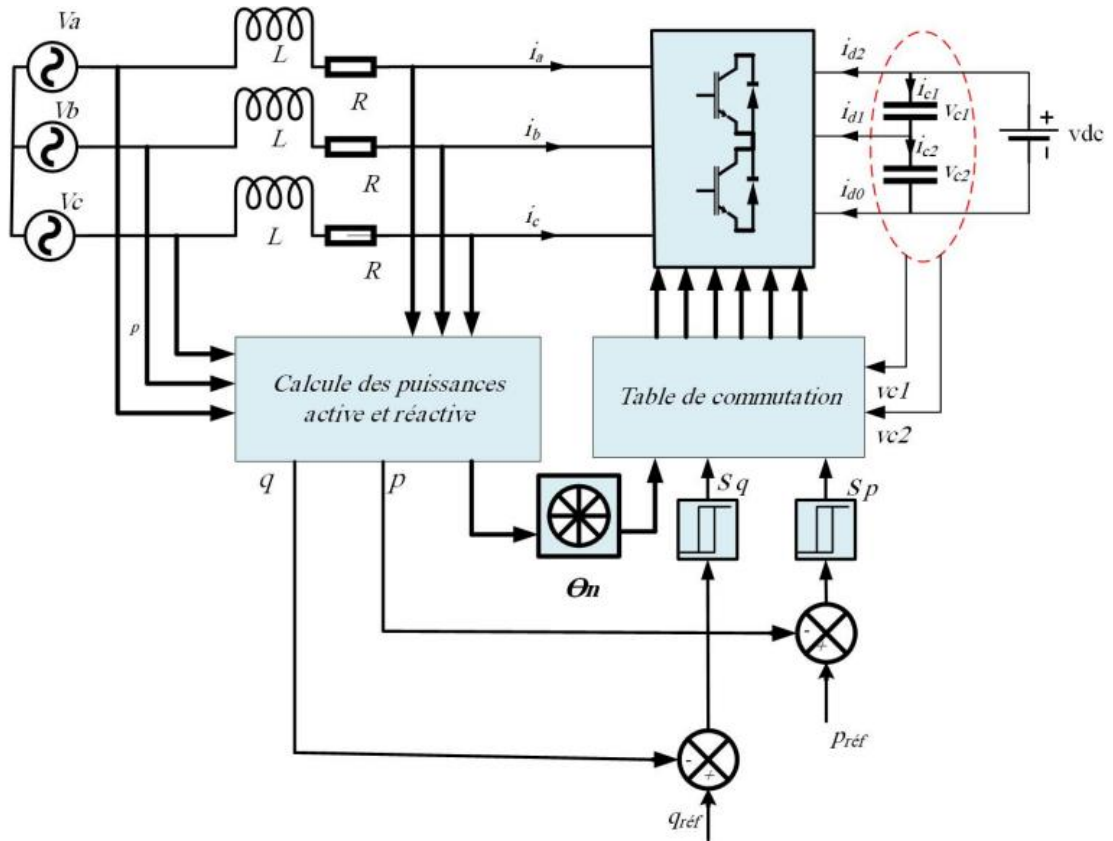


Figure (2.14) : Schéma de principe de la commande DPC d'onduleur à trois niveaux .

[2]

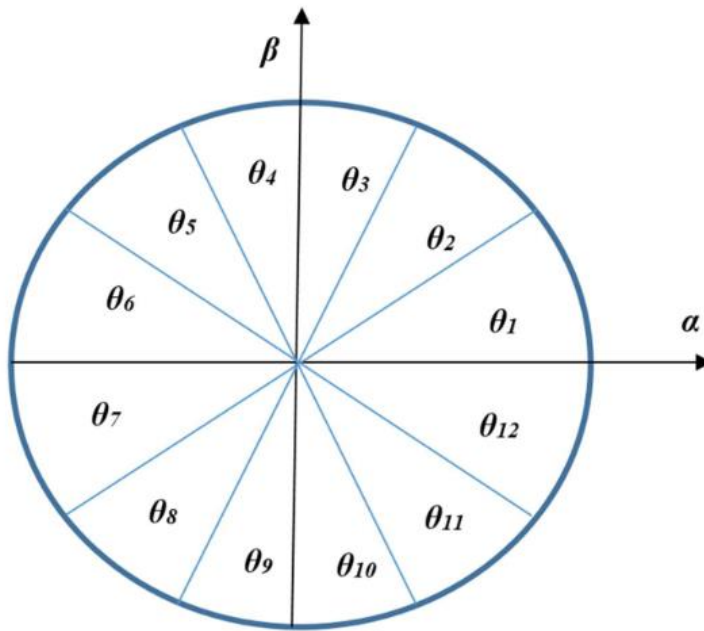
2.3.1. Sélection du secteur

La connaissance du secteur de la tension de réseau est nécessaire pour déterminer les états de commutation optimale pour l'onduleur trois-niveaux. Pour cela, le plan de travail (α, β) est divisé en 12 secteurs (figure (2.4)), ces derniers peuvent être déterminés par la relation suivante [2]:

$$(n - 1) \frac{\pi}{6} \leq \theta_n < n \frac{\pi}{6}, \quad n = 1, \dots, 12 \quad (2.38)$$

Où n est le numéro du secteur.

Figure (2.15) : Plant (α, β) divisé en 12 secteurs . [2]



2.3.2. Régulateurs à hystérésis

Plusieurs contrôleurs d'hystérésis à plusieurs niveaux qui ont été utilisés pour l'onduleur à trois niveaux proposé dans la littérature, dans ce travail, nous utilisons le même contrôleur d'hystérésis à deux niveaux que celui utilisé pour l'onduleur à deux niveaux.

2.3.3. Table de commutation

Dans le cas d'un onduleur à trois niveaux, nous avons 27 vecteurs de commutation v_i ($i=1, 2, \dots, 27$). En fonction de la position de vecteur tension de réseau et les sorties des régulateurs hystérésis, on peut déterminer les signaux de commande de l'onduleur NPC selon le tableau de commutation (2.3) .[2]

Table (2.6) : Table de commutation DPC pour l'onduleur à trois niveaux . [2]

S_p	S_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
1	0	v_{23} v_{24}	v_{13} v_{14}	v_{13} v_{14}	v_{15} v_{16}	v_{15} v_{16}	v_{17} v_{18}	v_{17} v_{18}	v_{19} v_{20}	v_{19} v_{20}	v_{21} v_{22}	v_{21} v_{22}	v_{23} v_{24}
1	1	v_{13} v_{14}	v_{15} v_{16}	v_{15} v_{16}	v_{17} v_{18}	v_{17} v_{18}	v_{19} v_{20}	v_{19} v_{20}	v_{21} v_{22}	v_{21} v_{22}	v_{23} v_{24}	v_{23} v_{24}	v_{13} v_{14}
0	0	v_{12}	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}
0	1	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}	v_{12}

2.4. Résultats de simulation

Dans cette section, des résultats de simulation sont fournis pour prouver l'efficacité du DPC pour l'onduleur à trois niveaux connectés au réseau. La tension du réseau est de 220 V, 50 Hz (ligne-ligne RMS), l'impédance de couplage est $L=10$ mH, $R= 0,25$ ohm, la période d'échantillonnage est de 10^{-5} s , les tensions des condensateurs sont supposées des sources de tensions fixes de valeur $v_{dc}/2$.

Les figures (2.7) montrent les formes d'onde sous la variation de puissance active et réactive de référence pour l'onduleur à trois niveaux respectivement.

La puissance active de référence est passée de 1 kW à 2 kW à $t=0,3s$. La puissance réactive de référence est augmentée de 0 à 500 Var à $t=0,2s$.

On peut observer que les puissances active et réactive suivent parfaitement leurs valeurs de référence (voir figure (2.7.b)).

Comme le montrent les figures (2.8), l'amplitude du courant de ligne est augmentée en fonction de la puissance active, tandis que, la variation de la puissance réactive permet d'avancer le courant de ligne par rapport à la tension de réseau correspondante. [2]

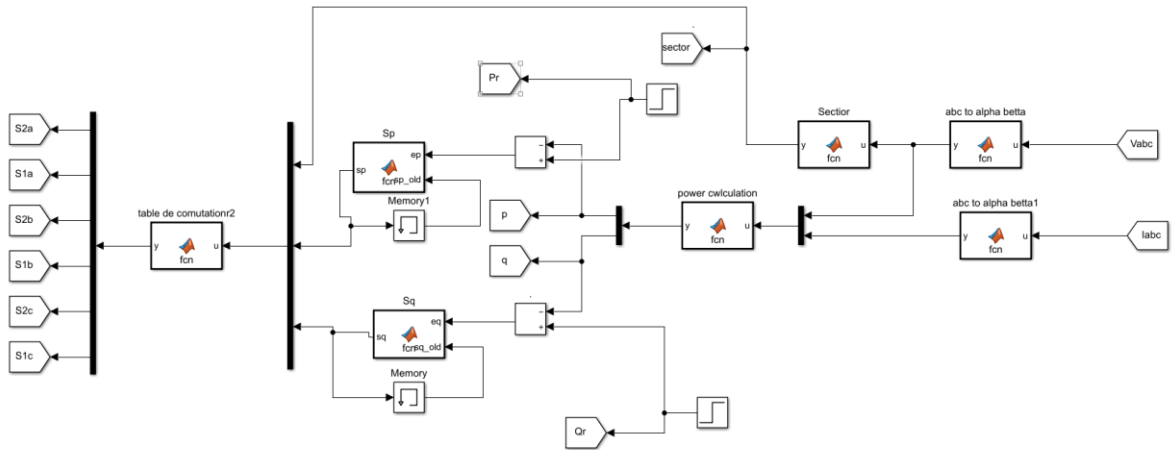


Figure (2.16) : Schéma block de la commande DPC dans MATLAB Simulink pour l'onduleur trois niveaux .

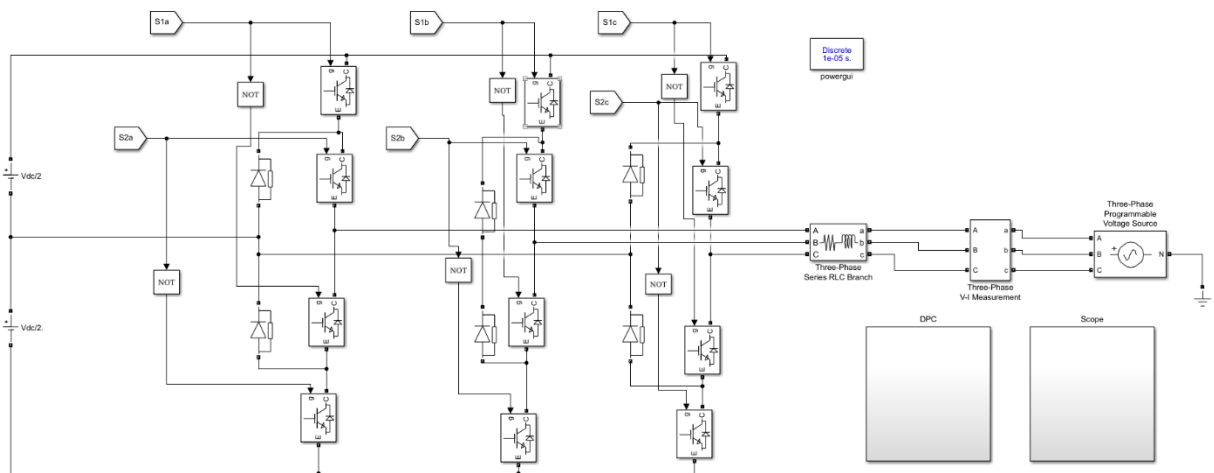


Figure (2.17) : Modèle de simulation de l'onduleur connecté au réseau dans MATLAB Simulink .

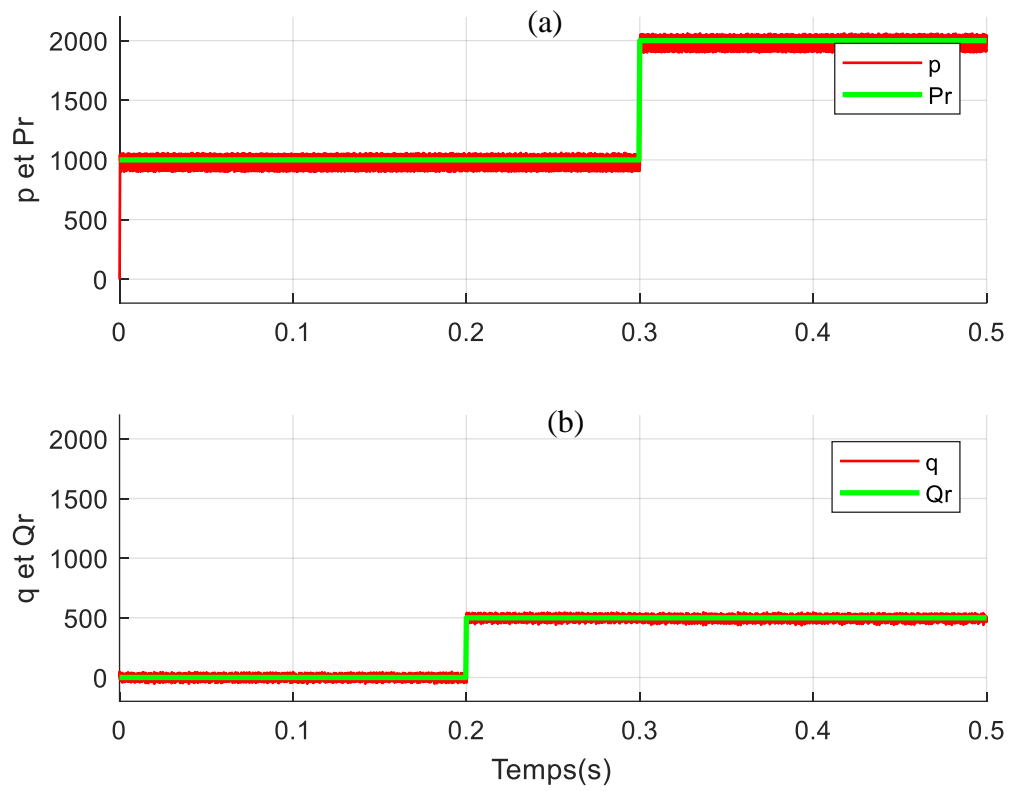


Figure (2.18) : Les puissances active et réactive et leur référence pour un onduleur à trois-niveaux connecté au réseau .

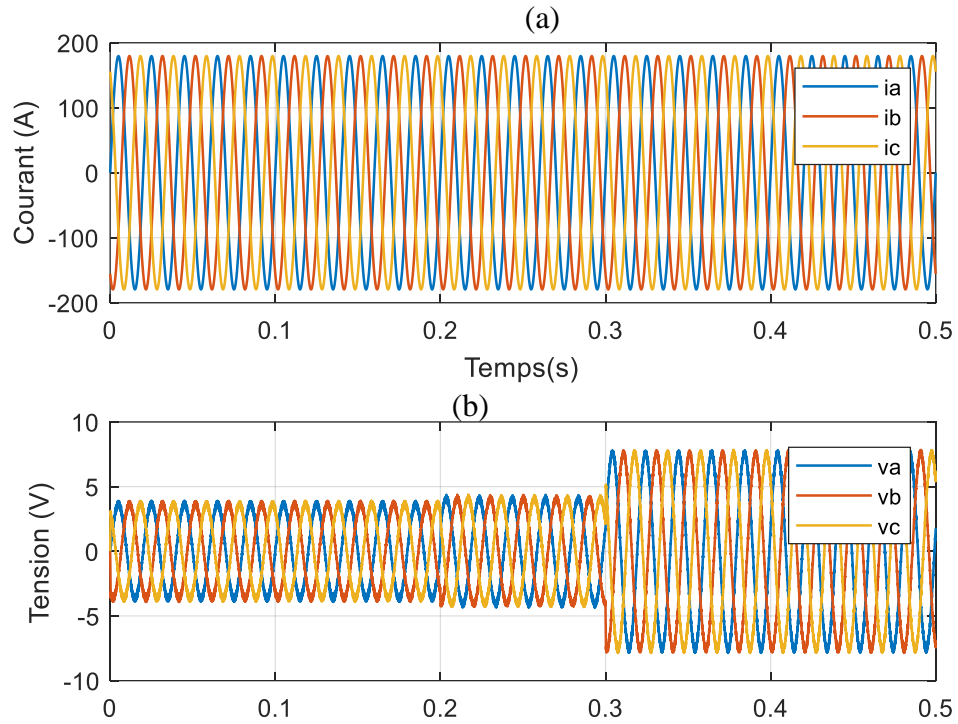


Figure (2.19) : Les tensions de réseau et les courants de lignes .

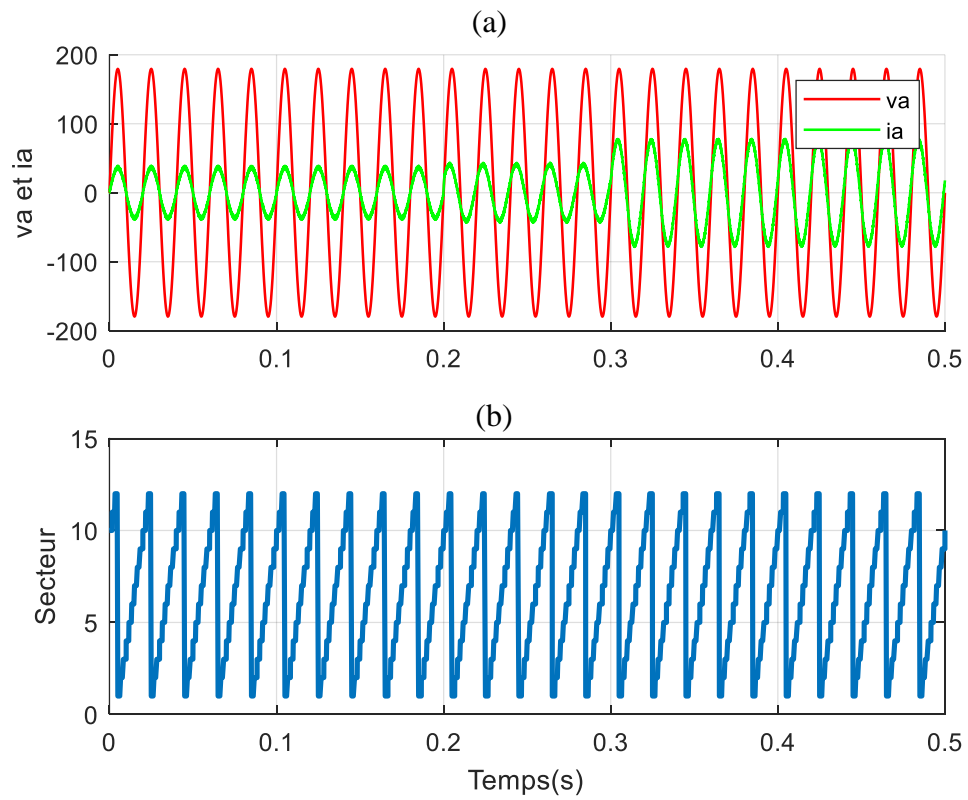


Figure (2.20) : (a) : Le courant i_a et la tension v_a , (b) La position de vecteur de réseau (Secteur).

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, le contrôle de puissance direct DPC a été présenté et appliqué pour l'onduleur trois niveau NPC connectés au réseau, son principe de fonctionnement et ses synthèses sont fournis l'onduleur à trois niveaux. Son algorithme est simple, il ne nécessite aucun bloc de modulation ni boucle de courant, les signaux de commande sont fournis directement à partir de la puissance active et réactive à travers une table de commutation prédéfinie.

Chapitre III

**Commande directe de
puissance de l'onduleur à cinq
niveaux connectés au réseau**

Chapitre III

Commande directe de puissance de l'onduleur à cinq niveaux connectés au réseau

3.1. Introduction

L'onduleur triphasé à cinq niveaux étudiés est constitué de trois bras et quatre sources de tension continue. Chaque bras comporte huit interrupteurs, plus deux diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montés en tête bêche. La figure (3.1) donne une représentation schématique d'un bras de cet onduleur .

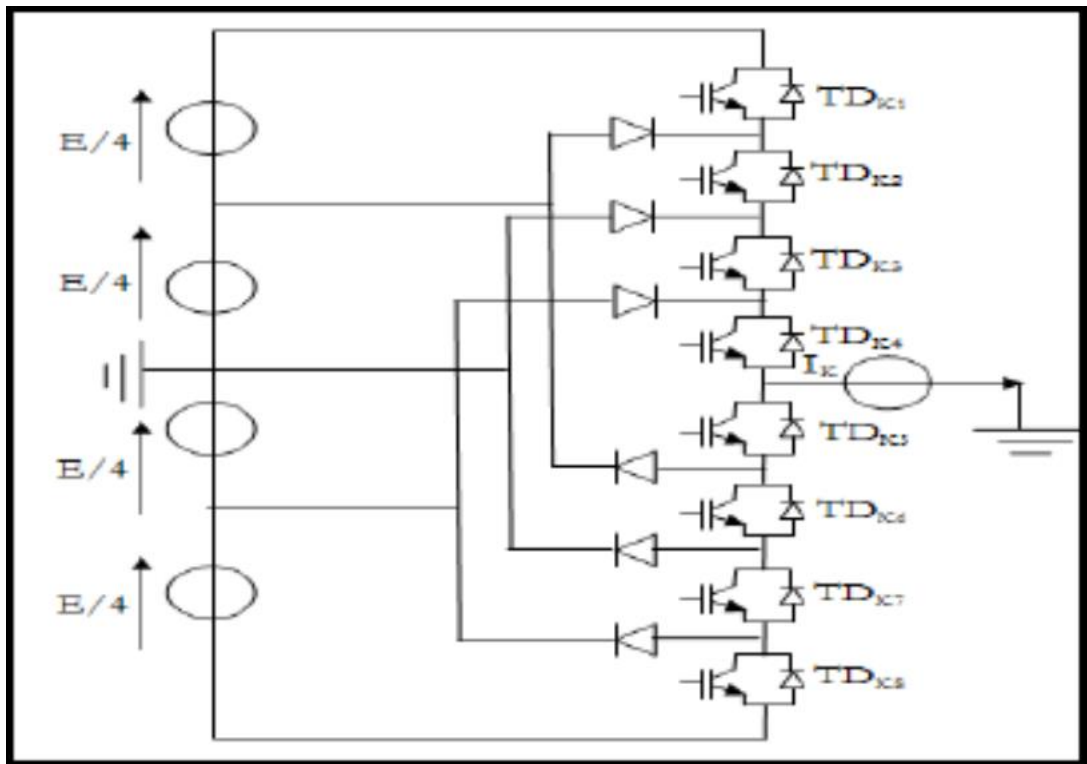


Figure (3.21) : Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux. [17]

3.2. Modélisation de l'onduleur à cinq niveaux

L'onduleur à diodes flottantes à cinq niveaux est représenté sur la figure (3.2). Chacun des trois bras de l'onduleur est composé de huit interrupteurs commandés, et six diodes flottantes. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant, il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Le bus continu d'entrée est composé de quatre capacités en série (C_1, C_2, C_3 et C_4), permettant de créer un ensemble de trois points milieux capacitifs. La tension totale du bus continu vaut vdc

; dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les quatre capacités qui possèdent alors une tension $V_{dc}/4$ à leurs bornes. [15]

Pour éviter le court-circuit de la source continue de l'entrée de l'onduleur, ou l'ouverture du circuit inductif de sa charge, on doit prévoir des commandes complémentaires comme le présente la figure (3.2).

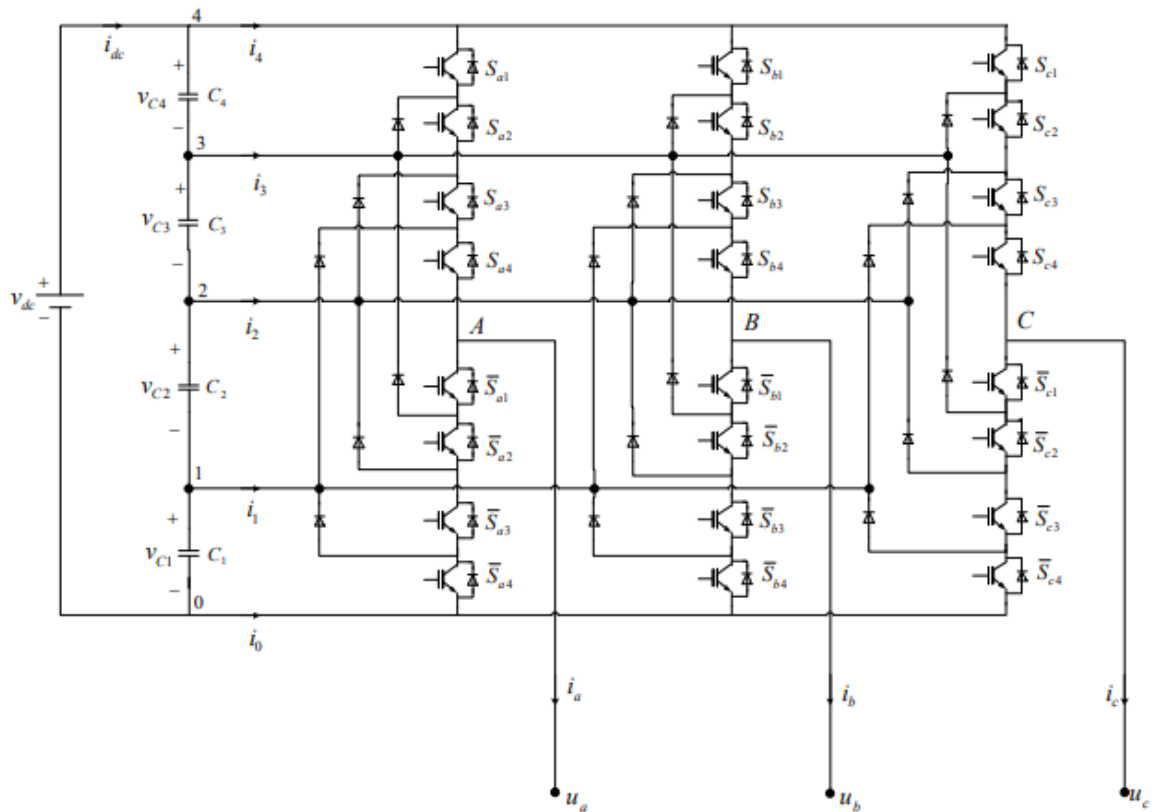


Figure (3.22) : Onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes. [15]

Chaque bras de l'onduleur peut avoir un des cinq états possibles présentés dans le tableau (3.1).

Table (3. 7) : Etats d'un bras de l'onduleur à 5 niveaux (x =a, b ou c) . [15]

Etat du bras	Etat des interrupteurs d'un bras								Tension de sortie u_{x0}
	S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}	\bar{S}_{x1}	\bar{S}_{x2}	\bar{S}_{x3}	\bar{S}_{x4}	
4	1	1	1	1	0	0	0	0	v_{dc}
3	0	1	1	1	1	0	0	0	$v_{C3} + v_{C2} + v_{C1}$
2	0	0	1	1	1	1	0	0	$v_{C2} + v_{C1}$
1	0	0	0	1	1	1	1	0	v_{C1}
0	0	0	0	0	1	1	1	1	0

3.2.1. Fonctions de connexion des demi-bras

Chaque branche de l'onduleur est vue comme un commutateur dont les positions permettent de modifier le potentiel des points a, b et c, comme le montre la figure (3.3). Ces points sont connectés à chaque fois à l'une des tensions du diviseur capacitif côté continu. [15]

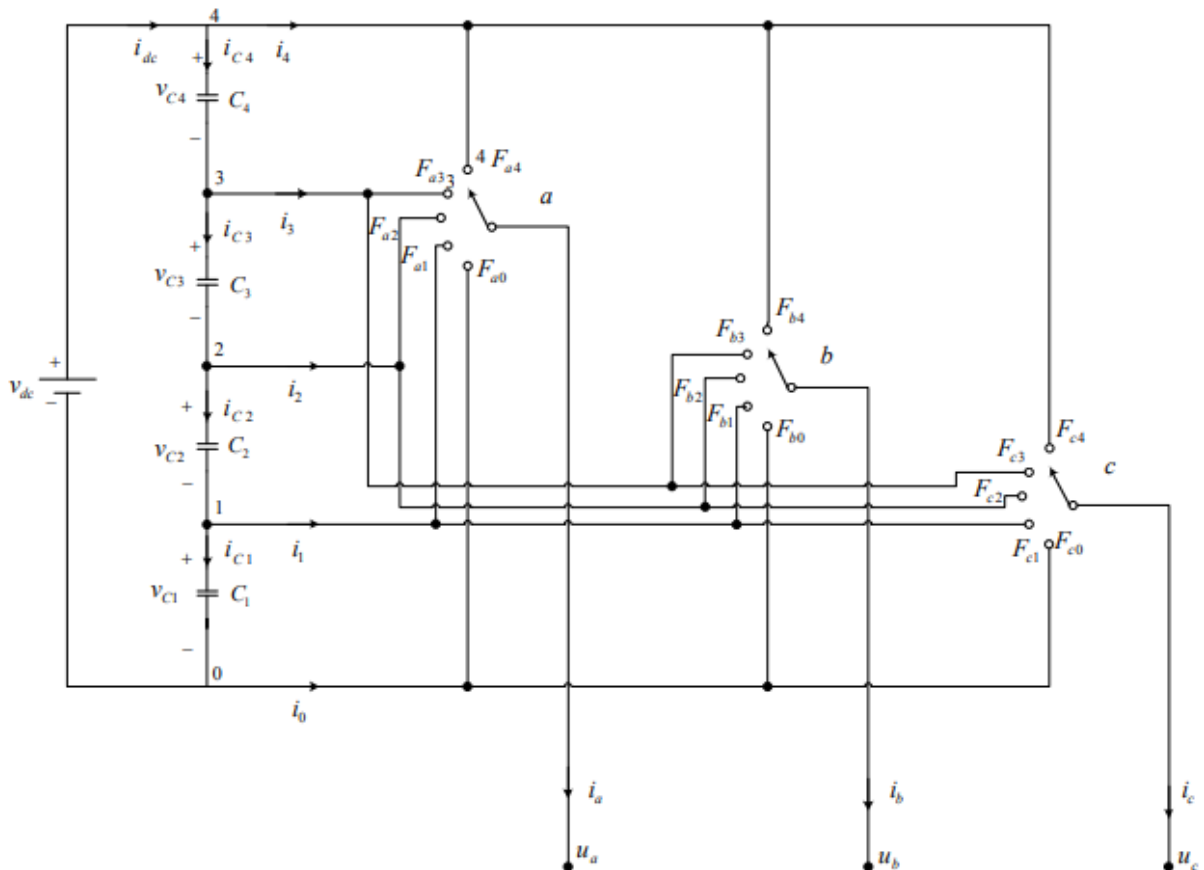


Figure (3.23) : Schéma fonctionnel de l'onduleur à cinq niveaux . [15]

Tension de sortie

Les potentiels des nœuds a, b et c de l'onduleur triphasé à cinq niveaux par rapport au point 0 sont donnés par le système suivant : [15]

$$\begin{aligned}
 U_{ao} &= F_{a4} (v_{c4} + v_{c3} + v_{c2} + v_{c1}) + F_{a3} (v_{c3} + v_{c2} + v_{c1}) + F_{a2}(v_{c2} + v_{c1}) + F_{a1}v_{c1} \\
 U_{bo} &= F_{b4} (v_{c4} + v_{c3} + v_{c2} + v_{c1}) + F_{b3} (v_{c3} + v_{c2} + v_{c1}) + F_{b2}(v_{c2} + v_{c1}) + F_{b1}v_{c1} \\
 U_{co} &= F_{c4} (v_{c4} + v_{c3} + v_{c2} + v_{c1}) + F_{c3} (v_{c3} + v_{c2} + v_{c1}) + F_{c2}(v_{c2} + v_{c1}) + F_{c1}v_{c1}
 \end{aligned} \quad (3.39)$$

Où :

v_{cj} , ($j = 1, 2, 3, 4$) : tensions aux bornes des condensateurs.

L'équation (3.40) peut être écrite sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} u_{a0} \\ u_{b0} \\ u_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{a4} & F_{a3} & F_{a2} & F_{a1} \\ F_{b4} & F_{b3} & F_{b2} & F_{b1} \\ F_{c4} & F_{c3} & F_{c2} & F_{c1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{c4} + v_{c3} + v_{c2} + v_{c1} \\ v_{c3} + v_{c2} + v_{c1} \\ v_{c2} + v_{c1} \\ v_{c1} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Les tensions composées sont exprimées par :

$$\begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \\ u_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{a0} - u_{b0} \\ u_{b0} - u_{c0} \\ u_{c0} - u_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{a4} - F_{b4} & F_{a3} - F_{b3} & F_{a2} - F_{b2} & F_{a1} - F_{b1} \\ F_{b4} - F_{c4} & F_{b3} - F_{c3} & F_{b2} - F_{c2} & F_{b1} - F_{c1} \\ F_{c4} - F_{a4} & F_{c3} - F_{a3} & F_{c2} - F_{a2} & F_{c1} - F_{a1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{c4} + v_{c3} + v_{c2} + v_{c1} \\ v_{c3} + v_{c2} + v_{c1} \\ v_{c2} + v_{c1} \\ v_{c1} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Les tensions de sortie des bras par rapport au neutre de la charge, dans le cas d'une charge équilibrée, sont exprimées par :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} u_{ab} - u_{ca} \\ u_{bc} - u_{ab} \\ u_{ca} - u_{bc} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Ce qui donne :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2F_{a4} - F_{b4} - F_{c4} & F_{b3} & F_{a2} - F_{b2} & F_{a1} - F_{b1} \\ 2F_{b4} - F_{c4} - F_{a4} & F_{c3} & F_{b2} - F_{c2} & F_{b1} - F_{c1} \\ 2F_{c4} - F_{a4} - F_{b4} & F_{a3} & F_{c2} - F_{a2} & F_{c1} - F_{a1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{c4} + v_{c3} + v_{c2} + v_{c1} \\ v_{c3} + v_{c2} + v_{c1} \\ v_{c2} + v_{c1} \\ v_{c1} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Ainsi, les courants d'entrée de l'onduleur s'expriment en fonction des courants de la charge i_a , i_b et i_c au moyen des fonctions de connexion des demi-bras par les relations suivantes :

$$\begin{aligned}i_4 &= F_{a4}i_a + F_{b4}i_b + F_{c4}i_c \\i_3 &= F_{a3}i_a + F_{b3}i_b + F_{c3}i_c \\i_2 &= F_{a2}i_a + F_{b2}i_b + F_{c2}i_c \\i_1 &= F_{a1}i_a + F_{b1}i_b + F_{c1}i_c \\i_0 &= F_{a0}i_a + F_{b0}i_b + F_{c0}i_c\end{aligned}\tag{3.44}$$

3.2.2. Représentation vectorielle

Diagramme vectoriel On distingue 60 positions discrètes, distribuées sur quatre hexagones, en plus d'une position au centre de ces hexagones. Certaines positions sont créées par plusieurs états redondants. De l'hexagone externe vers l'hexagone interne, les positions du vecteur de sortie sont créées par un, deux, trois ou quatre états redondants. La position du centre de ces hexagones, correspondante à une tension de sortie nulle, est générée par cinq états redondants. On distingue ainsi 24 positions à une seule redondance, 18 positions à deux redondances, 12 positions à trois redondances et 6 positions à quatre redondances. Les 61 positions du vecteur tension de sortie divise le diagramme vectoriel en six secteurs triangulaires. Chaque secteur est composé de 16 régions triangulaires (Figure (3.4)). On a ainsi 96 régions triangulaires dans le diagramme vectoriel complet. [15]

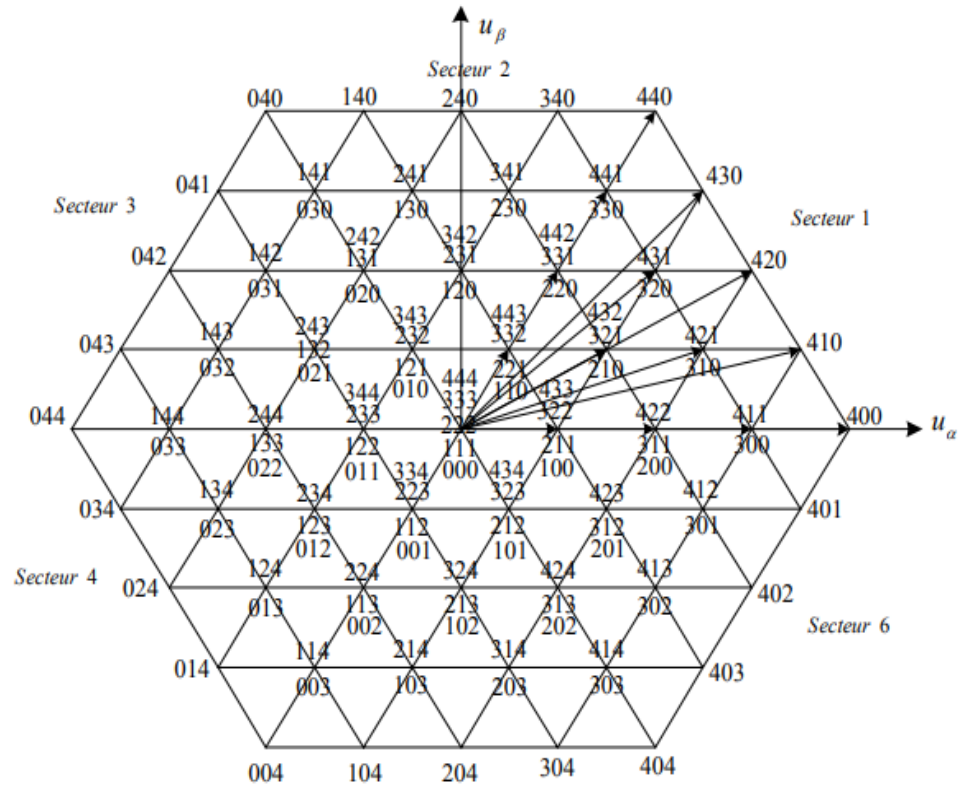


Figure (3.24) : diagramme vectorielle de l'onduleur à 5 niveau . [15]

3.3. Commande directe de la puissance de l'onduleur à cinq niveaux :

Dans cette sous-section, la synthèse de la commande de puissance directe pour l'onduleur à cinq niveaux est effectuée. Les tensions de condensateur v_{c1} , v_{c2} , v_{c3} et v_{c4} sont supposées équilibrées et égales à $v_{dc}/4$, par conséquent, le contrôle de ces tensions n'est pas inclus dans l'algorithme DPC présenté.

3.3.1. Sélection du secteur :

Dans l'algorithme DPC présenté [16], le diagramme vectoriel spatial est divisé en 24 secteurs, ce qui signifie que chaque angle de secteur est $\pi/12$ (voir Figure (3.5)).

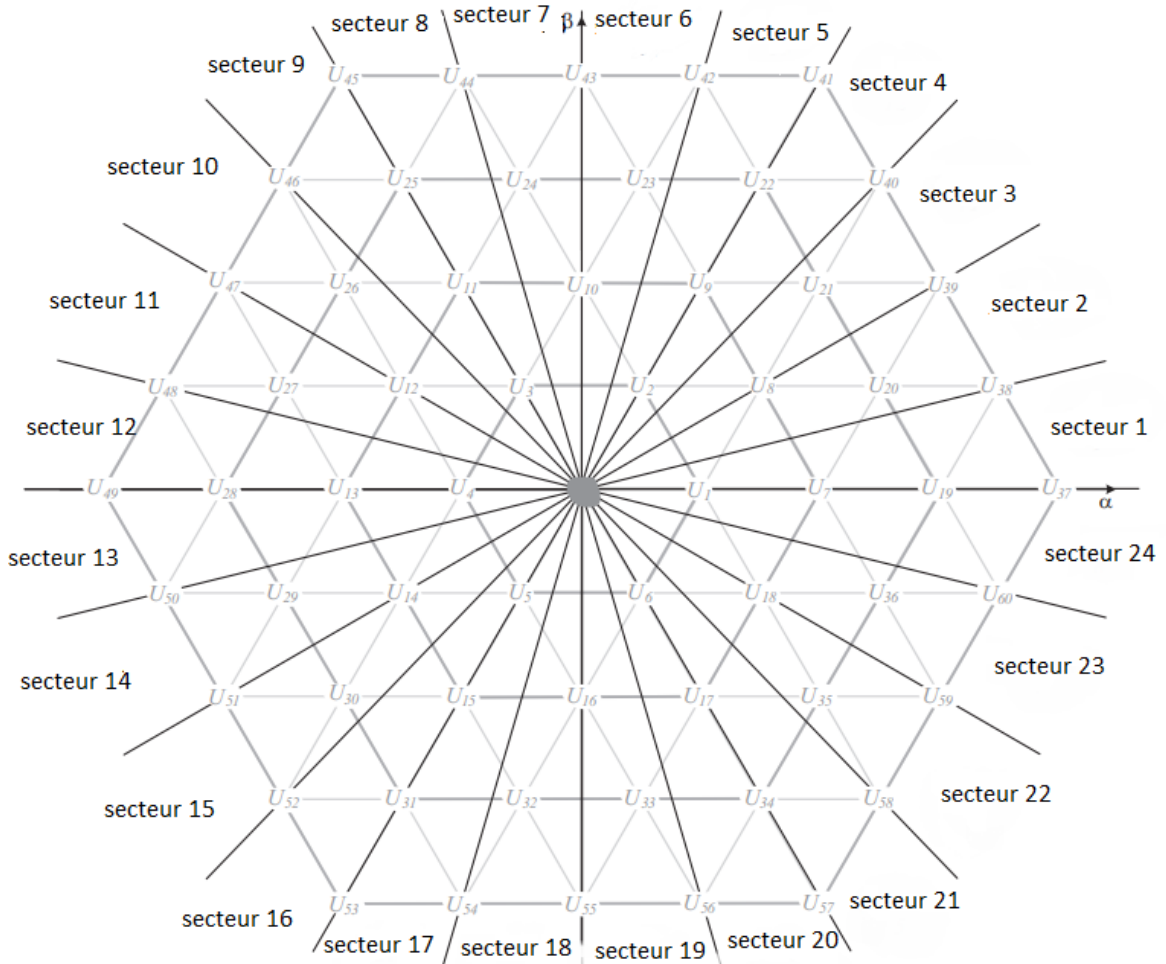


Figure (3.25) : Plan $\alpha \beta$ divisé en 24 secteurs. [16]

La position du vecteur tension du réseau doit être déterminée instantanément à l'aide des équations (1.35 et 3.45).

$$(n - 1) \frac{\pi}{12} \leq \theta_n < (n) \frac{\pi}{12} \quad n = 1, 2, \dots, 24 \quad (3.44)$$

3.3.2. Table de commutation

Avec $5^3 = 125$ choix possibles pour la sélection du vecteur de tension, la table de commutation dans un onduleur à cinq niveaux devient plus complexe par rapport aux onduleurs à deux et trois niveaux, mais elle offre beaucoup plus de possibilités pour satisfaire la condition de commutation [16].

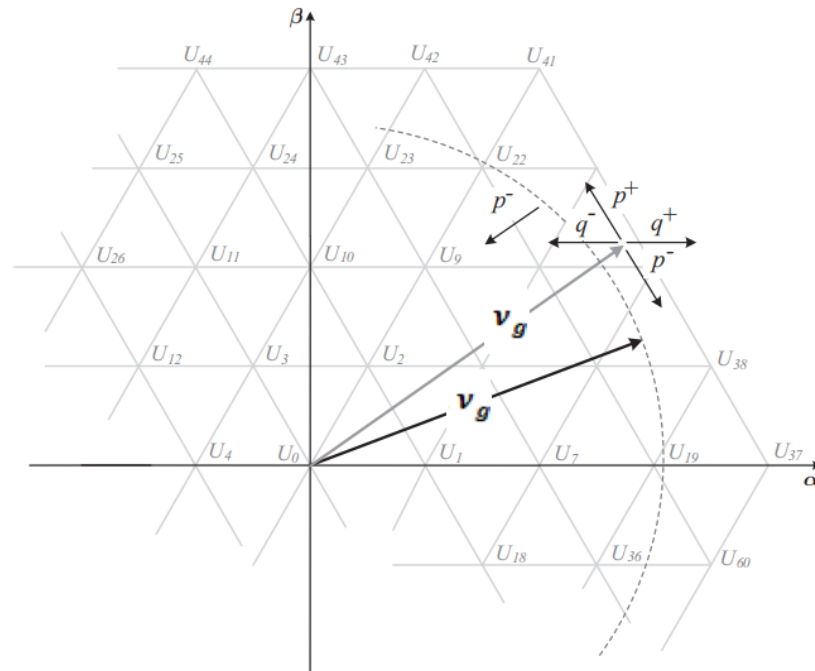


Figure (3.26) : Influence des vecteurs tension sur les puissances active et réactive instantanées v_g . [16]

Selon l'analyse présentée dans [16], la puissance active est influencée par des vecteurs de tension qui augmentent ou diminuent l'angle entre les vecteurs de tension de l'onduleur et du réseau. D'autre part, en ajustant l'amplitude du vecteur tension de l'onduleur, la puissance réactive est contrôlée [16].

Cependant, dans le cas d'un onduleur à cinq niveaux, deux niveaux de tension supplémentaires existant dans le plan vectoriel spatial augmentent le degré de liberté pour contrôler les deux variables, en particulier la puissance active.

Pour profiter de ce fait, la stratégie d'hystérésis est modifiée (Figure 3.7.a) en ajoutant trois bornes supplémentaires (u_{p2} , u_{p3} et u_{p4}) à celle utilisée pour la méthode à deux et trois niveaux. Chaque niveau de la commande d'hystérésis (u_{p1} à u_{p4}) est directement référé à un niveau de tension du plan vectoriel spatial (hexagones intérieur à extérieur).

Pour la puissance réactive, le comparateur à hystérésis à trois niveaux de la figure (3.7.b) est utilisé.

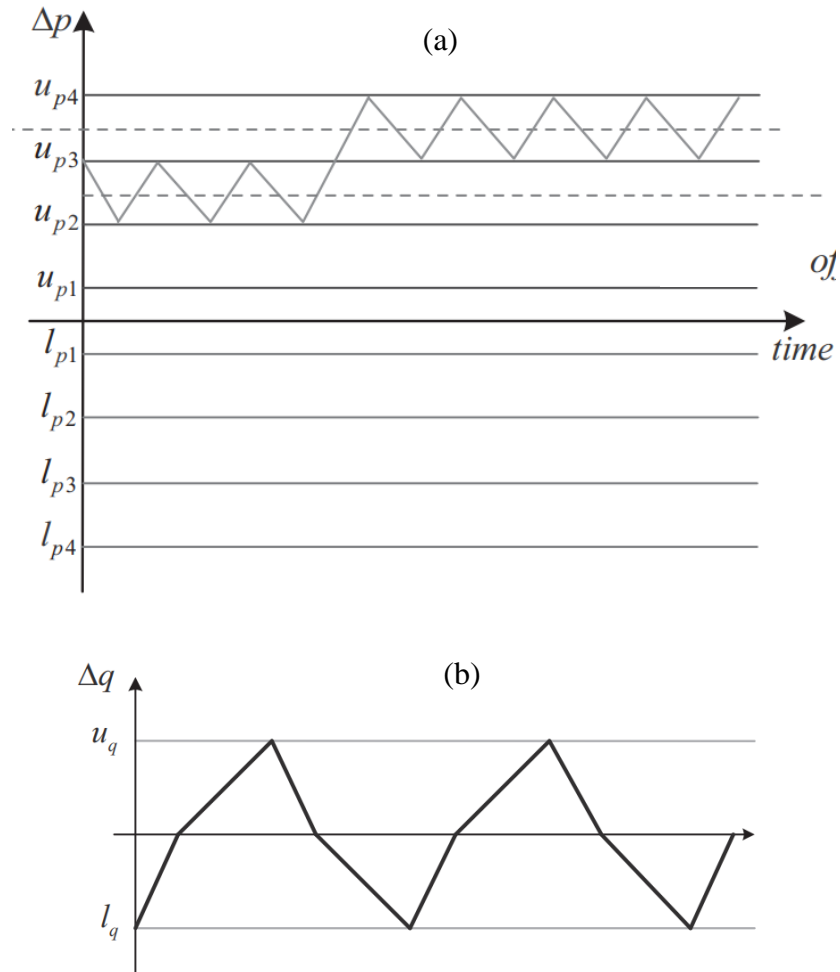


Figure (3.27) : Comparateur d'hystérésis pour l'onduleur à cinq niveaux, (a) pour la puissance active, (b) pour la puissance réactive [16]

En fonction de la position du vecteur tension du réseau et du point de fonctionnement de l'onduleur, l'erreur de puissance active est maintenue dans deux bornes consécutives, permettant de ne sélectionner que des vecteurs voisins. En supposant que le vecteur de tension du réseau tourne entre les deux hexagones extérieurs, en fonction de l'indice de modulation de l'onduleur, Δp pourrait être conservé [16].

Lorsque l'erreur atteint la limite supérieure (u_{p4}), un vecteur approprié de l'hexagone extérieur (U37 à U60) est sélectionné pour augmenter la puissance active instantanée, en inversant le sens de Δp . Quand l'erreur de puissance active passe vers le u_{p3} , un vecteur de tension du niveau interne suivant (U19 à U36) est choisi pour réduire la puissance active instantanée. Ces décisions dépendent évidemment aussi de l'état du bloc de décision du secteur et du besoin en puissance réactive [16].

En utilisant la même analyse pour la puissance réactive, et en généralisant cette analyse pour tous les secteurs, le tableau de commutation du DPC pour l'onduleur à cinq niveaux est donné dans le tableau (3.2).

Table (3.8) : Table de commutation de la DPC pour l'onduleur a 5 niveaux [16]

Sp	Sq	01	02	03	04	05	06	07	08
-4	-1	V49	V50	V51	V52	V53	V54	V55	V56
-4	0	V50	V51	V52	V53	V54	V55	V56	V57
-4	1	V51	V52	V53	V54	V55	V56	V57	V58
-3	-1	V28	V29	V30	V30	V31	V32	V33	V33
-3	0	V29	V30	V31	V31	V32	V33	V34	V34
-3	1	V30	V31	V32	V32	V33	V34	V35	V35
-2	-1	V12	V13	V13	V14	V14	V15	V15	V16
-2	0	V13	V14	V14	V15	V15	V16	V16	V17
-2	1	V14	V15	V15	V16	V16	V17	V17	V18
-1	-1	V3	V4	V4	V4	V4	V5	V5	V5
-1	0	V4	V4	V5	V5	V5	V5	V6	V6
-1	1	V5	V5	V5	V6	V6	V6	V6	V1
1	-1	V2	V2	V2	V3	V3	V3	V3	V4
1	0	V1	V1	V2	V2	V2	V2	V3	V3
1	1	V6	V1	V1	V1	V1	V2	V2	V2
2	-1	V8	V9	V9	V10	V10	V11	V11	V12
2	0	V7	V8	V8	V9	V9	V10	V10	V11
2	1	V18	V7	V7	V8	V8	V9	V9	V10
3	-1	V21	V22	V23	V23	V24	V25	V26	V26
3	0	V20	V21	V22	V22	V23	V24	V25	V25
3	1	V19	V20	V21	V21	V22	V23	V24	V24
4	-1	V39	V40	V41	V42	V43	V44	V45	V46
4	0	V38	V39	V40	V41	V42	V43	V44	V45
4	1	V37	V38	V39	V40	V41	V42	V43	V44
Sp	Sq	09	010	011	012	013	014	015	016
-4	-1	V57	V58	V59	V60	V37	V38	V39	V40
-4	0	V58	V59	V60	V37	V38	V39	V40	V41
-4	1	V59	V60	V37	V38	V39	V40	V41	V42
-3	-1	V34	V35	V36	V36	V19	V20	V21	V21

-3	0	V35	V36	V19	V19	V20	V21	V22	V22
-3	1	V36	V19	V20	V20	V21	V22	V23	V23
-2	-1	V16	V17	V17	V18	V18	V7	V7	V8
-2	0	V17	V18	V18	V7	V7	V8	V8	V9
-2	1	V18	V7	V7	V8	V8	V9	V9	V10
-1	-1	V5	V6	V6	V6	V6	V1	V1	V1
-1	0	V6	V6	V1	V1	V1	V1	V2	V2
-1	1	V1	V1	V1	V2	V2	V2	V2	V3
1	-1	V4	V4	V4	V5	V5	V5	V5	V6
1	0	V3	V3	V4	V4	V4	V4	V5	V5
1	1	V2	V3	V3	V3	V3	V4	V4	V4
2	-1	V12	V13	V13	V14	V14	V15	V15	V16
2	0	V11	V12	V12	V13	V13	V14	V14	V15
2	1	V10	V11	V11	V12	V12	V13	V13	V14
3	-1	V27	V28	V29	V29	V30	V31	V32	V32
3	0	V26	V27	V28	V28	V29	V30	V31	V31
3	1	V25	V26	V27	V27	V28	V29	V30	V30
4	-1	V47	V48	V49	V50	V51	V52	V53	V54
4	0	V46	V47	V48	V49	V50	V51	V52	V53
4	1	V45	V46	V47	V48	V49	V50	V51	V52

Sp	Sq	017	018	019	020	021	022	023	024
-4	-1	V41	V42	V43	V44	V45	V46	V47	V48
-4	0	V42	V43	V44	V45	V46	V47	V48	V49
-4	1	V43	V44	V45	V46	V47	V48	V49	V50
-3	-1	V22	V23	V24	V24	V25	V26	V27	V27
-3	0	V23	V24	V25	V25	V26	V27	V28	V28
-3	1	V24	V25	V26	V26	V27	V28	V29	V29
-2	-1	V8	V9	V9	V10	V10	V11	V11	V12
-2	0	V9	V10	V10	V11	V11	V12	V12	V13
-2	1	V10	V11	V11	V12	V12	V13	V13	V14
-1	-1	V1	V2	V2	V2	V2	V3	V3	V3
-1	0	V2	V2	V3	V3	V3	V3	V4	V4
-1	1	V3	V3	V3	V4	V4	V4	V4	V5
1	-1	V6	V6	V6	V1	V1	V1	V1	V2
1	0	V5	V5	V6	V6	V6	V6	V1	V1
1	1	V4	V5	V5	V5	V5	V6	V6	V6
2	-1	V16	V17	V17	V18	V18	V7	V7	V8
2	0	V15	V16	V16	V17	V17	V18	V18	V7
2	1	V14	V15	V15	V16	V16	V17	V17	V18
3	-1	V33	V34	V35	V35	V36	V19	V20	V20
3	0	V32	V33	V34	V34	V35	V36	V19	V19
3	1	V31	V32	V33	V33	V34	V35	V36	V36
4	-1	V55	V56	V57	V58	V59	V60	V37	V38

4	0	V54	V55	V56	V57	V58	V59	V60	V37
4	1	V53	V54	V55	V57	V57	V58	V59	V60

3.4. Résultats de simulation :

Dans cette section, des résultats de simulation sont fournis pour prouver l'efficacité du DPC pour l'onduleur à cinq niveaux connectés au réseau. La tension du réseau est de 220 V, 50 Hz (ligne-ligne RMS), l'impédance de couplage est $L=10$ mH, $R= 0,25$ ohm, la période d'échantillonnage est de 10^{-5} s, les tensions des condensateurs sont supposée des source de tension continue fixe de $v_{dc}/4 = 150V$.

Le modèle de simulation de l'onduleur cinq niveaux connecté au réseau est représenté par (3.8). La figure (3.9) montre le block de la commande directe de puissance d'un onduleur à cinq niveaux.

Dans le but d'évaluer le DPC pour l'onduleur à deux niveaux, la puissance active de référence est passée de 1 kW à 2 kW à $t=0,2s$. La valeur de référence de la puissance réactive est augmentée de 0 à 500 Var à $t=0,3s$.

La figure (3.10) montre que les puissance active et réactive suite bien leur référence avec un faible ondulation. Au moment de changement de la puissance active de 1 kW à 2 kW, l'amplitude des courants de ligne double de 4A à 8A (Figure (3.11)). Au point de changement de puissance réactive, le courant de ligne commence à décaler par rapport à la tension de réseau correspondante, comme illustré à la Figure (3.12), car dans ce cas, un 500 var est injecté de l'onduleur au réseau.

La figure (3.13) présente le spectre d'harmonique des courant de ligne pour les onduleur 2, 3 et 5-niveaux, cette figure démontre la supériorité de l'onduleur à cinq niveaux en termes de THD de courant de ligne par rapport à celui à trois et à deux niveaux, le THD est de 5,86% pour l'onduleur à deux niveaux, cependant, le THD est réduit à 3,34% dans le cas de l'onduleur à trois niveaux, le THD est réduit à 3,12% dans le cas de l'onduleur à cinq niveaux .

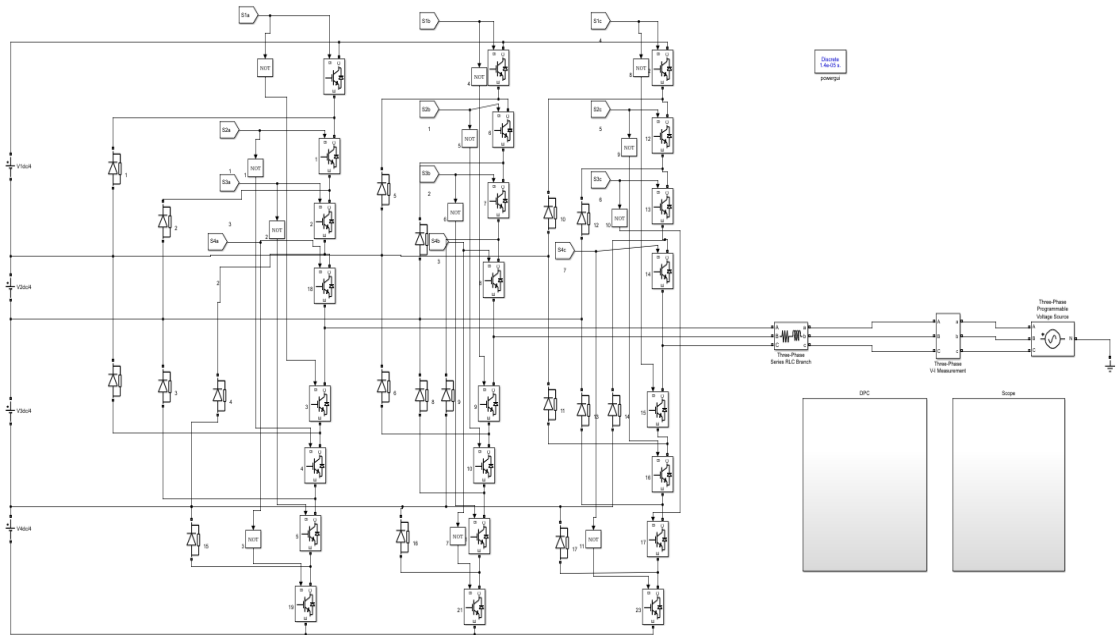


Figure (3.28) : Block de la commande directe de puissance d'un onduleur à cinq niveaux.

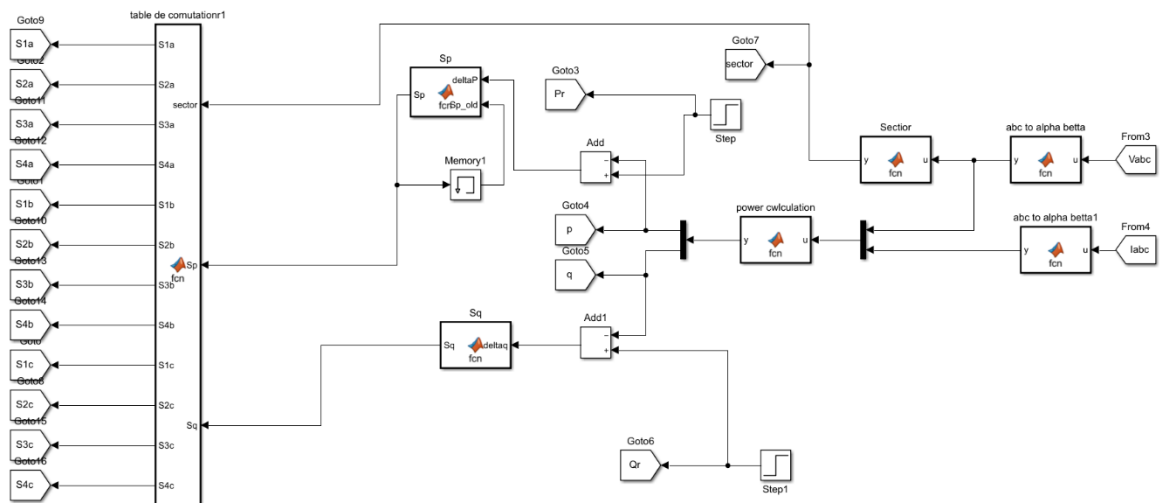


Figure (3.29) : Schéma block de la commande DPC pour l'onduleur cinq niveaux en utilisant MATLAB Simulink.

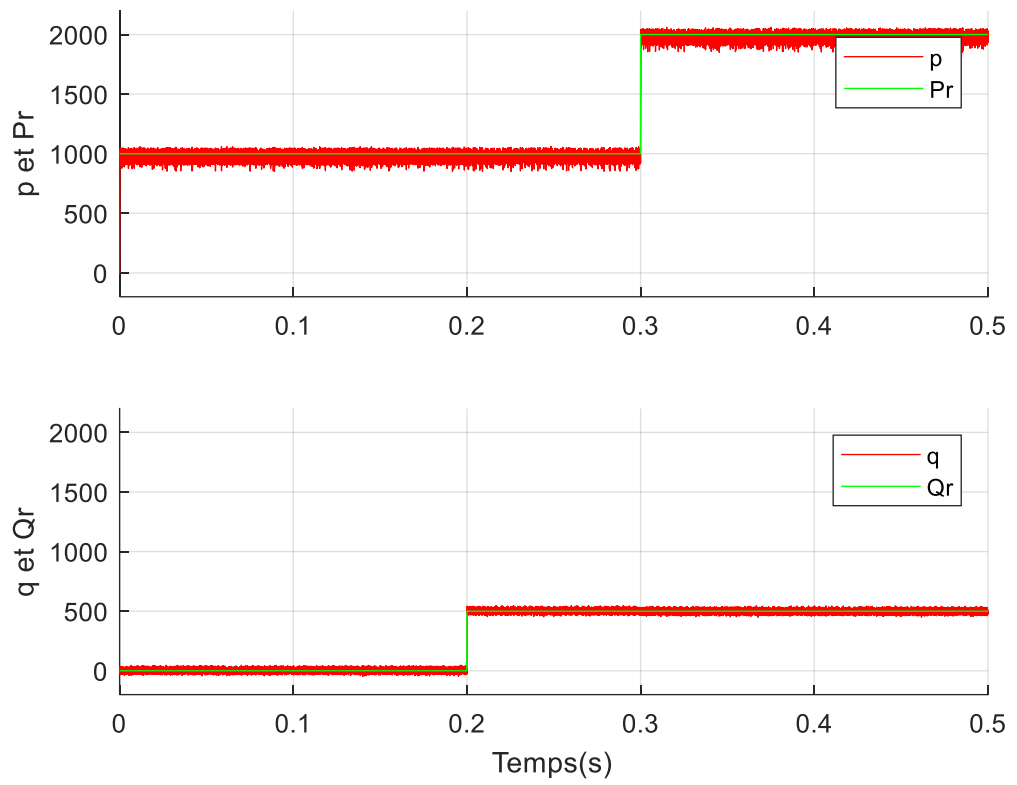


Figure (3.30) : Résultats de simulation des puissances active et réactive et leur référence pour un onduleur à cinq-niveaux connecté au réseau .

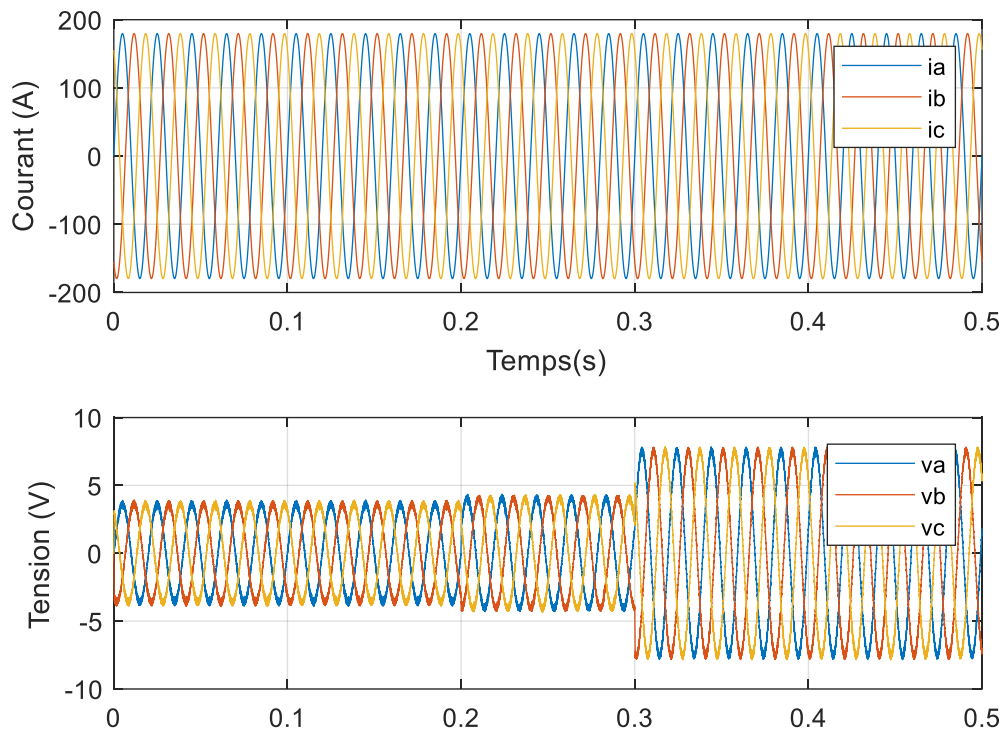


Figure (3.31) : Résultats de simulation des tensions du réseau et des courants de lignes d'un onduleur à cinq-niveaux connecté au réseau.

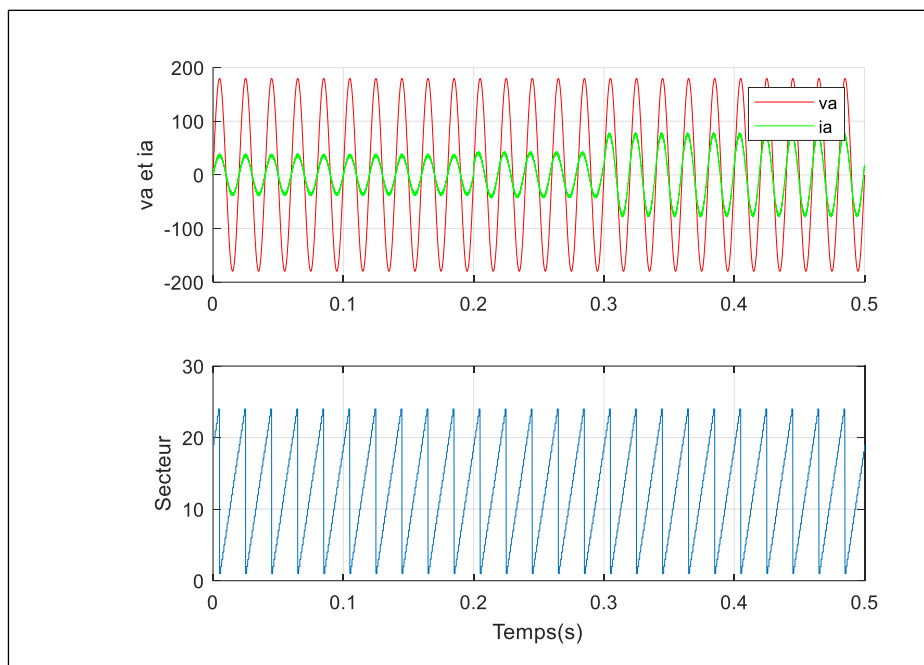


Figure (3.32) : Résultats de simulation du courant i_a , de la tension v_a et du secteur pour un onduleur à cinq niveaux connecté au réseau .

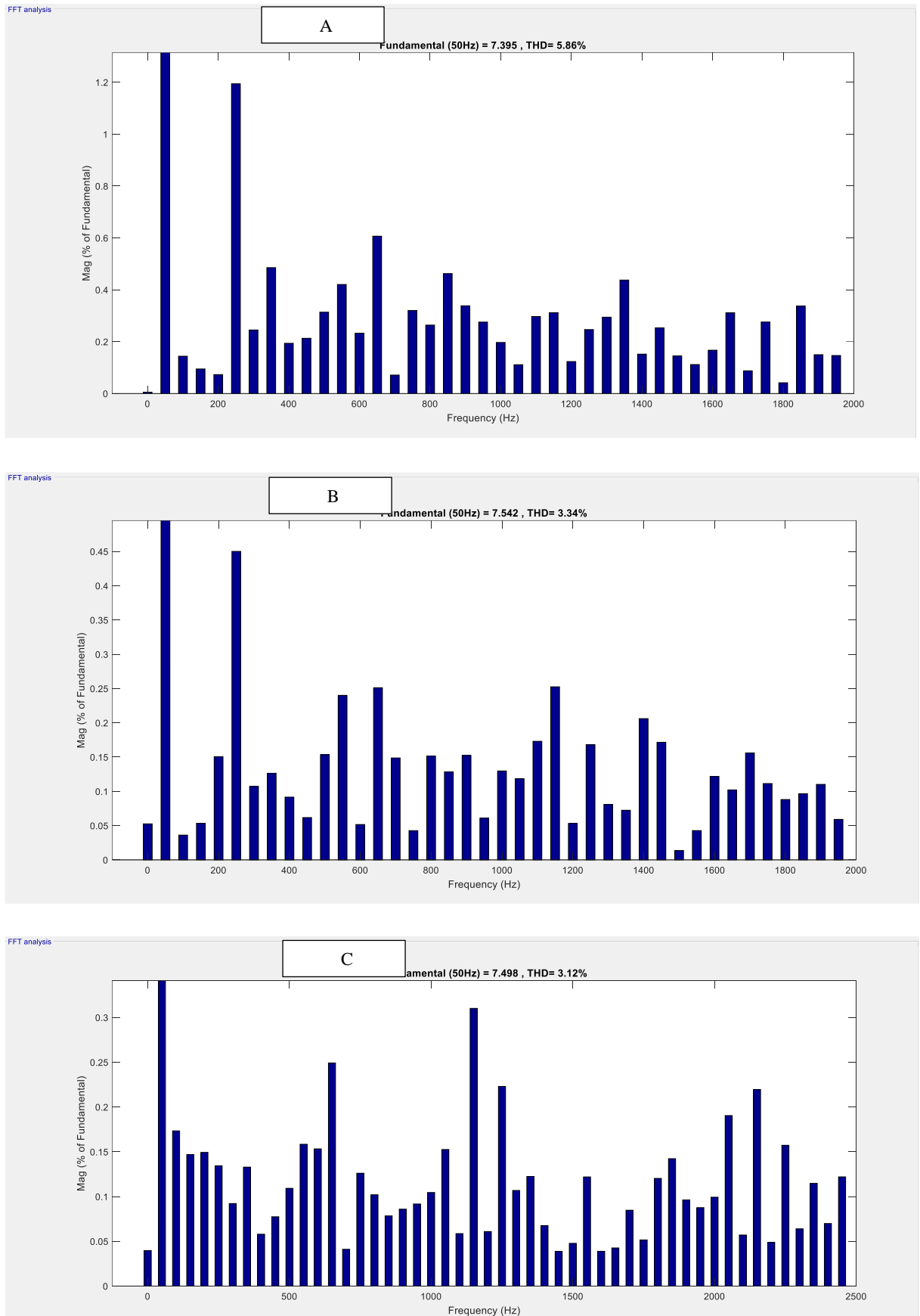


Figure (3.33) : Spectre d'harmonique de courant de ligne, (A) : pour l'onduleur à deux niveaux, (B) : pour l'onduleur à trois niveaux, (C) : pour l'onduleur à cinq niveaux.

Le tableau (3.3) montre le THD du courant de ligne et l'ondulation de puissance active et réactive en fonction de la largeur de la bande d'hystérésis pour les onduleurs à deux, trois et cinq niveaux, il est clair que le THD et l'ondulation de puissance augmentent avec l'augmentation de l'hystérésis largeur de bande.

Table (3.9) : THD du courant de ligne et l'ondulation des puissances active et réactive par

		$(H_q, H_p) (W, Var)$										
		1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
THD %	DPC_2	3,79	3,86	3,91	3,99	4,1	4,22	4,35	4,51	4,6	4,69	4,82
	DPC_3	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79
	DPC_5	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79
$\frac{\Delta q}{q} \%$	DPC_2	13,5	13,7	13	13	13	13,5	13	13	13	13	13
	DPC_3	5	5	5	5	5,75	5,75	5,2	5,2	5,75	5,75	5,75
	DPC_5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
$\frac{\Delta p}{p} \%$	DPC_2	13	13,2	13	13	13	13,75	13,5	13,5	13,5	13,5	13,7
	DPC_3	7,25	7,75	7,75	7,5	7,5	7,5	7,2	7,5	7,5	7,5	7,5
	DPC_5	7,25	7,5	7,5	7,5	7	7	6	6	6	2	2

rapport aux valeurs de bande d'hystérésis H_p et H_q pour l'onduleur NPC à trois niveaux et deux niveaux et cinq niveau.

Le tableau (3.4) montre l'effet de la période d'échantillonnage utilisée dans MATLAB Simulink sur le THD et l'ondulation des puissances active et réactive. Il est clair que la période d'échantillonnage a un effet important, les petites valeurs de la période d'échantillonnage donnent une bonne précision du système de contrôle, où le THD et l'ondulation de puissance sont réduits. Cependant, les grandes valeurs peuvent dégrader la qualité de courant et le contrôle des puissances active et réactive. D'autre part, en cas d'implémentation réelle, les petites valeurs de la période d'échantillonnage comme 1 μs , ou 5 μs ne seront pas supportées par les cartes d'implémentation.

Table (3.10) : THD du courant de ligne et l'ondulation des puissances active et réactive en fonction de la période d'échantillonnage pour l'onduleur NPC à cinq et trois niveaux et deux niveaux

		$T_e (\mu s)$										
		1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
THD %	DPC_2	0.42	0.79	1.5	2.22	2.97	3.85	4.46	5.38	6.65	6.65	7.23
	DPC_3	0.21	0.42	0.83	1.26	1.67	2.08	2.53	2.94	3.34	3.77	4.32
	DPC_5	0.13	0.34	0.75	1.13	1.53	1.99	2.35	2.77	3.12	3.59	3.93
$\frac{\Delta q}{p} \%$	DPC_2	1.45	2.75	5.5	7.5	9	12.5	14	16.5	17.5	19	22.5
	DPC_3	0.65	0.9	1.95	2.75	3.5	4.5	5	6	7	8	8.5
	DPC_5	0.35	0.75	1.5	2.1	3	4	4.5	5	5.5	6	7
$\frac{\Delta p}{p} \%$	DPC_2	1.45	2.85	5.5	7.7	10.25	13	15.5	18	21	22	25
	DPC_3	0.8	1.55	3.35	5.25	6.75	8.75	10	11.5	13.5	15	16.5
	DPC_5	0.7	0.65	3	4.5	5.75	7.5	9	11	12	14	15

3.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation d'un onduleur à cinq niveaux à structure NPC. Nous avons présenté un modèle pour l'onduleur ainsi leurs commandes complémentaires optimales et les matrices de transferts en utilisant les fonctions de connexion. De plus, la stratégie de contrôle de puissance directe est développée pour l'onduleur NPC à cinq niveaux dans ce chapitre, où son algorithme est relativement complexe par rapport aux onduleurs à deux et trois niveaux. Cependant, l'onduleur NPC à cinq niveaux contrôlés par DPC offre de meilleurs résultats en termes de puissances active et réactive ainsi que de courant de ligne THD.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous avons étudié en détail l'onduleur de tension à deux niveaux connectés au réseau. On a présenté la modélisation de l'onduleur connecté au réseau, en particulier en détaille l'onduleur à deux niveaux, ainsi le réseau et le filtre de raccordement. Ensuite, on a présenté la commande directe de puissance.

Le deuxième chapitre a été consacré au contrôle de puissance direct DPC pour l'onduleur trois niveau NPC connectés au réseau, son principe de fonctionnement et ses synthèses sont fournis l'onduleur à trois niveaux. Son algorithme est simple, il ne nécessite aucun bloc de modulation ni boucle de courant, les signaux de commande sont fournis directement à partir de la puissance active et réactive à travers une table de commutation prédéfinie.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation d'un onduleur à cinq niveaux à structure NPC. Nous avons présenté un modèle pour l'onduleur ainsi leurs commandes complémentaires optimales et les matrices de transferts en utilisant les fonctions de connexion. De plus, la stratégie de contrôle de puissance directe est développée pour l'onduleur NPC à cinq niveaux dans ce chapitre, où son algorithme est relativement complexe par rapport aux onduleurs à deux et trois niveaux. Cependant, l'onduleur NPC à cinq niveaux contrôlés par DPC offre de meilleurs résultats en termes de puissances active et réactive ainsi que de courant de ligne THD.

Comme perspectives, ce travail peut être étendu aux points suivants :

- Association des techniques d'intelligence artificielle aux stratégies de contrôle direct de puissance pour les onduleurs multiniveaux ;
- Extension de cette étude vers d'autres topologie des onduleur multiniveaux ;
- Utilisation des méthodes de commande non-linéaires adaptatives ;
- Implémentation pratique des algorithmes de commande ;

Reference :

- [1] F. Escalante, J. C. Vannier, and A. Arzandé, "Flying capacitor multilevel inverters and DTC motor Drive applications," *IEEE Trans. Ind. Electronics.*, vol. 49, no. 04, pp. 809-815, August 2002.
- [2] MERIOUMA MED LAMIN et al. « Commande Directe de Puissance du Système Photovoltaïque-Onduleur NPC à Trois Niveaux Connecté au Réseau Electrique » UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2020
- [3] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, and I. Takahashi, "Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, pp. 473-479, 1998.
- [4] N. A. Qentin Pesqueux, "Commande DPC sur un convertisseur matriciel," Master mémoire de master, Université de Lille, imassa, 2014.
- [5] A. Bouafia, "Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: Application aux redresseurs a MLI," 2014.
- [6] G. Escobar, A. M. Stankovic, J. M. Carrasco, E. Galván, and R. Ortega, "Analysis and design of direct power control (DPC) for a three phase synchronous rectifier via output regulation subspaces," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, pp. 823-830, 2003.
- [7] S. Vazquez, J. A. Sanchez, J. M. Carrasco, J. I. Leon, and E. Galvan, "A model-based direct power control for three-phase power converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 1647-1657, 2008.
- [8] M. Malinowski, M. P. Kazmierkowski, S. Hansen, F. Blaabjerg, and G. Marques, "Virtual flux based direct power control of three-phase PWM rectifiers," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth 56 IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*, 2000, pp.2369-2375 .
- [9] M. Malinowski, M. Jasinski, and M. P. Kazmierkowski, "Simple direct power control of threephase PWM rectifier using space-vector modulation (DPC-SVM)," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, pp. 447-454, 2004.
- [10] P. Antoniewicz and M. P. Kazmierkowski, "Virtual-flux-based predictive direct power control of AC/DC converters with online inductance estimation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 4381-4390, 2008.
- [11] S. A. Larrinaga, M. A. R. Vidal, E. Oyarbide, and J. R. T. Apraiz, "Predictive control strategy for DC/AC converters based on direct power control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 1261-1271, 2007.

- [12] P. Cortés, J. Rodríguez, P. Antoniewicz, and M. Kazmierkowski, "Direct power control of an AFE using predictive control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, pp. 2516-2523, 2008.
- [13] B. S. Chen and G. Joós, "Direct power control of active filters with averaged switching frequency regulation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, pp. 2729-2737, 2008.
- [14] D. Santos-Martin, J. L. Rodriguez-Amenedo, and S. Arnalte, "Direct power control applied to doubly fed induction generator under unbalanced grid voltage conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, pp. 2328-2336, 2008.
- [15] Bouzidi Mansour, « stratégies de contrôle direct de puissance associées à des commandes non linéaires d'un filtre actif parallèle multiniveaux », mémoire de diplôme magister, Université Djilali Liabes Sidi-Belabbes, 20
- [16] Serpa , Leonardo A. « Current Control Strategies for Multilevel Grid Connected Inverters » submitted to the SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH, 2007 .
- [17] Dellalou Khereddine « Stratégies De Commande Des Onduleurs Multiniveaux (MLI ST et MLI Vectorielle) » UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA , master, 2019