

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



**UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**

**HOUARI BOUMEDIENE**

**FACULTE D'ÉLECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE**

# ***Thèse***

Présentée pour obtenir le diplôme de **DOCTORAT**

**EN: ÉLECTRONIQUE**

Spécialité: Contrôle des Processus et Robotique

par

**MESSAÏF IQBAL**

Sujet

**Contrôle Direct du Couple d'une machine asynchrone  
alimentée par onduleurs multiniveaux  
par une approche classique et une approche neuronale.  
Équilibrage des tensions d'entrée des onduleurs**

soutenue publiquement le 04/07/2009, devant le jury composé de:

|                         |                                     |                              |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| <b>Mr R. Toumi</b>      | <b>Professeur, USTHB</b>            | <b>Président</b>             |
| <b>Mr E.M. Berkouk</b>  | <b>Professeur, ENP</b>              | <b>Directeur de Thèse</b>    |
| <b>Mme N. Saadia</b>    | <b>Maître de conférences, USTHB</b> | <b>Co-Directeur de Thèse</b> |
| <b>Mr M. Tadjine</b>    | <b>Professeur, ENP</b>              | <b>Examineur</b>             |
| <b>Mr M.O. Mahmoudi</b> | <b>Professeur, ENP</b>              | <b>Examineur</b>             |
| <b>Mr H. Zerroug</b>    | <b>Maître de Conférences, USTHB</b> | <b>Examineur</b>             |

## AVANT PROPOS

Les travaux de recherche dans cette thèse se sont effectués au sein du Laboratoire de Robotique Parallélisme et Électroénergétique de la faculté d'Électronique et d'Informatique de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene en collaboration avec le Laboratoire de Commande des Processus de l'École Nationale Polytechnique.

Au terme d'un travail de cinq années de recherche, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé en contribuant à l'aboutissement de cette thèse, tout particulièrement :

- Monsieur El Madjid Berkouk, Professeur à l'ENP, qui a dirigé ces travaux de recherche. Qu'il soit assuré de ma profonde reconnaissance pour ses conseils précieux et la confiance dont il a témoigné à mon égard tout au long de ce parcours.
- Madame Nadia Saadia, Maître de conférence à l'USTHB, qui a co-dirigé ce travail. Ses conseils judicieux ont été pour moi une aide précieuse.

Je remercie très vivement Monsieur R. Toumi, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner mon travail en présidant le jury.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur M. Tadjine, Professeur à l'École Nationale Polytechnique, pour la confiance et l'honneur qu'il m'accorde en acceptant de participer à ce jury.

Que Monsieur M.O. Mahmoudi, Professeur à l'École Nationale Polytechnique d'Alger, trouve ici mes remerciements les plus sincères et ma profonde reconnaissance pour sa participation au sein du jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur H. Zerroug, Maîtres de Conférence à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, pour l'honneur qu'il me fait en participant au jury de cette thèse.

Mes remerciements vont:

à tout les membres de l'équipe Robotique2 de la faculté d'Électronique et d'Informatique, pour la chaleureuse et amicale ambiance dans laquelle se sont déroulées ces dernières années.

à tous mes collègues de la FEI de l'USTHB pour leurs soutiens et encouragements.  
A la mémoire de mes chers parents:- ce fut pour moi un honneur d'avoir suivi ce parcours, dont vous avez bien connu les contraintes ... que Dieu le tout puissant leur accorde sa sainte miséricorde et les accueille dans son vaste Paradis.

Enfin, je ne serais terminer ces remerciements sans mentionner les proches, famille et amis, qui, sur le plan humain, m'ont soutenu par leurs encouragements. Un remerciement particulier et une reconnaissance la plus profonde vont à ma femme et mes adorables filles Rym, Maroua et Anfel pour la joie et l'ambiance particulière qu'elles ont créé autour de moi, ainsi qu'à tous mes frères et sœurs.

Plusieurs personnes ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, je ne serais les nommer toutes, mais je tiens à leurs exprimer mes vives remerciements.

Cette thèse leur est dédiée à titre de modeste remerciement.

# SOMMAIRE

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Introduction générale | 1 |
|-----------------------|---|

## CHAPITRE 1

### CONTROLE DIRECT DU COUPLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE ALIMENTEE PAR UN ONDULEUR A 2-NIVEAUX DE TENSION

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 Introduction                                                                                           | 3  |
| 1.2 Caractéristiques d'une commande CDC                                                                    | 4  |
| 1.3 Principes d'une commande CDC                                                                           | 4  |
| 1.3.1 Contrôle du flux statorique                                                                          | 5  |
| 1.3.2 Contrôle du couple électromagnétique                                                                 | 6  |
| 1.3.3 Cas particulier: Application du vecteur de tension nulle                                             | 7  |
| 1.4 Application à la commande d'une machine asynchrone<br>alimentée par un onduleur à 2-niveaux de tension | 8  |
| 1.4.1 L'onduleur à 2-niveaux de tension                                                                    | 8  |
| 1.4.1.1 Introduction                                                                                       | 8  |
| 1.4.1.2 Modélisation de l'onduleur de tension                                                              | 8  |
| 1.4.2 Description de la structure de commande                                                              | 10 |
| 1.4.2.1 Règles générales pour la sélection du vecteur de tension vs                                        | 10 |
| 1.4.2.2 Estimateurs                                                                                        | 15 |
| 1.4.2.3 Élaboration du vecteur de commande                                                                 | 16 |
| 1.4.2.4 Synthèse de la table de commande                                                                   | 18 |
| 1.4.3 Synoptique d'une commande CDC                                                                        | 20 |
| 1.5 Simulations                                                                                            | 20 |
| 1.6 Conclusion                                                                                             | 27 |

## CHAPITRE 2

### CONTROLE DIRECT DU COUPLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE ALIMENTEE PAR UN ONDULEUR A 3-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Introduction                                                                                                | 28 |
| 2.2 L'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC                                                               | 29 |
| 2.2.1 Structure                                                                                                 | 29 |
| 2.2.2 Principe de fonctionnement                                                                                | 29 |
| 2.3 Application du CDC au contrôle d'une machine asynchrone<br>alimentée par un onduleur à 3-niveaux de tension | 32 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.1 Construction de 2 nouvelles tables de commande                                                            | 33 |
| 2.3.1.1 Stratégie à 2 tables de commande                                                                        | 34 |
| 2.3.1.2 Stratégie à une table de commande unique                                                                | 40 |
| 2.3.2 Simulations                                                                                               | 40 |
| 2.4 Contrôle du point milieu de l'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC                                   | 46 |
| 2.4.1 Influence des différents vecteurs sur le point milieu<br>de l'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC | 47 |
| 2.4.1.1 Vecteurs de tension intrinsèquement stables                                                             | 47 |
| 2.4.1.2 Vecteurs de tension stables par la commande                                                             | 48 |
| 2.4.1.3 Vecteurs de tension instables                                                                           | 48 |
| 2.4.2 La redondance base du contrôle du point milieu<br>de l'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC        | 49 |
| 2.4.3 L'algorithme du contrôle du point milieu<br>de l'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC              | 49 |
| 2.4.4 Application aux cas des tables de commande établies                                                       | 52 |
| 2.4.5 Schéma global de contrôle                                                                                 | 56 |
| 2.4.6 Simulations                                                                                               | 58 |
| 2.5 Conclusion                                                                                                  | 58 |

## CHAPITRE 3

### CONTROLE DIRECT DU COUPLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE ALIMENTEE PAR UN ONDULEUR A 5-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Introduction                                                                                                            | 61 |
| 3.2 L'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC                                                                           | 61 |
| 3.2.1 Structure                                                                                                             | 61 |
| 3.2.2 Différentes configurations d'un bras d'onduleur<br>à 5-niveaux de tension de type NPC                                 | 62 |
| 3.3 Application du CDC au contrôle d'une machine asynchrone<br>alimentée par un onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC | 67 |
| 3.3.1 Élaboration des tables de commande                                                                                    | 68 |
| 3.3.1.1 Stratégie à plusieurs tables de commande                                                                            | 68 |
| 3.3.1.2 Stratégie à une table de commande unique                                                                            | 80 |
| 3.3.2 Simulations                                                                                                           | 80 |
| 3.4 Contrôle du point milieu de l'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC                                               | 82 |
| 3.4.1 Influence des différents vecteurs sur le point milieu<br>de l'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC             | 82 |
| 3.4.1.1 Vecteurs de tension intrinsèquement stables                                                                         | 87 |
| 3.4.1.2 Vecteurs de tension stables par la commande                                                                         | 88 |
| 3.4.1.3 Vecteurs de tension instables                                                                                       | 88 |
| 3.4.2 Mise au point de l'algorithme de contrôle                                                                             | 91 |
| 3.4.3 Application aux cas des tables de commande établies                                                                   | 94 |
| 3.4.4 Schéma global de contrôle                                                                                             | 94 |

|                   |    |
|-------------------|----|
| 3.4.5 Simulations | 95 |
| 3.4.6 Conclusion  | 97 |

## CHAPITRE 4

### APPLICATION DES RESEAUX DE NEURONES AU CONTROLE DIRECT DU COUPLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1 Introduction                                           | 103 |
| 4.2 Conception de la structure à réseaux de neurones       | 104 |
| 4.3 Application aux cas des tables de commande élaborées   | 108 |
| 4.3.1 CDC avec onduleur à 2-niveaux de tension             | 108 |
| 4.3.2 CDC avec onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC | 119 |
| 4.3.2.1 Sans équilibrage du potentiel du point milieu      | 119 |
| 4.3.2.2 Avec équilibrage du potentiel du point milieu      | 112 |
| 4.3.3 CDC avec onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC | 114 |
| 4.3.3.1 Sans équilibrage du potentiel du point milieu      | 114 |
| 4.3.3.2 Avec équilibrage du potentiel du point milieu      | 117 |
| 4.4 Simulation                                             | 122 |
| 4.5 Conclusion                                             | 127 |
| Conclusion générale                                        | 128 |

# التحكم المباشر لعزم ماكنة غير متوازنة مغذاة بمموج متعدد المستويات باستعمال طريقة تقليدية و الشبكات العصبية. موازنة توترات الدخول للمموج

## كلمات مفتاحية

قيادة بدون استشعار السرعة  
موازنة  
الشبكات العصبية  
طريقة لفنبرج-ماركوارت

ماكنة غير متوازنة  
التحكم المباشر للعزم  
مموج متعدد المستويات  
جدول القيادة

## ملخص

يبحث هذا العمل في إستراتيجية التحكم المسماة التحكم المباشر للعزم بدون استشعار السرعة لماكنة غير متوازنة مغذاة بمموج متعدد المستويات. لذلك، عن طريق اختيار من جدول القيادة لشعاع الخروج المناسب لمموج الجهد، نفرض مباشرة حالة المقاطع الطاقوية بدلالة الحالة الكهرومغناطيسية للماكنة.

في هذا الشأن، نقدم ثلاث تطبيقات. الأول يعالج التحكم في ماكنة غير متوازنة مغذاة بمموج تقليدي. في التطبيقين الثاني و الثالث نقوم بإنشاء جداول جديدة للقيادة في حالات تغذية على التوالي بمموج ذو ثلاث مستويات و بمموج ذو خمس مستويات من الجهد من طراز NPC. نعطي اهتمام خاص لصيانة توازن جهود المدخل الذي يمثل نقطة ضعف رئيسة لهذا النوع من التركيب.

إن جداول القيادة تأخذ أحجام أكبر بخاصة في حالات مموج بثلاث و خمسة مستويات من الجهد، فتطلب إستعمال هياكل على أساس الشبكات العصبية، الذي يؤدي في النهاية إلى تخفيض وقت التنفيذ و حجم الذاكرة التي ستخصص في حالة ما إذا تم التنفيذ في الوقت الحقيقي.

**Contrôle Direct du Couple d'une machine asynchrone  
alimentée par onduleurs multiniveaux  
par une approche classique et une approche neuronale.**  
Équilibrage des tensions d'entrée des onduleurs

**Mots clés**

Machine asynchrone  
Contrôle direct du couple  
Onduleur multiniveaux  
Table de commande

Commande sans capteur de vitesse  
Équilibrage des tensions d'entrée  
Réseaux de neurones  
Méthode de Levenberg-Marquardt

**Résumé**

Ce travail décrit la mise en œuvre du contrôle direct du couple sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone alimentée par des convertisseurs multiniveaux. Ainsi, par un choix dans une table de commande du vecteur de sortie approprié de l'onduleur de tension, on impose directement les états des interrupteurs de puissance en fonction de l'état électromagnétique de la machine.

Trois applications sont présentées dans ce cadre. La première traite du contrôle d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur classique. La seconde et la troisième développent de nouvelles tables de commande dans les cas d'alimentations respectivement par un onduleur à 3-niveaux et par un onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC. Une attention particulière est portée au maintien de l'équilibre des tensions continues d'entrée, l'inconvénient majeur de ce type de structure.

Les tables de commande de plus en plus grandes notamment dans les cas d'onduleurs à 3 et 5-niveaux de tension a nécessité l'emploi des structures à réseaux de neurones, réduisant le temps d'exécution et la taille mémoire allouée dans une éventuelle implémentation en temps réel.

**A direct torque control of the asynchronous machine  
fed by multilevel inverter  
with a classical approach and a neuronal approach.**

Balance maintaining of the input voltages of inverters

**Keywords**

Asynchronous machine  
Direct torque control  
Multilevel inverter  
Switching table

Speed sensorless control  
Balance maintaining  
Neural networks  
Levenberg-Marquardt method

**Summary**

This work describes design of a speed sensorless direct torque control of an asynchronous machine supplied by multilevel converters.

Indeed, by choosing the right inverter output vectors in a switching table, it directly imposes the power switches states according to the electromagnetic state of the machine.

Three applications are treated within this work. The first relates to the control of classical inverter-fed asynchronous machine. The others develop new switching tables for a direct torque control of respectively a 3-levels and 5-levels NPC inverter-fed asynchronous machine. A special care is paid to the balance maintaining of the input DC voltages, which represents a major inconvenient of these structures.

These tables become more complicate particularly in the cases of 3-levels and 5-levels inverters, and need the use of neural network structures for the little computation time and facility of implementation.

## NOMENCLATURE

### *Indices*

|                 |                                                   |
|-----------------|---------------------------------------------------|
| $d, q$          | Axes du repère diphasé tournant                   |
| $\alpha, \beta$ | Axes du repère diphasé fixe par rapport au stator |
| $a, b, c$       | Axes du système triphasé                          |
| $s, r$          | Indices des grandeurs statoriques et rotoriques   |
| ref             | Référence                                         |

### *Paramètres*

|          |                               |
|----------|-------------------------------|
| $R$      | Résistance d'une phase        |
| $L$      | Inductance cyclique par phase |
| $l$      | Inductance propre d'une phase |
| $L_m$    | Inductance mutuelle cyclique  |
| $\sigma$ | Coefficient de dispersion     |
| $p$      | Nombre de paires de pôles     |
| $J$      | Moment d'inertie              |
| $f$      | Force de frottement           |

### *Variables*

|                              |                                                                      |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $\Delta\phi_s, \Delta\Gamma$ | Largeur de la bande d'hystérésis respectivement du flux et du couple |
| $S$                          | Numéro du Secteur de la position du vecteur flux statorique          |
| $\phi$                       | Valeur instantanée du flux                                           |
| $\Gamma_e$                   | Couple électromagnétique                                             |
| $\Gamma_r$                   | Couple de charge                                                     |
| $v$                          | Valeur instantanée de la tension                                     |
| $v_i$                        | Vecteur de tension atteignable par l'onduleur de tension             |
| $U_o$                        | Tension d'entrée de l'onduleur                                       |
| $T_e$                        | Période d'échantillonnage                                            |
| $i$                          | Valeur instantanée du courant                                        |
| $\theta$                     | Position du rotor                                                    |
| $\psi$                       | Position du repère tournant                                          |
| $\omega_\psi$                | Vitesse du repère tournant                                           |
| $\omega_s$                   | Pulsation statorique                                                 |
| $\omega$                     | Vitesse électrique de rotation                                       |

# INTRODUCTION GENERALE

Le variateur de vitesse, constitué par un moteur asynchrone et un convertisseur statique, prend de plus en plus d'importance dans le domaine de la vitesse variable grâce d'une part au progrès dans le domaine des convertisseurs de puissance et d'autre part aux divers avantages que présente le moteur asynchrone par rapport au moteur à courant continu en ce qui concerne la robustesse mécanique, la structure (poids et taille) et le coût d'achat et de maintenance [1].

Vers le milieu des années 80, un nouveau concept de la commande de la machine asynchrone, dénommé Contrôle Direct du Couple (ou Direct Torque Control, DTC en anglais) est apparu comme concurrentiel par rapport aux techniques de commande vectorielle qui sont basées sur des formalismes mathématiques pointus mais rigoureux [2,3].

La stratégie de commande basée sur le contrôle direct du couple a été inventée par I. Takahashi et largement développée par M. Depenbrok en Allemagne (1985) et par I. Takahashi et T. Nogushi au Japon (1985). Elle est basée sur la régulation séparée du flux statorique et du couple électromagnétique d'une machine asynchrone en utilisant deux contrôleurs à hystérésis et une table de commande pour générer de façon directe les ordres de commande de l'onduleur de tension sans l'intermédiaire d'un étage à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) qui lui impose un vecteur de tension en valeur moyenne. Or, les avantages déterminants attribués à cette stratégie tels la dynamique, la robustesse, la facilité d'implémentation et surtout l'absence d'un capteur de vitesse, sont cependant contrebalancés par l'utilisation de comparateurs à hystérésis qui par principe, conduisent à un fonctionnement à fréquence variable qui augmente les risques de résonance, et d'autre part, l'échantillonnage à fréquence finie se traduit par un dépassement pseudo-aléatoire de la bande d'hystérésis. Ces deux facteurs contribuent à rendre le contenu harmonique des différents signaux de sortie difficilement prévisibles, notamment quand il s'agit d'un onduleur classique à 2-niveaux de tension.

Simultanément, d'autres topologies de conversion statique, appelées multiniveaux, ont vu leur entrée dans les applications d'entraînement à vitesse variable de forte puissance [4,5]. Par rapport aux structures à 2-niveaux de tension, dans lesquelles la tension de sortie ne peut être modulée qu'en jouant sur la durée d'utilisation des 2 états disponibles (MLI), les structures multiniveaux ouvrent en effet une nouvelle dimension, celle de la modulation en amplitude.

Notre objectif dans ce présent travail est la mise en œuvre de nouvelles tables de

commande, notamment dans le cas d'onduleurs multiniveaux, capable de réguler au mieux les grandeurs de contrôle (flux statorique et couple électromagnétique) en exploitant toutes les possibilités offertes par l'onduleur. Comme l'idée de base de cette commande est la sélection des vecteurs de tension de l'onduleur afin d'alimenter la machine, cette opération devient contraignante en terme de temps d'exécution en plus de l'espace mémoire devant être alloué à ces tables de commande au cours d'une implémentation. Cet état de fait nous a poussé à proposer une alternative basée sur l'application de l'intelligence artificielle [6,7,8]. En effet, et profitant de leur capacité d'apprentissage ainsi que leur rapidité avérées, des structures à réseaux de neurones de type multicouches sont conçues dans le but de les substituer à ces tables de commande.

Le présent manuscrit est organisé comme suit:

Dans le premier chapitre, nous exposons le Contrôle Direct du Couple (CDC) appliqué à une machine asynchrone alimentée par un onduleur classique à 2-niveaux de tension. Le principe de la commande CDC est ainsi présenté. Les règles d'évolution du couple électromagnétique et du flux statorique sont examinées constituant la base théorique du contrôle. Nous étalons deux stratégies de contrôle développées dans le cas de cette alimentation ainsi que les tables de commande correspondantes. Des résultats de simulation sont montrés pour valider ces différentes stratégies.

Cependant, cette étude et les résultats y afférant nous ont été utiles pour le développement d'une stratégie de contrôle direct du flux statorique et du couple électromagnétique de la machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3-niveaux puis par un onduleur à 5-niveaux de tension et de type dit à point neutre "clampé" (Neutral Point Clamped, NPC en anglais), c'est l'objet respectivement du second et du troisième chapitre. Plusieurs tables de commande ont été élaborées à cet effet. Aussi, le problème du déséquilibre entre les tensions des condensateurs à l'entrée de ce type de topologie a été soulevé [9,10,11] et une solution basée sur le principe de la redondance des vecteurs de tension a été présentée.

Enfin, le dernier chapitre de ce mémoire propose une nouvelle commande intelligente à base de réseaux de neurones, la table de commande classique élaborée aux chapitres précédents est substituée par un sélecteur à base de réseaux de neurones. En effet, le problème lié aux dimensions des tables de commande qui augmentent au fur et à mesure que le niveau de l'onduleur augmente, pose de sérieuses contraintes lors d'une éventuelle implémentation en temps réel. Le choix de l'architecture ainsi que la procédure d'apprentissage de ces structures sont détaillés.

# CHAPITRE 1

## CONTROLE DIRECT DU COUPLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE ALIMENTEE PAR UN ONDULEUR A 2-NIVEAUX DE TENSION

### 1.1 INTRODUCTION

Classé dans la catégorie des commandes en amplitude qui sont basées sur un modèle instantané du processus [12]-[16], le Contrôle Direct du Couple (CDC) connu en anglais sous le nom de DTC (Direct Torque Control) consiste à imposer un vecteur de tension instantané à l'onduleur, la fréquence de découpage étant variable en valeur moyenne. Le réglage des grandeurs de contrôle est classiquement assuré par des régulateurs à hystérésis menant finalement à une action directe sur les configurations du convertisseur statique. Le schéma de principe d'une telle commande est donné ci-dessous.

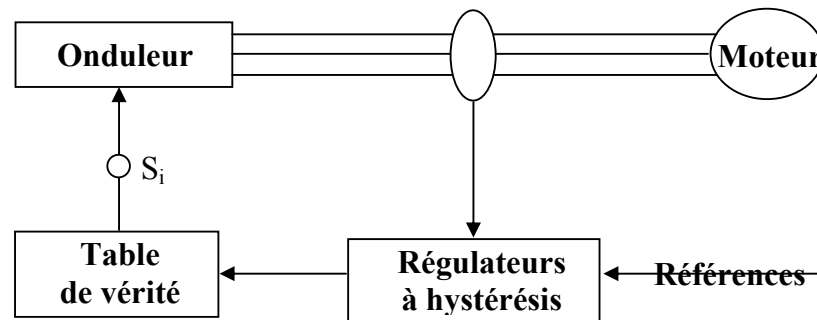


**Figure 1.1** Schéma de principe d'une commande CDC

En conséquence, lorsqu'il s'agit d'une commande en amplitude, la tension de sortie appliquée n'est autre que l'un des vecteurs de tension physiquement disponible ou instantanément atteignable. Au contraire des commande à orientation du champ [17,18], le bloc MLI est généralement supprimé, et elles n'utilisent pas de boucles de régulation en cascade ni de régulateurs PI, ce qui doit a priori améliorer ses aptitudes dynamiques et éliminer les problèmes liées à la saturation des régulateurs PI et l'effet mémoire qui en résulte [19]. Les actions de correction du couple et du flux statorique donc l'état des interrupteurs sont déterminés à chaque cycle de régulation correspondant à une période d'échantillonnage courte, typiquement de l'ordre de quelques dizaines de microsecondes.

## 1.2 CARACTERISTIQUES D'UNE COMMANDE CDC

La commande CDC correspond à un contrôle direct du flux statorique et du couple électromagnétique d'une machine asynchrone. À l'opposé de la solution adoptée en contrôle vectoriel par flux orienté où nous contrôlons classiquement le flux rotorique [20,21], nous préférons dans le cas du CDC, piloter le flux statorique dont la dynamique de variation est beaucoup plus rapide. L'idée de base est en effet ici de contrôler des grandeurs instantanées rapides et significatives de l'état électromagnétique du système.

La suppression de l'étage MLI est la principale caractéristique et la génération des commandes de l'onduleur se fait de façon directe. Deux contrôleurs d'hystérésis respectivement pour le couple et pour le flux assurent la régulation séparée de ces deux grandeurs. Naturellement, leur présence a pour conséquence d'avoir une fréquence de commutation variable. En outre, le nombre limité de vecteurs de tension disponibles à la sortie de l'onduleur engendrent la présence d'une ondulation sur le courant et le couple [22,23,24].

## 1.3 PRINCIPE D'UNE COMMANDE CDC

Pour illustrer la régulation directe du flux statorique et du couple électromagnétique d'une machine asynchrone, nous illustrons la représentation spatiale vectorielle des grandeurs de la machine sur la figure 1.2. Les vecteurs flux, courant et les huit séquences d'interrupteurs atteignables sur un onduleur à deux niveaux de tension sont représentés dans le système de coordonnées du stator (voir annexe 1).

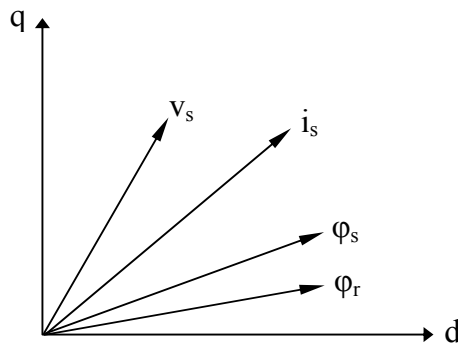


**Figure 1.2** Représentation spatiale vectorielle des grandeurs de la machine asynchrone

L'objectif d'une commande CDC est de maintenir le couple et le module du flux à l'intérieur de bandes d'hystérésis par le choix de la tension de sortie de l'onduleur. Lorsqu'une de ces deux grandeurs atteint une des limites de l'hystérésis, un vecteur de tension approprié est alors appliqué afin de ramener la grandeur concernée à l'intérieur de sa bande d'hystérésis.

Pour choisir ce vecteur de tension, il est fondamental de connaître les règles d'évolution du couple électromagnétique et du module du flux statorique.

### 1.3.1 CONTROLE DU FLUX STATORIQUE

Le flux statorique de la machine est donné par l'équation électrique suivante [25]:

$$\frac{d\phi_s}{dt} = v_s - R_s \cdot i_s \quad (1-1)$$

Dans la mesure où on peut considérer le terme résistif négligeable (ce qui est possible dans le cas des machines à grande vitesse), alors l'équation du flux peut s'écrire:

$$\frac{d\phi_s}{dt} = v_s \quad (1-2)$$

Après discrétisation, et compte tenu du fait que pendant une période d'échantillonnage  $T_e$  le vecteur de tension appliqué à la machine reste constant, cette dernière équation devient:

$$\phi_s(k+1) = \phi_s(k) + v_s \cdot T_e \Rightarrow \Delta\phi_s = v_s \cdot T_e \quad (1-3)$$

La période d'échantillonnage étant fixe,  $\Delta\phi_s$  est donc proportionnel au vecteur de tension appliqué à la machine. On constate alors que l'extrémité du vecteur flux statorique se déplace le long d'une droite d'axe colinéaire à celui du vecteur de tension imposé par l'onduleur de tension à la machine comme le montre la figure 1.3.

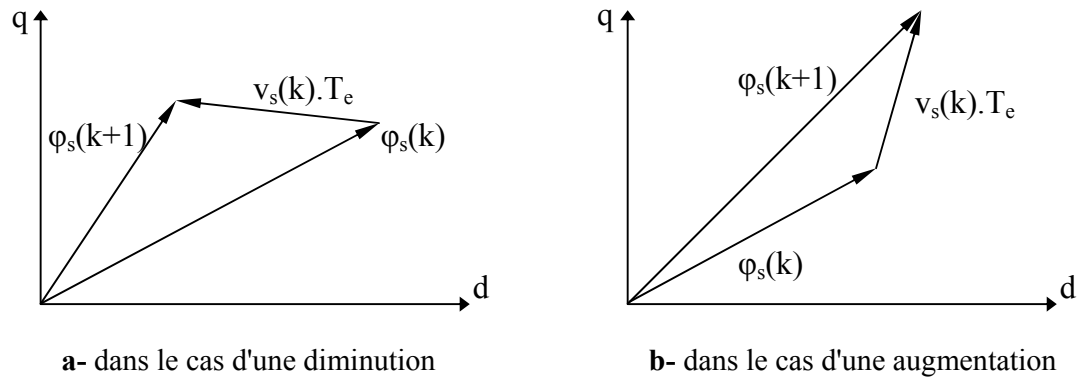


**Figure 1.3** Action du vecteur de tension sur le module du flux statorique

Le déplacement du vecteur flux statorique va être assuré par l'application successive des vecteurs de tension fournis par l'onduleur de tension. De plus, selon le vecteur de tension appliqué, on peut agir sur la valeur du module du flux statorique (Figure 1.3).

En outre, la vitesse de déplacement est donnée par l'équation (1-2), soit le module de  $v_s$ . La vitesse de rotation de  $\phi_s$  dépend fortement du choix de  $v_s$ . Elle est maximale pour un

vecteur  $v_s$  perpendiculaire à la direction de  $\phi_s$ . Elle est nulle si l'on applique un vecteur nul. Elle peut aussi être négative.

### 1.3.2 CONTROLE DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

Le couple électromagnétique s'exprime en fonction du flux statorique et du flux rotorique de la façon suivante:

$$\Gamma_e = K \cdot \text{Im}(\phi_s \cdot \phi_r^*) \quad (1-4)$$

$K$  est une constante dépendant des paramètres de la machine,  $K = p \cdot \frac{L_m}{\sigma L_r L_s}$ .  $\phi_r^*$  représente le conjugué de  $\phi_r$  et  $\text{Im}()$  la partie imaginaire de l'expression entre parenthèse.

Les flux statorique et rotorique peuvent se mettre sous la forme:

$$\begin{cases} \phi_s = \phi_{s0} \cdot e^{j\theta_{s0}} \\ \phi_r = \phi_{r0} \cdot e^{j\theta_{r0}} \end{cases} \quad (1-5)$$

où  $\phi_{s0}$  et  $\phi_{r0}$  sont les modules respectivement du flux statorique et du flux rotorique à l'instant  $t_0$ .

On remplace les flux par leur expression dans celle du couple électromagnétique. Compte tenu du fait que la loi de contrôle veut maintenir le flux statorique proche de sa valeur de référence  $\phi_{sref}$ , on obtient:

$$\Gamma_e = K \cdot \phi_s^* \cdot \phi_{r0} \cdot \sin \gamma_0 \quad (1-6)$$

$$\text{Avec: } \gamma_0 = \theta_{s0} - \theta_{r0}$$

Lors de l'application d'un vecteur de tension non nul, on modifie la vitesse de rotation du vecteur flux statorique. Soit:

$$\phi_s = \phi_{sref} \cdot e^{j(\theta_{s0} + \Delta\theta_s)} \quad (1-7)$$

$$\text{où } \Delta\theta_s = (\omega_{s0} + \Delta\omega_s)(t - t_0)$$

et  $t$  désigne l'instant qui suit l'instant d'application du vecteur de tension non nul.

Or, si on considère que l'évolution du flux rotorique est très lente par rapport à celle du flux statorique, on peut dire qu'immédiatement après l'application du vecteur de tension non nul,  $\Delta\phi_r$  et  $\Delta\theta_r$  sont encore nuls, et donc:

$$\Delta\gamma = (\omega_{s0} + \Delta\omega_s)(t - t_0) \quad (1-8)$$

Ainsi, le contrôle du couple électromagnétique dépend directement du contrôle de la rotation du vecteur flux statorique.

L'évolution du couple électromagnétique est illustrée sur la figure 1.4, dans le cas d'application de deux vecteurs de tension. Ces derniers font évoluer le flux statorique dans des sens de rotation contraires. Le sens de rotation trigonométrique est considéré comme le sens de rotation positif.

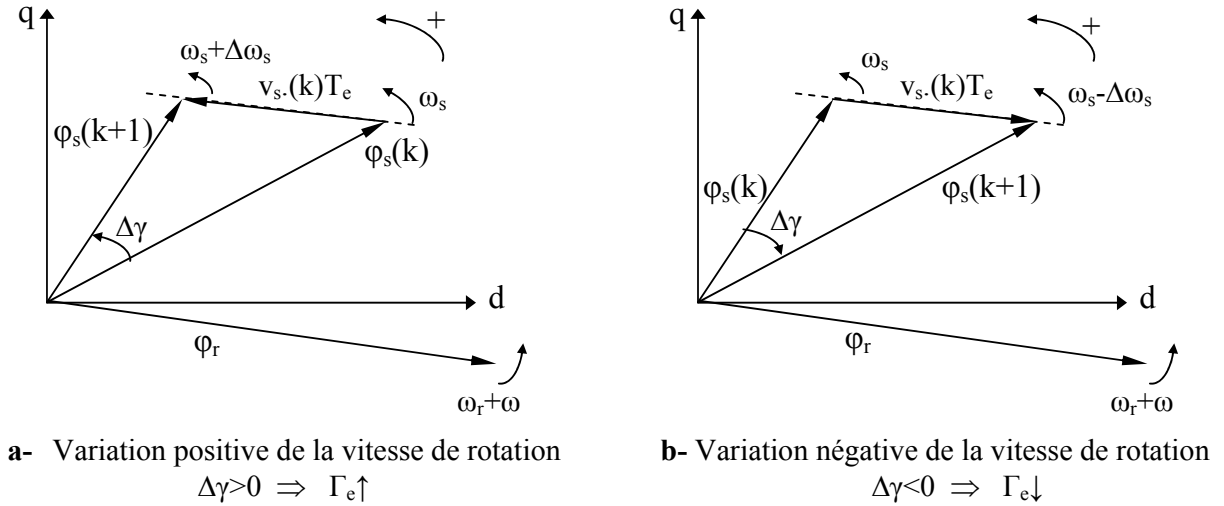


**Figure 1.4** Évolution du couple électromagnétique

### 1.3.3 CAS PARTICULIER: APPLICATION DU VECTEUR DE TENSION NULLE

Si un vecteur de tension nulle est appliqué ( $v_s=0$ ), nous constatons que la variation du module du flux statorique est toujours négative et proportionnelle au terme  $R_s i_{ds}$  (eq. 1-9).

$$\frac{d\phi_s}{dt} = -R_s i_s \quad (1-9)$$

Quand le terme résistif est négligé, l'application du vecteur de tension nulle a pour effet de stopper la rotation du vecteur flux statorique et la variation de son module est considérée nulle:

$$\frac{d\phi_s}{dt} = 0 \quad (1-10)$$

Ainsi, l'angle  $\gamma$  existant entre le flux statorique et le flux rotorique va diminuer et le couple électromagnétique diminue lentement comme le montre la figure 1.5.

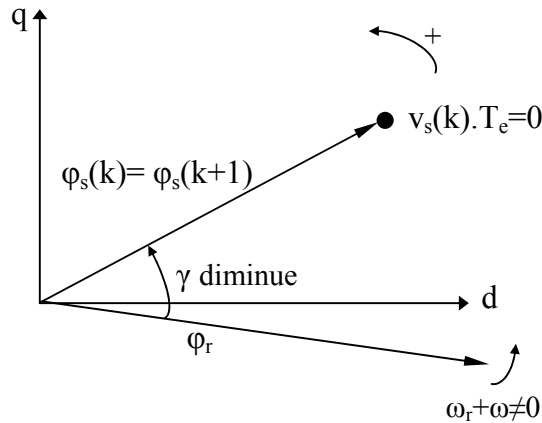


**Figure 1.5** Application du vecteur de tension nulle, cas où on néglige le terme résistif

## 1.4 APPLICATION A LA COMMANDE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE ALIMENTEE PAR UN ONDULEUR A 2-NIVEAUX DE TENSION

### 1.4.1 L'ONDULEUR A 2-NIVEAUX DE TENSION [26]

#### 1.4.1.1 INTRODUCTION

La tension fournie par un convertisseur continu-alternatif peut théoriquement varier instantanément de zéro à la valeur de la tension du bus continu et vice-versa, ce qui rend le convertisseur statique non linéaire en valeur instantanée. De ce fait et dans le cas des lois de commande non linéaires du type direct, une modélisation en instantané de l'onduleur devient ainsi nécessaire.

#### 1.4.1.2 MODELISATION DE L'ONDULEUR DE TENSION

L'onduleur de tension triphasé est composé de trois bras indépendants dont chacun est muni de deux interrupteurs. Chacun est réalisé par l'association d'un composant commandé à l'amorçage et au blocage  $(T_i, T_i')$  et d'une diode antiparallèle  $(D_i, D_i')$ ,  $i=a,b,c$ .  $(T_i, D_i)$  et  $(T_i', D_i')$  forment respectivement les interrupteurs supérieurs et inférieurs du bras  $i$ .

Cet onduleur associé à une machine asynchrone est alimenté par une source de tension continue d'amplitude  $U_0$  comme le montre la figure 1.6.

Pour préserver la source de tension continue de tout court circuit, les interrupteurs d'un même bras fonctionnent de façon complémentaire tout en négligeant les temps morts. Dans ces conditions, les états des interrupteurs sont imposés par la commande.

Si on considère un point  $o$ , point fictif de la source de tension continue. Par combinaison des deux interrupteurs d'un même bras, on peut imposer à la phase deux niveaux de tension différents:

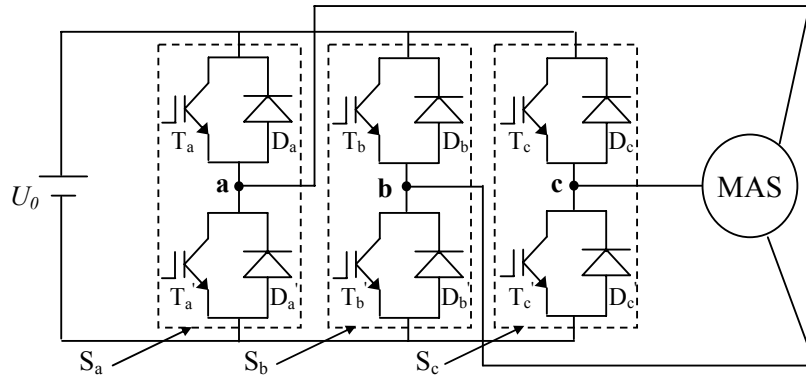


**Figure 1.6** Structure d'un onduleur à 2 niveaux de tension

$$(1,0): T_i \text{ passant et } T_i' \text{ bloqué: } v_{io} = \frac{U_0}{2}$$

$$(0,1): T_i \text{ bloqué et } T_i' \text{ passant: } v_{io} = -\frac{U_0}{2}$$

On peut montrer que l'onduleur fixe à  $U_0$  la tension imposée à chaque interrupteur en état de blocage.

En outre, on définit l'état  $S_i$  du bras numéro  $i$  de la manière suivante:

$$\begin{cases} (T_i, T_i') = (1,0) \Rightarrow S_i = 1 \\ (T_i, T_i') = (0,1) \Rightarrow S_i = 0 \end{cases} \quad (1-11)$$

et les tensions simples par rapport au point o s'écrivent:

$$v_{io} = \frac{U_0}{2}(2S_i - 1); \quad i = a, b, c \quad (1-12)$$

Si la charge connectée à l'onduleur est équilibrée, la somme des tensions simples étant nulle  $\Sigma v_{iN}=0$ , et la tension du neutre s'écrit comme suit:

$$v_{oN} = - \sum_{i=a,b,c} \frac{v_{io}}{3} \quad (1-13)$$

Sachant l'expression des tensions simples aux bornes de la machine:

$$v_{iN} = v_{io} + v_{oN} \quad (1-14)$$

En portant (1-12) et (1-13) dans cette dernière expression, il vient:

$$\begin{cases} v_{aN} = \frac{U_0}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ v_{bN} = \frac{U_0}{3}(2S_b - S_a - S_c) \\ v_{cN} = \frac{U_0}{3}(2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (1-15)$$

En appliquant la transformation de Park, prise sous forme de (eq. A1-5), aux tensions simples données par (1-15), on obtient dans le repère fixe biphasé cette forme du vecteur de tension:

$$v_s = v_{ds} + jv_{qs} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( v_{aN} + v_{bN} \exp\left(j\frac{2\pi}{3}\right) + v_{cN} \exp\left(j\frac{4\pi}{3}\right) \right) \quad (1-16)$$

Nous constatons qu'il existe huit combinaisons possibles des états des bras de l'onduleur ( $S_a, S_b, S_c$ ). À partir de ces combinaisons nous déterminons six séquences de tension actives délivrées par l'onduleur pour alimenter la machine et deux séquences de tension nulle. Le tableau et les deux figures suivants montrent ces tensions.

**Tableau 1.1** Tensions générées par l'onduleur à 2-niveaux de tension

| $S_a$ | $S_b$ | $S_c$ | $v_{1N}$          | $v_{2N}$          | $v_{3N}$          | $v_s$                                                    | N° du vecteur |
|-------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------------------------------|---------------|
| 1     | 0     | 0     | $\frac{2}{3}U_0$  | $-\frac{1}{3}U_0$ | $-\frac{1}{3}U_0$ | $\sqrt{\frac{2}{3}}U_0$                                  | $v_1$         |
| 1     | 1     | 0     | $\frac{1}{3}U_0$  | $\frac{1}{3}U_0$  | $-\frac{2}{3}U_0$ | $\sqrt{\frac{2}{3}}U_0 \exp\left(j\frac{\pi}{3}\right)$  | $v_2$         |
| 0     | 1     | 0     | $-\frac{1}{3}U_0$ | $\frac{2}{3}U_0$  | $-\frac{1}{3}U_0$ | $\sqrt{\frac{2}{3}}U_0 \exp\left(j\frac{2\pi}{3}\right)$ | $v_3$         |
| 0     | 1     | 1     | $-\frac{2}{3}U_0$ | $\frac{1}{3}U_0$  | $\frac{1}{3}U_0$  | $\sqrt{\frac{2}{3}}U_0 \exp(j\pi)$                       | $v_4$         |
| 0     | 0     | 1     | $-\frac{1}{3}U_0$ | $-\frac{1}{3}U_0$ | $\frac{2}{3}U_0$  | $\sqrt{\frac{2}{3}}U_0 \exp\left(j\frac{4\pi}{3}\right)$ | $v_5$         |
| 1     | 0     | 1     | $\frac{1}{3}U_0$  | $-\frac{2}{3}U_0$ | $\frac{1}{3}U_0$  | $\sqrt{\frac{2}{3}}U_0 \exp\left(j\frac{5\pi}{3}\right)$ | $v_6$         |
| 0     | 0     | 0     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                                                        | $v_0$         |
| 1     | 1     | 1     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                                                        | $v_7$         |

## 1.4.2 DESCRIPTION DE LA STRUCTURE DE COMMANDE

### 1.4.2.1 REGLES GENERALES POUR LA SELECTION DU VECTEUR DE TENSION $v_s$

Les conclusions faites aux paragraphes précédents montrent que la sélection du vecteur de tension  $v_s$  que l'on veut appliquer à la machine obéit à la règle suivante:

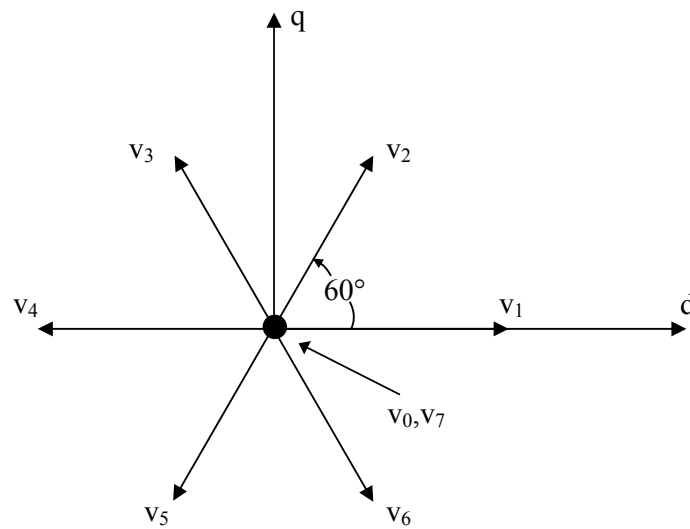


**Figure 1.7** Vecteurs de tension atteignables par un onduleur à 2-niveaux de tension

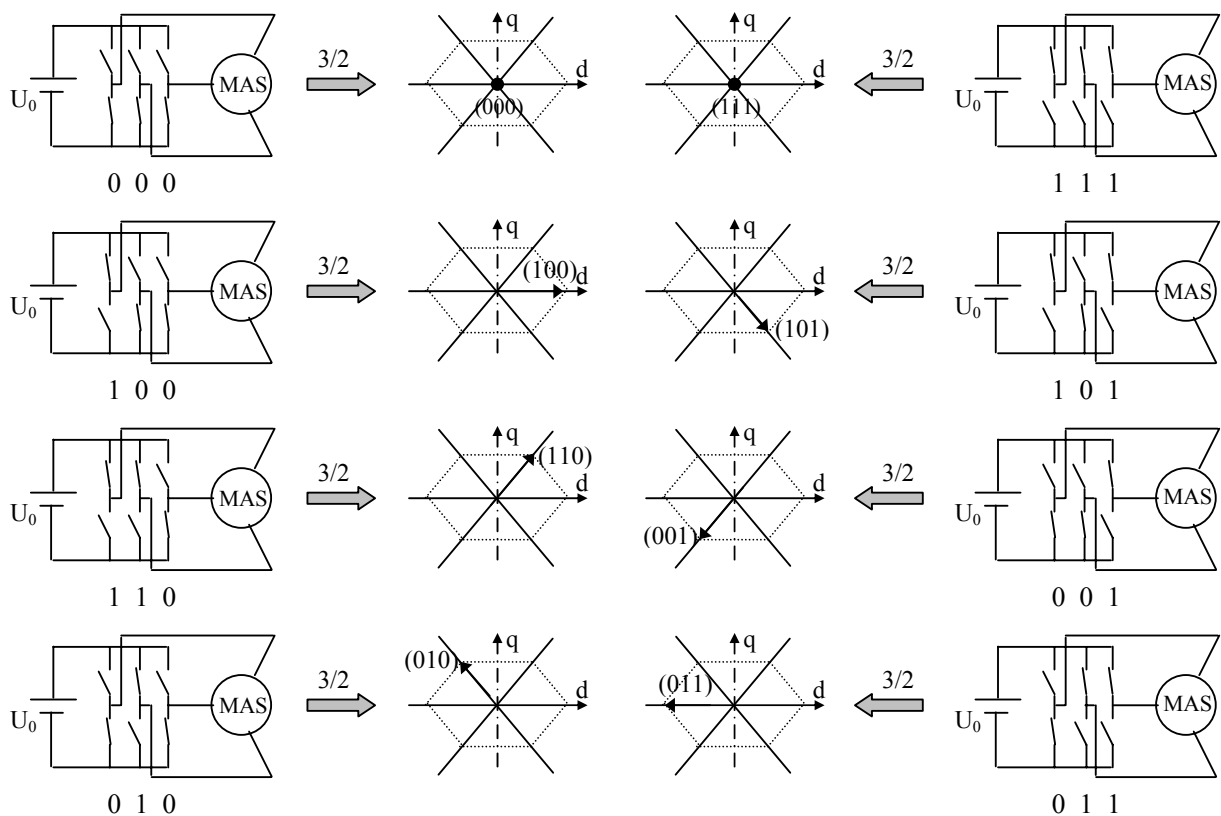


**Figure 1.8** Correspondance entre chaque configuration de l'onduleur et vecteur de tension

- on peut augmenter ou diminuer le module du flux statorique et ainsi le maintenir dans une bande d'hystérésis autour de sa référence.
- on peut augmenter ou diminuer la valeur du couple électromagnétique et le maintenir aussi dans une bande d'hystérésis autour de sa référence.
- on peut faire circuler le flux statorique dans les deux sens de rotation.

Quant au vecteur nul, dans la mesure où on peut négliger le terme  $R_s i_s$ , il n'a pas d'effet sur le module du flux statorique, mais son application stoppe la rotation du flux. Ainsi, il permet de diminuer la valeur du couple électromagnétique de façon lente.

L'étude du cas de la machine asynchrone alimentée par un onduleur à 2-niveaux de tension peut être résumée sur la figure 1.9 et le tableau 1.2, ce pour une position donnée du vecteur flux statorique.

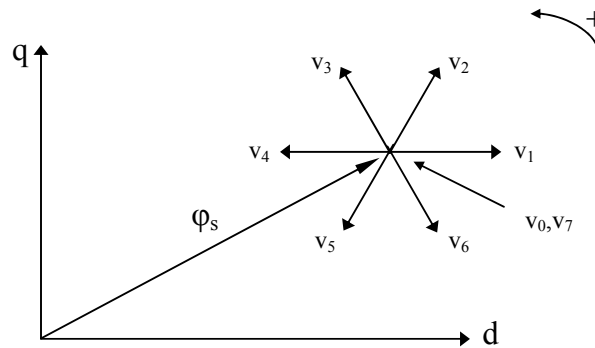


**Figure 1.9** Action des différents vecteurs de l'onduleur de tension

**Tableau 1.2** Action des différents vecteurs de tension pour une position donnée

| $v_s$ | Action sur le sens de rotation de $\phi_s$ | Action sur le module de $\phi_s$ | Action sur la valeur de $\Gamma_e$ |
|-------|--------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| $v_1$ | -                                          | ↑                                | ↓                                  |
| $v_2$ | +                                          | ↑                                | ↑                                  |
| $v_3$ | +                                          | ↓                                | ↑                                  |
| $v_4$ | +                                          | ↓                                | ↑                                  |
| $v_5$ | -                                          | ↓                                | ↓                                  |
| $v_6$ | -                                          | ↑                                | ↓                                  |

On peut constater ici que l'action d'un même vecteur ne sera pas la même sur le couple et

sur le flux, selon la position du vecteur  $\varphi_s$  au moment de l'application du vecteur de tension. L'exemple de la figure 1.10 montre bien que l'application du vecteur de tension statorique  $v_4$  peut entraîner une augmentation de la valeur du couple électromagnétique (a). Dans le cas (b), ce même vecteur va entraîner au contraire une diminution de cette valeur. De plus, l'action d'un même vecteur de tension dépend aussi du sens de rotation de la machine.

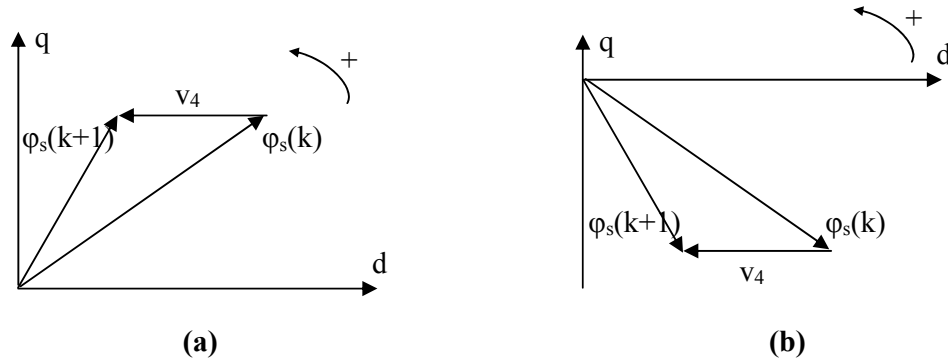


**Figure 1.10** Exemple d'action du vecteur  $v_4$  pour 2 positions du vecteur flux statorique

Pour établir une logique de choix du vecteur de tension à appliquer à la machine, on opte pour un découpage de l'espace en six secteurs ou zones de  $60^\circ$  chacun représentés sur la figure 1.11. Une décomposition en douze secteurs est aussi possible [27], mais elle n'apporte pas d'améliorations supplémentaires dans le cas d'une alimentation à l'aide d'un onduleur à 2-niveaux de tension.

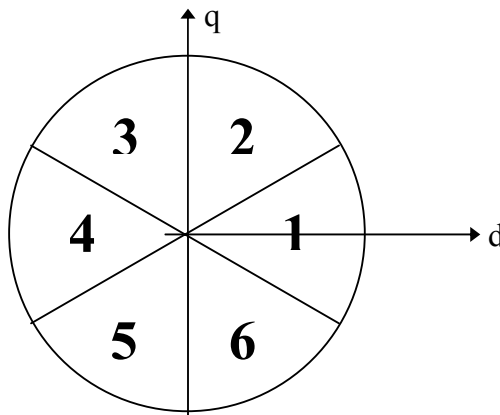


**Figure 1.11** Découpage de l'espace en six secteurs identiques de  $60^\circ$

#### ■ PROCEDURE DE BASE POUR L'ELABORATION D'UNE TABLE DE COMMANDE

La procédure de sélection du vecteur de tension à appliquer à la machine et donc des signaux de commande de l'onduleur ainsi développée, la table de commande est alors

synthétisée à partir des règles qualitatives d'évolution du flux et du couple établies au §1.3. Cette table constitue le noyau de l'algorithme de commande.

Afin d'illustrer la génération de la table de commande de l'onduleur, il s'avère intéressant de montrer un exemple sur le choix du vecteur de tension à appliquer. Le sens de rotation de la machine est le sens positif.

Si on considère que le vecteur flux statorique se trouve dans le secteur 1, on remarque que les vecteurs  $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_6$  contribuent à augmenter le module du flux alors que les vecteurs  $v_2$  et  $v_3$  contribuent à augmenter la valeur du couple. Donc, seul le vecteur  $v_2$  sert à augmenter à la fois le flux et le couple. Ce même raisonnement s'applique à tous les cas de figure, ce qui donne naissance aux tables de commande du flux et du couple.

**Tableau 1.3** Table de commande du flux statorique

| Évolution désirée<br>pour $ \varphi_s $ | Numéro de secteur |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                         | 1                 | 2               | 3               | 4               | 5               | 6               |
| ↑                                       | $v_6, v_1, v_2$   | $v_1, v_2, v_3$ | $v_2, v_3, v_4$ | $v_3, v_4, v_5$ | $v_4, v_5, v_6$ | $v_5, v_6, v_1$ |
| ↓                                       | $v_3, v_4, v_5$   | $v_4, v_5, v_6$ | $v_5, v_6, v_1$ | $v_6, v_1, v_2$ | $v_1, v_2, v_3$ | $v_2, v_3, v_4$ |

**Tableau 1.4** Table de commande du couple électromagnétique

| Évolution désirée<br>Pour $\Gamma_e$ | Numéro de secteur |            |            |            |            |            |
|--------------------------------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                      | 1                 | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          |
| ↑                                    | $v_2, v_3$        | $v_3, v_4$ | $v_4, v_5$ | $v_5, v_6$ | $v_6, v_1$ | $v_1, v_2$ |
| ↓                                    | $v_5, v_6$        | $v_6, v_1$ | $v_1, v_2$ | $v_2, v_3$ | $v_3, v_4$ | $v_4, v_5$ |

↑: Augmenter    ↓: Diminuer

Ces dernières résument de façon générale les séquences de tension actives à appliquer pour augmenter ou diminuer respectivement le module du flux statorique et la valeur algébrique du couple électromagnétique.

Finalement, la comparaison de ces tables de commande permet la synthèse finale d'une seule table de commande donnée par le tableau 1.5.

En termes plus simples, pour un sens de rotation positif, on peut dire que lorsque le vecteur flux  $\varphi_s$  se trouve dans un secteur  $i$ , l'action sur les grandeurs à contrôler se fait comme suit:

- Si  $\varphi_s$  croît et  $\Gamma_e$  croît alors  $v_{i+1}$  est sélectionné,
- Si  $\varphi_s$  croît et  $\Gamma_e$  décroît alors  $v_{i-1}$  est sélectionné,

- Si  $\varphi_s$  décroît et  $\Gamma_e$  croît alors  $v_{i+2}$  est sélectionné,
- Si  $\varphi_s$  décroît et  $\Gamma_e$  décroît alors  $v_{i-2}$  est sélectionné.

**Tableau 1.5** Table de commande par vecteurs actifs

|                                                   | Numéro de secteur |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                   | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| $(\uparrow\Gamma_e) \& (\uparrow \varphi_s )$     | $v_2$             | $v_3$ | $v_4$ | $v_5$ | $v_6$ | $v_1$ |
| $(\uparrow\Gamma_e) \& (\downarrow \varphi_s )$   | $v_3$             | $v_4$ | $v_5$ | $v_6$ | $v_1$ | $v_2$ |
| $(\downarrow\Gamma_e) \& (\uparrow \varphi_s )$   | $v_6$             | $v_1$ | $v_2$ | $v_3$ | $v_4$ | $v_5$ |
| $(\downarrow\Gamma_e) \& (\downarrow \varphi_s )$ | $v_5$             | $v_6$ | $v_1$ | $v_2$ | $v_3$ | $v_4$ |

On peut toutefois remarquer que le niveau d'efficacité des vecteurs de tension appliqués dépend également de la position du vecteur flux dans le secteur  $i$ . En effet, en début de secteur, les vecteurs  $v_{i+1}$  et  $v_{i+2}$  sont perpendiculaires à  $\varphi_s$  d'où une évolution rapide du couple mais une évolution lente du flux, alors qu'en fin de secteur l'action sur ces deux grandeurs est inverse. Avec les vecteurs  $v_{i-1}$  et  $v_{i-2}$ , cela donne une évolution lente du couple et rapide du flux au début de secteur, alors qu'en fin de secteur c'est le cas inverse qui se produit.

Il est à signaler que quelque soit le sens d'évolution de ces grandeurs de contrôle dans le secteur  $i$ , les vecteurs  $v_i$  et  $v_{i+3}$  ne sont jamais utilisés. En effet, ceux-ci ont la composante du flux la plus forte (évolution très rapide du flux) mais l'effet sur le couple, dépend de la position de  $\varphi_s$  dans le secteur, avec un effet nul en milieu de secteur.

En résumé, le vecteur de tension que doit produire l'onduleur de tension est décrit par les écarts entre les valeurs de référence et estimé du flux et du couple, et de la position du vecteur  $\varphi_s$ . Un estimateur de flux en module et en position ainsi qu'un estimateur de couple sont alors recommandés.

### 1.4.2.2 ESTIMATEURS

#### A) ESTIMATION DU FLUX STATORIQUE

L'estimation du flux statorique peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs statoriques courant et tension de la machine:

$$\varphi_s = \int_0^t (v_s - R_s i_s) dt \quad (1-17)$$

On obtient ainsi les composantes d et q du vecteur  $\varphi_s$ .

En combinant les expressions (1-14) et (1-15), on montre que les tensions  $v_{ds}$  et  $v_{qs}$  peuvent s'exprimer en fonction des ordres d'interruption ( $S_a, S_b, S_c$ ) et de la tension continue  $U_0$ .

$$\begin{cases} v_{ds} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 \left( S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right) \\ v_{qs} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_0 (S_b - S_c) \end{cases} \quad (1-18)$$

De même, les courants  $i_d$  et  $i_q$  sont obtenus à partir de la mesure des courants réels  $i_{as}$ ,  $i_{bs}$  et  $i_{cs}$  et par application de la transformation de Park:

$$i_s = i_{ds} + j i_{qs} \quad (1-19)$$

$$\begin{cases} i_{ds} = \sqrt{\frac{3}{2}} i_{as} \\ i_{qs} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{bs} - i_{cs}) \end{cases} \quad (1-20)$$

Le module du flux est donc déduit.

$$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{ds}^2 + \varphi_{qs}^2} \quad (1-21)$$

L'angle  $\theta$  entre le référentiel choisi et le vecteur  $\varphi_s$  est calculé à partir des composantes du flux:

$$\theta = \text{Arctg} \left( \frac{\varphi_{qs}}{\varphi_{ds}} \right) \quad (1-22)$$

Enfin, le numéro  $S$  du secteur est relié à  $\theta$  par la relation suivante:

$$-\frac{\pi}{6} - (1-S) \cdot \frac{\pi}{3} < \theta < \frac{\pi}{6} - (1-S) \cdot \frac{\pi}{3} \quad (1-23)$$

#### B) ESTIMATION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

Le couple électromagnétique est estimé directement à partir des composantes du courant et du flux statorique:

$$\Gamma_e = p \cdot (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (1-24)$$

### 1.4.2.3 ÉLABORATION DU VECTEUR DE COMMANDE

#### A) LE CONTROLEUR DE FLUX

Son but est de maintenir l'extrémité du vecteur  $\varphi_s$  dans une couronne circulaire centrée sur

une valeur de référence constante, comme l'indique la figure ci-après.

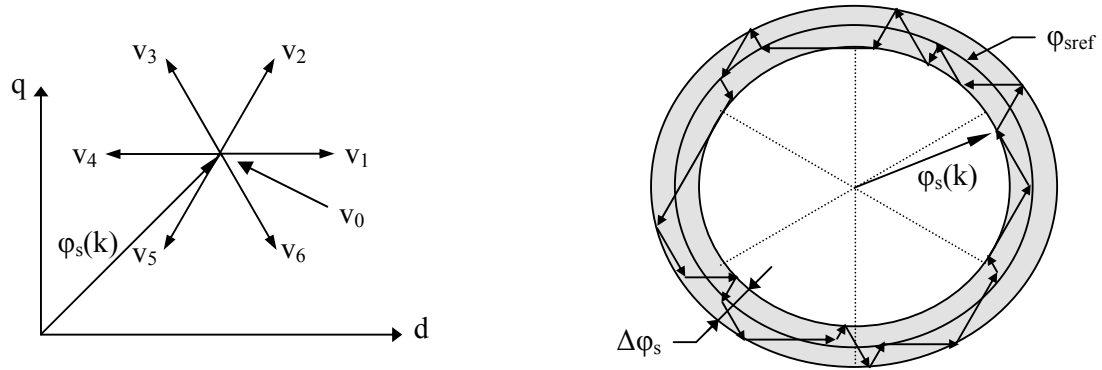


**Figure 1.12** Trajectoire du flux statorique

La sortie du contrôleur doit indiquer le sens d'évolution du module du flux afin de sélectionner le vecteur de tension correspondant. Pour cela un simple contrôleur à hystérésis à deux niveaux convient parfaitement (Figure 1.13), et permet de plus d'obtenir de très bonnes performances dynamiques.

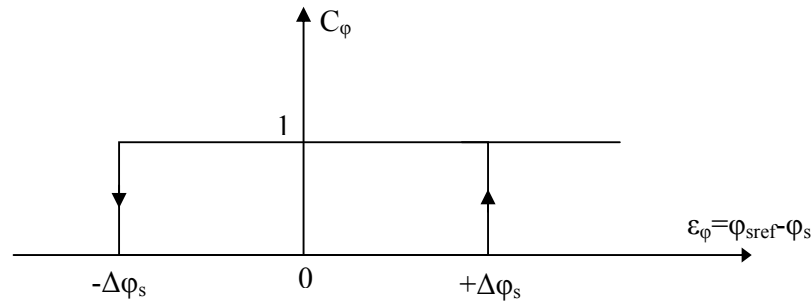


**Figure 1.13** Contrôleur de flux à simple bande  
(1/0: augmenter /diminuer)

La sortie du contrôleur, représentée par une variable booléenne  $C_\varphi$  indique directement si l'amplitude du flux doit être augmentée ( $C_\varphi=1$ ) ou diminuée ( $C_\varphi=0$ ) de façon à maintenir l'inégalité  $|\varphi_{sref}-\varphi_s|\leq\Delta\varphi_s$ ,  $\varphi_{sref}$  et  $\Delta\varphi_s$  étant respectivement la consigne et la largeur d'hystérésis du contrôleur.

#### B) LE CONTRÔLEUR DE COUPLE

Le contrôleur de couple a pour fonction de maintenir la valeur du couple électromagnétique dans les limites  $|\Gamma_{eref}-\Gamma_e|\leq\Delta\Gamma_e$ ,  $\Gamma_{eref}$  et  $\Delta\Gamma_e$  étant respectivement la consigne et la largeur d'hystérésis du contrôleur.

Cependant, une différence avec le contrôle du flux est que le couple peut être positif ou négatif selon le sens de rotation de la machine. De ce point de vue, deux types de contrôleur peuvent être utilisés: un contrôleur à hystérésis à 2 niveaux ou à simple bande (semblable à celui décrit dans le contrôle du flux) et un contrôleur à hystérésis à 3 niveaux ou à double bande.

▪ *Le contrôleur de couple à double bande*

Ce contrôleur a la possibilité de contrôler la machine dans les deux sens de rotation, c'est-à-dire pour un couple positif ou négatif.

La sortie du contrôleur (Fig.1.14), représentée par la variable booléenne  $C_r$  indique directement si l'amplitude du couple doit être augmentée en valeur absolue ( $C_r=+1$  pour une consigne positive et  $C_r=-1$  pour une consigne négative) ou diminuée ( $C_r=0$ ).

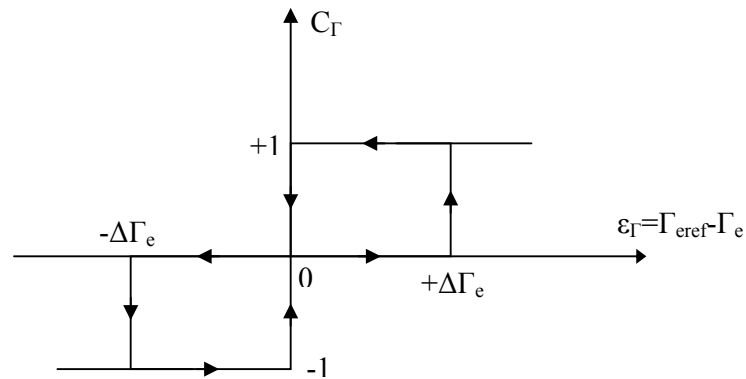


**Figure 1.14** Contrôleur de couple à double bande  
(-1/0/+1: diminuer/maintenir/augmenter)

#### 1.4.2.4 SYNTHÈSE DE LA TABLE DE COMMANDE

##### A) STRATÉGIE A UN CONTRÔLEUR DE COUPLE A SIMPLE BANDE

Cette stratégie se distingue de la stratégie de base de Takahashi [12] par le fait que des séquences de tension nulle sont appliquées même si le couple est en dehors de sa bande d'hystérésis.

Cependant, pour faire fonctionner la machine asynchrone dans les quatre (4) quadrants du plan couple-vitesse, on est dans l'obligation d'utiliser pour le contrôle du couple deux contrôleurs à hystérésis à deux états (Figure 1.14), avec deux tables de commande (relative aux deux sens de rotation) et bien sûr une information sur le sens de rotation, comme le montre les tableaux ci-dessous [28].

**Tableau 1.6** Table de commande Tab21 de la stratégie  
utilisant des contrôleurs de couple à simple bande**a- Rotation dans le sens positif**

|          |            | S     |       |       |       |       |       |
|----------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| 1        | 1          | $v_2$ | $v_3$ | $v_4$ | $v_5$ | $v_6$ | $v_1$ |
| 1        | 0          | $v_7$ | $v_0$ | $v_7$ | $v_0$ | $v_7$ | $v_0$ |
| 0        | 1          | $v_3$ | $v_4$ | $v_5$ | $v_6$ | $v_1$ | $v_2$ |
| 0        | 0          | $v_0$ | $v_7$ | $v_0$ | $v_7$ | $v_0$ | $v_7$ |

**b- Rotation dans le sens négatif**

|          |            | S     |       |       |       |       |       |
|----------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| 1        | 1          | $v_6$ | $v_1$ | $v_2$ | $v_3$ | $v_4$ | $v_5$ |
| 1        | 0          | $v_0$ | $v_7$ | $v_0$ | $v_7$ | $v_0$ | $v_7$ |
| 0        | 1          | $v_5$ | $v_6$ | $v_1$ | $v_2$ | $v_3$ | $v_4$ |
| 0        | 0          | $v_7$ | $v_0$ | $v_7$ | $v_0$ | $v_7$ | $v_0$ |

Cette stratégie de contrôle, qui n'utilisant que des contrôleurs à simple bande, est basée essentiellement sur l'application de séquences de tension nulle pour diminuer le couple. Par ailleurs, ce sont les séquences de tension active appropriées qui sont appliquées pour réguler le couple et le flux.

On peut noter qu'en sélectionnant correctement les vecteurs de tension nulle suivant les secteurs S, on s'aperçoit que pour chaque secteur, il y a un bras de l'onduleur qui ne commute jamais, ceci permet ainsi de diminuer la fréquence moyenne de commutation des interrupteurs [15], donc des pertes par commutation au niveau de l'onduleur de tension.

*B) STRATEGIE A UN CONTROLEUR DE COUPLE A DOUBLE BANDE*

Cette stratégie permet de contrôler la machine dans les quatre quadrants sans intervention sur la structure, elle fait usage d'une table de commande unique (Tab22). Cependant, une information sur le sens de rotation de la machine n'est pas nécessaire.

**Tableau 1.7** Table de commande Tab22 de la stratégie réalisant la rotation dans les 2 sens

|          |            | S     |       |       |       |       |       |
|----------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| 1        | +1         | $v_2$ | $v_3$ | $v_4$ | $v_5$ | $v_6$ | $v_1$ |
|          | 0          | $v_7$ | $v_0$ | $v_7$ | $v_0$ | $v_7$ | $v_0$ |
|          | -1         | $v_1$ | $v_2$ | $v_3$ | $v_4$ | $v_5$ | $v_6$ |
| 0        | +1         | $v_3$ | $v_4$ | $v_5$ | $v_6$ | $v_1$ | $v_2$ |
|          | 0          | $v_0$ | $v_7$ | $v_0$ | $v_7$ | $v_0$ | $v_7$ |
|          | -1         | $v_5$ | $v_6$ | $v_1$ | $v_2$ | $v_3$ | $v_4$ |

La réalisation de cette stratégie de contrôle [29,30] suit la procédure ci après:

- Nous appliquons des séquences de tension actives pour diminuer ou augmenter le couple.
- Nous faisons appel à des séquences de tension nulle afin de maintenir le couple.

### 1.4.3 SYNOPTIQUE D'UNE COMMANDE CDC

La figure 1.15 montre le schéma général de base du contrôle direct du couple. Généralement, cette stratégie de commande nécessite la connaissance a priori d'un modèle de la machine asynchrone afin d'estimer les grandeurs à contrôler que sont le flux statorique et le couple électromagnétique (Traité en 1.4.2). Cette opération est exécutée sur des intervalles successifs de durée la période d'échantillonnage  $T_e$ . La référence en couple provient de la régulation de vitesse. Des contrôleurs à hystérésis permettent de comparer les valeurs estimées de ces grandeurs à leurs références respectives. La génération des ordres de commande de l'onduleur se fait à travers d'une table de commande, établie en fonction de la stratégie adoptée. Cette table nécessite la connaissance de l'erreur sur le flux, de l'erreur sur le couple, ainsi que le secteur dans lequel se situe le vecteur flux et éventuellement une information sur le sens de rotation de la machine.

## 1.5 SIMULATIONS

Les tracés des figures 1.16 et 1.17 montrent les variations de quelques grandeurs de la machine (caractérisée en annexe 1) pour une référence de la vitesse égale à la valeur nominale de 1420 tr/min ainsi qu'un flux de référence nominal de 1Wb, respectivement dans le cas de la stratégie à simple bande et la stratégie à double bande. Les largeurs de bande de flux et de couple sont les mêmes pour les deux stratégies et dans tous les tests effectués, soient  $\Delta\phi_s=3\%$  et  $\Delta\Gamma_e=3\%$ .

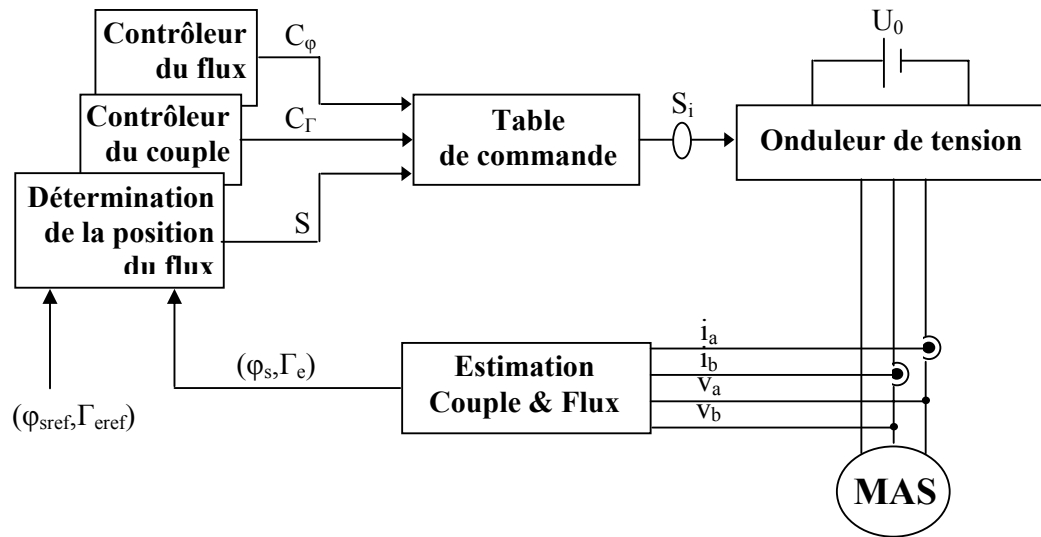


**Figure 1.15** Structure de base du contrôle direct du couple

Les paramètres du régulateur de vitesse de type PI sont les suivants:  $k_p = 0.83$ ,  $k_i = 5.82$ .

On remarque que les variations des tensions, notamment celles des tensions simples montrent bien les deux niveaux de tension développés par l'onduleur de tension, à savoir  $+\frac{U_0}{2}$  et  $-\frac{U_0}{2}$ .

Après un fort appel au démarrage, le courant statorique s'écarte de sa forme sinusoïdale. Cette déformation s'explique par un contenu riche en harmonique de ce courant.

Les ondulations des grandeurs à contrôler, à savoir le flux et le couple sont à hauteur de (6.5%,18%) dans le cas de la stratégie à simple bande et (6.5%,15%) dans le cas de la stratégie à double bande. Les dépassements des limites des bandes de tolérance sont dus au fonctionnement propre des comparateurs. La hauteur de ces fluctuations sont indépendantes de la stratégie adoptée et fonction des largeurs des bandes de tolérance, elles sont logiquement les plus faibles pour des valeurs nulles de ces bandes [31]. D'autre part, le dépassement important du couple constaté au démarrage est dû essentiellement au fonctionnement du régulateur de vitesse utilisé de type PI. Néanmoins, des travaux ont été engagés dans le but de pallier à ce problème [32].

Enfin, la vitesse de rotation de la machine suit sa consigne sans dépassement avec un temps de réponse égal à 1.15 secondes, et ceci indépendamment de la stratégie appliquée.

La figure 1.18 renseigne sur la robustesse du système, ainsi la machine est soumise à un démarrage à vide puis un couple nominal est appliqué à l'instant 0.8 secondes. Nous remarquons qu'à cet instant, le courant augmente de valeur à cause du branchement de la charge. Le couple augmente lui aussi afin de compenser le couple de charge appliqué. Ce changement de régime provoque naturellement une perturbation au niveau du flux

statorique. L'application de cette charge conduit enfin à une légère diminution de la vitesse de rotation, du au glissement introduit par la machine, vite compensée par le système de régulation de vitesse.

On peut constater que le démarrage à vide entraîne naturellement un rétablissement relativement rapide des grandeurs de la machine par rapport au démarrage en charge.

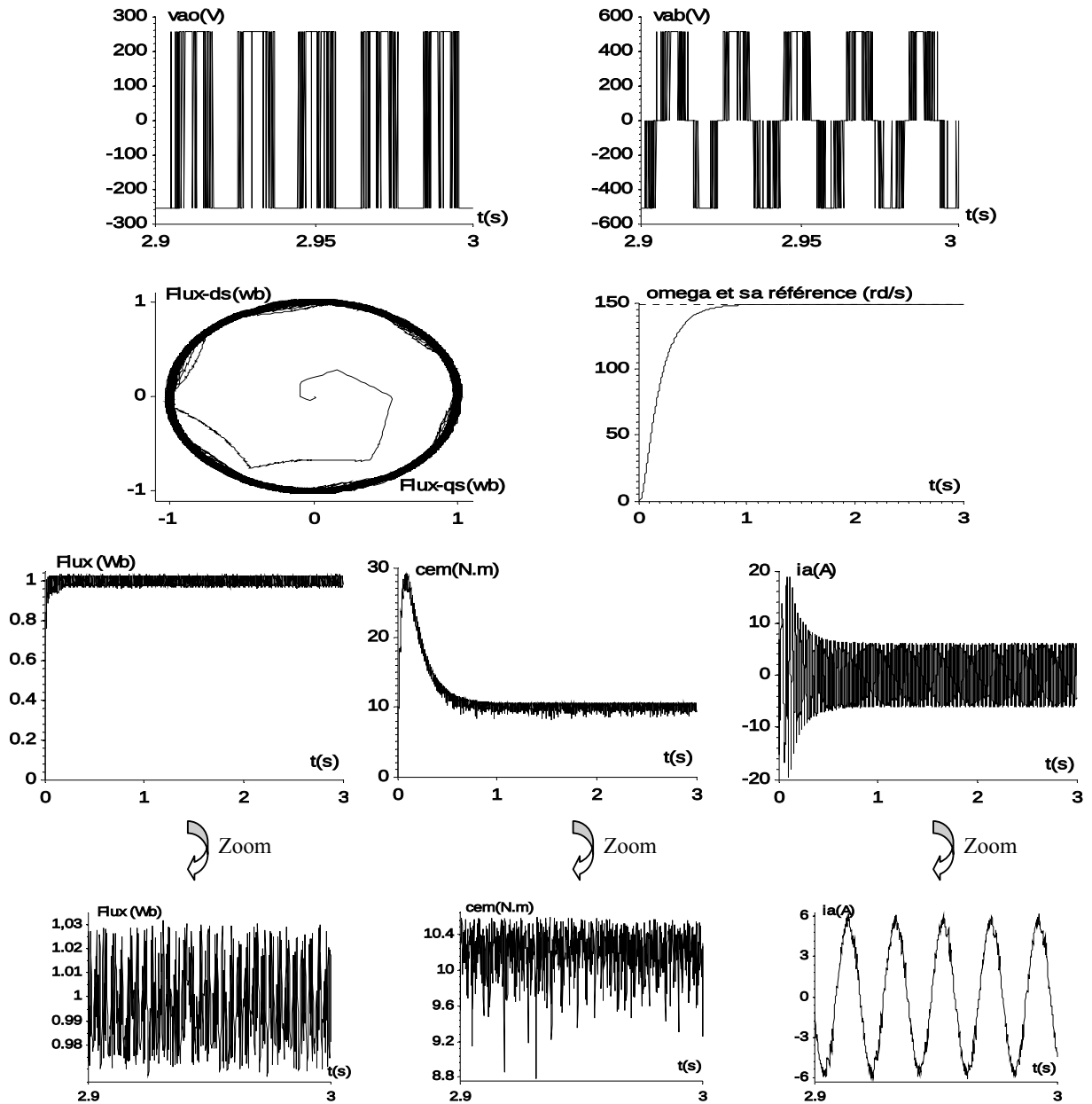


**Figure 1.16** Simulation du démarrage en charge nominale de la machine par la stratégie à simple bande: tension simple, tension de ligne, trajectoire du vecteur de flux, vitesse de rotation et sa référence, flux, couple et courant de phase.

D'après la figure 1.19, nous pouvons dire que le rétablissement de la vitesse suite à une inversion de la consigne s'effectue "correctement" dans le cas de la stratégie à double bande pour le couple comparativement à la stratégie à simple bande. En effet, dans ce dernier cas, le rétablissement de la vitesse s'accompagne d'un dépassement plus ou moins important.

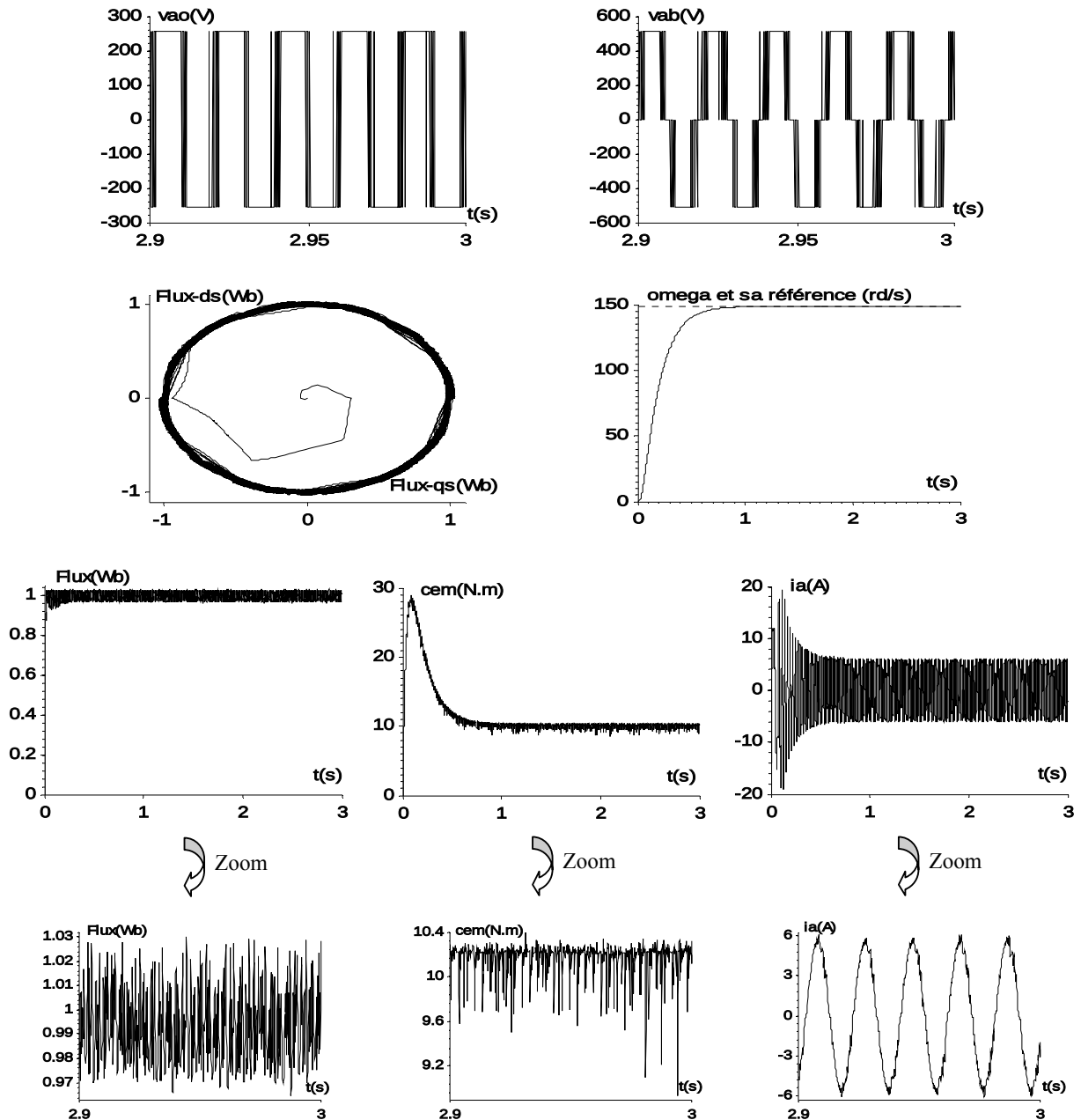


**Figure 1.17** Simulation du démarrage en charge nominale de la machine par la stratégie à double bande: tension simple, tension de ligne, trajectoire du vecteur de flux, vitesse de rotation et sa référence, flux, couple et courant de phase.

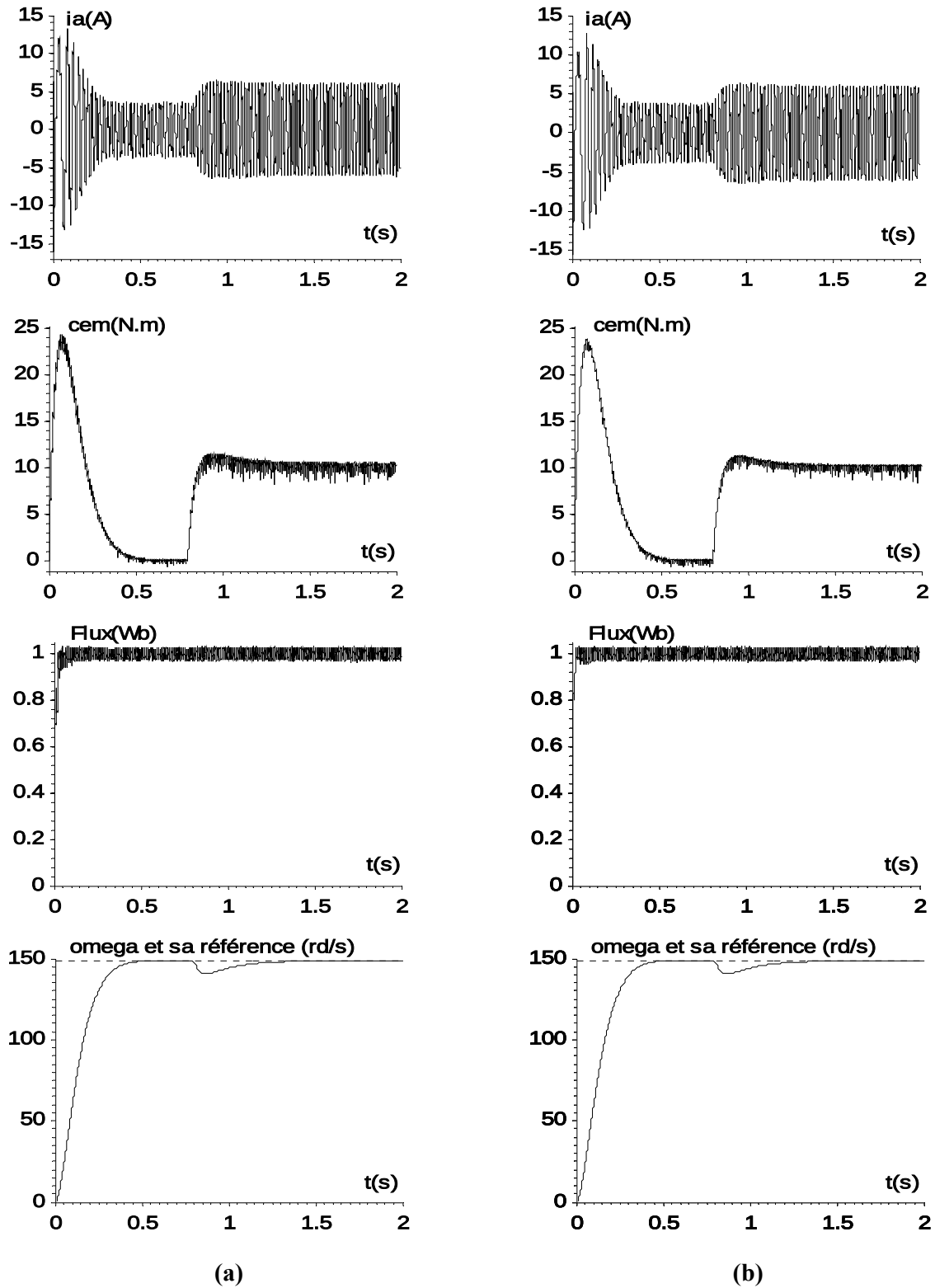


**Figure 1.18** Simulation du démarrage à vide puis application d'un couple nominale: courant de phase, couple, flux, vitesse de rotation et sa référence. (a) Stratégie à simple bande. (b) Stratégie à double bande.

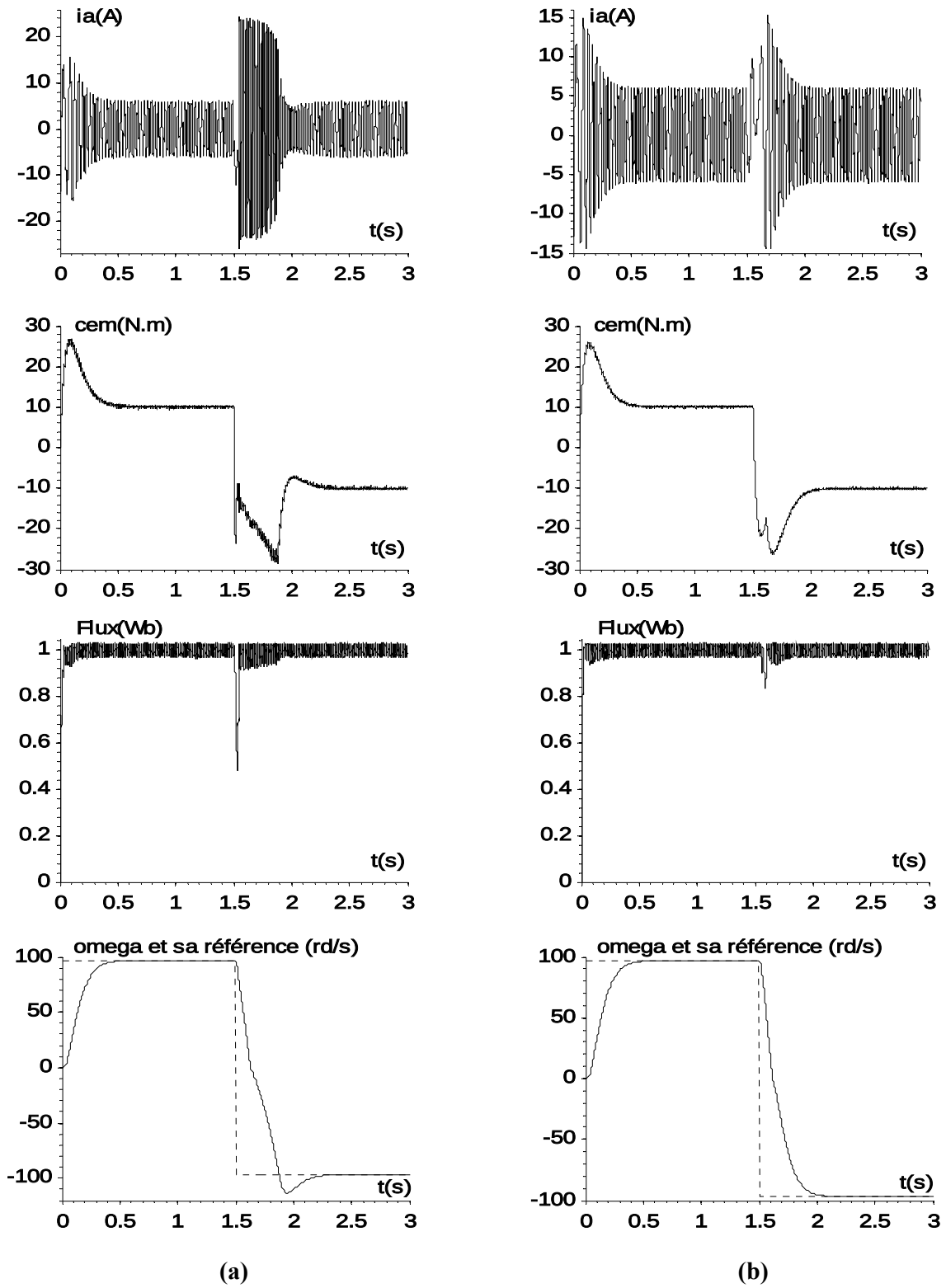


**Figure 1.19** Simulation du CDC de la machine asynchrone pour une inversion de la consigne de vitesse de 65% de la valeur nominale: courant de phase, couple, flux, vitesse de rotation et sa référence. (a) Stratégie à simple bande. (b) Stratégie à double bande.

Nous constatons que l'effet de l'inversion de la consigne sur le courant de phase et le flux statorique plus important dans le cas de la stratégie à simple bande du couple où le pic atteint approximativement  $\pm 24A$  et le flux perd presque 50% de sa valeur.

Aussi, la commande CDC avec onduleur à 2-niveaux de tension permet une régulation précise jusqu'à des vitesses très faibles comme nous le constatons à la figure 1.20. Cet essai montre les variations du courant de ligne, du couple et de la vitesse de rotation pour un passage brusque de la consigne de vitesse de 0 à 3 rad/s sous charge nominale.

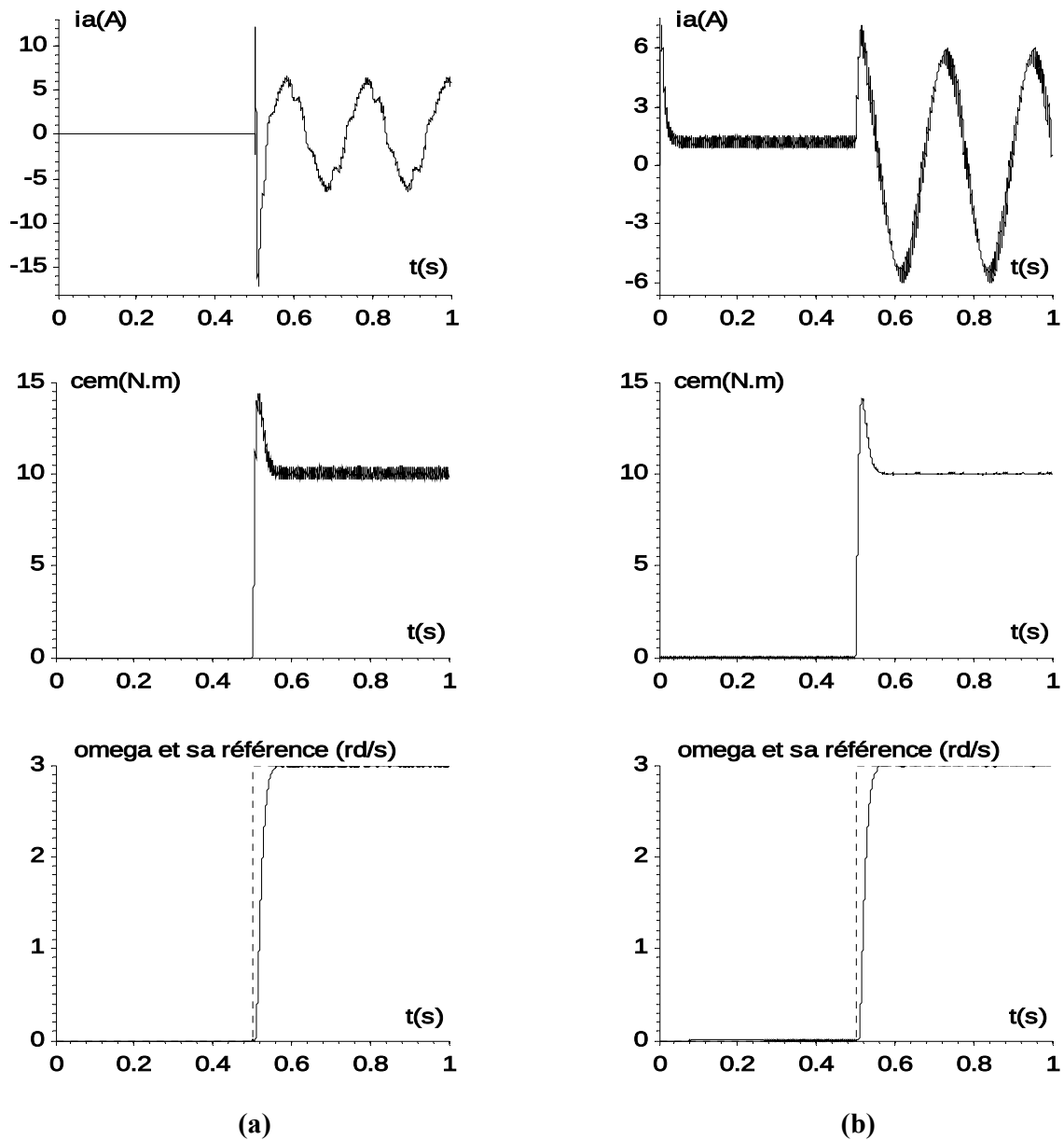


**Figure 1.20** Fonctionnement à basse vitesse: courant de phase, couple, vitesse de rotation et sa référence. (a) Stratégie à simple bande. (b) Stratégie à double bande.

## 1.6 CONCLUSION

Nous avons présenté le principe du contrôle direct du couple d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur classique à 2-niveaux de tension. La compréhension exacte de l'évolution du couple électromagnétique nous a permis d'établir la stratégie à simple bande du couple. Cette dernière favorise de façon significative l'application des séquences de tension nulle contribuant à réduire les pertes dues aux commutations, ceci est très intéressant en particulier pour des applications à grande puissance. Son inconvénient provient de l'utilisation de deux tables de commande qui nécessitent, pour être fonctionnelles, une information supplémentaire sur le sens de rotation de la machine. C'est la raison pour laquelle, nous avons développé la stratégie à double bande pour le couple nécessitant une seule table de commande. Cette dernière se distingue de la stratégie à simple bande du couple par l'application des séquences de tension actives si le couple se trouve en dehors de sa bande de tolérance.

On constate à travers les résultats obtenus que la stratégie à double bande du couple répond mieux aux exigences des tests effectués, c'est pourquoi elle a été retenue en prévision de la commande à l'aide des réseaux de neurones.

## CHAPITRE 2

# CONTROLE DIRECT DU COUPLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE ALIMENTEE PAR UN ONDULEUR A 3-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC

### 2.1 INTRODUCTION

L'évolution rapide des techniques de fabrication des dispositifs à semi conducteurs et l'orientation des concepteurs vers la technologie des composants hybrides tels que l'IGBT ont permis de développer de nouvelles structures d'onduleurs d'une grande performance par rapport aux structures classiques telles que l'onduleur à 2-niveaux de tension étudié au chapitre 1, en l'occurrence, les onduleurs multiniveaux. Ces derniers étant bien adaptés aux applications de grandes puissances, ils réduisent considérablement les contraintes liées aux phénomènes de commutation sollicitant les interrupteurs.

La première structure d'onduleurs multiniveaux à apparaître est l'onduleur à 3-niveaux de tension de structure dite à point neutre "clampé" (ou Neutral Point Clamped, NPC en anglais), cette topologie est connue depuis le début des années 80, [33] étant l'une des premières publications, contribuant largement à sa diffusion. Cependant, le principal inconvénient de ce type d'onduleur est le déséquilibre des tensions continues de l'onduleur. Ce problème sera traité à la fin du chapitre.

Afin de réaliser le contrôle direct du flux statorique et du couple électromagnétique de la machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3-niveaux de tension de structure NPC [34,35] nous devons élaborer de nouvelles tables de commande mettant en œuvre au mieux les possibilités de l'onduleur. Nous inspirant des parties précédemment développées, nous considérons certains mécanismes comme acquis. Certains points, redondants avec le contrôle appliqué à la machine asynchrone alimentée par un onduleur à 2-niveaux de tension, ne seront pas repris si les conclusions sont identiques. Ainsi, seule l'apport de l'utilisation d'un onduleur à 3-niveaux de tension sera examiné. Nous exposerons tout d'abord la construction de deux nouvelles tables de commande qui ont été envisagées dans ce travail. Aussi, nous présentons une technique de contrôle de la tension du point milieu de l'onduleur.

## 2.2 L'ONDULEUR A 3-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC

### 2.2.1 STRUCTURE

L'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC est représenté sur la figure 2.1. Cette structure de conversion consiste à créer un point milieu sur l'étage de tension continue  $U_0$ . Ainsi, l'idée de base est l'obtention d'une tension de sortie à 3-niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte [36,37].

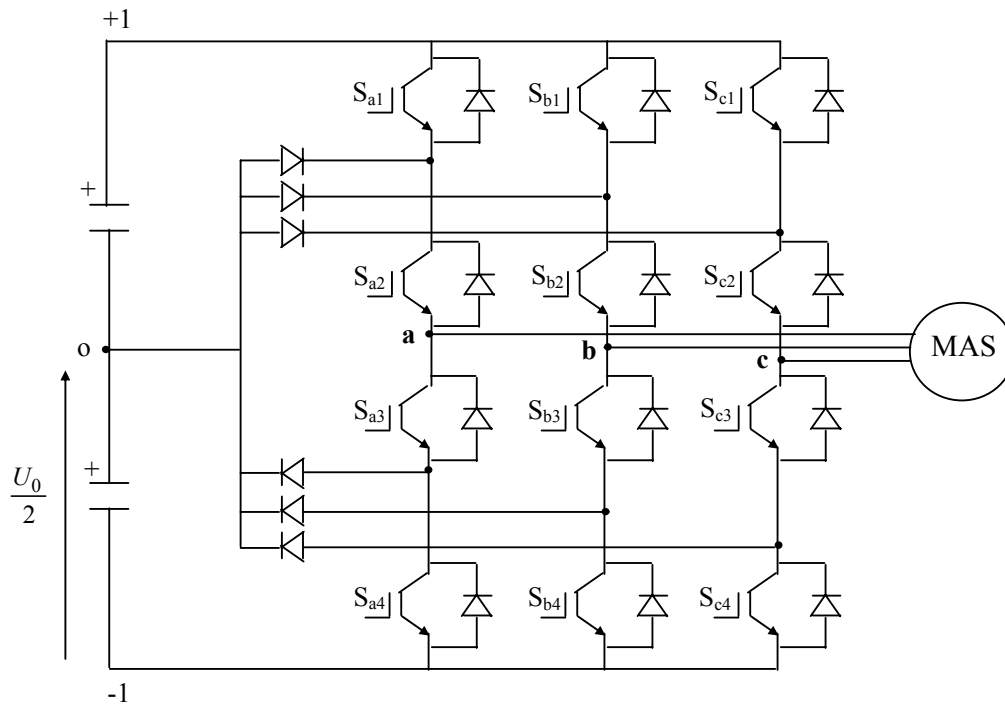


**Figure 2.1** Structure de l'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC

Chaque demi-pont est composé de deux (2) IGBT en série avec un point commun relié par une diode au milieu de la source. Comme pour la structure à 2-niveaux, des diodes anti-parallèles sur les transistors assurent la circulation des courants pendant la phase de roue libre. Cet onduleur permet d'avoir une tension plus proche de la sinusoïde que celle issue d'une structure classique d'onduleur à 2-niveaux de tension. Un autre avantage découle des structures multiniveaux, en général, consiste à une meilleure maîtrise des contraintes en tension sur les composants.

### 2.2.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Pour décrire le fonctionnement de l'onduleur, on considère un seul bras dont la structure est

donnée par la figure 2.2. On met en évidence les valeurs que peut prendre la tension simple  $v_{io}$  ( $i=a,b,c$ ) entre la borne "i" de la charge et le point milieu o. Cette tension étant entièrement définie par l'état des quatre (4) interrupteurs  $S_{ij}$  ( $i=a,b,c$   $j=1,\dots,4$ ) du bras.

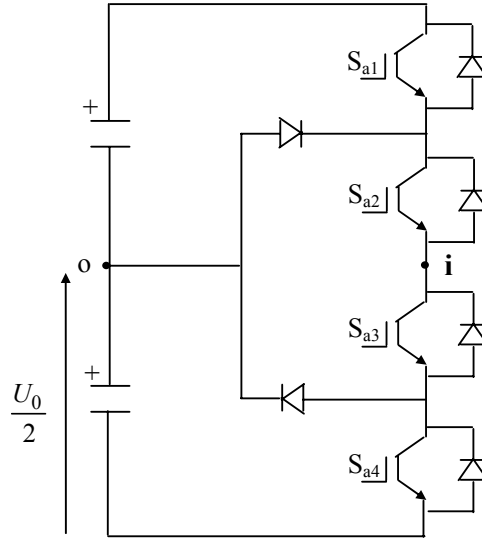


**Figure 2.2** Structure d'un bras de l'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC

Le sens positif ou négatif des courants  $i_1$ ,  $i_{-1}$  et  $i_{NP}$  fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant. Ainsi, sur les 16 séquences de tension possibles, seules trois séquences sont mises en œuvre, comme le montre la figure 2.3:

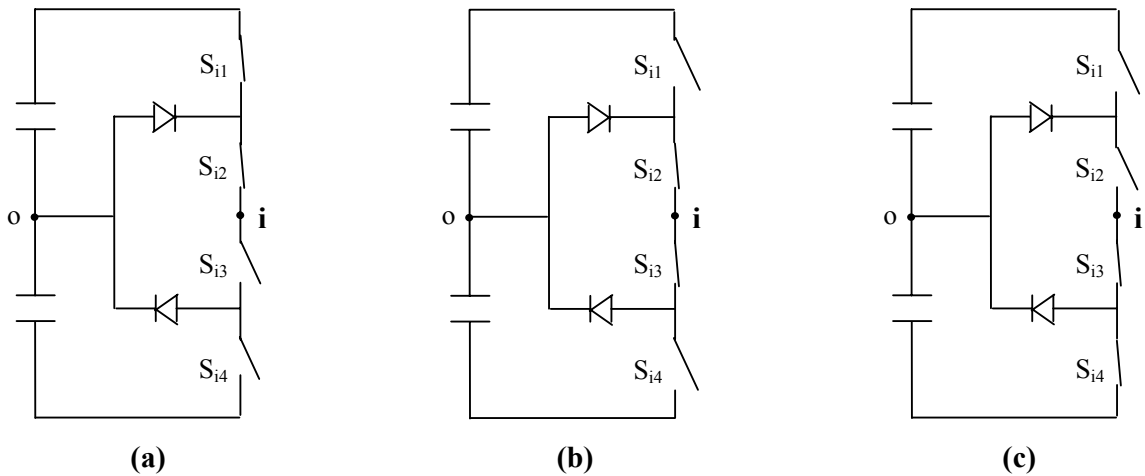


**Figure 2.3** Les trois configurations fonctionnelles d'un bras i

- Séquence 1:  $S_{i1}$  et  $S_{i2}$  sont passant et  $S_{i3}$  et  $S_{i4}$  sont bloqués (Figure 2.3-a):  $v_{io} = +\frac{U_0}{2}$

- Séquence 2:  $S_{i2}$  et  $S_{i3}$  sont passant et  $S_{i1}$  et  $S_{i4}$  sont bloqués (Figure 2.3-b). La charge est mise en court-circuit à travers l'un des interrupteurs  $S_{i2}$  et  $S_{i3}$  et l'une des diodes de bouclage. Donc, la phase  $i$  ( $i=a,b,c$ ) est reliée directement au point neutre  $o$ . La tension de sortie est alors nulle:  $v_{io} = -\frac{U_0}{2}$ .

De ce fait, la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués vaut:  $v_{si1} = v_{si4} = +\frac{U_0}{2}$ .

- Séquence 3:  $S_{i1}$  et  $S_{i2}$  sont bloqués et  $S_{i3}$  et  $S_{i4}$  sont passants (Figure 2.3-c):  $v_{io} = -\frac{U_0}{2}$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est:  $v_{si1} = v_{si2} = +\frac{U_0}{2}$

On définit alors trois (3) grandeurs booléennes de commande  $S_i$  ( $i=a,b,c$ ), telles que:

$$\begin{cases} (S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4}) = (0,0,1,1) \rightarrow S_i = -1 \\ (S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4}) = (0,1,1,0) \rightarrow S_i = 0 \\ (S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4}) = (1,1,0,0) \rightarrow S_i = +1 \end{cases} \quad (2-1)$$

Pour visualiser l'enchaînement de ces séquences, les formes d'ondes de la tension de sortie  $v_{io}$ , ainsi que les signaux de commande de chaque interrupteur sont tracés sur la figure suivante.

Cette analyse montre que l'onduleur à 3-niveaux de tension limite à  $\frac{U_0}{2}$  la tension imposée

à chaque interrupteur bloqué, et ceci contrairement à l'onduleur classique à 2-niveaux de tension où cette tension vaut la tension continue complète  $U_0$ . Cette caractéristique importante permet à l'onduleur à 3-niveaux de monter en tension et en puissance.

Les tensions simples par rapport au point  $o$  s'écrivent dans ce cas:

$$v_{io} = S_i \cdot \frac{U_0}{2} \quad i=a,b,c \quad (2-2)$$

Aussi:

$$\begin{cases} v_{aN} = \frac{U_0}{6}(2S_a - S_b - S_c) \\ v_{bN} = \frac{U_0}{6}(2S_b - S_a - S_c) \\ v_{cN} = \frac{U_0}{6}(2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (2-3)$$

L'expression de  $v_s$  édictée en (1-16) restant la même.

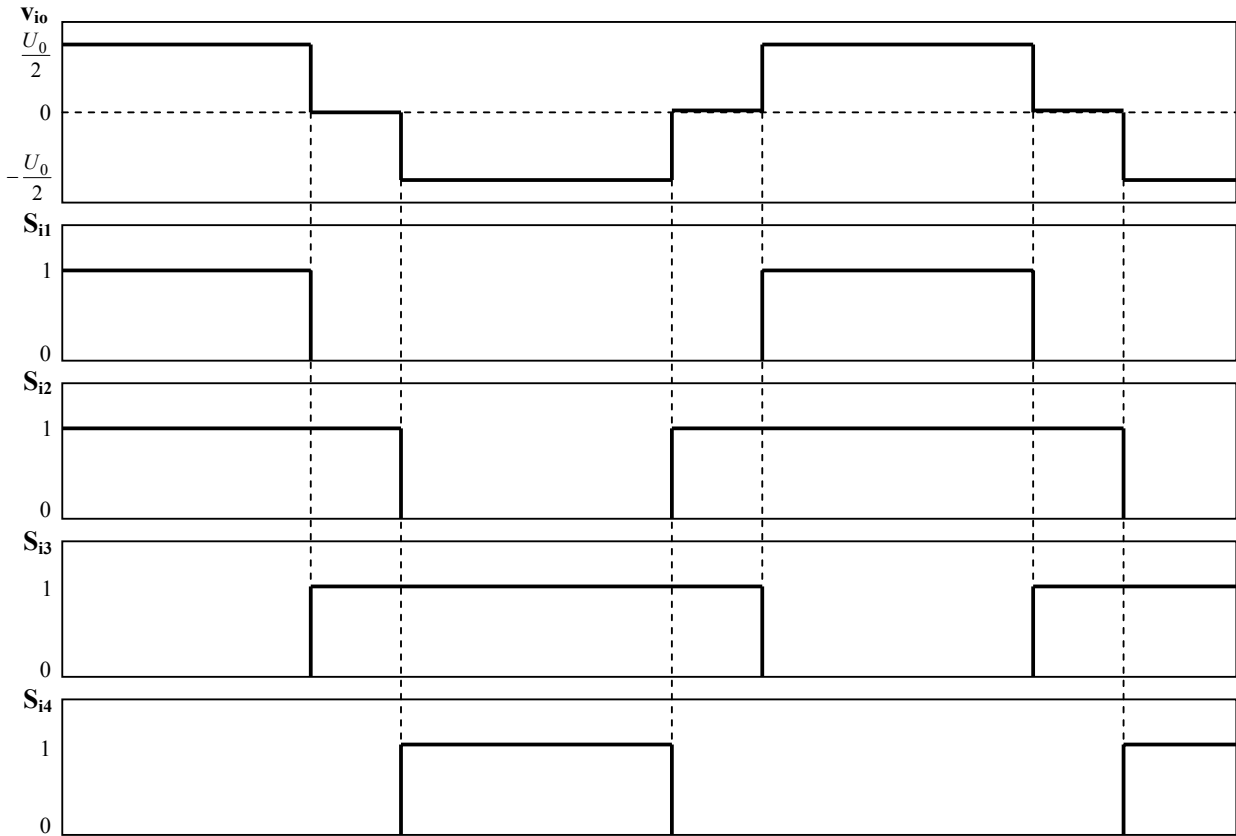
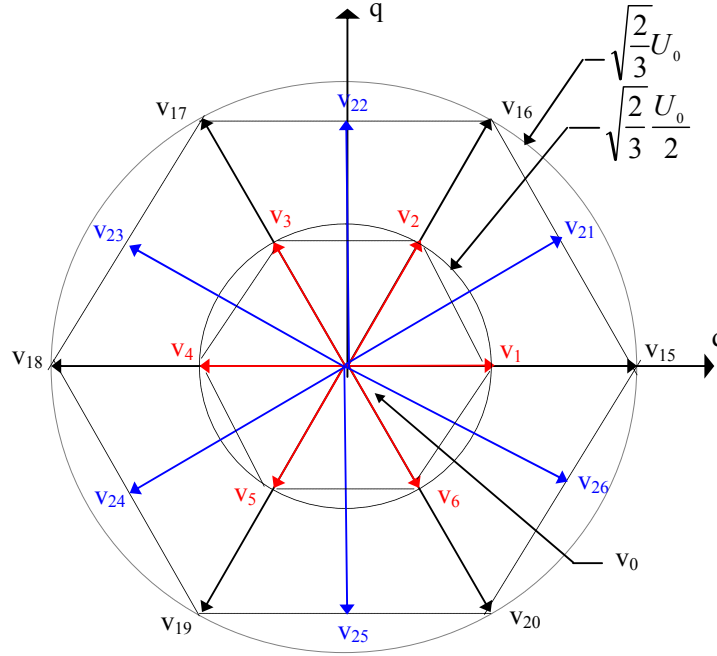


**Figure 2.4** Différentes formes d'onde d'un bras de l'onduleur

Les combinaisons des états  $S_i$  des trois (3) bras de l'onduleur montrent que l'onduleur à 3-niveaux de tension peut produire 19 valeurs différentes du vecteur de tension  $v_s$  correspondant à 27 séquences des états des bras de l'onduleur, comme illustre la figure 2.5. On répartit les 19 vecteurs de tension suivant leur amplitude, en quatre (4) groupes comme illustré au tableau 2.1.

### 2.3 APPLICATION DU CDC AU CONTROLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE ALIMENTÉE PAR UN ONDULEUR A 3-NIVEAUX DE TENSION

Nous inspirant de l'étude développée au chapitre précédent, des tables de commutation ou de commande exploitant au mieux les possibilités de l'onduleur à 3-niveaux de tension sont élaborées. Les tensions continues aux bornes des condensateurs sont supposées équilibrées et valent  $\frac{U_0}{2}$ .

**Figure 2.5** Vecteurs de tension fournis par l'onduleur à 3-niveaux de tension**Tableau 2.1** Répartition en 4 sous groupes des vecteurs de tension de sortie de l'onduleur

|                         |                       |                      |                        |                      |                       |                      |
|-------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| "Tension nulle"         | $V_0$<br>(0,0,0)      | $V_7$<br>(1,1,1)     | $V_{14}$<br>(-1,-1,-1) |                      |                       |                      |
| "Demie Tension"         | $V_1$<br>(1,0,0)      | $V_2$<br>(1,1,0)     | $V_3$<br>(0,1,0)       | $V_4$<br>(0,1,1)     | $V_5$<br>(0,0,1)      | $V_6$<br>(1,0,1)     |
|                         | $V_8$<br>(0,-1,-1)    | $V_9$<br>(0,0,-1)    | $V_{10}$<br>(-1,0,-1)  | $V_{11}$<br>(-1,0,0) | $V_{12}$<br>(-1,-1,0) | $V_{13}$<br>(0,-1,0) |
| "Pleine Tension"        | $V_{15}$<br>(1,-1,-1) | $V_{16}$<br>(1,1,-1) | $V_{17}$<br>(-1,1,-1)  | $V_{18}$<br>(-1,1,1) | $V_{19}$<br>(-1,-1,1) | $V_{20}$<br>(1,-1,1) |
| "Tension intermédiaire" | $V_{21}$<br>(1,0,-1)  | $V_{22}$<br>(0,1,-1) | $V_{23}$<br>(-1,1,0)   | $V_{24}$<br>(-1,0,1) | $V_{25}$<br>(0,-1,1)  | $V_{26}$<br>(1,-1,0) |

### 2.3.1 CONSTRUCTION DE 2 NOUVELLES TABLES DE COMMANDE

La construction de tables de commande se base effectivement sur les remarques du chapitre précédent. Le choix du vecteur de tension statorique qu'on applique va permettre d'augmenter ou de diminuer le module du flux statorique et de la valeur du couple électromagnétique.

### 2.3.1.1 STRATEGIE A 2 TABLES DE COMMANDE

Il s'avère que l'application des vecteurs dits "demie tension" ne permet pas à la machine de fonctionner à vitesse nominale par exemple sous le flux nominal. On a été amené donc à diviser la plage de vitesse en deux (2) zones et ces vecteurs sont utilisés uniquement dans le cas où les vitesses sont faibles [28,38,39].

#### A) FONCTIONNEMENT A FAIBLES VITESSES DE ROTATION

Quand la vitesse de la machine est faible, nous avons choisi d'utiliser les vecteurs de tension du groupe "demie tension". On pourra ainsi réduire le courant de démarrage de la machine. On se retrouve dans un cas similaire au cas de la machine asynchrone alimentée par un onduleur à 2-niveaux de tension, sauf que dans ce cas on fera appel en plus aux vecteurs du groupe "tension intermédiaire". En effet, ces vecteurs dits "demie tension" sont au nombre de six (6) et forment un hexagone dans un cercle de rayon  $\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_0}{2}$  et alternés par les vecteurs du groupe "tension intermédiaire", comme le montre la figure 2.6.

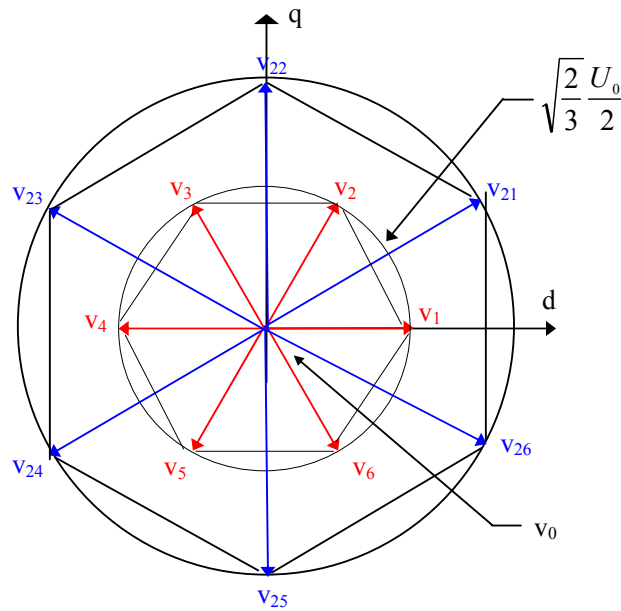


**Figure 2.6** Vecteurs de tension utilisés dans la table de commande Tab31

Globalement, on va pouvoir réutiliser la même logique de choix du vecteur  $v_s$  que celle utilisée dans le cas d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 2-niveaux de tension, détaillé précédemment.

Il est donc logique de constater que le découpage de l'espace en 6 secteurs identiques utilisé jusqu'à maintenant ne convient pas. En effet, ne mettant pas en évidence l'intérêt de l'utilisation des vecteurs du type "tension intermédiaire", ce découpage va nous conduire à

faire fonctionner l'onduleur à 3-niveaux de tension comme un onduleur à 2-niveaux en ne sollicitant que les vecteurs du groupe "demie tension".

▪ *Découpage de l'espace en douze (12) secteurs*

On va alors définir un nouveau découpage de l'espace tel que représenté sur la figure 2.7, en douze (12) secteurs identiques de  $30^\circ$  chacun. Ceci nous permettra de choisir également les vecteurs du groupe "tension intermédiaire" dans le CDC de la machine asynchrone et ainsi d'exploiter toutes les possibilités offertes par l'onduleur à 3-niveaux de tension.

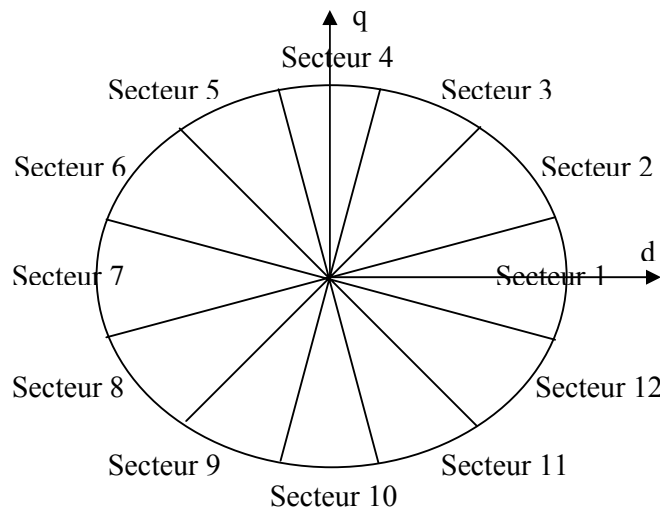


**Figure 2.7** Découpage de l'espace utilisé dans le CDC d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3-niveaux de tension

En effet, si on prend pour exemple le cas de figure où le vecteur flux statorique se trouve dans le secteur 1, on a alors à notre disposition pour augmenter le module de flux et la valeur du couple électromagnétique les vecteurs des groupes "demie tension" et "tension intermédiaire" listés ci-dessous:

- Pour augmenter le module du flux:  $v_6$ ,  $v_{26}$ ,  $v_1$ ,  $v_{21}$  et  $v_2$  (Figure 2.8).
- Pour augmenter la valeur du couple, la vitesse de rotation étant positive:  $v_{21}$ ,  $v_2$ ,  $v_{22}$ ,  $v_3$  et  $v_{23}$  (Figure 2.9).
- Pour augmenter la valeur du couple, la vitesse de rotation étant négative:  $v_{24}$ ,  $v_5$ ,  $v_{25}$ ,  $v_6$  et  $v_{26}$  (Figure 2.10).

Pour satisfaire aux conditions sur le flux et sur le couple simultanément, nous pouvons faire appel aux seuls vecteurs  $v_{21}$  et  $v_2$  (rotation positive) et  $v_{26}$  et  $v_6$  (rotation négative). Le vecteur  $v_1$  n'est intéressant, son action sur la valeur du couple est différente selon qu'il s'agisse du début, de la fin ou du milieu du secteur considéré.

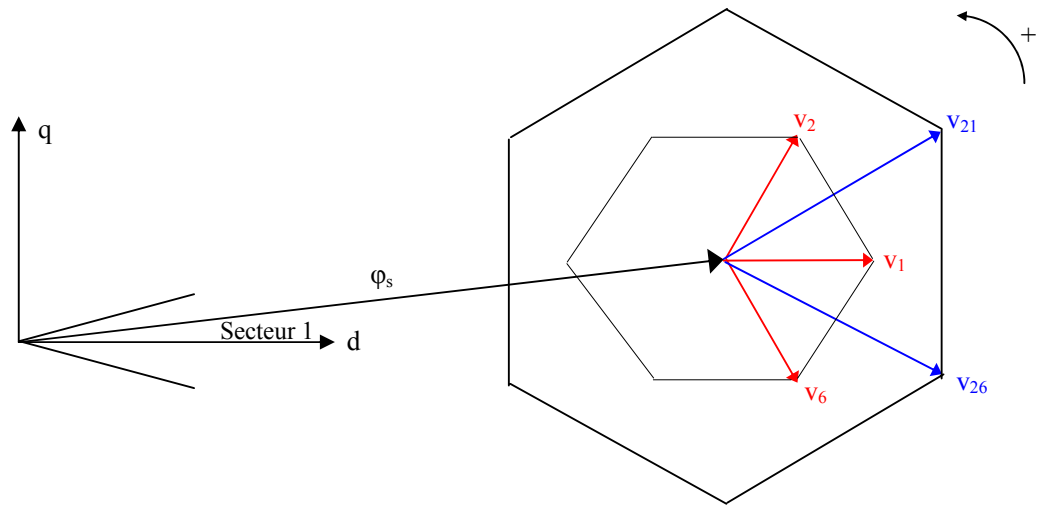


**Figure 2.8** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le module du flux.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.

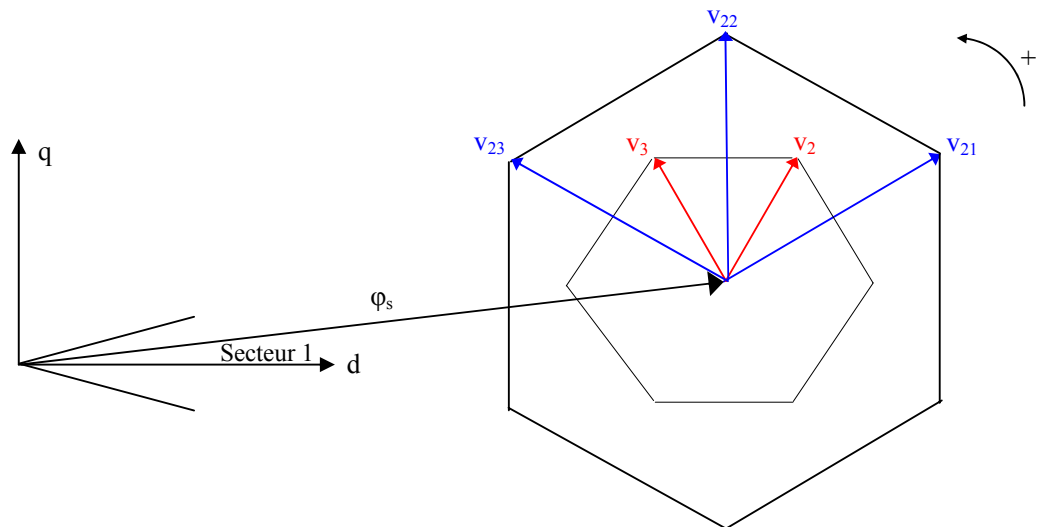


**Figure 2.9** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le couple.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.  
La vitesse de rotation est positive.

Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1, on opte pour le choix de  $v_{21}$  dans le cas où la rotation est positive et le vecteur de tension  $v_{26}$  dans l'autre cas.

Les contrôleurs à hystérésis flux et couple sont les mêmes que ceux utilisés au chapitre 1.

La synthèse de la table Tab31S obéit alors aux règles suivantes:

Quand le couple doit être augmenté ou diminué

Le vecteur du groupe "demie tension" ou du groupe "tension intermédiaire" donnant une variation angulaire de  $\gamma$  maximale est appliqué.

Quand le couple doit être maintenu

Le vecteur de tension nulle est appliqué.

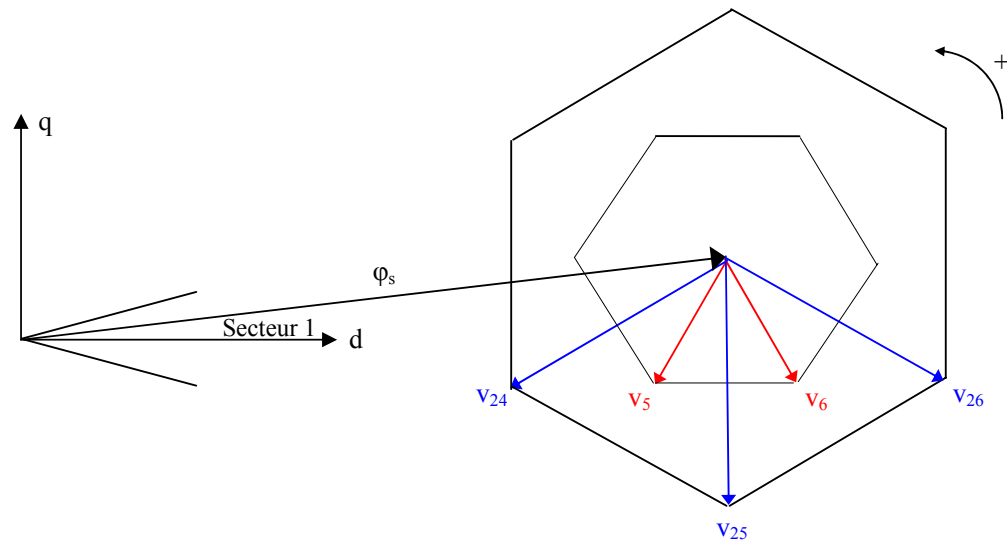


**Figure 2.10** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le couple.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.  
La vitesse de rotation est négative.

**Tableau 2.2** Table de commande Tab31S utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3-niveaux de tension.  
Cas où les vitesses sont faibles

|             |            | S             |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------|------------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $C_\varphi$ | $C_\Gamma$ | 1             | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| 1           | +1         | 2             | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 | 6  | 26 | 1  | 21 |
|             | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|             | -1         | 6             | 26 | 1  | 21 | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 |
| 0           | +1         | 22            | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  |
|             | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|             | -1         | 25            | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  |

Cette table a pour particularité d'imposer toujours la séquence (0,0,0) du vecteur nul  $v_0$  pour maintenir le couple (dans toutes les tables,  $i$  signifie le vecteur de tension  $v_i$ , valable pour tous les autres vecteurs). Ce choix est fait afin qu'un bras de l'onduleur ne puisse pas commuter directement entre deux états extrêmes et éviter ainsi les surtensions importantes aux bornes des interrupteurs, c'est le cas de toutes les tables élaborées au cours de ce travail. Il est à noter qu'il est possible de faire usage dans la table de commande uniquement de vecteurs de tension de type "demie tension" [28], les essais dans ce cas ont montré que cela rétrécit la bande de vitesse où la table est valable.

*B) FONCTIONNEMENT A VITESSES DE ROTATION ELEVEES*

Quand la vitesse de la machine est élevée, on fait appel aux vecteurs de tension des groupes "pleine tension" et "tension intermédiaire" pour réaliser le CDC de la machine asynchrone. On retrouve le même découpage de l'espace utilisé en 2.3.1.1-a soit douze (12) secteurs et un raisonnement semblable par rapport au premier cas (vitesses de rotation faibles) quant au choix du vecteur de tension statorique  $v_s$ .

L'exemple que nous développons, suppose que le flux statorique et le couple électromagnétique sont amenés à croître et que le secteur de position du flux choisi est 1.

- Pour augmenter le module du flux:  $v_{20}$ ,  $v_{26}$ ,  $v_{15}$ ,  $v_{21}$  et  $v_{16}$  (Figure 2.11).

- Pour augmenter la valeur du couple, la vitesse de rotation étant positive:  $v_{21}$ ,  $v_{16}$ ,  $v_{22}$ ,  $v_{17}$  et  $v_{23}$  (Figure 2.12).

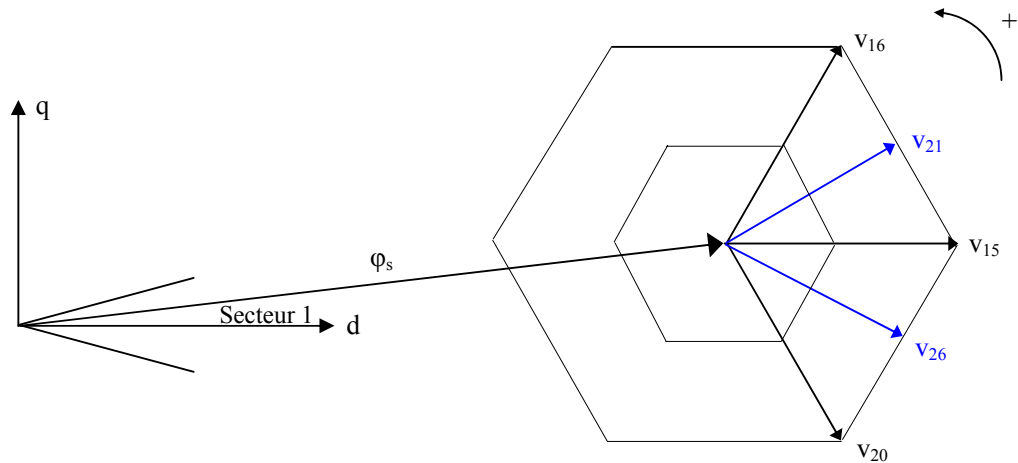


**Figure 2.11** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le module du flux.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.

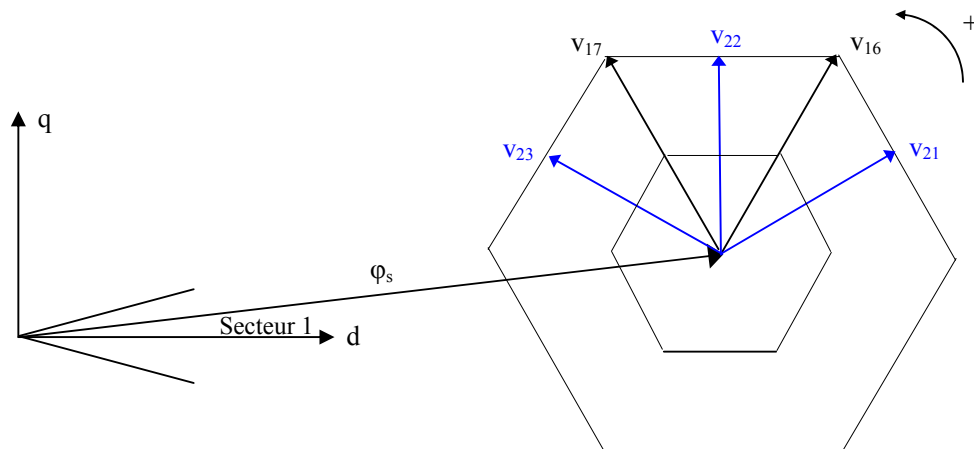


**Figure 2.12** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le couple.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.  
La vitesse de rotation est positive.

- Pour augmenter la valeur du couple, la vitesse de rotation étant négative:  $v_{24}$ ,  $v_{19}$ ,  $v_{25}$ ,  $v_{20}$  et  $v_{26}$  (Figure 2.13).

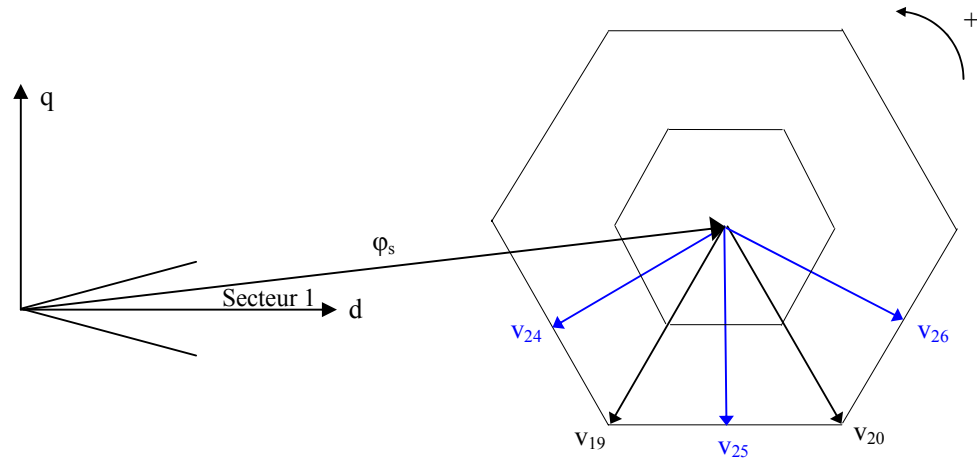


**Figure 2.13** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le couple.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.  
La vitesse de rotation est négative.

Pour réaliser les conditions sur le flux et sur le couple simultanément, deux directions  $v_{21}$  et  $v_{16}$  (rotation positive) et  $v_{26}$  et  $v_{20}$  (rotation négative) peuvent envisagées, mais seuls les vecteurs dits "pleine tension" répondent aux exigences de dynamique du couple, c'est d'ailleurs les vecteurs correspondant à ceux qui seraient appliqués dans le cas d'une alimentation par un onduleur classique à deux niveaux de tension.

En définitive, une table de commande donnée par le tableau 2.3 est construite selon les critères ci-dessous:

**Tableau 2.3** Table de commande Tab32S utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3-niveaux de tension.  
Cas où les vitesses sont élevées.

|             |            | S             |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------|------------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $C_\varphi$ | $C_\Gamma$ | 1             | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| 1           | +1         | 16            | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 |
|             | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|             | -1         | 20            | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 |
| 0           | +1         | 22            | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 |
|             | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|             | -1         | 25            | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 |

Quand le couple doit être augmenté ou diminué

Le vecteur du groupe "pleine tension" ou du groupe tension intermédiaire induisant une variation angulaire de  $\gamma$  maximale est alors choisi.

Quand le couple doit être maintenu

Le vecteur de tension nulle est sélectionné.

### 2.3.1.2 STRATEGIE A UNE TABLE DE COMMANDE UNIQUE

Par souci de contourner la lourdeur et les inconvénients dus à l'utilisation de deux tables de commande, des travaux de recherche se sont orientés vers l'établissement d'une seule et unique table de commande valable à toutes les vitesses de rotation de la machine [28,40].

En maintenant le découpage de l'espace en douze (12) secteurs, il devient impératif d'élever le niveau du contrôleur d'hystérésis du couple pour passer à un contrôleur à deux niveaux supérieurs et deux niveaux inférieurs (Figure 2.14).

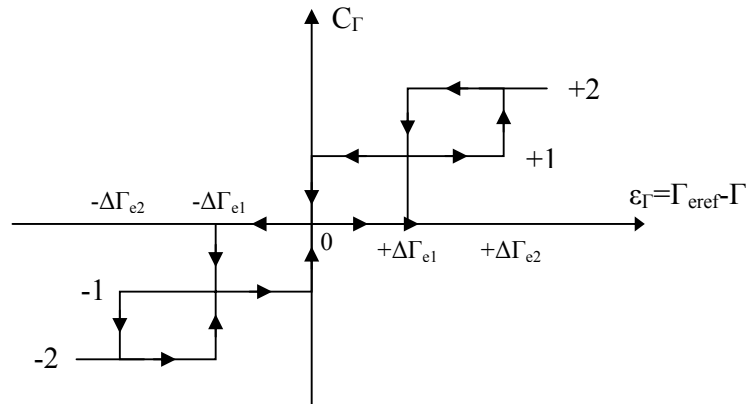


**Figure 2.14** Correcteur de couple à 2 niveaux supérieurs et 2 niveaux inférieurs  
(-2/-1/0/+1/+2: diminuer fortement/diminuer/maintenir/augmenter /augmenter fortement)

La synthèse de la table de commande Tab33S (Tableau 2.4) [41] s'est faite sur la base des règles suivantes:

Quand le couple doit être augmenté ou diminué

un des vecteurs actifs est appliqué selon les cas (sens de rotation positif ou négatif).

Quand le couple doit être maintenu

le vecteur de tension nulle est appliqué

### 2.3.2 SIMULATIONS

Les figures 2.15, 2.16, 2.17, 2.18 et 2.19 reprennent les mêmes essais que ceux pratiqués au

chapitre précédent. Les largeurs de bande de flux et de couple sont les mêmes dans tous les tests effectués, soient  $\Delta\phi_s=3\%$ ,  $\Delta\Gamma_{e1}=2.7\%$  et  $\Delta\Gamma_{e2}=3\%$  pour la stratégie à une table unique et  $\Delta\phi_s=3\%$  et  $\Delta\Gamma_e=3\%$  pour la stratégie à deux tables de commande.

On remarque que l'utilisation de l'onduleur à 3-niveaux de tension a amélioré les bandes de fluctuation notamment celle du couple, passant ainsi à (2.5%,12.4%) et (8%,6.2%) respectivement dans le cas de la stratégie à une table unique (Tab33S) et de la stratégie à deux tables de commande (Tab31S et Tab32S). Cependant, le choix de comparateurs double par exemple pour le flux peut améliorer les performances réalisées dans le cas de la stratégie à deux tables [39]. La trajectoire du vecteur flux statorique est pratiquement un cercle.

On peut observer l'amélioration des formes d'ondes tensions et courants comparativement au cas d'alimentation par un onduleur classique.

En outre, nous pouvons constater que le pic du courant au démarrage, sensiblement le même pour les deux stratégies, est plus faible soit de l'ordre de 17A.

**Tableau 2.4** Table de commande Tab33S utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3-niveaux de tension.

| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | S             |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------|------------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|          |            | 1             | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| +1       | +2         | 21            | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 |
|          | +1         | 21            | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 | 6  | 26 | 1  |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 26            | 1  | 21 | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 | 6  |
|          | -2         | 26            | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 |
| -1       | +2         | 17            | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 |
|          | +1         | 3             | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  | 22 |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 5             | 25 | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 |
|          | -2         | 19            | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 |
| 0        | +2         | 22            | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 |
|          | +1         | 22            | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 25            | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  |
|          | -2         | 25            | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 |

Le rétablissement de la vitesse de rotation dans le cas d'une application d'un couple de charge s'effectue plus rapidement que dans le cas d'une alimentation par un onduleur à 2 niveaux de tension, cependant celui du courant de phase prend pratiquement la même durée.

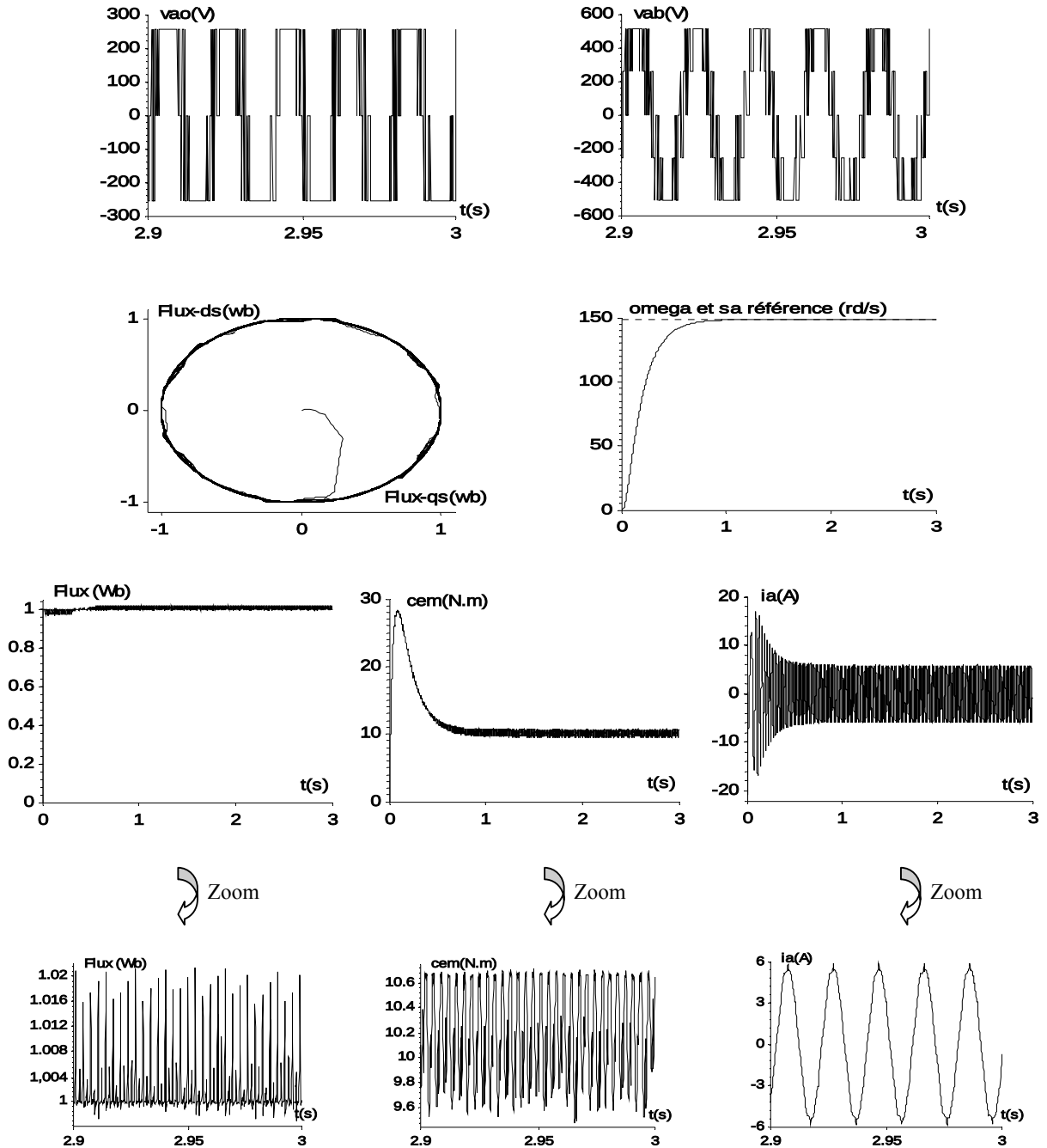


**Figure 2.15** Simulation du démarrage en charge nominale de la machine par la stratégie à une table unique: tension simple, tension de ligne, trajectoire du vecteur de flux, vitesse de rotation et sa référence, flux, couple et courant de phase.

Enfin, il est à noter le bon comportement en basse vitesse du système alimenté par un onduleur à 3 niveaux de tension.

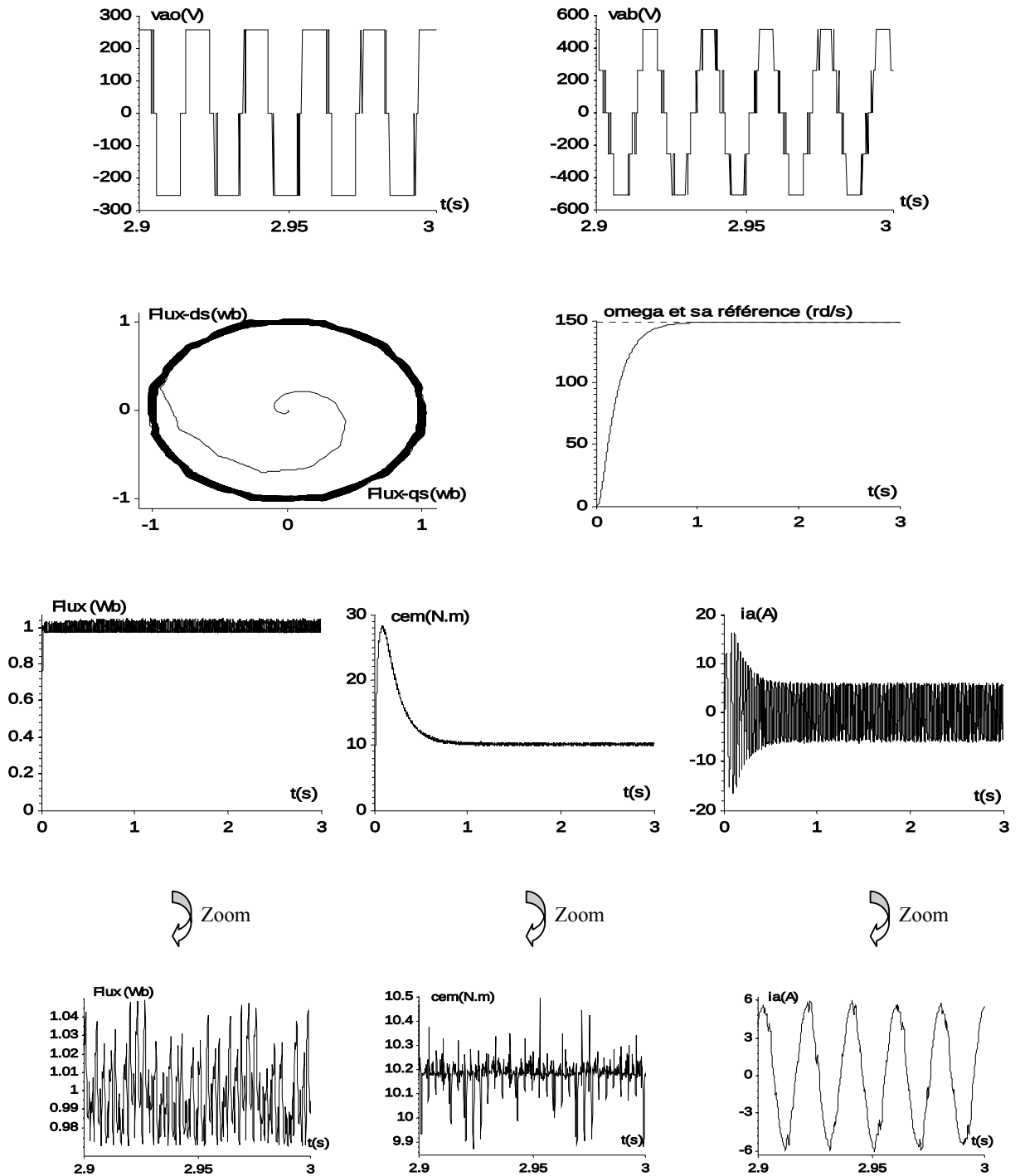


**Figure 2.16** Simulation du démarrage en charge nominale de la machine par la stratégie à deux tables: tension simple, tension de ligne, trajectoire du vecteur de flux, vitesse de rotation et sa référence, flux, couple et courant de phase.

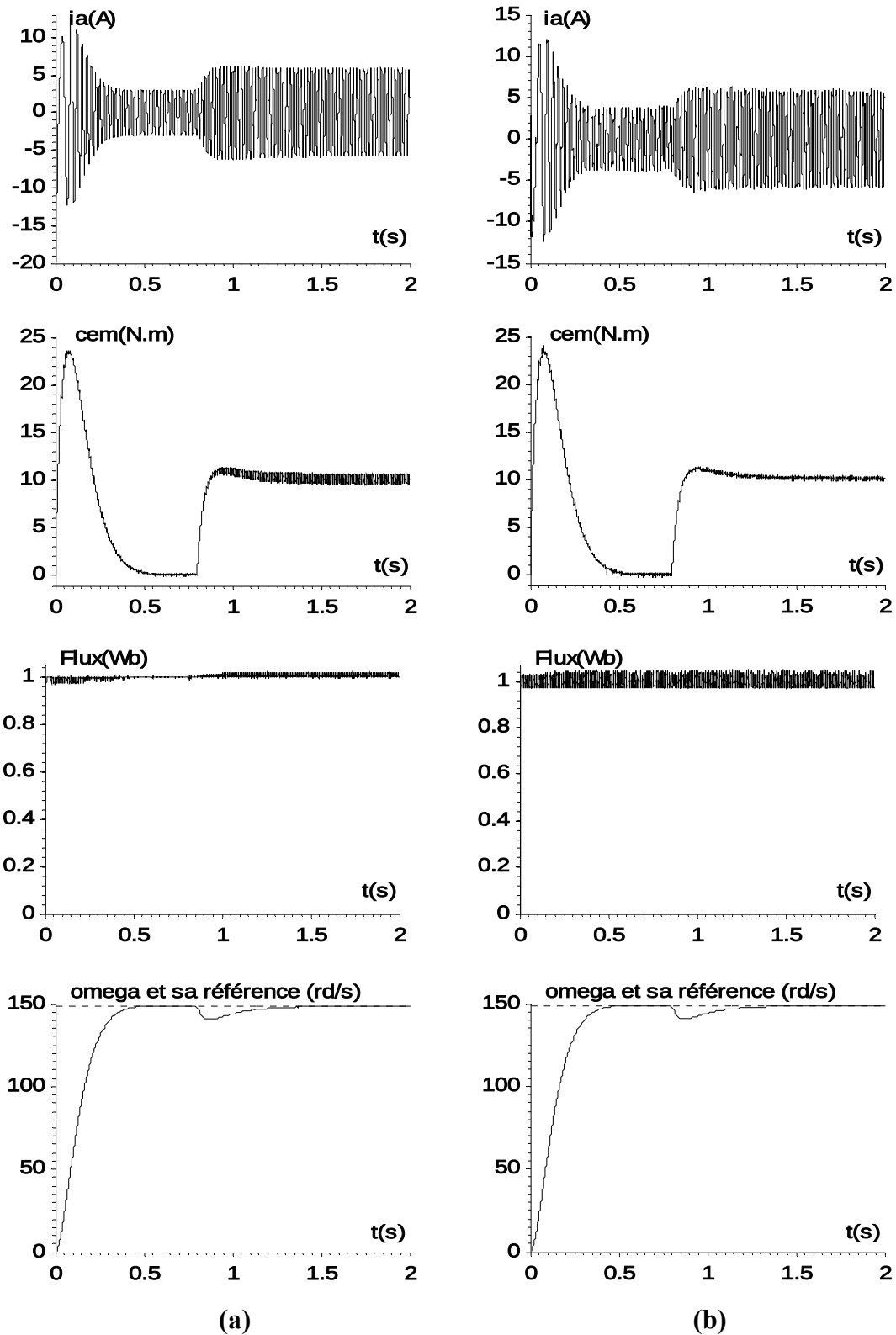


**Figure 2.17** Simulation du démarrage à vide puis application d'un couple nominal: courant de phase, couple, flux, vitesse de rotation et sa référence. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à deux tables.

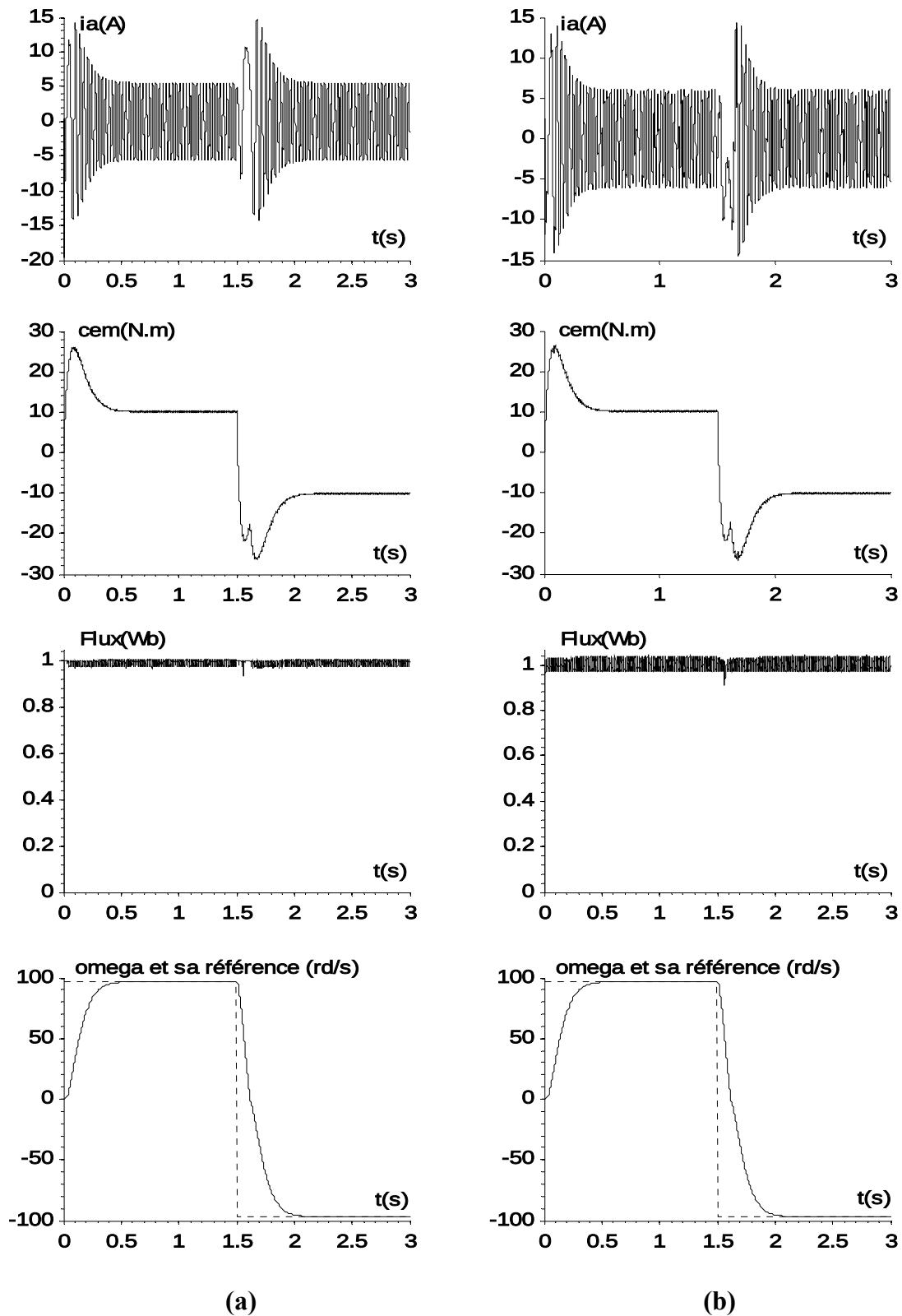


**Figure 2.18** Simulation du CDC de la machine asynchrone pour une inversion de la consigne de vitesse de 65% de la valeur nominale: courant de phase, couple, flux, vitesse de rotation et sa référence. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à deux tables.

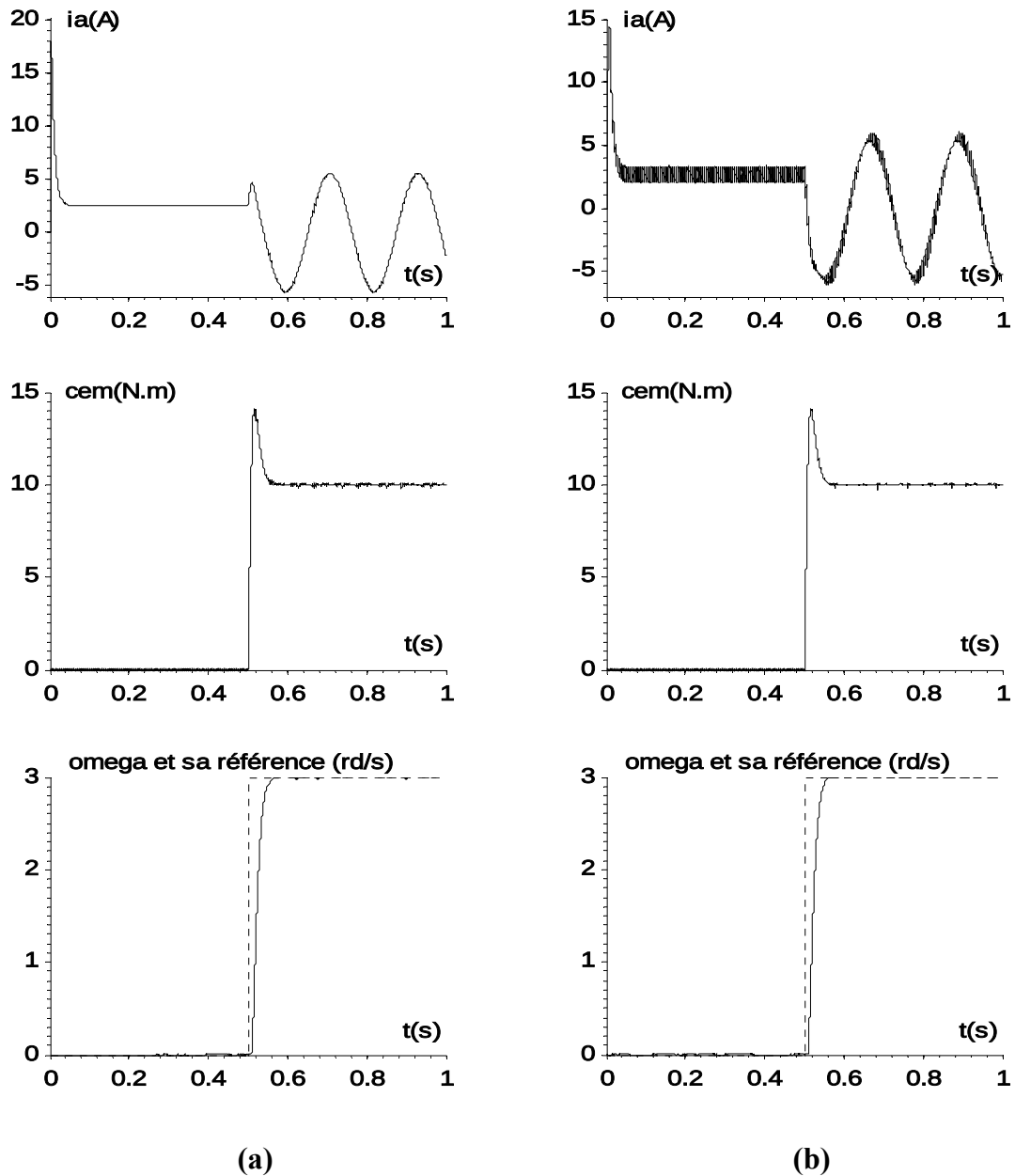


**Figure 2.19** Fonctionnement à basse vitesse: courant de phase, couple, vitesse de rotation et sa référence. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à deux tables.

## 2.4 CONTRÔLE DU POINT MILIEU DE L'ONDULEUR À 3-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC

Jusqu'à maintenant, nous avons supposé que les tensions continues d'entrée de l'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC sont constantes et égales. Or, ceci n'est pas vrai en

pratique et représente un inconvénient de taille pour ce type de topologie. De ce fait, de nombreux travaux ont été entrepris dans le but de stabiliser ces tensions [42]-[48].

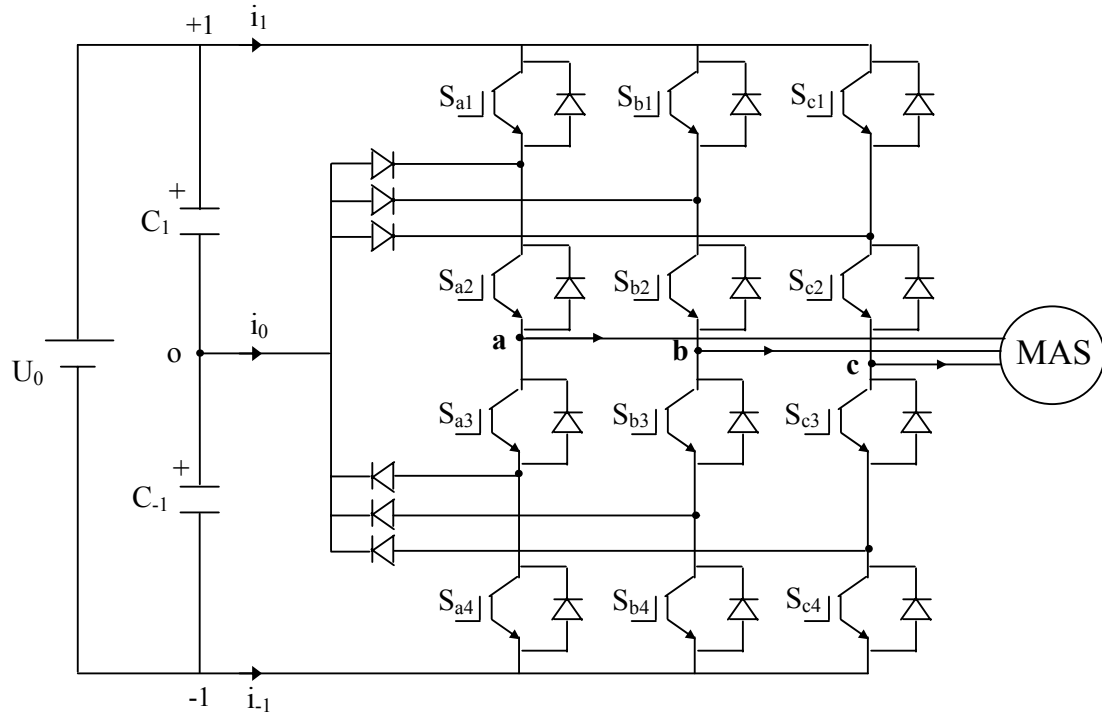


**Figure 2.20** Structure réelle de l'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC

Nous avons montré au paragraphe 2.2.2 que l'onduleur à 3-niveaux de tension (Tableau 2.1) présente une redondance de ces vecteurs de tension de sortie, de sorte qu'un vecteur peut être obtenu par plus d'une séquence des états des bras de l'onduleur. Cette propriété représente la base du contrôle de potentiel du point milieu de l'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC, donc des tensions aux bornes des condensateurs d'entrée de l'onduleur [49].

#### 2.4.1 INFLUENCE DES DIFFERENTS VECTEURS SUR LE POINT MILIEU DE L'ONDULEUR A 3-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC

On peut classer les vecteurs de tension, du point de vue de la stabilité du point milieu, et donc aussi de la stabilité des vecteurs de tension eux-mêmes, selon trois (3) catégories différentes (Tableaux 2.5) [50].

##### 2.4.1.1 VECTEURS DE TENSION INTRINSEQUEMENT STABLES

Ce sont les vecteurs que l'on retrouve dans un onduleur classique à 2-niveaux de tension.

On pense aux vecteurs de "tension nulle" et les vecteurs du groupe "pleine tension". Les séquences des états des bras qui les génèrent amènent à un courant nul du point milieu de l'onduleur.

**Tableau 2.5** Classification des vecteurs de tension suivant la stabilité du point milieu.

| Séquence   | $i_0$  | Séquence  | $i_0$  | Classification               |
|------------|--------|-----------|--------|------------------------------|
| (1,0,0)    | $+i_a$ | (0,-1,-1) | $-i_a$ | Stable<br>par<br>la commande |
| (1,1,0)    | $-i_c$ | (0,0,-1)  | $+i_c$ |                              |
| (0,1,0)    | $+i_b$ | (-1,0,-1) | $-i_b$ |                              |
| (0,1,1)    | $-i_a$ | (-1,0,0)  | $+i_a$ |                              |
| (0,0,1)    | $+i_c$ | (-1,-1,0) | $-i_c$ |                              |
| (1,0,1)    | $-i_b$ | (0,-1,0)  | $+i_b$ |                              |
| (1,0,-1)   | $-i_b$ | —         | —      | Instable                     |
| (0,1,-1)   | $-i_a$ | —         | —      |                              |
| (-1,1,0)   | $-i_c$ | —         | —      |                              |
| (-1,0,1)   | $-i_b$ | —         | —      |                              |
| (0,-1,1)   | $-i_a$ | —         | —      |                              |
| (1,-1,0)   | $-i_c$ | —         | —      |                              |
| (1,-1,-1)  | 0      | —         | —      | Intrinsèquement<br>stable    |
| (1,1,-1)   | 0      | —         | —      |                              |
| (-1,1,-1)  | 0      | —         | —      |                              |
| (-1,1,1)   | 0      | —         | —      |                              |
| (-1,-1,1)  | 0      | —         | —      |                              |
| (1,-1,1)   | 0      | —         | —      |                              |
| (0,0,0)    | 0      | —         | —      |                              |
| (1,1,1)    | 0      | —         | —      |                              |
| (-1,-1,-1) | 0      | —         | —      |                              |

#### 2.4.1.2 VECTEURS DE TENSION STABLES PAR LA COMMANDE

Ce sont des vecteurs dont la stabilité peut être assurée par la commande, en permutant d'une séquence des états des bras de l'onduleur à une autre donnant le même vecteur de tension, ce qui rend cette permutation transparente pour la charge. On pense aux vecteurs dits "demie tension". Chacun de ces vecteurs peut être appliqué à la charge en permanence.

#### 2.4.1.3 VECTEURS DE TENSION INSTABLES

Ces vecteurs sont générés par une séquence unique des états des bras de l'onduleur, chacun des bras étant à un potentiel différent, on pense aux vecteurs de tension du groupe "tension

intermédiaire". Ces vecteurs vont avoir un effet sur le potentiel du point milieu. Par contre, on ne peut pas savoir s'il va être de l'augmenter ou de le diminuer. Les deux condensateurs d'entrée  $C_1$  et  $C_{-1}$  sont tous les deux sollicités, contribuant à une variation du potentiel du point milieu dans le même sens tant que le sens du courant  $i_0$  ne change pas. Ces vecteurs ne pourront donc être appliqués continûment à la charge que pendant peu de temps, dépendant du dimensionnement du convertisseur.

#### **2.4.2 LA REDONDANCE BASE DU CONTROLE DU POINT MILIEU DE L'ONDULEUR A 3-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC**

L'existence des six (6) vecteurs de tension instables générés par l'onduleur à 3-niveaux de tension ne pose généralement pas de gros problèmes de stabilisation des tensions aux bornes des condensateurs, donc du point milieu de l'onduleur. Ces derniers étant en fait entourés par des vecteurs intrinsèquement stables ou stables par la commande (Figure 2.5). En effet, lors d'une commutation d'un vecteur instable à un autre intrinsèquement stable, les tensions aux bornes des condensateurs seront "maintenues" à leur niveau. D'autre part, lors d'une commutation à un vecteur stable par la commande, il est toujours possible de choisir une séquence des états des bras de l'onduleur qui contribue à la convergence du potentiel du point milieu vers sa référence  $\frac{U_0}{2}$ . Ainsi, dans le cas d'un onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC alimentant une machine asynchrone, la partie de l'algorithme relative à la commande machine peut à priori se faire indépendamment du contrôle du potentiel du point milieu. Le choix parmi les 19 possibilités du ou des vecteurs de tension à appliquer à la machine pendant une période d'échantillonnage donnée se fait en exploitant un premier degré de liberté de l'onduleur [28]. Le choix de la séquence des états des bras de l'onduleur, parmi toutes les possibilités associées à chaque vecteur de tension choisi, constitue un deuxième degré de liberté qui doit impérativement être utilisé pour la stabilisation des tensions aux bornes des condensateurs d'entrée de l'onduleur.

#### **2.4.3 L'ALGORITHME DE CONTROLE DU POINT MILIEU DE L'ONDULEUR A 3-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC**

Si on prend pour exemple les deux vecteurs de tension  $v_1$  et  $v_8$  qui appartiennent chacun à un des deux sous groupes formant le groupe "demie tension". Ils ont tous les deux la même action sur les grandeurs de contrôle que sont le flux statorique et le couple électromagnétique. Toutefois, ils ont des actions contraires sur la valeur du potentiel du point milieu de l'onduleur. La figure 2.21 illustre l'état des interrupteurs ainsi que la circulation des courants dans le cas où l'onduleur délivre ces deux tensions.

En effet, la séquence (1,0,0) donnant le vecteur de tension  $v_1$  fait intervenir le condensateur

$C_1$ , alors que la séquence (0,-1,-1) donnant  $v_8$  fait appel au condensateur  $C_{-1}$ . Comme la somme des tensions aux bornes des condensateurs est toujours à hauteur de la tension continue complète d'entrée de l'onduleur, on peut déduire que la première séquence contribue à une décharge de  $C_1$  (c'est-à-dire une augmentation du potentiel du point milieu), alors que la seconde séquence aboutit plutôt à une charge de ce même condensateur (c'est-à-dire une diminution du potentiel du point milieu). Faisant de même avec les vecteurs de tension restant du groupe "demie tension", on déduit le tableau suivant, donnant l'effet des différentes séquences des états des bras de l'onduleur sur le sens de variation de la tension aux bornes des condensateurs d'entrée de l'onduleur.

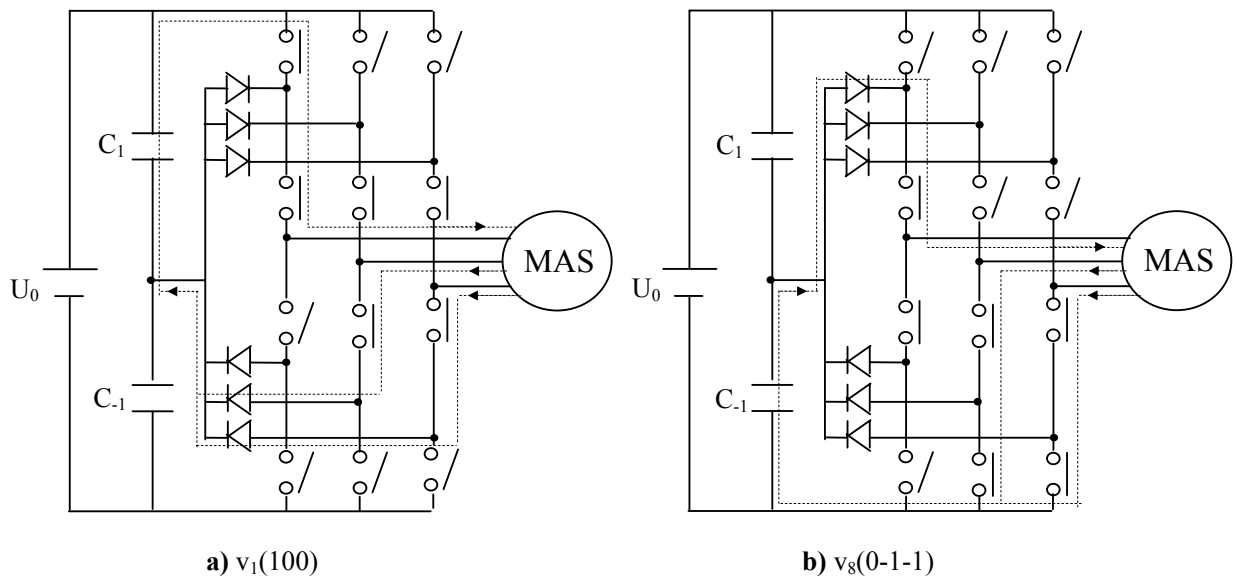


**Figure 2.21** Application des séquences des états des bras de l'onduleur appartenant à 2 sous groupes différents

**Tableau 2.6** Influence des différents vecteurs du groupe "demie tension" sur la tension des condensateurs d'entrée de l'onduleur.

| Vecteur de tension | $\Delta U_{C1}$ | $\Delta U_{C-1}$ | Vecteur de tension | $\Delta U_{C1}$ | $\Delta U_{C-1}$ |
|--------------------|-----------------|------------------|--------------------|-----------------|------------------|
| (1,0,0)            | —               | +                | (0,-1,-1)          | +               | —                |
| (1,1,0)            | —               | +                | (0,0,-1)           | +               | —                |
| (0,1,0)            | —               | +                | (-1,0,-1)          | +               | —                |
| (0,1,1)            | —               | +                | (-1,0,0)           | +               | —                |
| (0,0,1)            | —               | +                | (-1,-1,0)          | +               | —                |
| (1,0,1)            | —               | +                | (0,-1,0)           | +               | —                |

"+" évolution positive

"-" évolution négative

Grâce à cette propriété, on peut contrôler les variations du potentiel du point milieu en maintenant l'écart entre les tensions des deux condensateurs dans une bande d'hystérésis centrée autour de la valeur de référence qui est nulle.

Après avoir mesuré les tensions aux bornes des deux condensateurs, on va calculer l'écart (eq. 2-4) qui existe entre les deux et qui correspond au déséquilibre des charges des deux condensateurs  $C_1$  et  $C_{-1}$ .

$$\varepsilon_u = U_{C1} - U_{C-1} \quad (2-4)$$

Un régulateur à hystérésis simple suffit pour maintenir cette erreur dans une bande de largeur  $2\Delta U$  (Figure 2.22).

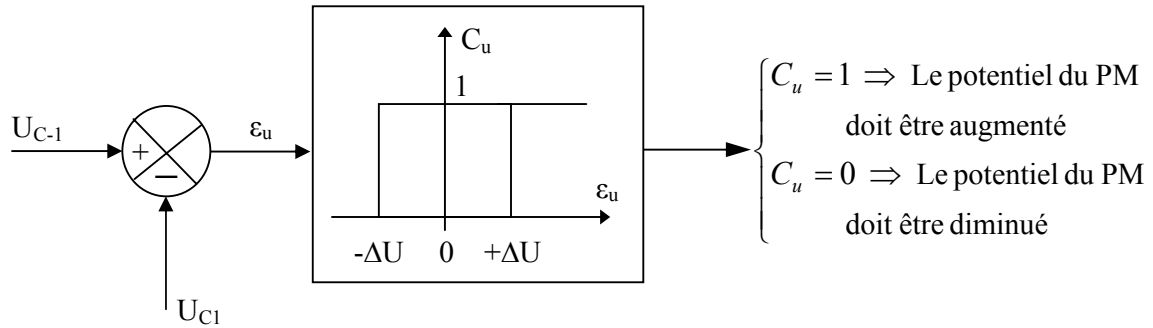


Figure 2.22 Contrôleur du potentiel du point milieu de l'onduleur

Si  $\varepsilon_u < -\Delta U$  ou si  $\varepsilon_u > \Delta U$ , cela signifie que le déséquilibre entre les deux condensateurs devient inacceptable dans un sens ou dans l'autre. Dans le premier cas, il va falloir imposer un vecteur de tension qui aura pour action d'augmenter la valeur du potentiel du point milieu de l'onduleur. Dans le second, on imposera plutôt un vecteur de tension qui aura pour action de le diminuer.

#### ▪ Mise en œuvre de l'algorithme

Les relations entre les tensions simples et les tensions aux bornes des condensateurs se mettent sous la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} & S_{a-1} \\ S_{b1} & S_{b-1} \\ S_{c1} & S_{c-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{c1} \\ U_{c-1} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

où  $S_{a1}$ ,  $S_{b1}$ ,  $S_{c1}$ ,  $S_{a-1}$ ,  $S_{b-1}$  et  $S_{c-1}$  représentent les états des demi bras de l'onduleur respectivement positifs et négatifs.

Les tensions aux bornes des condensateurs  $C_1$  et  $C_{-1}$  s'écrivent en fonction de la tension continue d'entrée  $U_0$  et l'écart  $\varepsilon_U$  du potentiel du point milieu:

$$\begin{cases} U_{C1} = \frac{U_0}{2} + \varepsilon_u \\ U_{C-1} = \frac{U_0}{2} - \varepsilon_u \end{cases} \quad (2-6)$$

On peut montrer que les courants  $i_1$  et  $i_{-1}$  s'écrivent en fonction des courants de phase comme suit:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_{-1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} S_{ab1} & S_{bc1} & S_{ca1} \\ S_{ab-1} & S_{bc-1} & S_{ca-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a - i_b \\ i_b - i_c \\ i_c - i_a \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

où  $S_{ab1} = S_{a1} - S_{b1}$ ,  $S_{ab-1} = S_{a-1} - S_{b-1}, \dots$

Dans le cas particulier de  $C_1 = C_{-1} = C$  et vu que  $i_0$  constitue la somme des courants  $i_1 = i_{-1}$ . Nous pouvons déduire la relation dynamique donnant  $\varepsilon_u$ :

$$i_0 = -2C \frac{d\varepsilon_u}{dt} \quad (2-8)$$

Combinant ces dernières relations, nous arrivons à l'expression finale liant l'erreur  $\varepsilon_u$  aux états des interrupteurs:

$$\frac{d\varepsilon_u}{dt} = -\frac{1}{6C} [S_{ab1} + S_{ab-1} S_{bc1} + S_{bc-1} S_{ca1} + S_{ca-1}] \times \begin{bmatrix} i_a - i_b \\ i_b - i_c \\ i_c - i_a \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

#### 2.4.4 APPLICATION AUX CAS DES TABLES DE COMMANDE ETABLIES

En reprenant les esquisses des tables de commande Tab31S et Tab33S et sur la base des concepts développés au paragraphe 2.4.2, on peut dès lors construire les tables de commande suivantes qui réaliseront la régulation en plus des grandeurs à contrôler qui sont le flux statorique et le couple électromagnétique, du potentiel du point milieu de l'onduleur.

Après avoir décidé du vecteur de l'hexagone interne qu'il faut imposer pour le contrôle du flux du flux, cette table choisit, en fonction de la sortie du contrôleur à hystérésis du potentiel du point milieu, l'une ou l'autre combinaison parmi les deux possibles pour réaliser le vecteur de tension.

**Tableau 2.7** Table de commande Tab31E utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone et assurant la stabilisation du point milieu de l'onduleur.  
Cas où les vitesses sont faibles

|          |            |               | S  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------|------------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | $C_U$         | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| 1        | +1         | 1             | 9  | 22 | 10 | 23 | 11 | 24 | 12 | 25 | 13 | 26 | 8  | 21 |
|          |            | 0             | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 | 6  | 26 | 1  | 21 |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 1             | 13 | 26 | 8  | 21 | 9  | 22 | 10 | 23 | 11 | 24 | 12 | 25 |
|          |            | 0             | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 |
|          | -1         | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 0        | +1         | 1             | 22 | 10 | 23 | 11 | 24 | 12 | 25 | 13 | 26 | 8  | 21 | 9  |
|          |            | 0             | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 1             | 25 | 13 | 26 | 8  | 21 | 9  | 22 | 10 | 23 | 11 | 24 | 12 |
|          |            | 0             | 25 | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  |
|          | -1         | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

Il est toute fois légitime de se demander si l'utilisation des vecteurs du groupe "tension intermédiaire" ne va pas être à l'origine de déséquilibre du potentiel du point milieu de l'onduleur. Ce problème se pose notamment dans le cas de la table de commande Tab32S. En effet, ces vecteurs relient chacun une phase machine au point o, l'évolution du potentiel du point milieu dépend alors du signe du courant  $i_0$  traversant le point milieu. Nous allons montrer que la table de commande en question assure le contrôle de ce potentiel par sa construction même (Tableau 2.9) [28].

Pour l'expliquer, nous allons raisonner sur le schéma donné en figure 2.23. Ce schéma représente les trois (3) courants de phase et le courant  $i_0$  traversant le point o lors d'un cycle du vecteur flux statorique.

Selon le découpage de l'espace et la construction de la table de commande, chaque vecteur du groupe "tension intermédiaire" est appliqué dans un secteur de  $\frac{\pi}{3}$ . Nous remarquons alors que le courant  $i_0$  sera périodique.

**Tableau 2.8** Table de commande Tab33E utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone et assurant la stabilisation du point milieu de l'onduleur.

|          |            |               | S  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------|------------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | $C_U$         | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| +1       | +2         | 1             | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 |
|          |            | 0             | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 |
|          | +1         | 1             | 21 | 9  | 22 | 10 | 23 | 11 | 24 | 12 | 25 | 13 | 26 | 8  |
|          |            | 0             | 21 | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 | 6  | 26 | 1  |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 1             | 26 | 8  | 21 | 9  | 22 | 10 | 23 | 11 | 24 | 12 | 25 | 13 |
|          |            | 0             | 26 | 1  | 21 | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 | 6  |
|          | -2         | 1             | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 |
|          |            | 0             | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 |
| -1       | +2         | 1             | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 |
|          |            | 0             | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 |
|          | +1         | 1             | 10 | 23 | 11 | 24 | 12 | 25 | 13 | 26 | 8  | 21 | 9  | 22 |
|          |            | 0             | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  | 22 |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 1             | 12 | 25 | 13 | 26 | 8  | 21 | 9  | 22 | 10 | 23 | 11 | 24 |
|          |            | 0             | 5  | 25 | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 |
|          | -2         | 1             | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 |
|          |            | 0             | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 |
| 0        | +2         | 1             | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 |
|          |            | 0             | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 |
|          | +1         | 1             | 22 | 10 | 23 | 11 | 24 | 12 | 25 | 13 | 26 | 8  | 21 | 9  |
|          |            | 0             | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  | 25 | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 1             | 25 | 13 | 26 | 8  | 21 | 9  | 22 | 10 | 23 | 11 | 24 | 12 |
|          |            | 0             | 25 | 6  | 26 | 1  | 21 | 2  | 22 | 3  | 23 | 4  | 24 | 5  |
|          | -2         | 1             | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 |
|          |            | 0             | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 |

**Tableau 2.9** Table de commande Tab32E utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone et assurant la stabilisation du point milieu de l'onduleur.  
Cas où les vitesses sont élevées

|          |            |               | S  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------|------------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | $C_U$         | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| 1        | +1         | 1             | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 |
|          |            | 0             | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 1             | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 |
|          |            | 0             | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 |
| 0        | +1         | 1             | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 |
|          |            | 0             | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 1             | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 |
|          |            | 0             | 25 | 20 | 26 | 15 | 21 | 16 | 22 | 17 | 23 | 18 | 24 | 19 |

Pour illustrer ça, prenons l'exemple de l'application des deux vecteurs  $v_{23}$  et  $v_{24}$ .

Les trois (3) courants de phase s'expriment de la façon suivante:

$$\begin{cases} i_a(t) = I_{\max} \cdot \sin(\omega_s t - \psi_0) \\ i_b(t) = I_{\max} \cdot \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} - \psi_0\right) \\ i_c(t) = I_{\max} \cdot \sin\left(\omega_s t - \frac{4\pi}{3} - \psi_0\right) \end{cases} \quad (2-10)$$

Si à  $t=t_1$ , on doit appliquer  $v_{23}$ , alors le vecteur suivant  $v_{24}$  sera appliqué à l'instant  $t_1 + \frac{\tau_s}{6}$ .

Quand  $v_{23}$  est appliqué, la phase c est reliée au point o et donc:

$$i_0(t_1) = i_c(t_1) = I_{\max} \sin\left(\omega_s t_1 - \frac{4\pi}{3} - \psi_0\right) \quad (2-11)$$

Quand  $v_{24}$  est appliqué, la phase b est reliée au point o et donc:

$$i_0\left(t_1 + \frac{\tau_s}{6}\right) = i_b\left(t_1 + \frac{\tau_s}{6}\right) = I_{\max} \sin\left(\omega_s \left(t_1 + \frac{\tau_s}{6}\right) - \frac{2\pi}{3} - \psi_0\right) \quad (2-12)$$

Ou encore:

$$i_0\left(t_1 + \frac{\tau_s}{6}\right) = I_{\max} \sin\left(\omega_s t_1 - \frac{\pi}{3} - \psi_0\right) = -i_c(t_1) \quad (2-13)$$

De ce qui précède et selon le signe du courant  $i_0$ , ce dernier traverse l'un ou l'autre des deux condensateurs car lors de l'application d'un vecteur de "tension intermédiaire", on a toujours une phase reliée à l'état haut et une phase reliée à l'état bas. Comme on vient de le montrer, sur une demie période,  $i_0$  est positif et sur l'autre demie période il est négatif, les quantités de courant mises en jeu à chaque demie période sont les mêmes, on peut conclure donc que la variation du potentiel du point milieu de l'onduleur est nulle sur une période.

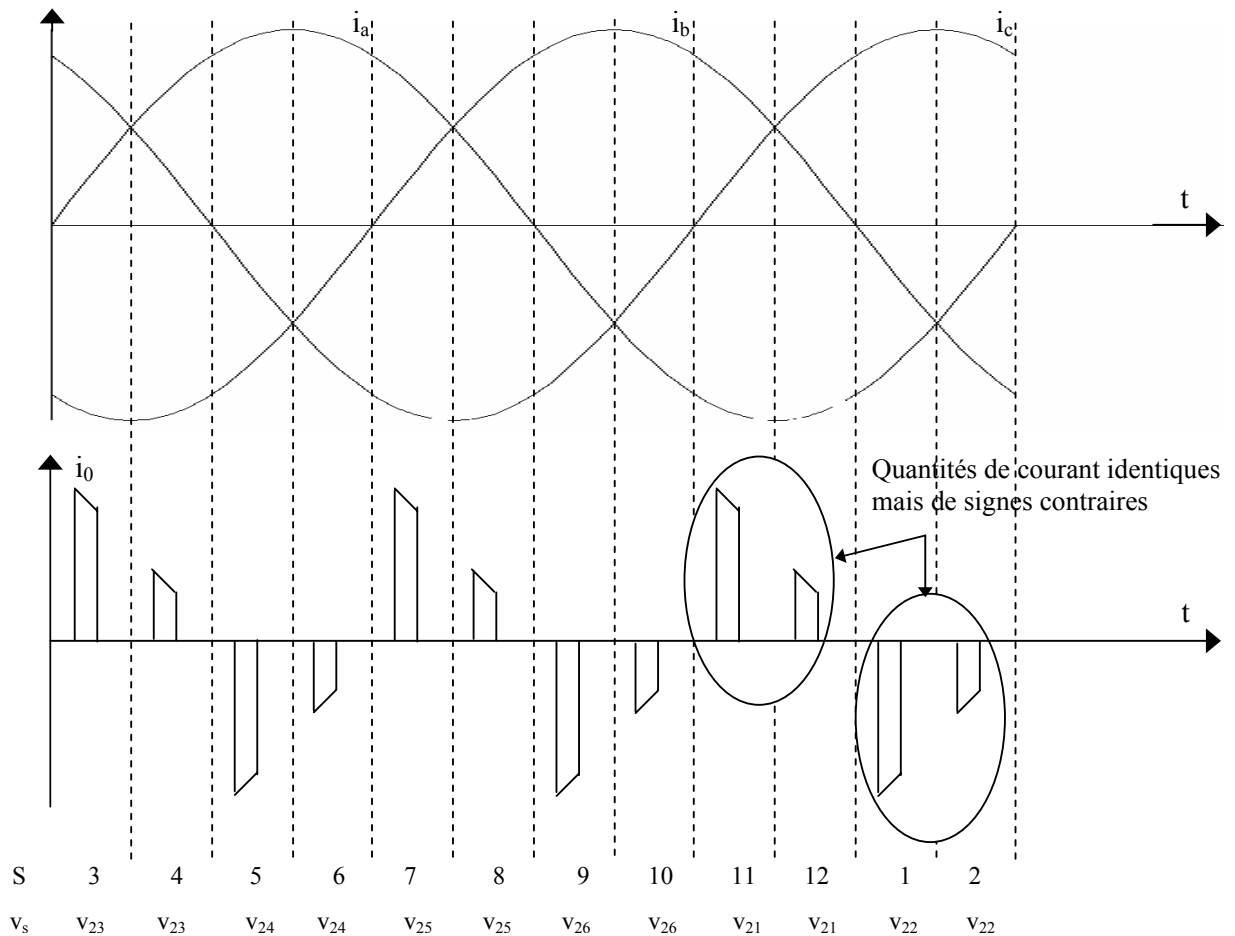


**Figure 2.23** Régulation du potentiel du point milieu par l'usage des vecteurs dits "instables"

### 2.4.5 SCHEMA GLOBAL DE CONTROLE

Le schéma général du contrôle direct du couple de la machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC ainsi finalisé est représenté sur la figure 2.24.

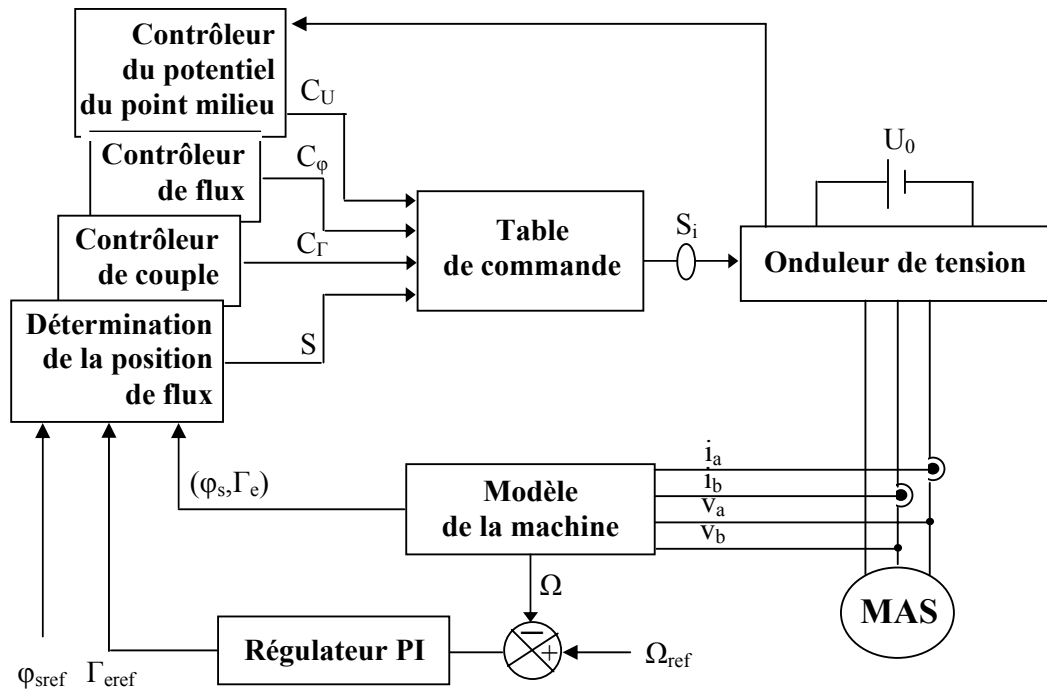


**Figure 2.24** Structure du contrôle direct du couple d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC

Les contrôleurs de flux et de couple sont réalisés de la façon suivante:

- Pour le contrôle de flux: On applique à l'écart entre les valeurs estimée et de référence du flux, une fonction d'hystérésis entrée sur la référence et de largeur maximale  $2\Delta\varphi_s$ . Le niveau de cette fonction est dicté par la table de commande utilisée. La sortie du bloc d'hystérésis nous indique s'il faut agir de sorte à augmenter ou diminuer le module du flux statorique de la machine.
- Pour le contrôle du couple: La même procédure est utilisée, la largeur de bande d'hystérésis est  $2\Delta\Gamma_e$ . Le bloc d'hystérésis est plus performant, sa sortie nous permet de déterminer s'il faut agir de sorte à augmenter ou diminuer la valeur du couple électromagnétique de la machine et ceci quelque soit le sens de rotation de la machine. La référence du couple est obtenue par régulation de la vitesse mécanique. Le démarrage de la machine est effectué grâce à la table Tab31E, on utilisera la table Tab32E par la suite. La table Tab33E peut être utilisée à toute vitesse de rotation inférieure à la vitesse nominale de la machine.

### 2.4.6 SIMULATIONS

Si on décidait de n'utiliser que les vecteurs de tension d'un seul des deux sous groupes formant le groupe demi tension par exemple le second, le contrôle direct du couple de la machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux de tension devient alors équivalent au contrôle direct du couple de la machine asynchrone alimentée par un onduleur à deux niveaux de tension où la tension continue d'entrée est la tension aux bornes du condensateur  $C_{-1}$ . Donc, un déséquilibre se produit entre les tensions  $U_{C1}$  et  $U_{C-1}$ , résultat illustré par la figure 2.25. La valeur de la capacité  $C_i$  ( $i=-1,1$ ) étant de l'ordre de 3.9mF. On peut donc affirmer qu'il n'est pas possible de contrôler la machine en n'utilisant que les vecteurs de tension d'un seul sous groupe.

La figure 2.26 illustre le contrôle du potentiel du point milieu de l'onduleur. La largeur de tolérance de tension des condensateurs d'entrée de l'onduleur  $\Delta U$  est de l'ordre de 3%. L'essai a été réalisé grâce à l'application de la table Tab33E pour la stratégie à une table unique et des tables Tab31E et Tab32E pour la stratégie à deux tables de commande, qui permet le contrôle en plus du flux et du couple, du potentiel du point milieu.

On constate que l'évolution du potentiel du point milieu est bien différente si on appliquait ou pas les vecteurs du groupe "demie tension", comme le montre bien les variations de l'écart entre les tensions des deux condensateurs  $U_{C1}$  et  $U_{C-1}$ . En effet, le maintien de l'égalité entre ces deux tensions est forcé par un comparateur à hystérésis défini selon la figure 2.17. Le courant  $i_0$  traversant le point milieu de l'onduleur est d'ailleurs très différent dans ces deux cas, les caractéristiques de symétrie présentées par ce courant est plus évidente quand le comparateur est fonctionnel.

## 2.5 CONCLUSION

En plus des variétés de glissement choisies pour le couple et le flux dans le cas d'une alimentation par un onduleur classique, qui sont les erreurs existantes entre les grandeurs à contrôler et les valeurs de référence qu'elles doivent suivre, l'alimentation par un onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC nécessite une surface de glissement supplémentaire qui doit permettre le contrôle du potentiel du point milieu de l'onduleur de type NPC. On choisit d'assurer l'égalité entre les deux tensions de condensateurs d'entrée de l'onduleur. L'organe de commutation choisi dans tous les cas est un comparateur à hystérésis. L'apport de notre étude se trouve dans le développement de trois tables de commande pour l'application du contrôle de la MAS alimentée par un onduleur à 3-niveaux de tension.

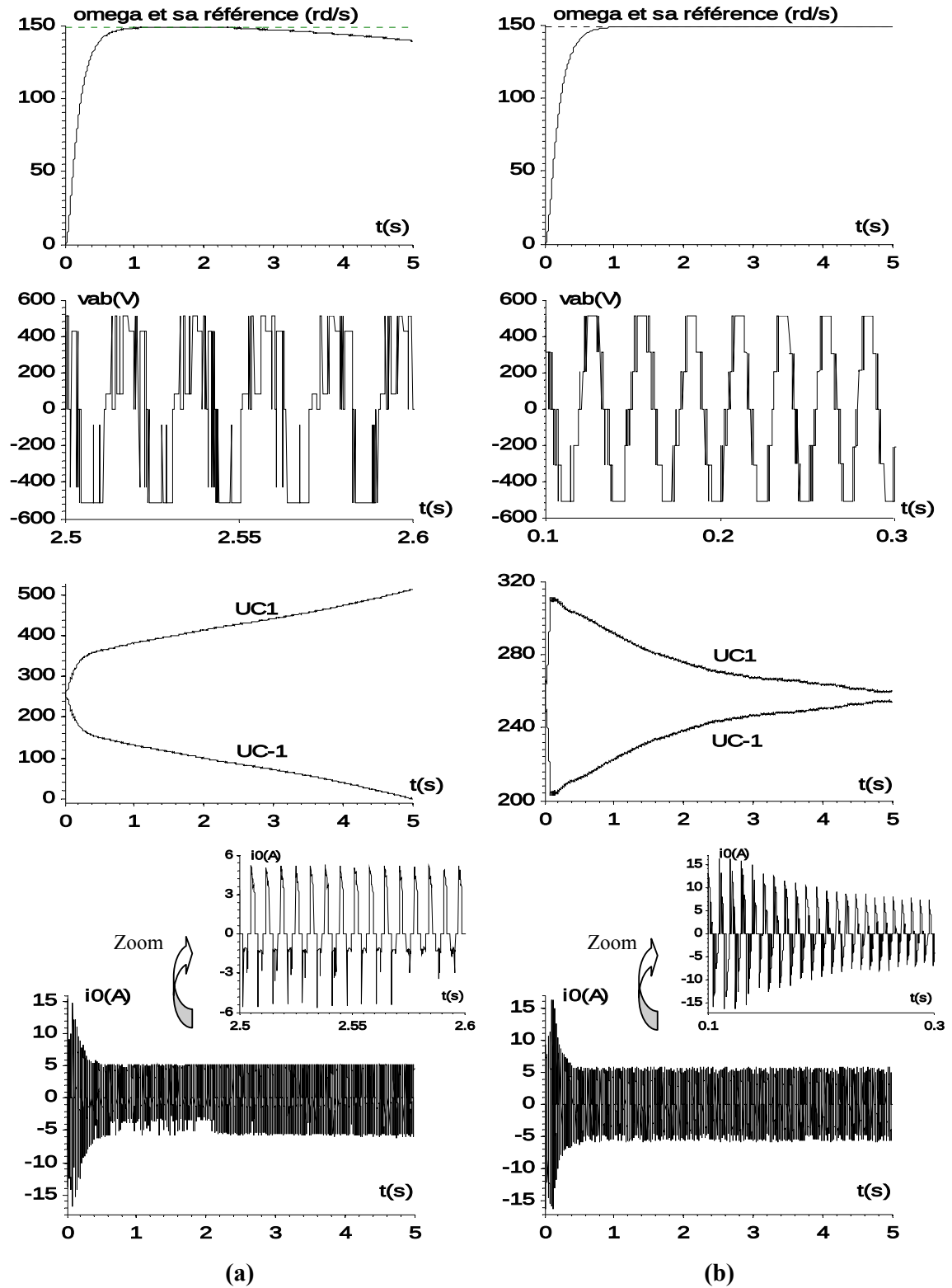


**Figure 2.25** Nécessité du contrôle du point milieu de l'onduleur lors de l'application des vecteurs du groupe "demi tension": vitesse de rotation et sa référence, tension de ligne, tensions de condensateurs ( $U_{C1}$ ,  $U_{C-1}$ ) et courant de potentiel du point milieu. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à deux tables.

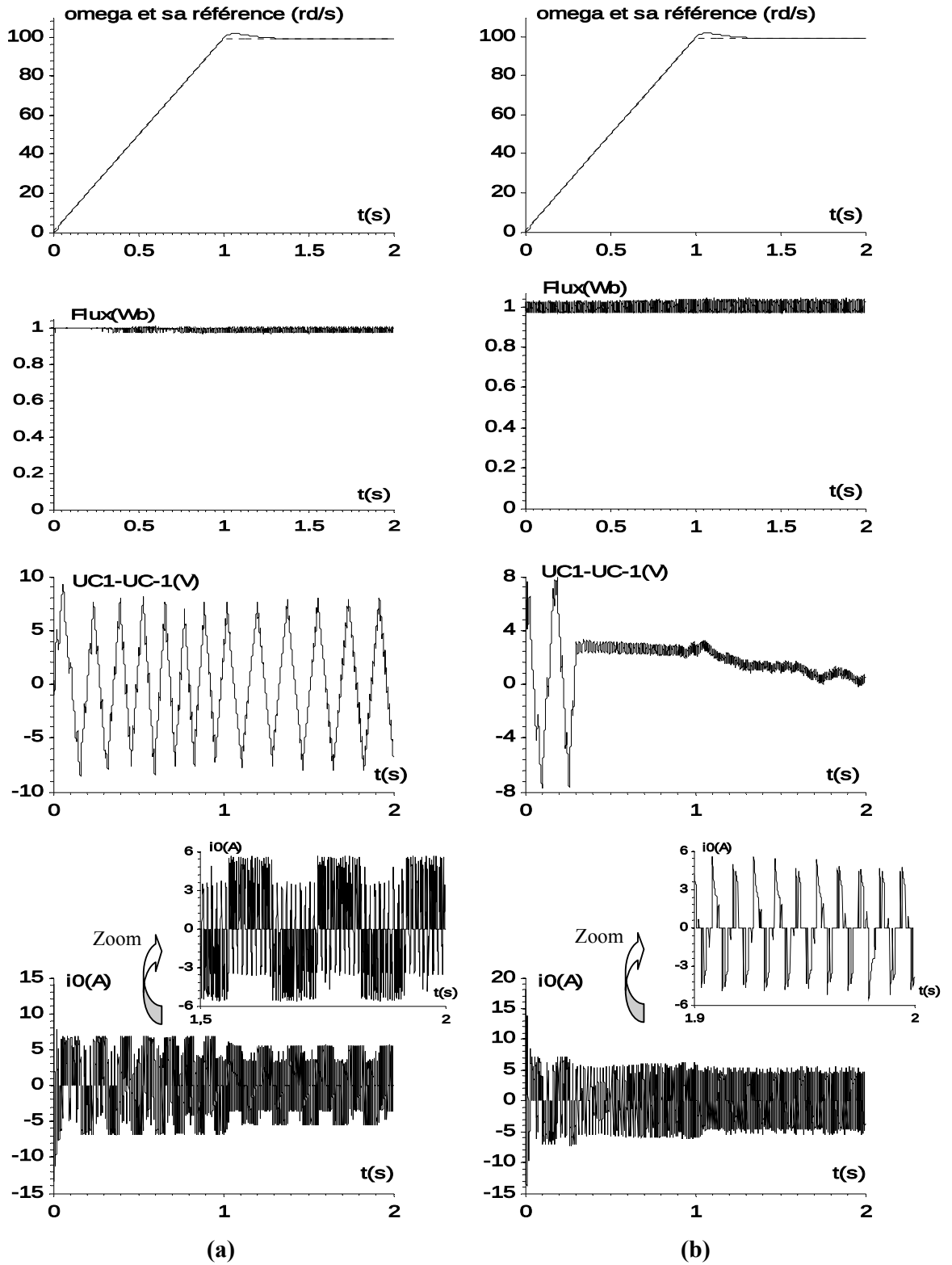


**Figure 2.26** Régulation du potentiel du point milieu de l'onduleur: vitesse de rotation et sa référence, tension de ligne, tensions de condensateurs ( $U_{C1}, U_{C-1}$ ) et courant de potentiel du point milieu. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à deux tables.

## CHAPITRE 3

# CONTROLE DIRECT DU COUPLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE ALIMENTEE PAR UN ONDULEUR A 5-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC

### 3.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre deux, nous avons étudié le contrôle direct du couple d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3-niveaux de tension, nous avons vu que ce dernier permet d'augmenter la tension délivrée à la charge grâce à sa topologie. Une tension la plus sinusoïdale possible est générée et un faible taux d'harmonique est obtenu. Partant de cet ordre idée, un onduleur multiniveaux de niveau supérieur est utilisé dans ce présent chapitre en l'occurrence l'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC. Les travaux de recherche sur ce sujet sont légions [51]-[57], pour n'en citer que quelques uns. Cet onduleur permet des combinaisons de ses interrupteurs bien plus nombreuses que celles obtenues pour l'onduleur à 3-niveaux ou encore l'onduleur classique à 2-niveaux de tension. Plusieurs tables de commande peuvent être construites ayant chacune ces avantages et ces inconvénients. Dans le cadre de notre étude, deux stratégies de contrôle basées respectivement sur une table unique et sur plusieurs tables de commande ont été envisagées et plusieurs tables ont été élaborées.

Comme pour l'onduleur à 3-niveaux de tension, l'utilisation de la structure dite NPC nécessite un contrôle du potentiel du point milieu en plus du contrôle du flux statorique et du couple électromagnétique de la machine.

L'étude de performance du CDC appliquée à une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 5-niveaux de tension permettra d'évaluer l'apport de niveaux de tension supplémentaire dans l'alimentation en tension des machines asynchrones.

### 3.2 L'ONDULEUR A 5-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC

#### 3.2.1 STRUCTURE

L'onduleur triphasé à 5-niveaux de tension de type NPC se compose de trois (3) bras symétriques constitués chacun de six (6) interrupteurs en séries et deux autres en parallèle, plus deux diodes permettant l'obtention du zéro de la tension  $v_{io}$  ( $i=a,b,c$ ). Chaque interrupteur est composé d'un interrupteur bicommandable (soit l'IGBT) et d'une diode montée en tête bêche. Quatre (4) condensateurs  $C_i$  ( $i=-2,-1,1,2$ ) se partagent la tension

continue  $U_0$  pour donner quatre sources distinctes de tension  $\frac{U_0}{4}$  [58].

La représentation schématique de cet onduleur est donnée par la figure 3.1.

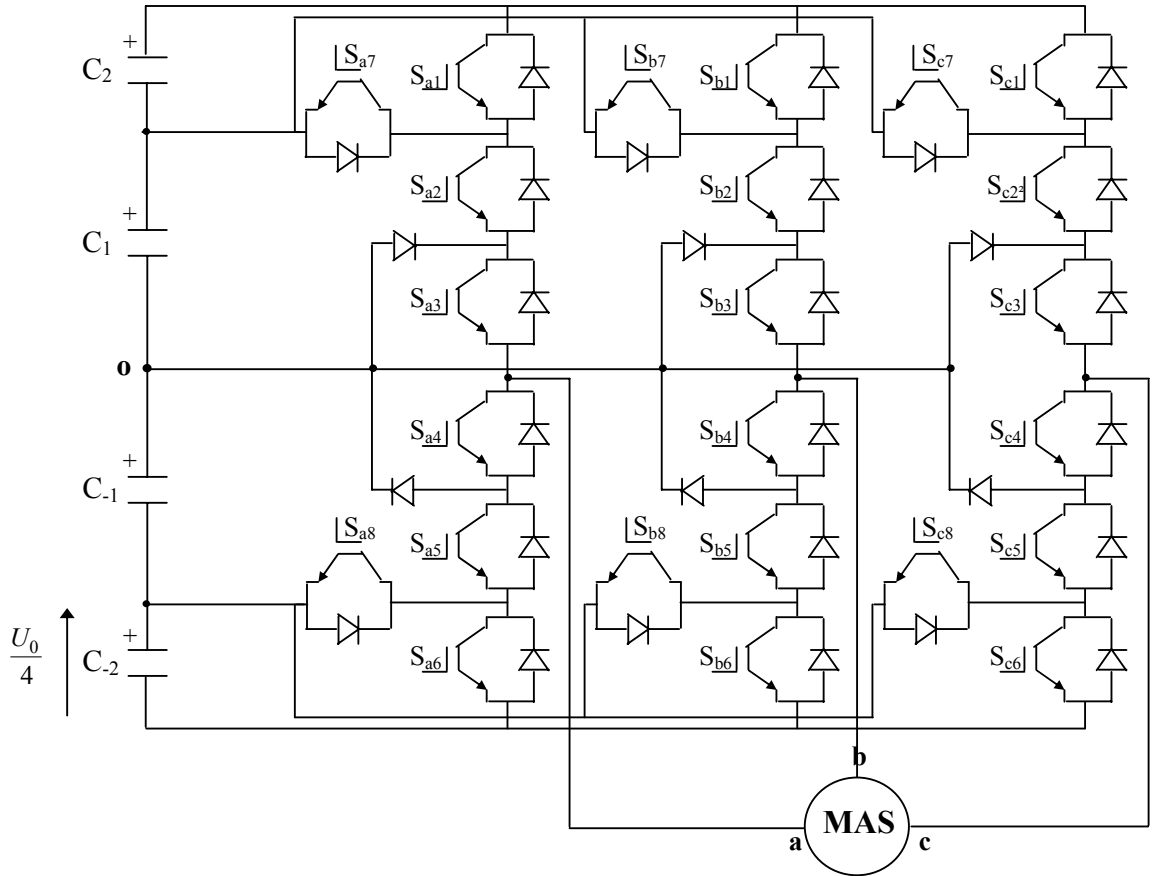


**Figure 3.1** Structure de l'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC

### 3.2.2 DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS D'UN BRAS D'ONDULEUR A 5-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC

Vu la symétrie de la structure de l'onduleur triphasé à 5-niveaux de tension de type NPC, la modélisation de ce dernier se fait par bras (Figure 3.2).

Une analyse topologique d'un bras de l'onduleur triphasé à 5-niveaux de tension montre qu'il existe sept (7) configurations possibles, comme le montre la figure 3.3.

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont représentées dans le tableau 3.1. Pour la configuration (0), la tension  $v_{io}$  dépend de la charge connectée à l'onduleur.

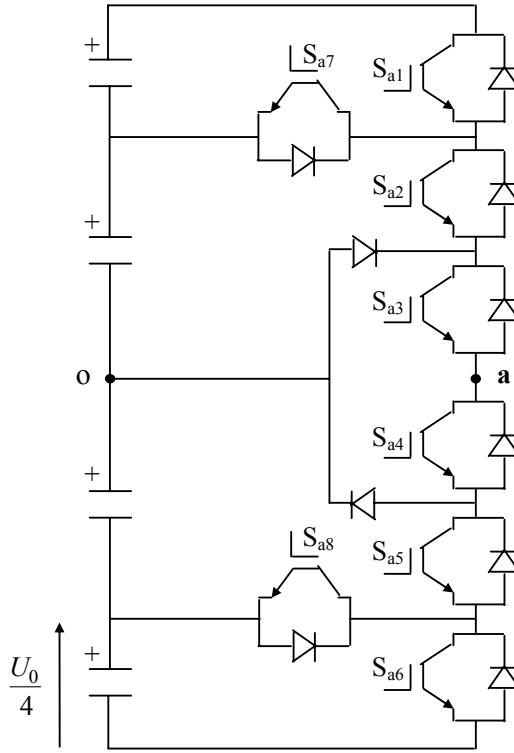


**Figure 3.2** Structure d'un bras de l'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC

Le tableau 3.2 représente la table d'excitation des interrupteurs d'un bras  $i$  ( $i=a,b,c$ ) de l'onduleur à 5-niveaux de tension.

La tension inverse supportée par les interrupteurs bloqués vaut  $\frac{U_0}{4}$ . Soit la moitié de celle appliquée dans le cas de l'onduleur à 3-niveaux de tension ou encore le quart de celle appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués d'un onduleur classique à 2-niveaux.

On définit alors les trois (3) grandeurs booléennes de commande  $S_i$  ( $i=a,b,c$ ) de la manière suivante:

$$\left\{ \begin{array}{l} (S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4}, S_{i5}, S_{i6}) = (1, 1, 1, 0, 0, 0) \Rightarrow S_i = +2 \\ (S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4}, S_{i5}, S_{i6}) = (0, 1, 1, 0, 0, 0) \Rightarrow S_i = +1 \\ \left. \begin{array}{l} (S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4}, S_{i5}, S_{i6}) = (0, 0, 0, 1, 0, 0) \\ (S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4}, S_{i5}, S_{i6}) = (0, 0, 1, 0, 0, 0) \end{array} \right\} \Rightarrow S_i = 0 \\ (S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4}, S_{i5}, S_{i6}) = (0, 0, 0, 1, 1, 0) \Rightarrow S_i = -1 \\ (S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4}, S_{i5}, S_{i6}) = (0, 0, 0, 1, 1, 1) \Rightarrow S_i = -2 \end{array} \right. \quad (3-1)$$

La figure 3.4 donne un aperçu des formes d'ondes de la tension simple  $v_{io}$  ( $i=a,b,c$ ) ainsi que les signaux de commande des interrupteurs formant le bras de l'onduleur.

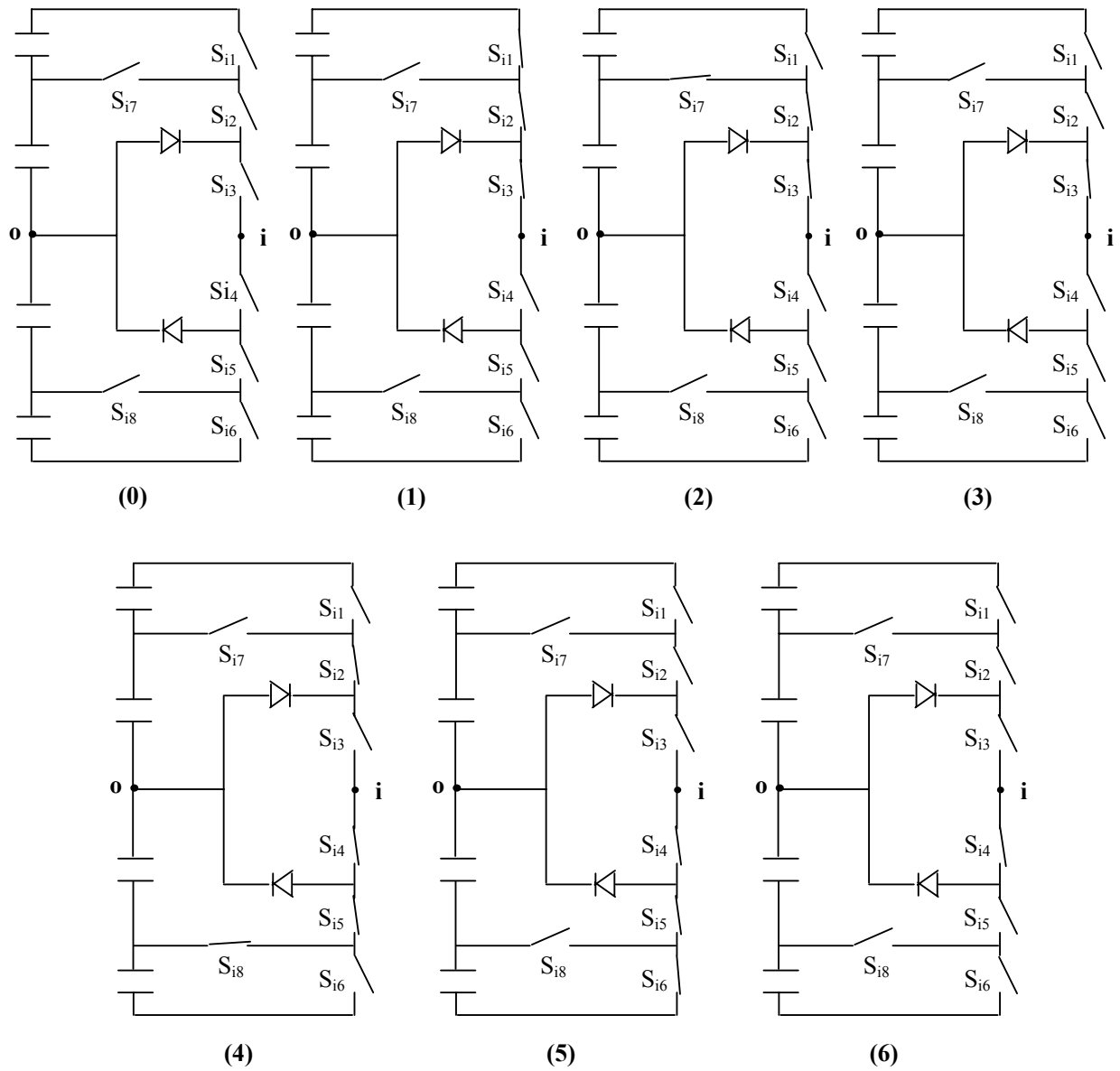


**Figure 3.3** Différentes configurations pour un bras i de l'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC

Les tensions simples par rapport au point o s'écrivent:

$$v_{io} = S_i \cdot \frac{U_0}{4} \quad i=a,b,c \quad (3-2)$$

**Tableau 3.1** Grandeurs électriques correspondantes aux configurations d'un bras i  
de l'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC

| Configuration | Grandeurs électriques                            |
|---------------|--------------------------------------------------|
| 0             | $i_i=0$ : $v_{io}$ dépend de la charge           |
| 1             | $v_{io} = U_{C1} + U_{C2} = \frac{U_0}{2}$       |
| 2             | $v_{io} = U_{C2} = \frac{U_0}{4}$                |
| 3             | 0                                                |
| 4             | $v_{io} = -U_{C-1} = -\frac{U_0}{4}$             |
| 5             | $v_{io} = -(U_{C-1} + U_{C-2}) = -\frac{U_0}{2}$ |
| 6             | 0                                                |

**Tableau 3.2** Table d'excitation des interrupteurs de l'onduleur  
à 5-niveaux de tension de type NPC

| $S_{i1}$ | $S_{i2}$ | $S_{i3}$ | $S_{i4}$ | $S_{i5}$ | $S_{i6}$ | $v_{io}$         |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------|
| 1        | 1        | 1        | 0        | 0        | 0        | $+\frac{U_0}{2}$ |
| 0        | 1        | 1        | 0        | 0        | 0        | $+\frac{U_0}{4}$ |
| 0        | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 0                |
| 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        | 0                |
| 0        | 0        | 0        | 1        | 1        | 0        | $-\frac{U_0}{4}$ |
| 0        | 0        | 0        | 1        | 1        | 1        | $-\frac{U_0}{2}$ |

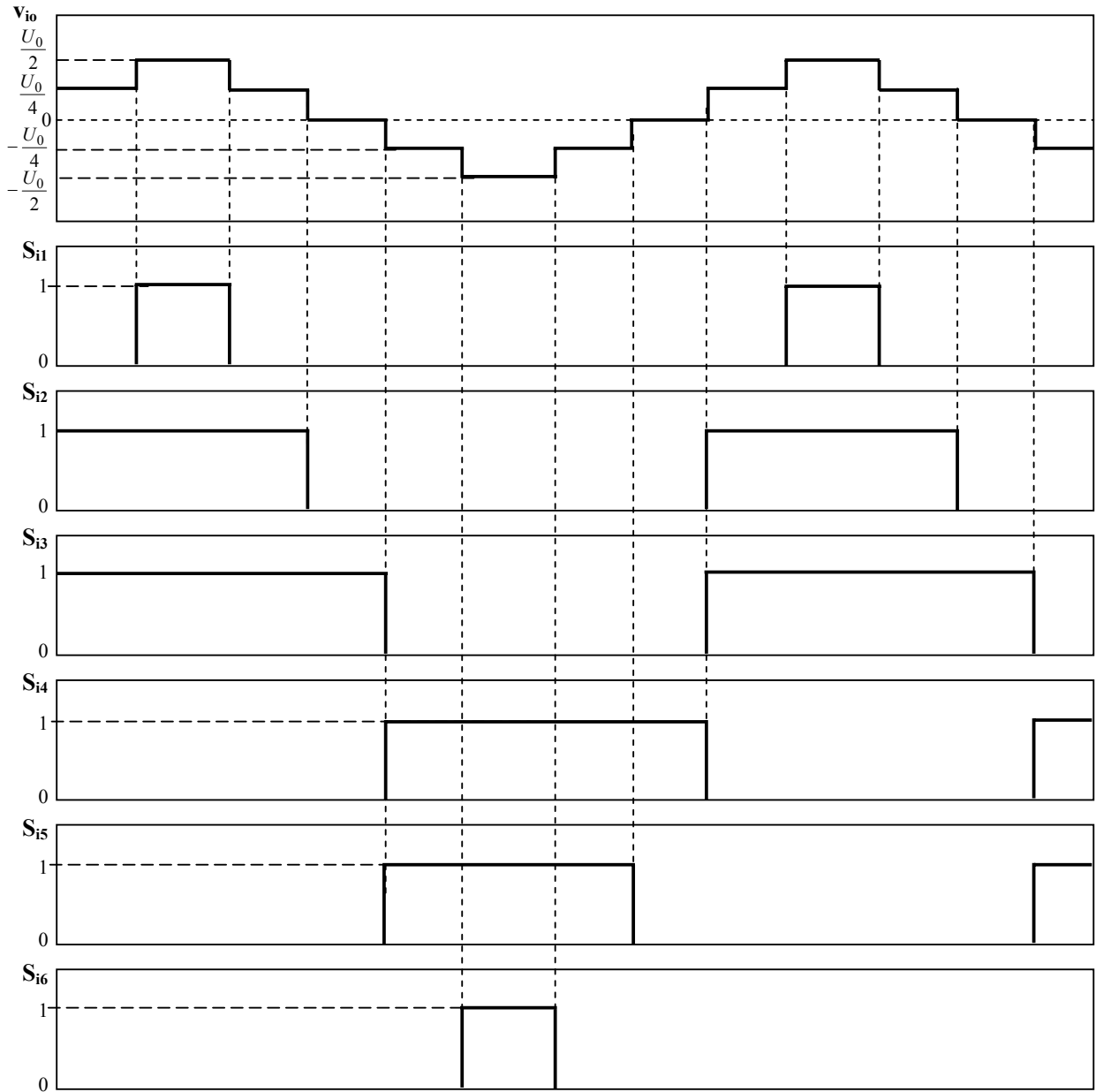


**Figure 3.4** Différentes formes d'onde d'un bras de l'onduleur à 5-niveaux de type NPC

Aussi:

$$\begin{cases} v_{aN} = \frac{U_0}{12} (2S_a - S_b - S_c) \\ v_{bN} = \frac{U_0}{12} (2S_b - S_a - S_c) \\ v_{cN} = \frac{U_0}{12} (2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (3-3)$$

L'expression de la tension de sortie  $v_s$  de l'onduleur énoncée en (1-16) restant toujours valable.

Les combinaisons des états des trois (3) bras de l'onduleur nous permettent de donner en équilibre 61 valeurs différentes au vecteur de tension  $v_s$  (Figure 3-5), défini toujours par (eq. 1-16) et correspondant à 125 séquences de ces états.

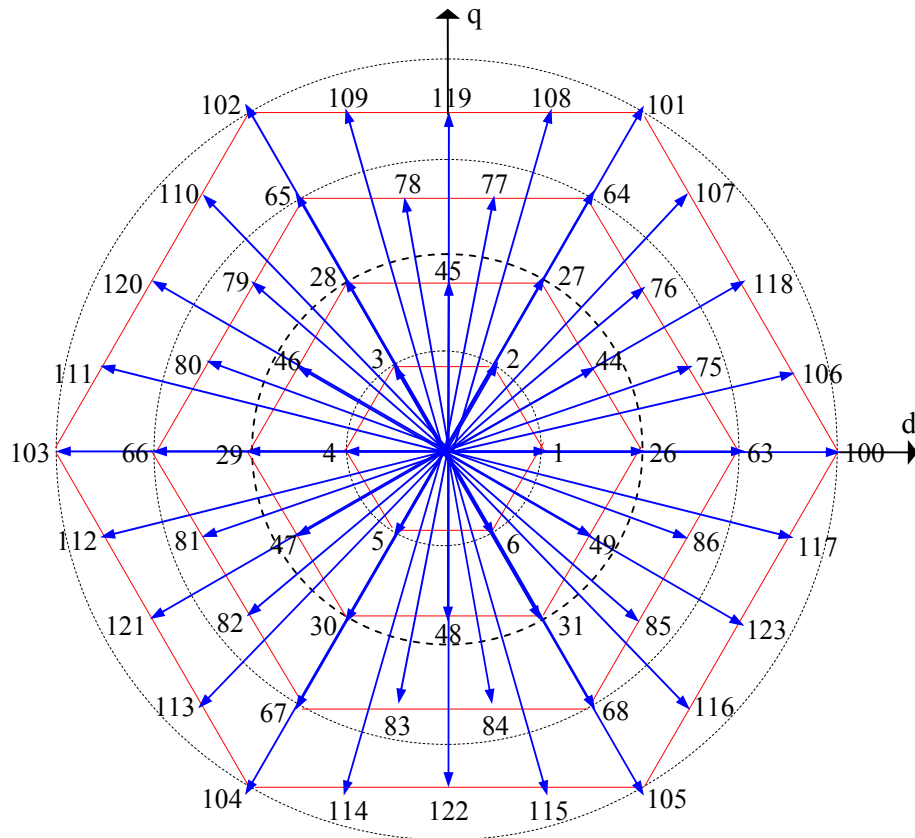


**Figure 3.5** Vecteurs de tension fournis par l'onduleur à 5-niveaux de tension

On peut classer cet ensemble de vecteurs de tension selon leur amplitude, en neuf (9) groupes. Le tableau 3.3 montre l'amplitude de ces vecteurs ainsi que les séquences correspondantes des états des interrupteurs.

### 3.3 APPLICATION DU CDC AU CONTRÔLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE ALIMENTÉE PAR UN ONDULEUR A 5-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC

Afin de réaliser le contrôle direct du flux statorique et du couple électromagnétique de la machine asynchrone alimentée par un onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC [59],

nous devons élaborer de nouvelles tables de commande. Les tensions continues aux bornes des condensateurs sont supposées en état d'équilibre et valent  $\frac{U_0}{4}$ .

### 3.3.1 ÉLABORATION DES TABLES DE COMMANDE

Vu que le choix du vecteur de tension est dicté par le sens de variation voulu pour le module du flux statorique et le couple électromagnétique et vu le grand nombre de vecteurs de tension délivré par l'onduleur à 5-niveaux de tension, on a été amené à exploiter les deux stratégies de contrôle exposées au chapitre 2 afin de développer nos tables de commande. Aussi, nous optons dans tout les cas de figure à un découpage de l'espace en douze (12) secteurs (Figure 2.7).

#### 3.3.1.1 STRATEGIE A PLUSIEURS TABLES DE COMMANDE

La vitesse du vecteur flux statorique est donnée par le module du vecteur de tension appliqué. De ce fait, le choix de ce dernier se fait sur la base de la connaissance de la vitesse de rotation de la machine [60]. En résumé, pour les vitesses faibles on choisit des vecteurs de tension de faible amplitude et des vecteurs de tension de grande amplitude sont utilisés dans le cas de vitesses élevées [51]. Cette logique a été déjà appliquée dans le cas d'une alimentation à 3-niveaux de tension.

Sachant que l'onduleur à 5-niveaux de tension fournit 61 vecteurs de tension, quatre (4) tables de commande sont alors construites, chacune valable dans une bande de vitesse bien définie.

##### A) CAS OU $\Omega \leq 4.5\% \Omega_{NOM}$ (TABLEAU 3.4)

Quand la vitesse de la machine est très faible, soit au démarrage, cette dernière est alimentée par les vecteurs de tension dont les amplitudes sont les faibles. On pense à ceux des groupes 2, 3, 4 et 5, comme illustré à la figure suivante.

Globalement, la logique de choix du vecteur  $v_s$  appliquée dans le cas d'une alimentation à l'aide d'un onduleur à 3-niveaux de tension ou encore à 2-niveaux de tension, est exploitée ici. L'espace d'évolution du vecteur flux statorique est découpé en 12 secteurs identiques, permettant de tirer profit du nombre important de vecteurs de tension atteignables par l'onduleur à 5-niveaux de tension. De ce fait et si on prend pour exemple le cas où le vecteur flux statorique se situe dans le secteur 1, alors pour augmenter le module du flux et la valeur du couple électromagnétique, on dispose des vecteurs de tension suivants appartenant aux groupes 2, 3, 4 et 5, soient:

**Tableau 3.3** Vecteurs de tension délivrés par l'onduleur à 5-niveaux de tension répartis en 9 groupes

| Groupe | Amplitude                                    | Vecteurs                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | 0                                            | 0 25 62 99 124<br>(0,0,0) (1,1,1) (2,2,2) (-1,-1,-1) (-2,-2,-2)                                                                                                                                                                                                                                                |
| 2      | $\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_0}{4}$           | 1 2 3 4 5 6<br>(1,0,0) (1,1,0) (0,1,0) (0,1,1) (0,0,1) (1,0,1)<br>7 8 9 10 11 12<br>(2,1,1) (2,2,1) (1,2,1) (1,2,2) (1,1,2) (2,1,2)<br>13 14 15 16 17 18<br>(0,-1,-1) (0,0,-1) (-1,0,-1) (-1,0,0) (-1,-1,0) (0,-1,0)<br>19 20 21 22 23 24<br>(-1,-2,-2) (-1,-1,-2) (-2,-1,-2) (-2,-1,-1) (-2,-2,-1) (-1,-2,-1) |
| 3      | $\frac{U_0}{2\sqrt{2}}$                      | 44 45 46 47 48 49<br>(2,1,0) (1,2,0) (0,2,1) (0,1,2) (1,0,2) (2,0,1)<br>50 51 52 53 54 55<br>(1,0,-1) (0,1,-1) (-1,1,0) (-1,0,1) (0,-1,1) (1,-1,0)<br>56 57 58 59 60 61<br>(0,-1,-2) (-1,0,-2) (-2,0,-1) (-2,-1,0) (-1,-2,0) (0,-2,-1)                                                                         |
| 4      | $\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_0}{2}$           | 26 27 28 29 30 31<br>(2,0,0) (2,2,0) (0,2,0) (0,2,2) (0,0,2) (2,0,2)<br>32 33 34 35 36 37<br>(1,-1,-1) (1,1,-1) (-1,1,-1) (-1,1,1) (-1,-1,1) (1,-1,1)<br>38 39 40 41 42 43<br>(0,-2,-2) (0,0,-2) (-2,0,-2) (-2,0,0) (-2,-2,0) (0,-2,0)                                                                         |
| 5      | $\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_0}{4} \sqrt{7}$  | 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86<br>(2,0,-1) (1,0,-2) (0,1,-2) (0,2,-1) (-1,2,0) (-2,1,0) (-2,0,1) (-1,0,2) (0,-1,2) (0,-2,1) (1,-2,0) (2,-1,0)<br>87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98<br>(1,-1,-2) (2,1,-1) (1,2,-1) (-1,1,-2) (-2,1,-1) (-1,2,1) (-1,1,2) (-2,-1,1) (-1,-2,1) (1,-1,2) (2,-1,1) (1,-2,-1) |
| 6      | $\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{3U_0}{4}$          | 63 64 65 66 67 68<br>(2,-1,-1) (2,2,-1) (-1,2,-1) (-1,2,2) (-1,-1,2) (2,-1,2)<br>69 70 71 72 73 74<br>(1,-2,-2) (1,1,-2) (-2,1,-2) (-2,1,1) (-2,-2,1) (1,-2,1)                                                                                                                                                 |
| 7      | $\frac{U_0}{\sqrt{2}}$                       | 118 119 120 121 122 123<br>(2,0,-2) (0,2,-2) (-2,2,0) (-2,0,2) (0,-2,2) (2,-2,0)                                                                                                                                                                                                                               |
| 8      | $\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_0}{4} \sqrt{13}$ | 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117<br>(2,-1,-2) (2,1,-2) (1,2,-2) (-1,2,-2) (-2,2,-1) (-2,2,1) (-2,1,2) (-2,-1,2) (-1,-2,2) (1,-2,2) (2,-2,1) (2,-2,-1)                                                                                                                                           |
| 9      | $\sqrt{\frac{2}{3}} U_0$                     | 100 101 102 103 104 105<br>(2,-2,-2) (2,2,-2) (-2,2,-2) (-2,2,2) (-2,-2,2) (2,-2,2)                                                                                                                                                                                                                            |

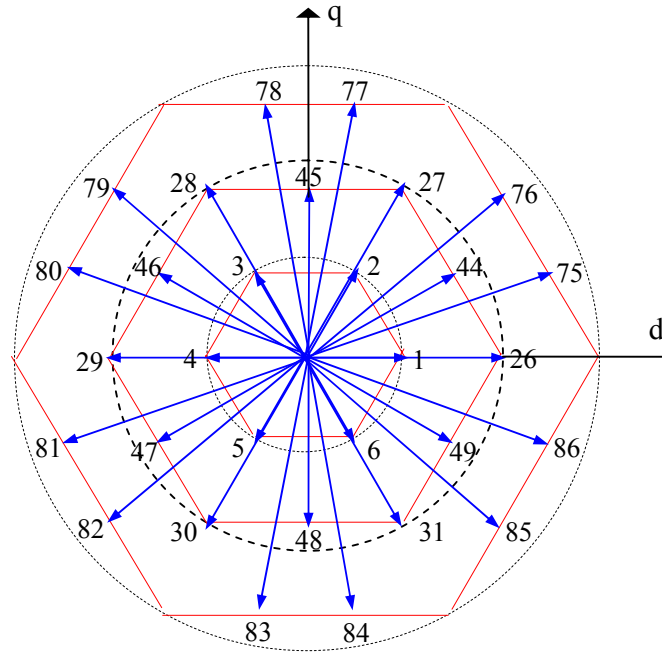


**Figure 3.6** Vecteurs de tension utilisés dans la table de commande Tab51S

- Pour augmenter le module du flux: 1, 26, 75, 44, 76, 2, 27, 86, 49, 85, 6 et 31 (Figure 3.7).

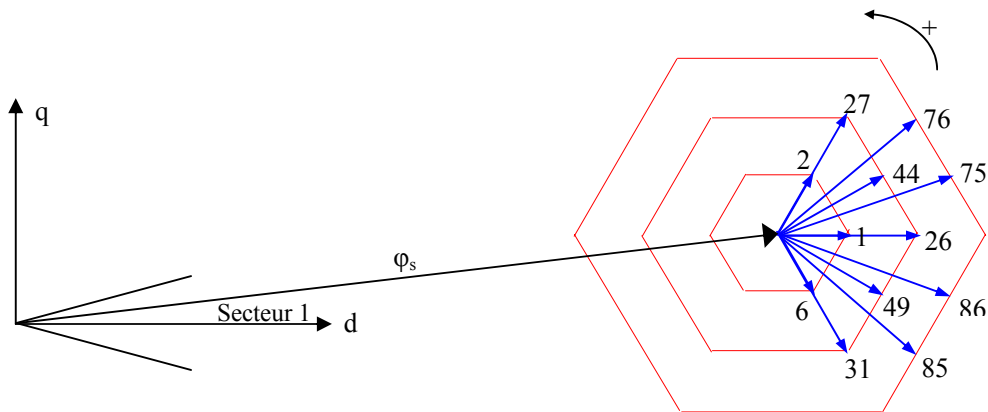


**Figure 3.7** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le module du flux.

Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.

- Pour augmenter la valeur du couple, la vitesse de rotation étant positive: 75, 44, 76, 2, 27, 77, 45, 78, 3, 28, 79, 46 et 80 (Figure 3.8).

- Pour augmenter la valeur du couple, la vitesse de rotation étant négative: 86, 49, 85, 6, 31, 84, 48, 83, 5, 30, 82, 47 et 81 (Figure 3.9).

Ainsi, pour conduire à une augmentation simultanément du module du flux et de la valeur du couple, nous pourrions appliquer les vecteurs 75, 44, 76, 2 et 27 (rotation positive) et 86,

9, 85, 6 et 31 (rotation négative).

Le vecteur flux statorique se trouvant dans le secteur 1, on opte alors pour le choix des vecteurs de tension suivants: 44 et 76 (rotation positive), 49 et 85 (rotation négative). La combinaison (0,0,0) du vecteur nul est imposé pour maintenir la valeur du couple dans la bande désirée.

Notons que les vecteurs 75 et 86 ne sont pas sélectionnés, ils ne répondent pas aux exigences de dynamique sur le couple, soit une croissance plus rapide.

Les contrôleurs à hystérésis flux et couple sont les mêmes que ceux développés en 2.3.1.2, c'est le cas de toutes les tables de commande mises en oeuvre dans cette stratégie.

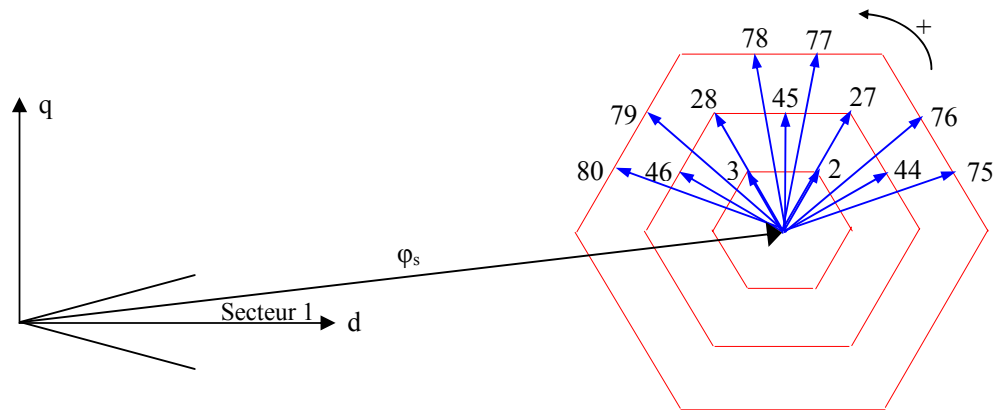


**Figure 3.8** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le couple.

Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.

La vitesse de rotation est positive.

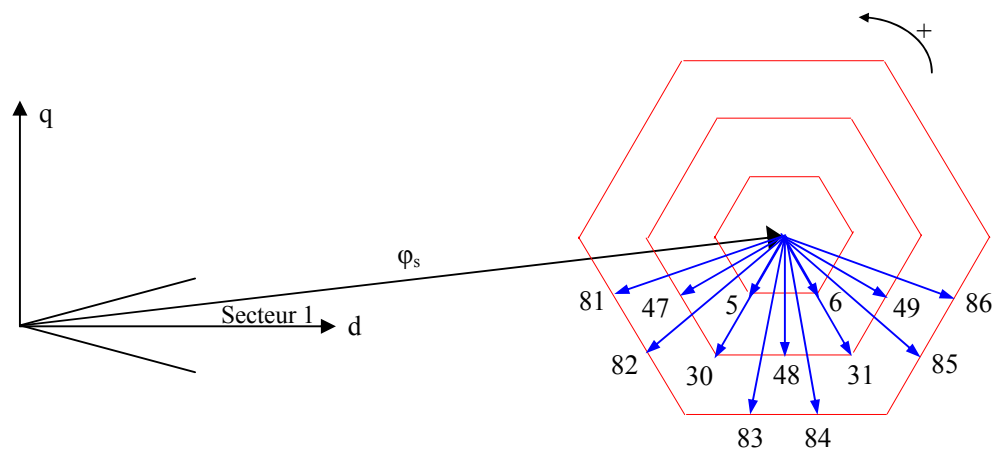


**Figure 3.9** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le couple.

Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.

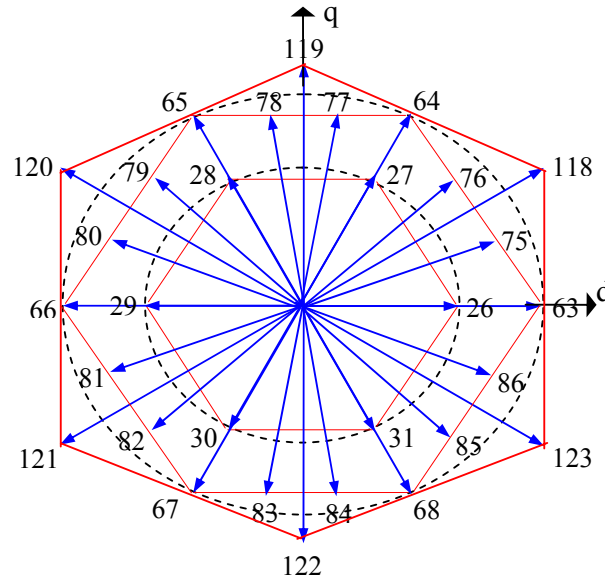
La vitesse de rotation est négative.

**Tableau 3.4** Table de commande Tab51S utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 5-niveaux de tension.Cas où  $\Omega \leq 4.5\% \Omega_{nom}$ 

|          |       | S             |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------|-------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $C_\phi$ | $C_r$ | 1             | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| +1       | +2    | 76            | 27 | 78 | 28 | 80 | 29 | 82 | 30 | 84 | 31 | 86 | 26 |
|          | +1    | 44            | 2  | 45 | 3  | 46 | 4  | 47 | 5  | 48 | 6  | 49 | 1  |
|          | 0     | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1    | 49            | 1  | 44 | 2  | 45 | 3  | 46 | 4  | 47 | 5  | 48 | 6  |
|          | -2    | 85            | 26 | 75 | 27 | 77 | 28 | 79 | 29 | 81 | 30 | 83 | 31 |
| 0        | +2    | 78            | 28 | 80 | 29 | 82 | 30 | 84 | 31 | 86 | 26 | 76 | 27 |
|          | +1    | 45            | 3  | 46 | 4  | 47 | 5  | 48 | 6  | 49 | 1  | 44 | 2  |
|          | 0     | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1    | 48            | 6  | 49 | 1  | 44 | 2  | 45 | 3  | 46 | 4  | 47 | 5  |
|          | -2    | 30            | 83 | 31 | 85 | 26 | 75 | 27 | 77 | 28 | 79 | 29 | 81 |
| -1       | +2    | 28            | 79 | 29 | 81 | 30 | 83 | 31 | 85 | 26 | 75 | 27 | 77 |
|          | +1    | 3             | 46 | 4  | 47 | 5  | 48 | 6  | 49 | 1  | 44 | 2  | 45 |
|          | 0     | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1    | 5             | 48 | 6  | 49 | 1  | 44 | 2  | 45 | 3  | 46 | 4  | 47 |
|          | -2    | 30            | 83 | 31 | 85 | 26 | 75 | 27 | 77 | 28 | 79 | 29 | 81 |

B) CAS OU  $4.5\% \Omega_{nom} < \Omega \leq 40\% \Omega_{nom}$  (TABLEAU 3.5)

Les vecteurs de tension des quatre (4) groupes 4, 5, 6 et 7 sont utilisés, comme le montre la figure 3.10.

**Figure 3.10** Vecteurs de tension utilisés dans la table de commande Tab52S

Si on suppose que le module du flux et la valeur du couple sont amenés à croître et que la position du vecteur flux est le secteur 1, on dispose alors des vecteurs de tension suivants:

- Pour augmenter le module du flux: 26, 63, 75, 118, 76, 27, 64, 86, 123, 85, 31 et 68 (Figure 3.11).

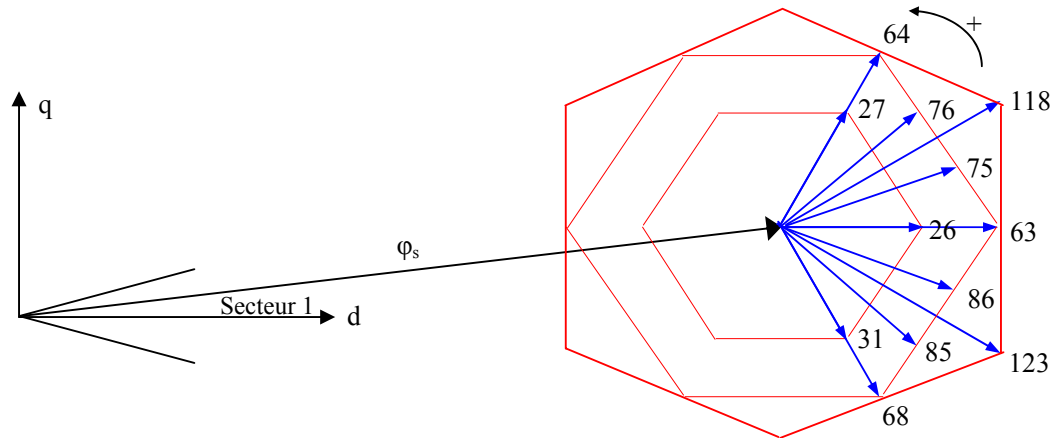


**Figure 3.11** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le module du flux.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.

- Pour augmenter la valeur du couple, la vitesse de rotation étant positive: 75, 118, 76, 27, 64, 77, 119, 78, 28, 65, 79, 120 et 80 (Figure 3.12).

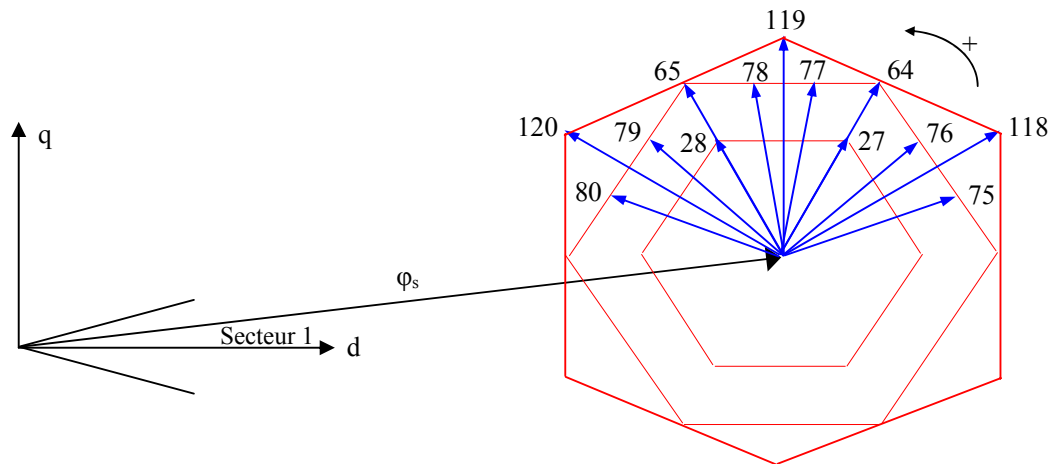


**Figure 3.12** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le couple.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.  
La vitesse de rotation est positive.

- Pour augmenter la valeur du couple, la vitesse de rotation étant négative: 86, 123, 85, 31, 68, 84, 122, 83, 30, 67, 82, 121 et 81 (Figure 3.13).

Pour augmenter à la fois le module du flux et la valeur du couple, nous devons choisir parmi les vecteurs 75, 118, 76, 27 et 64 (rotation positive) et 86, 123, 85, 31 et 68 (rotation

négative). Dans notre cas où le vecteur flux se situe dans le secteur 1, nous optons plutôt pour les vecteurs de tension 118 et 76 (rotation positive) et 123 et 85 (rotation négative).

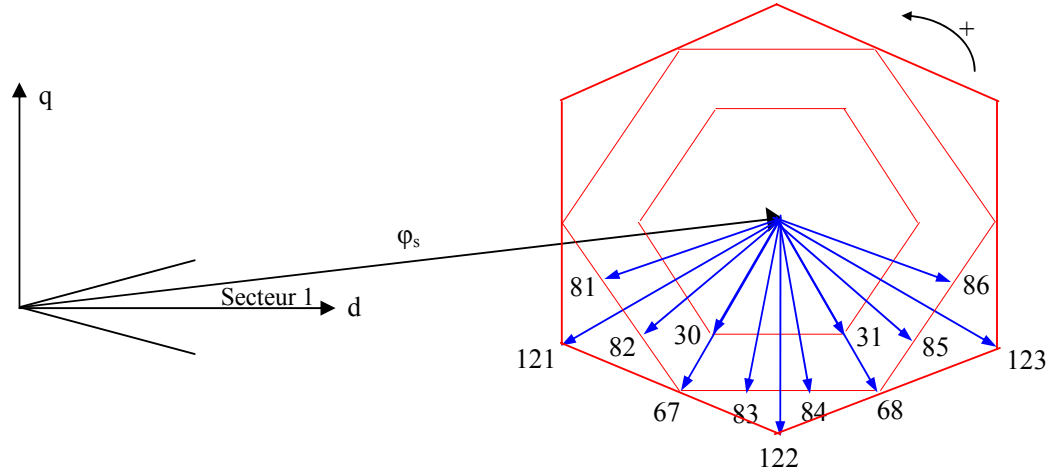


**Figure 3.13** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le couple.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.  
La vitesse de rotation est négative.

**Tableau 3.5** Table de commande Tab52S utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 5-niveaux de tension.  
Cas où  $4.5\% \Omega_{nom} < \Omega \leq 40\% \Omega_{nom}$

|             |            | S             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $C_\varphi$ | $C_\Gamma$ | 1             | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
| +1          | +2         | 118           | 64  | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  | 122 | 68  | 123 | 63  |
|             | +1         | 76            | 27  | 78  | 28  | 80  | 29  | 82  | 30  | 84  | 31  | 86  | 26  |
|             | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|             | -1         | 85            | 26  | 75  | 27  | 77  | 28  | 79  | 29  | 81  | 30  | 83  | 31  |
|             | -2         | 123           | 63  | 118 | 64  | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  | 122 | 68  |
| 0           | +2         | 119           | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  | 122 | 68  | 123 | 63  | 118 | 64  |
|             | +1         | 78            | 28  | 80  | 29  | 82  | 30  | 84  | 31  | 86  | 26  | 76  | 27  |
|             | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|             | -1         | 30            | 83  | 31  | 85  | 26  | 75  | 27  | 77  | 28  | 79  | 29  | 81  |
|             | -2         | 122           | 68  | 123 | 63  | 118 | 64  | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  |
| -1          | +2         | 65            | 120 | 66  | 121 | 67  | 122 | 68  | 123 | 63  | 118 | 64  | 119 |
|             | +1         | 28            | 79  | 29  | 81  | 30  | 83  | 31  | 85  | 26  | 75  | 27  | 77  |
|             | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|             | -1         | 30            | 83  | 31  | 85  | 26  | 75  | 27  | 77  | 28  | 79  | 29  | 81  |
|             | -2         | 67            | 122 | 68  | 123 | 63  | 118 | 64  | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 |

c) CAS OU  $40\%\Omega_{NOM} < \Omega \leq 75\%\Omega_{NOM}$  (TABLEAU 3.6)

La figure 3.14 montre les vecteurs de tension pouvant intervenir dans la 3eme bande de vitesse dans le contrôle d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 5-niveaux de tension. Ces vecteurs composent les groupes 5, 6, 7 et 9.

Si on veut augmenter le module du flux et la valeur du couple électromagnétique, le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1, nous pouvons choisir parmi les vecteurs de tension suivants:

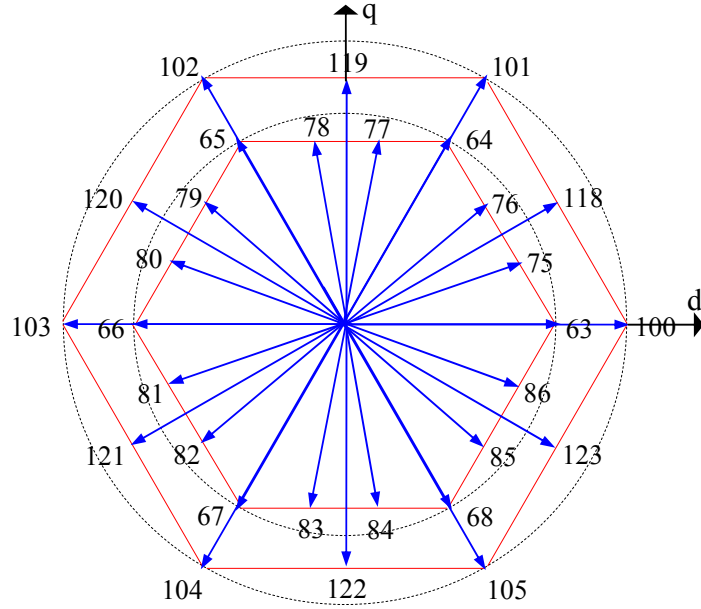


**Figure 3.14** Vecteurs de tension utilisés dans la table de commande Tab53S

- Pour augmenter le module du flux: 63, 100, 75, 118, 76, 64, 101, 86, 123, 85, 68 et 105 (Figure 3.15).

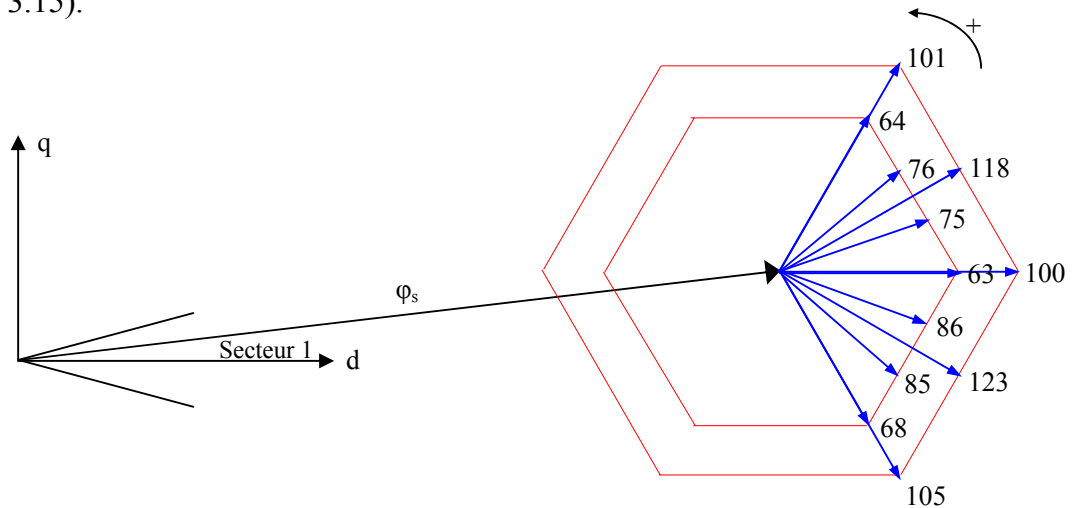


**Figure 3.15** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le module du flux.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.

- Pour augmenter la valeur du couple, la vitesse de rotation étant positive: 75, 118, 76, 64, 101, 77, 119, 78, 65, 102, 79, 120 et 80 (Figure 3.16).

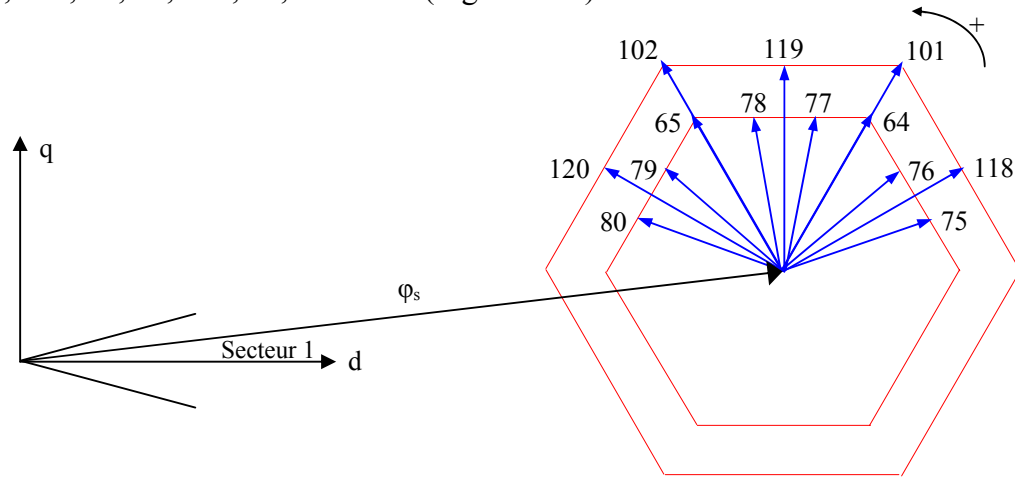


**Figure 3.16** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le couple.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.  
La vitesse de rotation est positive.

- Pour augmenter la valeur du couple, la vitesse de rotation étant négative: 86, 123, 85, 68, 105, 84, 122, 83, 67, 104, 82, 121 et 81 (Figure 3.17).

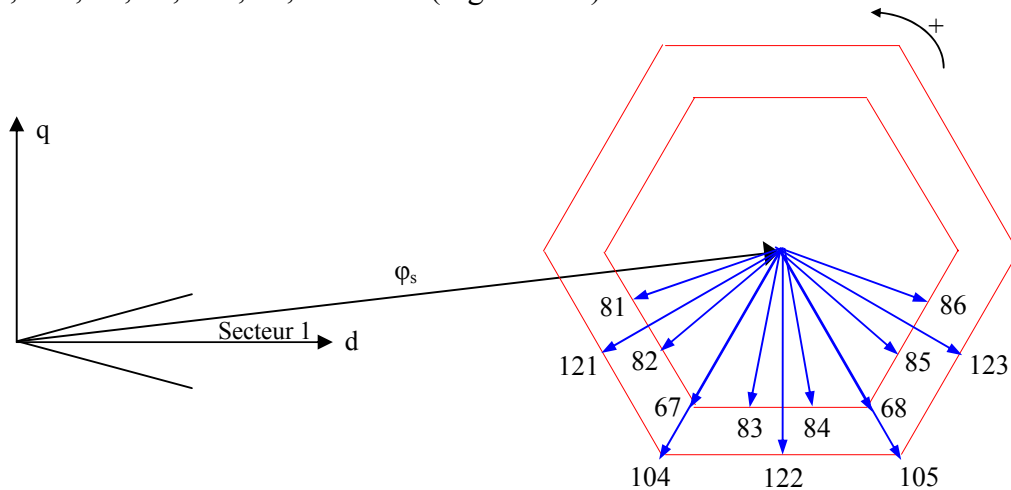


**Figure 3.17** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le couple.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.  
La vitesse de rotation est négative.

Des directions sont privilégiées dans le cas où le module du flux et la valeur du couple sont amenés à croître: 75, 118, 76, 64 et 101 (rotation positive) et 86, 123, 85, 68 et 105 (rotation négative).

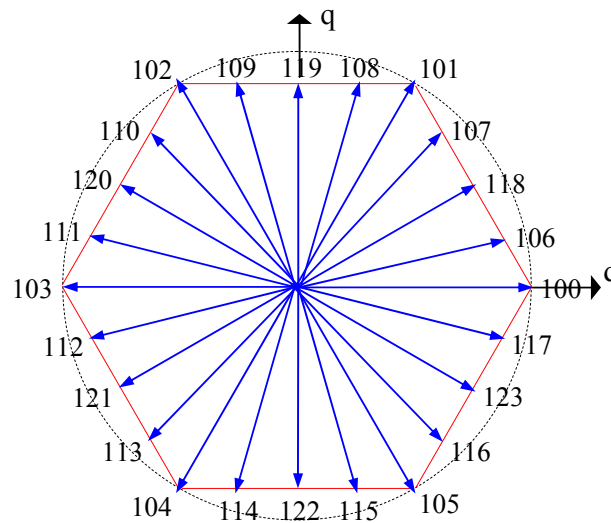
Les vecteurs de tension 118 et 76 (rotation positive) et 123 et 85 (rotation négative) sont retenus dans notre cas.

**Tableau 3.6** Table de commande Tab53S utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 5-niveaux de tension.Cas où  $40\% \Omega_{nom} < \Omega \leq 75\% \Omega_{nom}$ 

|             |            | S             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $C_\varphi$ | $C_\Gamma$ | 1             | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
| 1           | +2         | 118           | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 |
|             | +1         | 76            | 64  | 78  | 65  | 80  | 66  | 82  | 67  | 84  | 68  | 86  | 63  |
|             | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|             | -1         | 85            | 63  | 75  | 64  | 77  | 65  | 79  | 66  | 81  | 67  | 83  | 68  |
|             | -2         | 123           | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 |
| 0           | +2         | 119           | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 |
|             | +1         | 78            | 65  | 80  | 66  | 82  | 67  | 84  | 68  | 86  | 63  | 76  | 64  |
|             | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|             | -1         | 83            | 68  | 85  | 63  | 75  | 64  | 77  | 65  | 79  | 66  | 81  | 67  |
|             | -2         | 122           | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 |
| -1          | +2         | 102           | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 |
|             | +1         | 65            | 79  | 66  | 81  | 67  | 83  | 68  | 85  | 63  | 75  | 64  | 77  |
|             | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|             | -1         | 67            | 83  | 68  | 85  | 63  | 75  | 64  | 77  | 65  | 79  | 66  | 81  |
|             | -2         | 104           | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 |

D) CAS OU  $\Omega > 75\% \Omega_{nom}$  (TABLEAU 3.7)

En régime établi de la machine, le choix est porté sur les vecteurs de tension des groupes ci-après: 7, 8 et 9 (Figure 3.18).

**Figure 3.18** Vecteurs de tension utilisés dans la table de commande Tab54S

Le vecteur flux statorique se situant toujours dans le secteur 1, nous pouvons augmenter le module du flux et la valeur du couple en faisant usage des vecteurs de tension suivants:

- Pour augmenter le module du flux: 100, 106, 118, 107, 101, 117, 123, 116 et 105 (Figure 3.19).

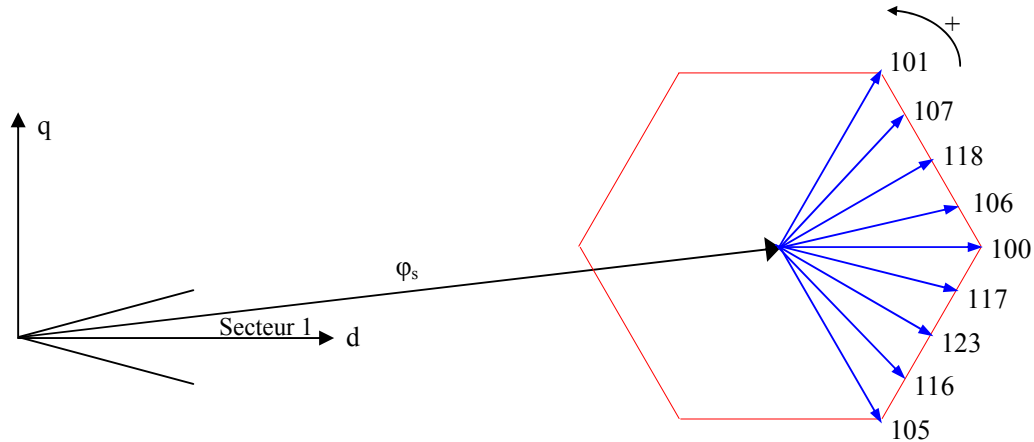


**Figure 3.19** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le module du flux.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.

- Pour augmenter la valeur du couple, la vitesse de rotation étant positive: 118, 107, 101, 108, 119, 109, 102, 110, 120 et 111 (Figure 3.20).

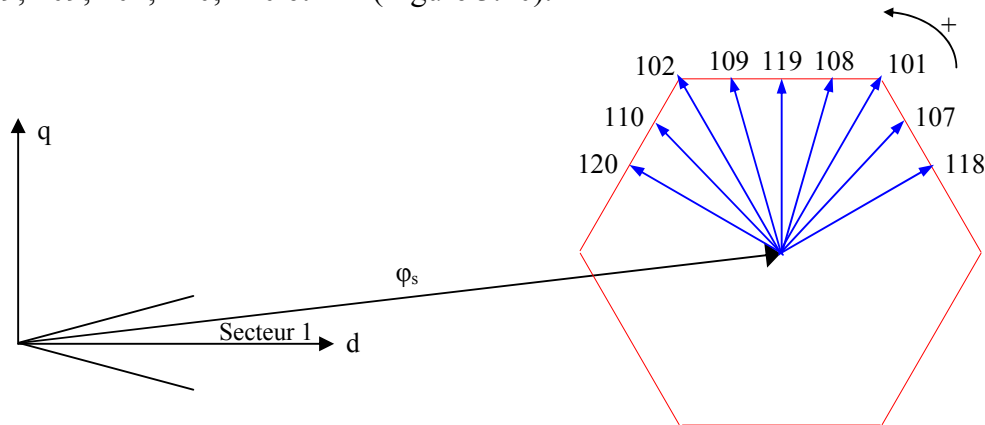
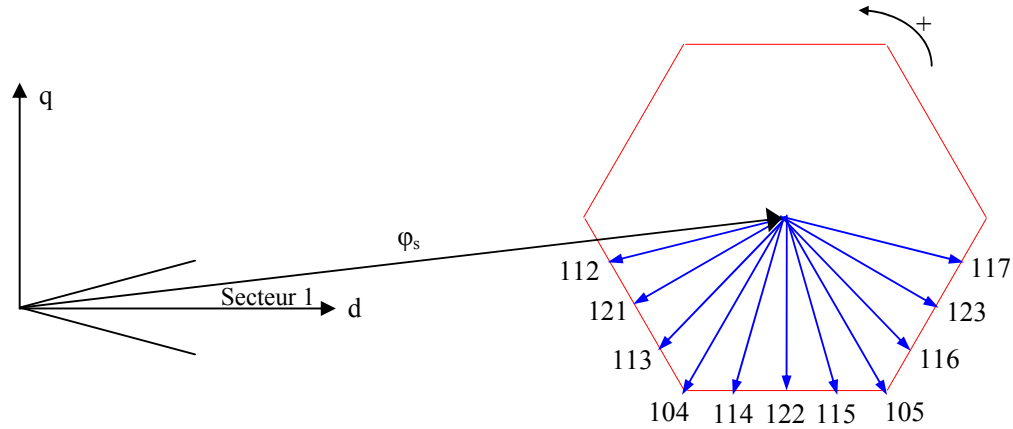


**Figure 3.20** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le couple.  
Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.  
La vitesse de rotation est positive.

- Pour augmenter la valeur du couple, la vitesse de rotation étant négative: 123, 116, 105, 115, 122, 114, 104, 113, 121 et 112 (Figure 3.21).

Pour satisfaire aux deux conditions à la fois, le choix peut être porté alors sur les vecteurs de tension suivants: 118, 107 et 101 (rotation positive) et 123, 116 et 105 (rotation négative).

**Figure 3.21** Vecteurs de tension permettant d'augmenter le couple.

Le vecteur flux se trouvant dans le secteur 1.

La vitesse de rotation est négative.

Enfin, les vecteurs de tension 118 et 107 (rotation positive) et 123 et 116 (rotation négative) sont sélectionnés pour être appliqué quand le vecteur flux se positionne dans le secteur 1.

**Tableau 3.7** Table de commande Tab54S utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 5-niveaux de tension.  
Cas où  $\Omega > 75\% \Omega_{nom}$

|             |       | S             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------|-------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $C_\varphi$ | $C_r$ | 1             | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
| +1          | +2    | 107           | 101 | 109 | 102 | 111 | 103 | 113 | 104 | 115 | 105 | 117 | 100 |
|             | +1    | 118           | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 |
|             | 0     | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|             | -1    | 123           | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 |
|             | -2    | 116           | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 | 104 | 114 | 105 |
| 0           | +2    | 119           | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 |
|             | +1    | 109           | 102 | 111 | 103 | 113 | 104 | 115 | 105 | 117 | 100 | 107 | 101 |
|             | 0     | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|             | -1    | 104           | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 |
|             | -2    | 122           | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 |
| -1          | +2    | 102           | 110 | 103 | 112 | 104 | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 |
|             | +1    | 102           | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 |
|             | 0     | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|             | -1    | 104           | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 |
|             | -2    | 104           | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 |

### 3.3.1.2 STRATEGIE A UNE TABLE DE COMMANDE UNIQUE

Comme dans le cas d'une alimentation à 3-niveaux de tension, nous nous sommes intéressés à l'établissement d'une table de commande unique valable pour toutes les vitesses et dans les deux sens de rotation de la machine.

Le découpage de l'espace d'évolution du vecteur flux statorique s'effectue toujours sur douze (12) secteurs identiques, et vu le nombre élevé du nombre de vecteurs de tension que peut produire l'onduleur à 5-niveaux de tension, le niveau du contrôleur d'hystérésis du couple devient encore plus performant, soit à quatre (4) niveaux supérieurs et quatre (4) niveaux inférieurs (Figure 3.22).

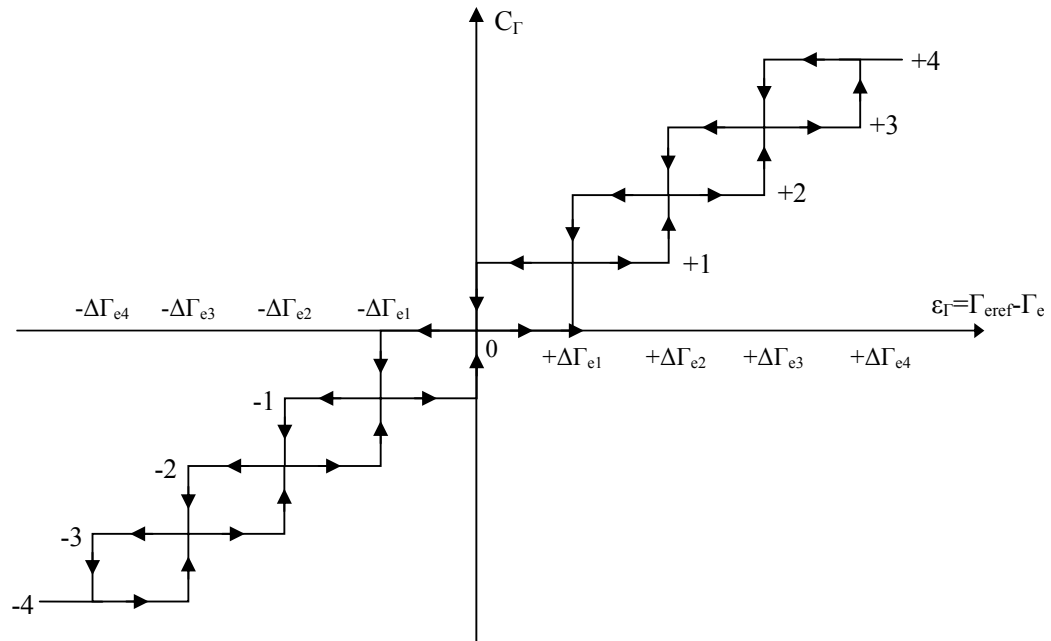


**Figure 3.22** Correcteur de couple à 4 niveaux supérieurs et 4 niveaux inférieurs

La synthèse de la table Tab55S donnée par le tableau 3.8 se fait alors sur la base des mêmes règles édictées en §2.3.1.2. L'amplitude du vecteur de tension choisi correspond à l'action donnée à la sortie du contrôleur à hystérésis couple.

### 3.3.2 SIMULATIONS

Les figures suivantes reprennent les mêmes essais des chapitres précédents.

On constate d'abord que l'alimentation à l'aide d'un onduleur à 5-niveaux de tension a permis une nette minimisation des fluctuations des grandeurs de contrôle qui sont le flux et le couple, soit moins de (1.7%, 4.3%) et (2.3%, 4.5%) respectivement dans le cas de la stratégie à une table unique (Tab55S) et la stratégie à plusieurs tables de commande (tables Tab51S, Tab52S, Tab53S et Tab54S). Les largeurs de bande de tolérance de flux, de

couple et de tension de condensateurs d'entrée sont les mêmes dans tous les tests réalisés, soient pour la stratégie à une table unique  $\Delta\phi_s=3\%$ ,  $\Delta\Gamma_{e1}=0.5\%$ ,  $\Delta\Gamma_{e2}=1\%$ ,  $\Delta\Gamma_{e3}=2\%$ ,  $\Delta\Gamma_{e4}=3\%$ ,  $\Delta U=3\%$  et  $\Delta\phi_s=3\%$ ,  $\Delta\Gamma_{e1}=2\%$ ,  $\Delta\Gamma_{e2}=3\%$  et  $\Delta U=3\%$  pour la stratégie à plusieurs tables de commande.

**Tableau 3.8** Table de commande Tab55S utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 5-niveaux de tension.  
Cas où les vitesses sont faibles

| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | S             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          |            | 1             | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
| +1       | +4         | 107           | 101 | 109 | 102 | 111 | 103 | 113 | 104 | 115 | 105 | 117 | 100 |
|          | +3         | 76            | 64  | 78  | 65  | 80  | 66  | 82  | 67  | 84  | 68  | 86  | 63  |
|          | +2         | 118           | 27  | 119 | 28  | 120 | 29  | 121 | 30  | 122 | 31  | 123 | 26  |
|          | +1         | 44            | 2   | 45  | 3   | 46  | 4   | 47  | 5   | 48  | 6   | 49  | 1   |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 49            | 1   | 44  | 2   | 45  | 3   | 46  | 4   | 47  | 5   | 48  | 6   |
|          | -2         | 123           | 26  | 118 | 27  | 119 | 28  | 120 | 29  | 121 | 30  | 122 | 31  |
|          | -3         | 85            | 63  | 75  | 64  | 77  | 65  | 79  | 66  | 81  | 67  | 83  | 68  |
|          | -4         | 116           | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 | 104 | 114 | 105 |
| -1       | +4         | 102           | 110 | 103 | 112 | 104 | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 |
|          | +3         | 65            | 79  | 66  | 81  | 67  | 83  | 68  | 85  | 63  | 75  | 64  | 77  |
|          | +2         | 28            | 120 | 29  | 121 | 30  | 122 | 31  | 123 | 26  | 118 | 27  | 119 |
|          | +1         | 3             | 46  | 4   | 47  | 5   | 48  | 6   | 49  | 1   | 44  | 2   | 45  |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 5             | 48  | 6   | 49  | 1   | 44  | 2   | 45  | 3   | 46  | 4   | 47  |
|          | -2         | 30            | 122 | 31  | 123 | 26  | 118 | 27  | 119 | 28  | 120 | 29  | 121 |
|          | -3         | 67            | 83  | 68  | 85  | 63  | 75  | 64  | 77  | 65  | 79  | 66  | 81  |
|          | -4         | 104           | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 |
| 0        | +4         | 119           | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 |
|          | +3         | 45            | 65  | 46  | 66  | 47  | 67  | 48  | 68  | 49  | 63  | 44  | 64  |
|          | +2         | 78            | 28  | 80  | 29  | 82  | 30  | 84  | 31  | 86  | 26  | 76  | 27  |
|          | +1         | 109           | 3   | 111 | 4   | 113 | 5   | 115 | 6   | 117 | 1   | 107 | 2   |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 5             | 114 | 6   | 116 | 1   | 106 | 2   | 108 | 3   | 110 | 4   | 112 |
|          | -2         | 30            | 83  | 31  | 85  | 26  | 75  | 27  | 77  | 28  | 79  | 29  | 81  |
|          | -3         | 48            | 68  | 49  | 63  | 44  | 64  | 45  | 65  | 46  | 66  | 47  | 67  |
|          | -4         | 122           | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 |

La trajectoire du vecteur flux statorique s'approche encore plus d'un cercle comparativement aux cas de l'onduleur à 3-niveaux et l'onduleur à 2-niveaux de tension.

Les formes d'ondes notamment du courant de phase s'approchent nettement de la sinusoïde, on constate les nombreux niveaux développés par l'onduleur à 5-niveaux de tension.

L'appel du courant au démarrage est aussi important que dans le cas précédent et ceci pour les deux stratégies appliquées.

On constate que le rétablissement de la vitesse de rotation suite à une application d'un couple de charge est plus rapide dans ce cas comparativement aux cas d'alimentations précédentes, ce qui renseigne sur la robustesse de notre structure de commande vis-à-vis des perturbations extérieures.

Une remarque concernant la figure 3.25 et à l'inverse de tous les autres cas traités, les perturbations observées sur le module du flux et causées par l'inversion de la consigne vitesse sont insignifiantes dans le cas de la stratégie à une table de commande unique.

Enfin, la figure 3.26 montre le fonctionnement de la machine en basse vitesse. La vitesse de rotation suit la consigne, les pics de vitesse suite au passage entre les deux états, à vide et en charge, de la machine sont vite pris en charge par le régulateur de vitesse.

### **3.4 CONTROLE DU POINT MILIEU DE L'ONDULEUR A 5-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC**

Comme dans le cas d'une alimentation à l'aide d'un onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC, nous choisissons d'exploiter une nouvelle fois la redondance pour assurer la stabilisation des tensions aux bornes des condensateurs d'entrée autrement dit l'équilibrage du potentiel du point milieu [10]. Nous avons vu au § 3.2.2 que l'onduleur à 5-niveaux de tension (Tableau 3.3) pouvait fournir à sa sortie 125 vecteurs de tension dont 61 différents. Mathématiquement, un vecteur de tension donné peut être obtenu par un voir plusieurs combinaisons des états des bras de l'onduleur. Cet état de fait montre qu'une variété de voies possibles existe pour arriver à cet objectif.

#### **3.4.1 INFLUENCE DES DIFFERENTS VECTEURS SUR LE POINT MILIEU DE L'ONDULEUR A 5-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC**

En vu de stabiliser le point milieu de l'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC, on opte pour le choix de la stabilisation des tensions des quatre (4) condensateurs deux par deux, c'est-à-dire assurer l'égalité des tensions des deux demi bras supérieur et inférieur. Une classification des 125 vecteurs de tension par rapport à la stabilité du point milieu est alors déduite. Trois (3) catégories différentes sont alors dégagées (Tableau 3.9).

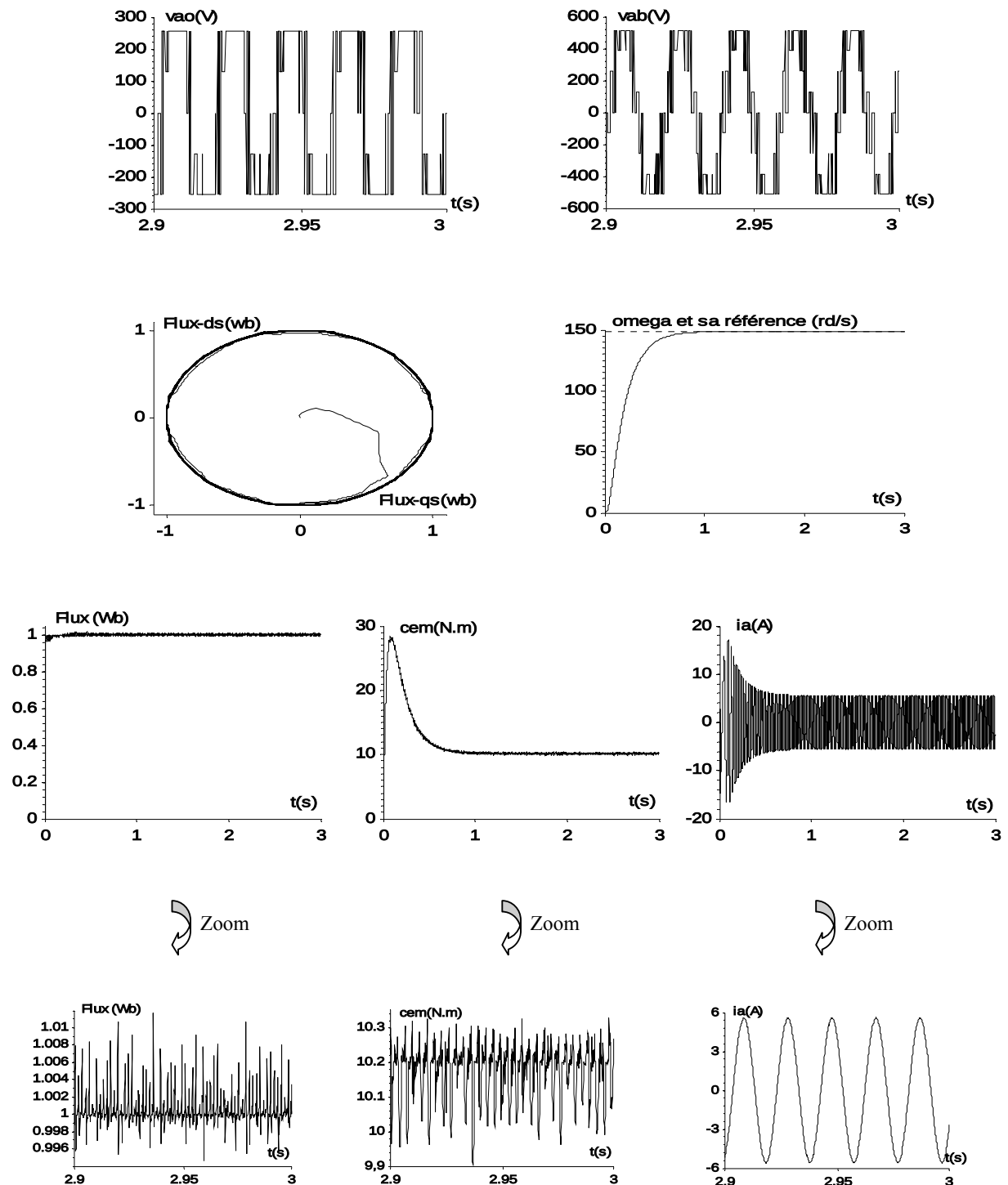


**Figure 3.23** Simulation du démarrage en charge nominale de la machine par la stratégie à une table unique: tension simple, tension de ligne, trajectoire du vecteur de flux, vitesse de rotation et sa référence, flux, couple et courant de phase.

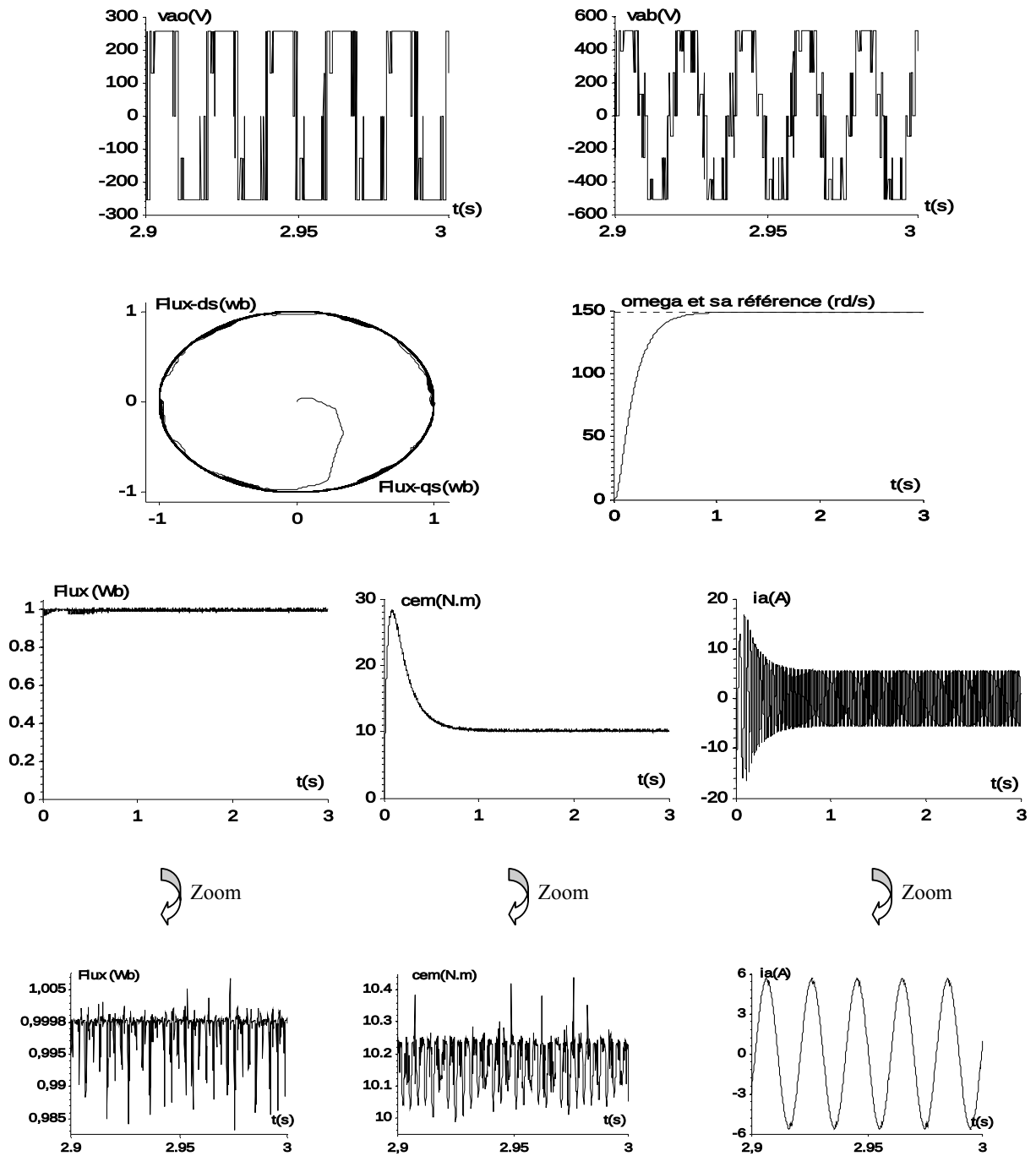


**Figure 3.24** Simulation du démarrage en charge nominale de la machine par la stratégie à plusieurs tables: tension simple, tension de ligne, trajectoire du vecteur de flux, vitesse de rotation et sa référence, flux, couple et courant de phase.

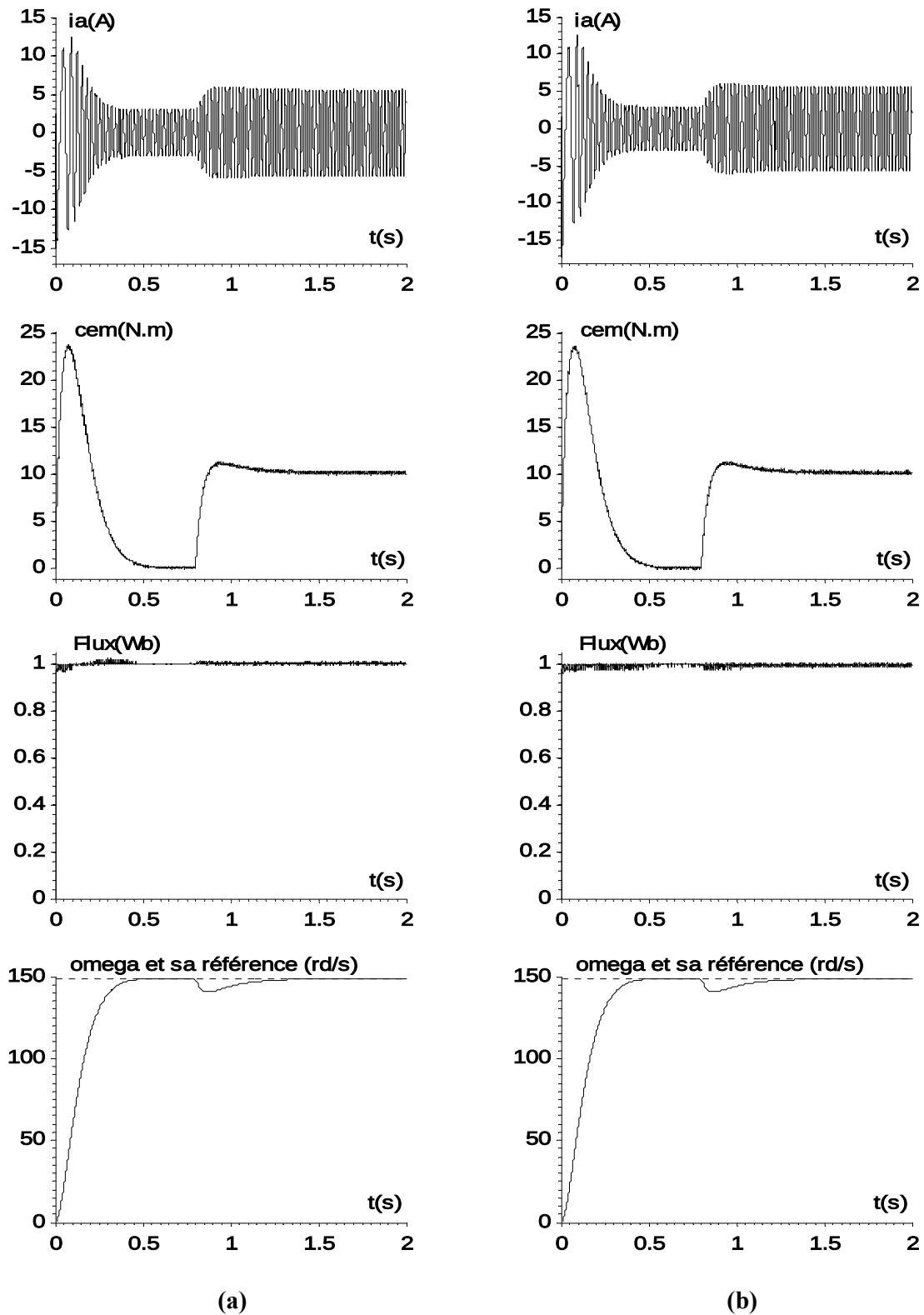


**Figure 3.25** Simulation du démarrage à vide puis application d'un couple nominale: courant de phase, couple, flux, vitesse de rotation et sa référence. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à plusieurs tables.

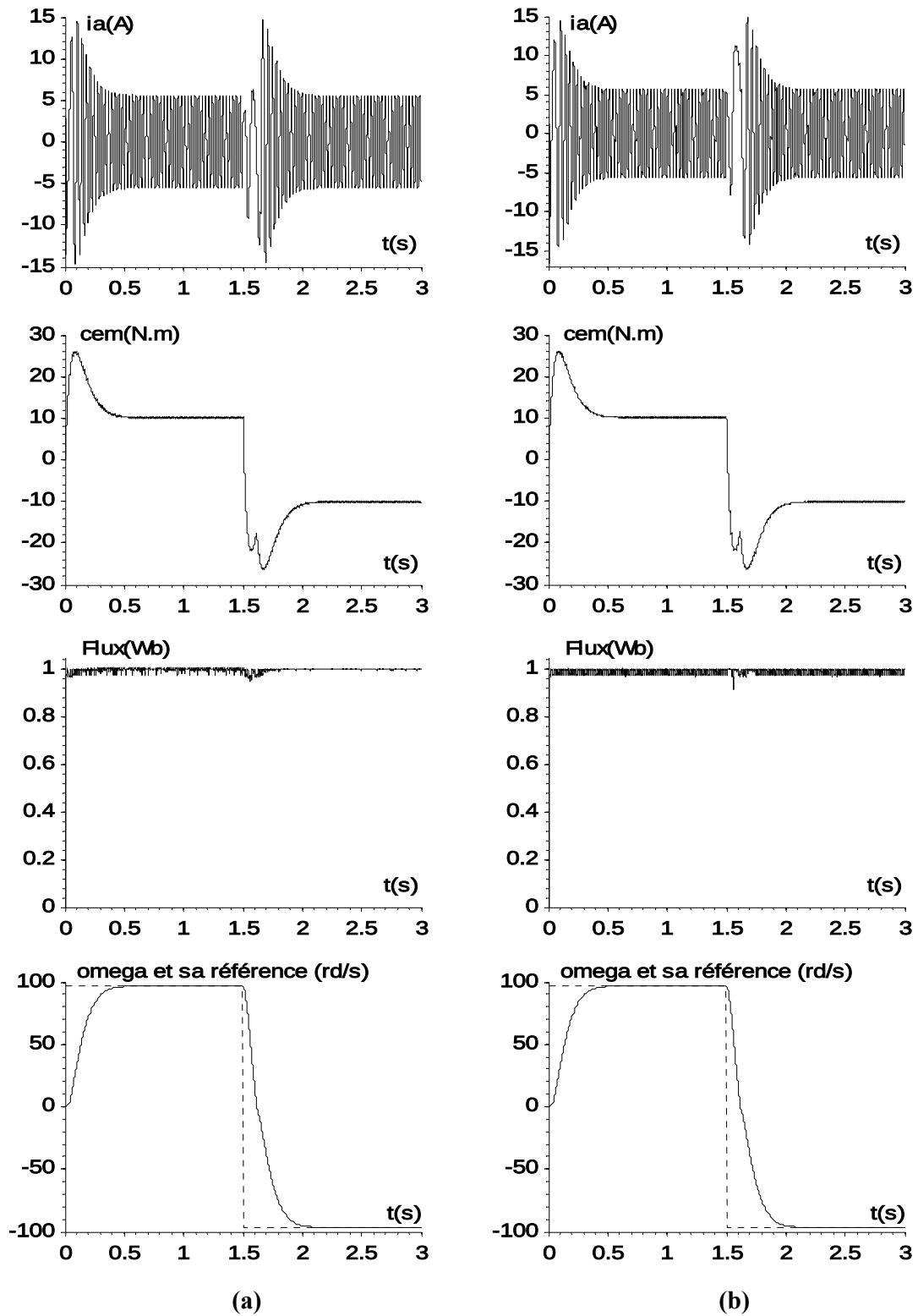


Figure 3.26 Simulation du CDC de la machine asynchrone pour une inversion de la consigne de vitesse de 65% de la valeur nominale: courant de phase, couple, flux, vitesse de rotation et sa référence. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à plusieurs tables.

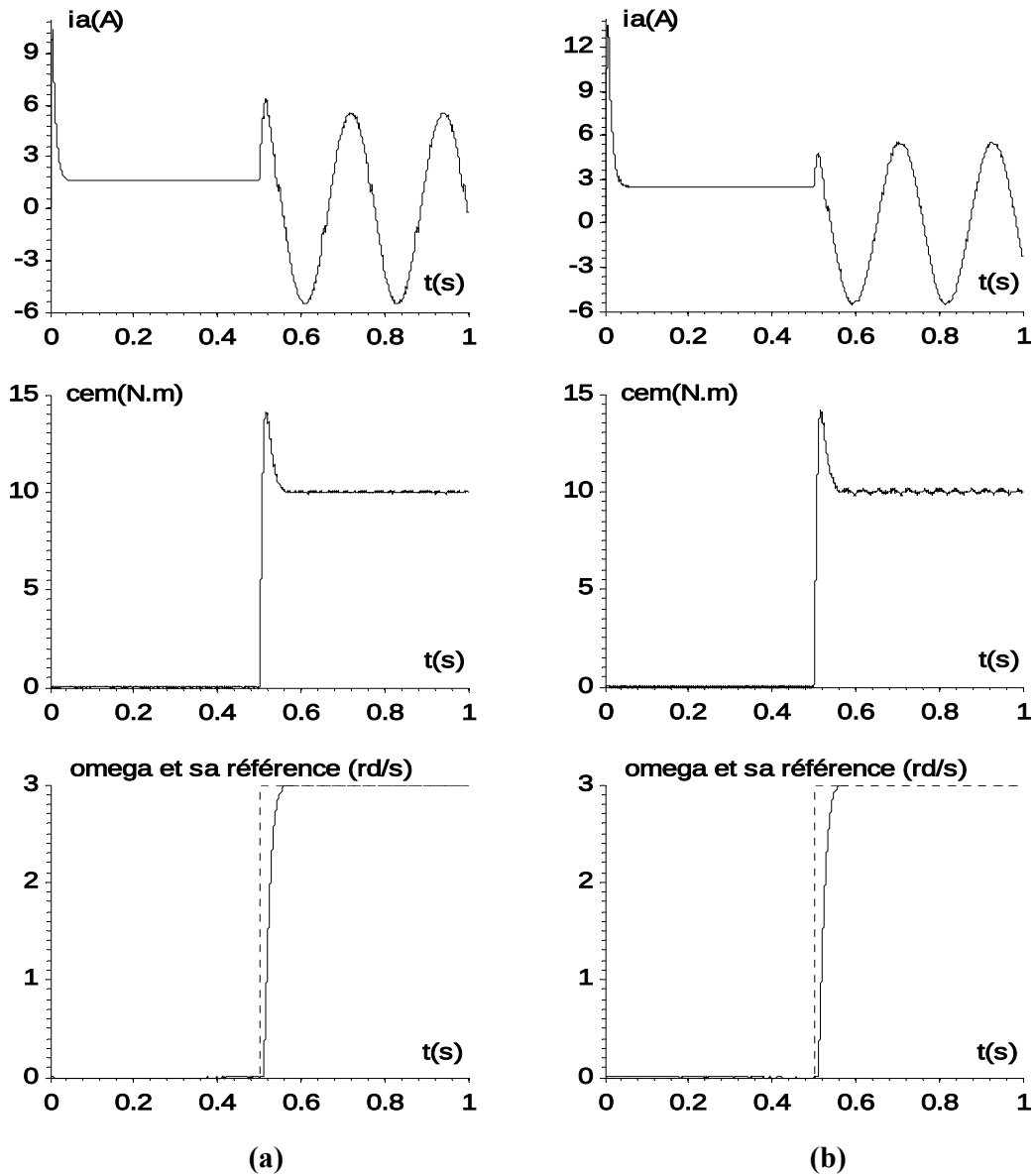


**Figure 3.27** Fonctionnement à basse vitesse: courant de phase, couple, vitesse de rotation et sa référence. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à plusieurs tables

### 3.4.1.1 VECTEURS DE TENSION INTRINSEQUMENT STABLES

En plus des vecteurs de tension nulle, on compte les vecteurs de tension appartenant aux groupes 2\_2 (7-12), 2\_4 (19-24), 4\_2 (32-37), 6 (63-74), 5\_2 (87-98), 8 (106-117) et 9 (100-105). Les séquences des états des bras de l'onduleur dans ce cas donnent un courant nul du point milieu.

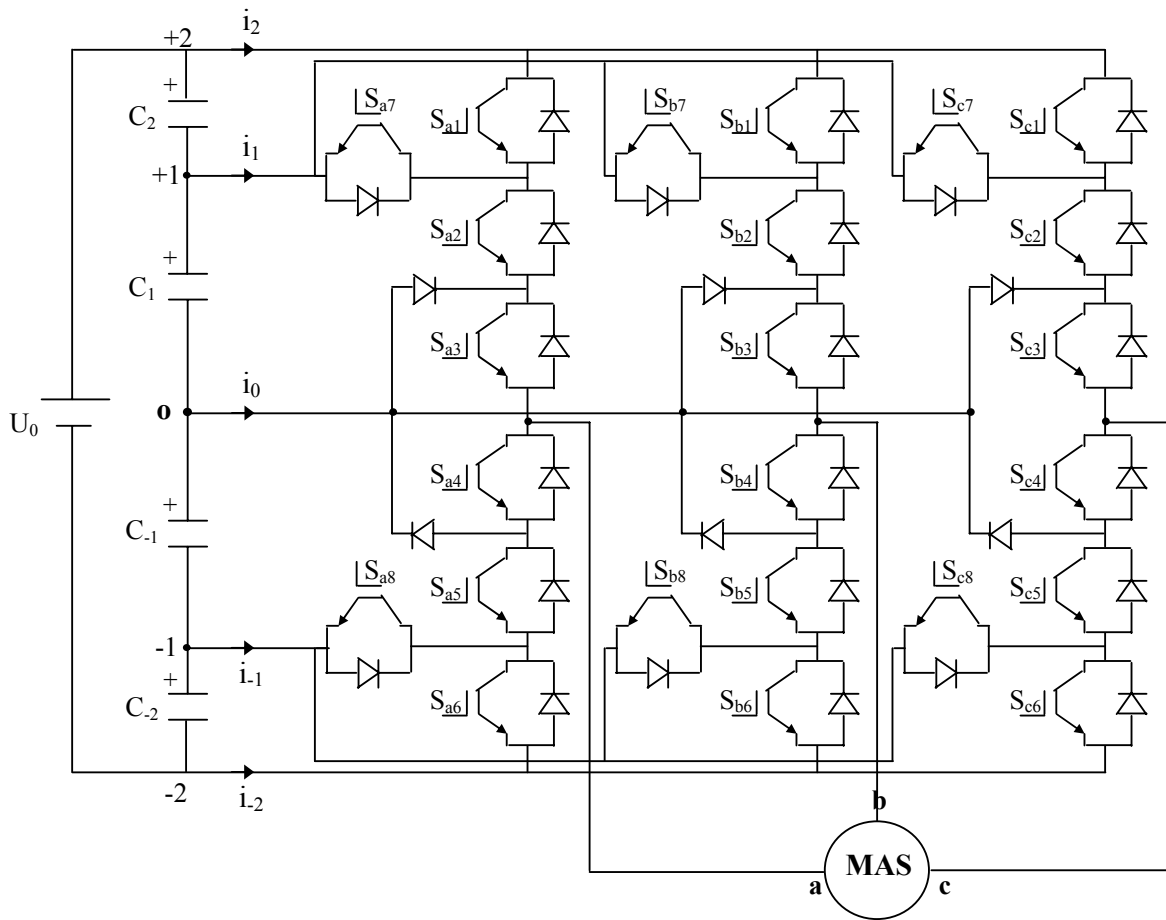


**Figure 3.28** Structure réelle de l'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC

### 3.4.1.2 VECTEURS DE TENSION STABLES PAR LA COMMANDE

Ce sont les vecteurs dont l'action étudiée peut assurer la stabilité du potentiel du point milieu de l'onduleur. Ces vecteurs constituent les sous groupes suivants: 2\_1 (1-6), 2\_3 (13-18), 3\_1 (44-49), 3\_3 (56-61), 4\_1 (26-31) et 4\_3 (38-43).

### 3.4.1.3 VECTEURS DE TENSION INSTABLES

Ce sont les vecteurs de tension des sous groupes ci après: 3\_2 (50-55), 5\_1 (75-86) et 7 (118-123). Ils ont un effet sur le potentiel du point milieu, par contre on ne peut pas savoir s'il va être de l'augmenter ou de le diminuer. Les deux paires de condensateurs des deux demi bras (( $C_1, C_2$ ) soit  $C_{12}$ ) et (( $C_{-1}, C_{-2}$ ) soit  $C_{-12}$ ) sont toutes les deux sollicitées, contribuant à une variation du potentiel du point milieu.

**Tableau 3.9** Classification des vecteurs de tension suivant la stabilité du point milieu

| Séquence | $i_0$  | Séquence  | $i_0$  | Classification               |
|----------|--------|-----------|--------|------------------------------|
| (1,0,0)  | $+i_a$ | (0,-1,-1) | $-i_a$ | Stable<br>par<br>la commande |
| (1,1,0)  | $-i_c$ | (0,0,-1)  | $+i_c$ |                              |
| (0,1,0)  | $+i_b$ | (-1,0,-1) | $-i_b$ |                              |
| (0,1,1)  | $-i_a$ | (-1,0,0)  | $+i_a$ |                              |
| (0,0,1)  | $+i_c$ | (-1,-1,0) | $-i_c$ |                              |
| (1,0,1)  | $-i_b$ | (0,-1,0)  | $+i_b$ |                              |
| (2,0,0)  | $+i_a$ | (0,-2,-2) | $-i_a$ |                              |
| (2,2,0)  | $-i_c$ | (0,0,-2)  | $+i_c$ |                              |
| (0,2,0)  | $+i_b$ | (-2,0,-2) | $-i_b$ |                              |
| (0,2,2)  | $-i_a$ | (-2,0,0)  | $+i_a$ |                              |
| (0,0,2)  | $+i_c$ | (-2,-2,0) | $-i_c$ |                              |
| (2,0,2)  | $-i_b$ | (0,-2,0)  | $+i_b$ |                              |
| (2,1,0)  | $-i_c$ | (0,-1,-2) | $+i_c$ |                              |
| (1,2,0)  | $-i_c$ | (-1,0,-2) | $+i_c$ |                              |
| (0,2,1)  | $-i_a$ | (-2,0,-1) | $+i_a$ |                              |
| (0,1,2)  | $-i_a$ | (-2,-1,0) | $+i_a$ |                              |
| (1,0,2)  | $-i_b$ | (-1,-2,0) | $+i_b$ |                              |
| (2,0,1)  | $-i_b$ | (0,-2,-1) | $+i_b$ |                              |
| (1,0,-1) | $-i_b$ | —         | —      | Instable                     |
| (0,1,-1) | $-i_a$ | —         | —      |                              |
| (-1,1,0) | $-i_c$ | —         | —      |                              |
| (-1,0,1) | $-i_b$ | —         | —      |                              |
| (0,-1,1) | $-i_a$ | —         | —      |                              |
| (1,-1,0) | $-i_c$ | —         | —      |                              |
| (2,0,-1) | $-i_b$ | —         | —      |                              |
| (1,0,-2) | $-i_b$ | —         | —      |                              |
| (0,1,-2) | $-i_a$ | —         | —      |                              |
| (0,2,-1) | $-i_a$ | —         | —      |                              |
| (-1,2,0) | $-i_c$ | —         | —      |                              |
| (-2,1,0) | $-i_c$ | —         | —      |                              |
| (-2,0,1) | $-i_b$ | —         | —      |                              |
| (-1,0,2) | $-i_b$ | —         | —      |                              |
| (0,-1,2) | $-i_a$ | —         | —      |                              |
| (0,-2,1) | $-i_a$ | —         | —      |                              |
| (1,-2,0) | $-i_c$ | —         | —      |                              |

→ Suite du tableau

|            |        |            |   |                           |
|------------|--------|------------|---|---------------------------|
| (2,-1,0)   | $-i_c$ | —          | — | Intrinsèquement<br>stable |
| (2,0,-2)   | $-i_b$ | —          | — |                           |
| (0,2,-2)   | $-i_a$ | —          | — |                           |
| (-2,2,0)   | $-i_c$ | —          | — |                           |
| (-2,0,2)   | $-i_b$ | —          | — |                           |
| (0,-2,2)   | $-i_a$ | —          | — |                           |
| (2,-2,0)   | $-i_c$ | —          | — |                           |
| (0,0,0)    | 0      | —          | — |                           |
| (1,1,1)    | 0      | —          | — |                           |
| (2,2,2)    | 0      | —          | — |                           |
| (-1,-1,-1) | 0      | —          | — |                           |
| (-2,-2,-2) | 0      | —          | — |                           |
| (2,1,1)    | 0      | (-1,-2,-2) | 0 |                           |
| (2,2,1)    | 0      | (-1,-1,-2) | 0 |                           |
| (1,2,1)    | 0      | (-2,-1,-2) | 0 |                           |
| (1,2,2)    | 0      | (-2,-1,-1) | 0 |                           |
| (1,1,2)    | 0      | (-2,-2,-1) | 0 |                           |
| (2,1,2)    | 0      | (-1,-2,-1) | 0 |                           |
| (1,-1,-1)  | 0      | —          | — |                           |
| (1,1,-1)   | 0      | —          | — |                           |
| (-1,1,-1)  | 0      | —          | — |                           |
| (-1,1,1)   | 0      | —          | — |                           |
| (-1,-1,1)  | 0      | —          | — |                           |
| (1,-1,1)   | 0      | —          | — |                           |
| (2,-1,-1)  | 0      | (1,-2,-2)  | 0 |                           |
| (2,2,-1)   | 0      | (1,1,-2)   | 0 |                           |
| (-1,2,-1)  | 0      | (-2,1,-2)  | 0 |                           |
| (-1,2,2)   | 0      | (-2,1,1)   | 0 |                           |
| (-1,-1,2)  | 0      | (-2,-2,1)  | 0 |                           |
| (2,-1,2)   | 0      | (1,-2,1)   | 0 |                           |
| (1,-1,-2)  | 0      | —          | — |                           |
| (2,1,-1)   | 0      | —          | — |                           |
| (1,2,-1)   | 0      | —          | — |                           |
| (-1,1,-2)  | 0      | —          | — |                           |
| (-2,1,-1)  | 0      | —          | — |                           |
| (-1,2,1)   | 0      | —          | — |                           |
| (-1,1,2)   | 0      | —          | — |                           |
| (-2,-1,1)  | 0      | —          | — |                           |
| (-1,-2,1)  | 0      | —          | — |                           |
| (1,-1,2)   | 0      | —          | — |                           |
| (2,-1,1)   | 0      | —          | — |                           |

→ Suite du tableau

|           |   |   |   |
|-----------|---|---|---|
| (1,-2,-1) | 0 | — | — |
| (2,-1,-2) | 0 | — | — |
| (2,1,-2)  | 0 | — | — |
| (1,2,-2)  | 0 | — | — |
| (-1,2,-2) | 0 | — | — |
| (-2,2,-1) | 0 | — | — |
| (-2,2,1)  | 0 | — | — |
| (-2,1,2)  | 0 | — | — |
| (-2,-1,2) | 0 | — | — |
| (-1,-2,2) | 0 | — | — |
| (1,-2,2)  | 0 | — | — |
| (2,-2,1)  | 0 | — | — |
| (2,-2,-1) | 0 | — | — |
| (2,-2,-2) | 0 | — | — |
| (2,2,-2)  | 0 | — | — |
| (-2,2,-2) | 0 | — | — |
| (-2,2,2)  | 0 | — | — |
| (-2,-2,2) | 0 | — | — |
| (2,-2,2)  | 0 | — | — |

### 3.4.2 MISE AU POINT DE L'ALGORITHME DE CONTROLE

Prenons l'exemple des deux vecteurs de tension 28 et 40 qui appartiennent tous les deux à deux sous groupes différents formant le groupe 4. Ces deux vecteurs ont la même amplitude, donc produisant le même effet sur les grandeurs de contrôle, cependant ils ont des actions contraires sur la variation du potentiel du point milieu. La figure 3.29 montre l'état des interrupteurs et la circulation des courants dans le cas où l'onduleur délivre ces deux tensions.

En effet, la séquence (0,2,0) correspondant au vecteur de tension 28, fait intervenir la paire de condensateurs  $C_{12}$ , alors que le vecteur de tension 40 de séquence (-2,0,-2) fait appel plutôt à la paire  $C_{-12}$ . Par conséquent, la 1ère séquence conduit à une décharge de la paire  $C_{12}$  (c'est-à-dire une augmentation du potentiel du point milieu), alors que la seconde séquence provoque une décharge de cet même ensemble se traduisant par une diminution du potentiel du point milieu de l'onduleur.

En appliquant le même raisonnement aux vecteurs de tension restants appartenant à la classe des vecteurs stables par la commande, on peut déduire le tableau suivant donnant l'influence de chacun de ces vecteurs sur la tension aux bornes des deux ensembles de condensateurs.

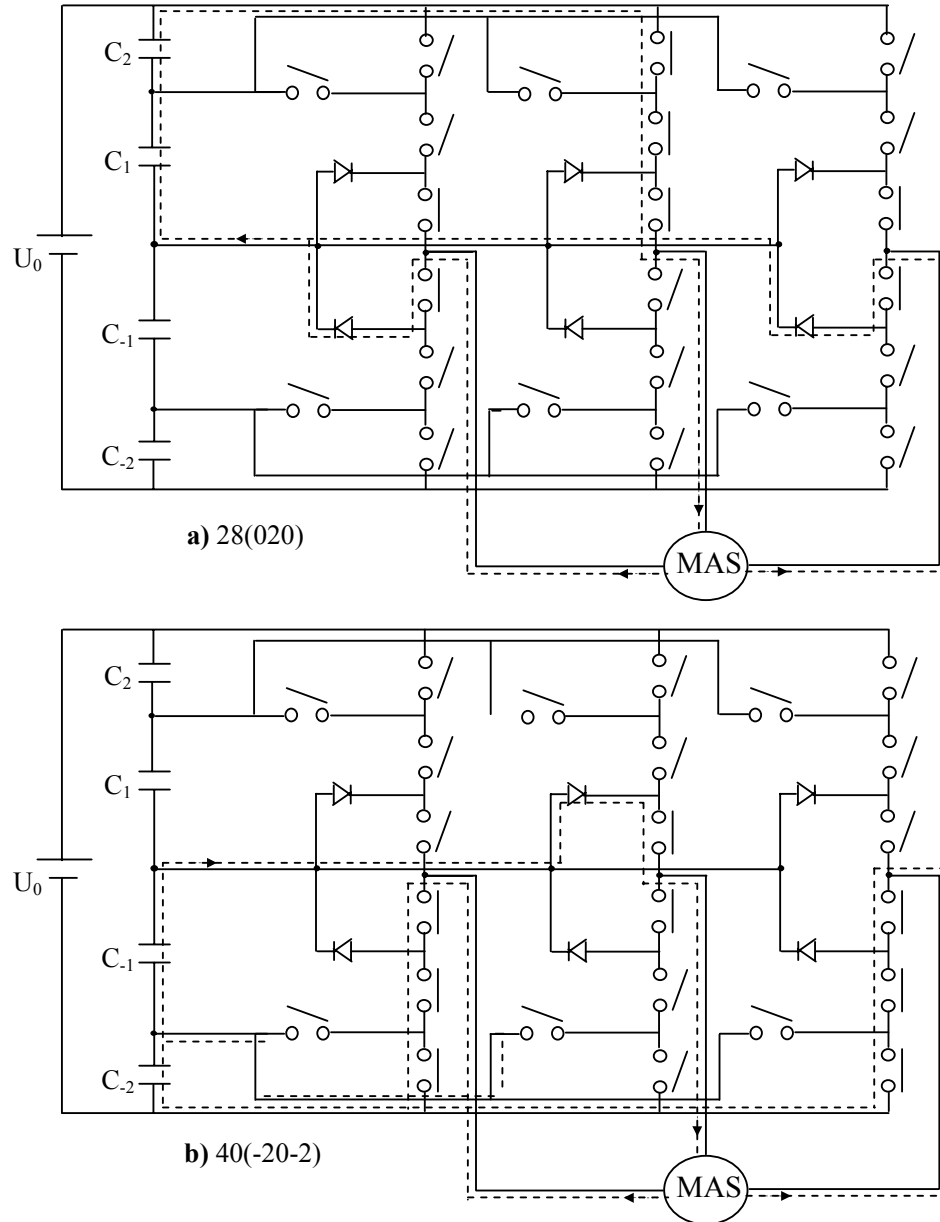


**Figure 3.29** Effet de l'application de 2 séquences appartenant à 2 sous groupes différents ayant des actions contraires sur le point milieu de l'onduleur

Comme dans le cas de l'alimentation par un onduleur à 3-niveaux de tension, ce degré de liberté supplémentaire dans le choix du vecteur de tension à alimenter la machine permet de contrôler le potentiel du point milieu et donc de minimiser l'écart entre les tensions aux bornes des deux paires  $C_{12}$  et  $C_{-12}$ , et ceci dans les limites imposées par un contrôleur à hystérésis simple semblable à celui développé en 2.4.3.

Le déséquilibre des charges des deux ensembles s'écrit:

$$\varepsilon_U = U_{C_{12}} - U_{C_{-12}} \quad (3-4)$$

**Tableau 3.10** Influence des vecteurs dits "stables par la commande" sur la tension des paires de condensateurs.

| Vecteur de tension | $\Delta U_{C12}$ | $\Delta U_{C-12}$ | Vecteur de tension | $\Delta U_{C12}$ | $\Delta U_{C-12}$ |
|--------------------|------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| (1,0,0)            | —                | +                 | (0,-1,-1)          | +                | —                 |
| (1,1,0)            | —                | +                 | (0,0,-1)           | +                | —                 |
| (0,1,0)            | —                | +                 | (-1,0,-1)          | +                | —                 |
| (0,1,1)            | —                | +                 | (-1,0,0)           | +                | —                 |
| (0,0,1)            | —                | +                 | (-1,-1,0)          | +                | —                 |
| (1,0,1)            | —                | +                 | (0,-1,0)           | +                | —                 |
| (2,0,0)            | —                | +                 | (0,-2,-2)          | +                | —                 |
| (2,2,0)            | —                | +                 | (0,0,-2)           | +                | —                 |
| (0,2,0)            | —                | +                 | (-2,0,-2)          | +                | —                 |
| (0,2,2)            | —                | +                 | (-2,0,0)           | +                | —                 |
| (0,0,2)            | —                | +                 | (-2,-2,0)          | +                | —                 |
| (2,0,2)            | —                | +                 | (0,-2,0)           | +                | —                 |
| (2,1,0)            | —                | +                 | (0,-1,-2)          | +                | —                 |
| (1,2,0)            | —                | +                 | (-1,0,-2)          | +                | —                 |
| (0,2,1)            | —                | +                 | (-2,0,-1)          | +                | —                 |
| (0,1,2)            | —                | +                 | (-2,-1,0)          | +                | —                 |
| (1,0,2)            | —                | +                 | (-1,-2,0)          | +                | —                 |
| (2,0,1)            | —                | +                 | (0,-2,-1)          | +                | —                 |

 $C_{12} \equiv (C_1, C_2)$  $C_{-12} \equiv (C_{-1}, C_{-2})$ 

"+" évolution positive

"-" évolution négative

Les tensions simples se mettent en fonction des tensions aux bornes des ensembles condensateurs comme suit:

$$\begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a12} & S_{a-12} \\ S_{b12} & S_{b-12} \\ S_{c12} & S_{c-12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{C12} \\ U_{C-12} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

où  $S_{i12}$  et  $S_{i-12}$  représentent les états des demi bras de l'onduleur respectivement positifs et négatifs, tels que:

$$\begin{cases} S_a = 0 \Rightarrow S_{a12} = 0 & S_{a-12} = 0 \\ S_a = 1 \Rightarrow S_{a12} = \frac{1}{2} & S_{a-12} = 0 \\ S_a = 2 \Rightarrow S_{a12} = 1 & S_{a-12} = 0 \\ S_a = -1 \Rightarrow S_{a12} = 0 & S_{a-12} = \frac{1}{2} \\ S_a = -2 \Rightarrow S_{a12} = 0 & S_{a-12} = 1 \end{cases} \quad (3-6)$$

Les tensions  $U_{C12}$  et  $U_{C-12}$  s'expriment:

$$\begin{cases} U_{C12} = \frac{U_0}{2} + \varepsilon_u \\ U_{C-12} = \frac{U_0}{2} - \varepsilon_u \end{cases} \quad (3-7)$$

Dans le cas particulier où  $C_1=C_2=C_{-1}=C_{-2}=C_0$ , nous pouvons écrire la relation dynamique ci-après:

$$i_0 = -2C \frac{d\varepsilon_u}{dt} \quad (3-8)$$

Où  $C$  représente la capacité équivalent de chaque ensemble de condensateurs, soit:  $C = C_{12} = C_{-12} = \frac{C_0}{2}$ .

### 3.4.3 APPLICATION AUX CAS DES TABLES DE COMMANDE ETABLIES

Le raisonnement développé au chapitre précédent demeure toujours valable dans le cas d'une alimentation à l'aide d'un onduleur à 5-niveaux de tension. De ce fait, les tables Tab51S, Tab52S et Tab55S donnant sur une décharge de la paire de condensateurs  $C_{12}$  sont complétées par l'action de décharge de l'autre paire  $C_{-12}$ , la régulation du potentiel du point milieu est alors possible. Cela débouche sur les nouvelles tables de commande Tab51E, Tab52E et Tab55E permettant la régulation en plus du flux et du couple, des tensions aux bornes des condensateurs d'entrée de l'onduleur. Les tables restantes soient Tab53E et Tab54E composées exclusivement de vecteurs de tension dits "stables par la commande" et de vecteurs de tension dits "instables", assurent ces fonctions par leur construction même.

### 3.4.4 SCHEMA GLOBAL DE CONTROLE

Le schéma du contrôle direct du couple d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC est semblable au cas d'alimentation par un onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC.

Néanmoins, dans la stratégie à une table de commande unique, le contrôleur du couple devient plus performant vu le grand nombre de vecteurs de tension que peut fournir l'onduleur de tension.

La référence du couple est obtenue par régulation de la vitesse mécanique à l'aide d'un régulateur linéaire de type PI. Le démarrage de la machine s'effectue grâce aux tables Tab51E et Tab52E. La table Tab55E est quant à elle utilisée à toute vitesse de rotation.

**Tableau 3.11** Table de commande Tab51E utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone et assurant la stabilisation du point milieu de l'onduleur.Cas où  $\Omega \leq 4.5\% \Omega_{nom}$ 

|          |            |               | S  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------|------------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | $C_U$         | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| +1       | +2         | 1             | 88 | 39 | 90 | 40 | 92 | 41 | 94 | 42 | 96 | 43 | 98 | 38 |
|          |            | 0             | 88 | 27 | 90 | 28 | 92 | 29 | 94 | 30 | 96 | 31 | 98 | 26 |
|          | +1         | 1             | 50 | 14 | 51 | 15 | 52 | 16 | 53 | 17 | 54 | 18 | 55 | 13 |
|          |            | 0             | 50 | 2  | 51 | 3  | 52 | 4  | 53 | 5  | 54 | 6  | 55 | 1  |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 1             | 55 | 13 | 50 | 14 | 51 | 15 | 52 | 16 | 53 | 17 | 54 | 18 |
|          |            | 0             | 55 | 1  | 50 | 2  | 51 | 3  | 52 | 4  | 53 | 5  | 54 | 6  |
|          | -2         | 1             | 97 | 38 | 87 | 39 | 89 | 40 | 91 | 41 | 93 | 42 | 95 | 43 |
|          |            | 0             | 97 | 26 | 87 | 27 | 89 | 28 | 91 | 29 | 93 | 30 | 95 | 31 |
| 0        | +2         | 1             | 90 | 40 | 92 | 41 | 94 | 42 | 96 | 43 | 98 | 38 | 88 | 39 |
|          |            | 0             | 90 | 28 | 92 | 29 | 94 | 30 | 96 | 31 | 98 | 26 | 88 | 27 |
|          | +1         | 1             | 51 | 15 | 52 | 16 | 53 | 17 | 54 | 18 | 55 | 13 | 50 | 14 |
|          |            | 0             | 51 | 3  | 52 | 4  | 53 | 5  | 54 | 6  | 55 | 1  | 50 | 2  |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 1             | 54 | 18 | 55 | 13 | 50 | 14 | 51 | 15 | 52 | 16 | 53 | 17 |
|          |            | 0             | 54 | 6  | 55 | 1  | 50 | 2  | 51 | 3  | 52 | 4  | 53 | 5  |
|          | -2         | 1             | 42 | 95 | 43 | 97 | 38 | 87 | 39 | 89 | 40 | 91 | 41 | 93 |
|          |            | 0             | 30 | 95 | 31 | 97 | 26 | 87 | 27 | 89 | 28 | 91 | 29 | 93 |
| -1       | +2         | 1             | 40 | 91 | 41 | 93 | 42 | 95 | 43 | 97 | 38 | 87 | 39 | 89 |
|          |            | 0             | 28 | 91 | 29 | 93 | 30 | 95 | 31 | 97 | 26 | 87 | 27 | 89 |
|          | +1         | 1             | 15 | 52 | 16 | 53 | 17 | 54 | 18 | 55 | 13 | 50 | 14 | 51 |
|          |            | 0             | 3  | 52 | 4  | 53 | 5  | 54 | 6  | 55 | 1  | 50 | 2  | 51 |
|          | 0          | vecteurs nuls |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|          | -1         | 1             | 17 | 54 | 18 | 55 | 13 | 50 | 14 | 51 | 15 | 52 | 16 | 53 |
|          |            | 0             | 5  | 54 | 6  | 55 | 1  | 50 | 2  | 51 | 3  | 52 | 4  | 53 |
|          | -2         | 1             | 42 | 95 | 43 | 97 | 38 | 87 | 39 | 89 | 40 | 91 | 41 | 93 |
|          |            | 0             | 30 | 95 | 31 | 97 | 26 | 87 | 27 | 89 | 28 | 91 | 29 | 93 |

### 3.4.5 SIMULATIONS

Pour matérialiser le déséquilibre entre les tensions  $U_{C12}$  et  $U_{C-12}$  des paires de condensateurs, on applique les vecteurs de tension des seules sous groupes ayant la même influence sur ces tensions, les 4 condensateurs d'entrée de l'onduleur sont tous de même capacité de valeur 7.2 mF. Les résultats visibles sur la figure 3.30 concluent à la nécessité d'un contrôle du potentiel du point milieu de l'onduleur. En effet, ce déséquilibre des tensions des deux paires de condensateurs introduit une instabilité au niveau des tensions de sortie de l'onduleur, certes moins importante que dans le cas d'une alimentation par un onduleur à 3-niveaux de tension.

**Tableau 3.12** Table de commande Tab52E utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone et assurant la stabilisation du point milieu de l'onduleur.Cas où  $4.5\% \Omega_{nom} < \Omega \leq 40\% \Omega_{nom}$ 

|          |            |               | S   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | $C_U$         | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
| +1       | +2         | 1             | 118 | 64  | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  | 122 | 68  | 123 | 63  |
|          |            | 0             | 118 | 64  | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  | 122 | 68  | 123 | 63  |
|          | +1         | 1             | 88  | 39  | 90  | 40  | 92  | 41  | 94  | 42  | 96  | 43  | 98  | 38  |
|          |            | 0             | 88  | 27  | 90  | 28  | 92  | 29  | 94  | 30  | 96  | 31  | 98  | 26  |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 1             | 97  | 38  | 87  | 39  | 89  | 40  | 91  | 41  | 93  | 42  | 95  | 43  |
|          |            | 0             | 97  | 26  | 87  | 27  | 89  | 28  | 91  | 29  | 93  | 30  | 95  | 31  |
|          | -2         | 1             | 123 | 63  | 118 | 64  | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  | 122 | 68  |
|          |            | 0             | 123 | 63  | 118 | 64  | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  | 122 | 68  |
| 0        | +2         | 1             | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  | 122 | 68  | 123 | 63  | 118 | 64  |
|          |            | 0             | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  | 122 | 68  | 123 | 63  | 118 | 64  |
|          | +1         | 1             | 90  | 40  | 92  | 41  | 94  | 42  | 96  | 43  | 98  | 38  | 88  | 39  |
|          |            | 0             | 90  | 28  | 92  | 29  | 94  | 30  | 96  | 31  | 98  | 26  | 88  | 27  |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 1             | 42  | 95  | 43  | 97  | 38  | 87  | 39  | 89  | 40  | 91  | 41  | 93  |
|          |            | 0             | 30  | 95  | 31  | 97  | 26  | 87  | 27  | 89  | 28  | 91  | 29  | 93  |
|          | -2         | 1             | 122 | 68  | 123 | 63  | 118 | 64  | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  |
|          |            | 0             | 122 | 68  | 123 | 63  | 118 | 64  | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  |
| -1       | +2         | 1             | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  | 122 | 68  | 123 | 63  | 118 | 64  | 119 |
|          |            | 0             | 65  | 120 | 66  | 121 | 67  | 122 | 68  | 123 | 63  | 118 | 64  | 119 |
|          | +1         | 1             | 40  | 91  | 41  | 93  | 42  | 95  | 43  | 97  | 38  | 87  | 39  | 89  |
|          |            | 0             | 28  | 91  | 29  | 93  | 30  | 95  | 31  | 97  | 26  | 87  | 27  | 89  |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 1             | 42  | 95  | 43  | 97  | 38  | 87  | 39  | 89  | 40  | 91  | 41  | 93  |
|          |            | 0             | 30  | 95  | 31  | 97  | 26  | 87  | 27  | 89  | 28  | 91  | 29  | 93  |
|          | -2         | 1             | 67  | 122 | 68  | 123 | 63  | 118 | 64  | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 |
|          |            | 0             | 67  | 122 | 68  | 123 | 63  | 118 | 64  | 119 | 65  | 120 | 66  | 121 |

Le contrôle du point milieu est maintenant réalisé, la figure suivante illustre nos résultats lorsqu'on applique les tables de commande Tab51E, Tab52E, Tab53E et Tab54E pour la stratégie à plusieurs tables et la table Tab55E dans le cadre de la stratégie à une tables de commande unique.

On remarque, comme dans le cas de l'onduleur à 3-niveaux de tension, que les variations du potentiel du point milieu est bien différente si on appliquait ou pas les vecteurs de tension stables par la commande, ceci est bien perceptible sur la courbe obtenue par la stratégie à plusieurs tables. Cette variation est régulière quand la vitesse de rotation est inférieure à

40% de la vitesse nominale. La forme du courant du point milieu s'est nettement améliorée et on retrouve la périodicité et la symétrie de ce courant.

**Tableau 3.13** Table de commande Tab53E utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone et assurant la stabilisation du point milieu de l'onduleur.

Cas où  $40\% \Omega_{\text{nom}} < \Omega \leq 75\% \Omega_{\text{nom}}$

|          |            |               | S   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | $C_U$         | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
| +1       | +2         | 1             | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 |
|          |            | 0             | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 |
|          | +1         | 1             | 88  | 64  | 90  | 65  | 92  | 66  | 94  | 67  | 96  | 68  | 98  | 63  |
|          |            | 0             | 88  | 64  | 90  | 65  | 92  | 66  | 94  | 67  | 96  | 68  | 98  | 63  |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 1             | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  | 65  | 91  | 66  | 93  | 67  | 95  | 68  |
|          |            | 0             | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  | 65  | 91  | 66  | 93  | 67  | 95  | 68  |
|          | -2         | 1             | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 |
|          |            | 0             | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 |
| 0        | +2         | 1             | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 |
|          |            | 0             | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 |
|          | +1         | 1             | 90  | 65  | 92  | 66  | 94  | 67  | 96  | 68  | 98  | 63  | 88  | 64  |
|          |            | 0             | 90  | 65  | 92  | 66  | 94  | 67  | 96  | 68  | 98  | 63  | 88  | 64  |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 1             | 95  | 68  | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  | 65  | 91  | 66  | 93  | 67  |
|          |            | 0             | 95  | 68  | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  | 65  | 91  | 66  | 93  | 67  |
|          | -2         | 1             | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 |
|          |            | 0             | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 |
| -1       | +2         | 1             | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 |
|          |            | 0             | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 |
|          | +1         | 1             | 65  | 91  | 66  | 93  | 67  | 95  | 68  | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  |
|          |            | 0             | 65  | 91  | 66  | 93  | 67  | 95  | 68  | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 1             | 67  | 95  | 68  | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  | 65  | 91  | 66  | 93  |
|          |            | 0             | 67  | 95  | 68  | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  | 65  | 91  | 66  | 93  |
|          | -2         | 1             | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 |
|          |            | 0             | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 |

### 3.4.6 CONCLUSION

Le présent chapitre a traité de l'application du CDC d'une machine asynchrone à alimentation par onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC. La loi de commande met en œuvre deux stratégies de contrôle et plusieurs tables ont été proposées et évaluées. Le

nombre important de vecteurs de tension pouvant être délivrés par cet onduleur confère à notre stratégie un contrôle plus rigoureux et plus fin des grandeurs à réguler comparativement aux cas d'alimentation par un onduleur à 3-niveaux ou encore par un onduleur classique à 2-niveaux de tension. Toutefois, nous avons également montré que ce résultat dépendait fortement de l'aptitude du contrôle à maintenir stable le potentiel du point milieu de l'onduleur, l'inconvénient principal de ce type d'onduleurs. A cet effet, la même procédure d'équilibrage que dans le chapitre précédent est exploitée, notre choix s'est porté sur un équilibrage par paires de condensateur.

**Tableau 3.14** Table de commande Tab54E utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone et assurant la stabilisation du point milieu de l'onduleur.

Cas où  $\Omega > 75\% \Omega_{nom}$

|          |            |               | S   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | $C_U$         | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
| +1       | +2         | 1             | 107 | 101 | 109 | 102 | 111 | 103 | 113 | 104 | 115 | 105 | 117 | 100 |
|          |            | 0             | 107 | 101 | 109 | 102 | 111 | 103 | 113 | 104 | 115 | 105 | 117 | 100 |
|          | +1         | 1             | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 |
|          |            | 0             | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 1             | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 |
|          |            | 0             | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 |
|          | -2         | 1             | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 | 104 | 114 | 105 |
|          |            | 0             | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 | 104 | 114 | 105 |
| 0        | +2         | 1             | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 |
|          |            | 0             | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 |
|          | +1         | 1             | 109 | 102 | 111 | 103 | 113 | 104 | 115 | 105 | 117 | 100 | 107 | 101 |
|          |            | 0             | 109 | 102 | 111 | 103 | 113 | 104 | 115 | 105 | 117 | 100 | 107 | 101 |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 1             | 104 | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 |
|          |            | 0             | 104 | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 |
|          | -2         | 1             | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 |
|          |            | 0             | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 |
| -1       | +2         | 1             | 102 | 110 | 103 | 112 | 104 | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 |
|          |            | 0             | 102 | 110 | 103 | 112 | 104 | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 |
|          | +1         | 1             | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 |
|          |            | 0             | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 1             | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 |
|          |            | 0             | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 |
|          | -2         | 1             | 104 | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 |
|          |            | 0             | 104 | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 |

**Tableau 3.15** Table de commande Tab55E utilisée dans le CDC d'une machine asynchrone et assurant la stabilisation du point milieu de l'onduleur.

| $C_\phi$ | $C_\Gamma$ | $C_U$         | S   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          |            |               | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
| +1       | +4         | 1             | 107 | 101 | 109 | 102 | 111 | 103 | 113 | 104 | 115 | 105 | 117 | 100 |
|          |            | 0             | 107 | 101 | 109 | 102 | 111 | 103 | 113 | 104 | 115 | 105 | 117 | 100 |
|          | +3         | 1             | 88  | 64  | 90  | 65  | 92  | 66  | 94  | 67  | 96  | 68  | 98  | 63  |
|          |            | 0             | 88  | 64  | 90  | 65  | 92  | 66  | 94  | 67  | 96  | 68  | 98  | 63  |
|          | +2         | 1             | 118 | 39  | 119 | 40  | 120 | 41  | 121 | 42  | 122 | 43  | 123 | 38  |
|          |            | 0             | 118 | 27  | 119 | 28  | 120 | 29  | 121 | 30  | 122 | 31  | 123 | 26  |
|          | +1         | 1             | 50  | 14  | 51  | 15  | 52  | 16  | 53  | 17  | 54  | 18  | 55  | 13  |
|          |            | 0             | 50  | 2   | 51  | 3   | 52  | 4   | 53  | 5   | 54  | 6   | 55  | 1   |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 1             | 55  | 13  | 50  | 14  | 51  | 15  | 52  | 16  | 53  | 17  | 54  | 18  |
|          |            | 0             | 55  | 1   | 50  | 2   | 51  | 3   | 52  | 4   | 53  | 5   | 54  | 6   |
|          | -2         | 1             | 123 | 38  | 118 | 39  | 119 | 40  | 120 | 41  | 121 | 42  | 122 | 43  |
|          |            | 0             | 123 | 26  | 118 | 27  | 119 | 28  | 120 | 29  | 121 | 30  | 122 | 31  |
|          | -3         | 1             | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  | 65  | 91  | 66  | 93  | 67  | 95  | 68  |
|          |            | 0             | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  | 65  | 91  | 66  | 93  | 67  | 95  | 68  |
|          | -4         | 1             | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 | 104 | 114 | 105 |
|          |            | 0             | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 | 104 | 114 | 105 |
| 0        | +4         | 1             | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 |
|          |            | 0             | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 |
|          | +3         | 1             | 51  | 65  | 52  | 66  | 53  | 67  | 54  | 68  | 55  | 63  | 44  | 64  |
|          |            | 0             | 51  | 65  | 52  | 66  | 53  | 67  | 54  | 68  | 55  | 63  | 44  | 64  |
|          | +2         | 1             | 90  | 40  | 92  | 41  | 94  | 42  | 96  | 43  | 98  | 38  | 88  | 39  |
|          |            | 0             | 90  | 28  | 92  | 29  | 94  | 30  | 96  | 31  | 98  | 26  | 88  | 27  |
|          | +1         | 1             | 109 | 15  | 111 | 16  | 113 | 17  | 115 | 18  | 117 | 13  | 107 | 14  |
|          |            | 0             | 109 | 3   | 111 | 4   | 113 | 5   | 115 | 6   | 117 | 1   | 107 | 2   |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 1             | 17  | 114 | 18  | 116 | 13  | 106 | 14  | 108 | 15  | 110 | 16  | 112 |
|          |            | 0             | 5   | 114 | 6   | 116 | 1   | 106 | 2   | 108 | 3   | 110 | 4   | 112 |
|          | -2         | 1             | 42  | 95  | 43  | 97  | 38  | 87  | 39  | 89  | 40  | 91  | 41  | 93  |
|          |            | 0             | 30  | 95  | 31  | 97  | 26  | 87  | 27  | 89  | 28  | 91  | 29  | 93  |
|          | -3         | 1             | 54  | 68  | 55  | 63  | 50  | 64  | 51  | 65  | 52  | 66  | 53  | 67  |
|          |            | 0             | 54  | 68  | 55  | 63  | 50  | 64  | 51  | 65  | 52  | 66  | 53  | 67  |
|          | -4         | 1             | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 |
|          |            | 0             | 122 | 105 | 123 | 100 | 118 | 101 | 119 | 102 | 120 | 103 | 121 | 104 |
| -1       | +4         | 1             | 102 | 110 | 103 | 112 | 104 | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 |
|          |            | 0             | 102 | 110 | 103 | 112 | 104 | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 |
|          | +3         | 1             | 65  | 91  | 66  | 93  | 67  | 95  | 68  | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  |
|          |            | 0             | 65  | 91  | 66  | 93  | 67  | 95  | 68  | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  |
|          | +2         | 1             | 40  | 120 | 41  | 121 | 42  | 122 | 43  | 123 | 38  | 118 | 39  | 119 |
|          |            | 0             | 28  | 120 | 29  | 121 | 30  | 122 | 31  | 123 | 26  | 118 | 27  | 119 |
|          | +1         | 1             | 15  | 52  | 16  | 53  | 17  | 54  | 18  | 55  | 13  | 50  | 14  | 51  |
|          |            | 0             | 3   | 52  | 4   | 53  | 5   | 54  | 6   | 55  | 1   | 44  | 2   | 51  |
|          | 0          | vecteurs nuls |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | -1         | 1             | 17  | 54  | 18  | 55  | 13  | 44  | 14  | 51  | 15  | 52  | 16  | 53  |
|          |            | 0             | 5   | 54  | 6   | 55  | 1   | 44  | 2   | 51  | 3   | 52  | 4   | 53  |
|          | -2         | 1             | 42  | 122 | 43  | 123 | 38  | 118 | 39  | 119 | 40  | 120 | 41  | 121 |
|          |            | 0             | 30  | 122 | 31  | 123 | 26  | 118 | 27  | 119 | 28  | 120 | 29  | 121 |
|          | -3         | 1             | 67  | 95  | 68  | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  | 65  | 91  | 66  | 93  |
|          |            | 0             | 67  | 95  | 68  | 97  | 63  | 87  | 64  | 89  | 65  | 91  | 66  | 93  |
|          | -4         | 1             | 104 | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 |
|          |            | 0             | 104 | 114 | 105 | 116 | 100 | 106 | 101 | 108 | 102 | 110 | 103 | 112 |

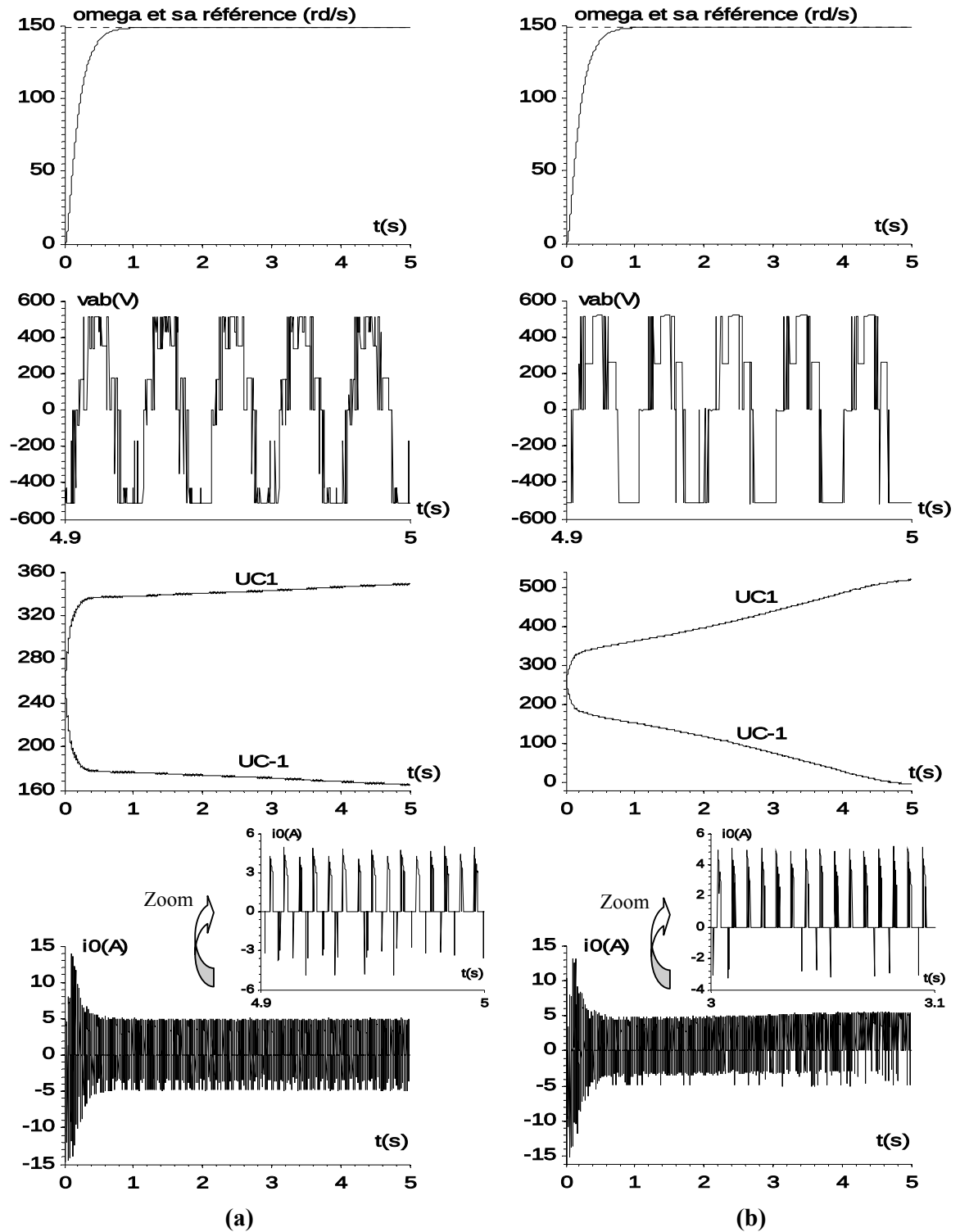


**Figure 3.30** Nécessité du contrôle du point milieu de l'onduleur lors de l'application des vecteurs du groupe "demi tension": vitesse de rotation et sa référence, tension de ligne, tensions de paires de condensateurs ( $U_{C12}, U_{C-12}$ ) et courant de potentiel du point milieu. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à plusieurs tables.

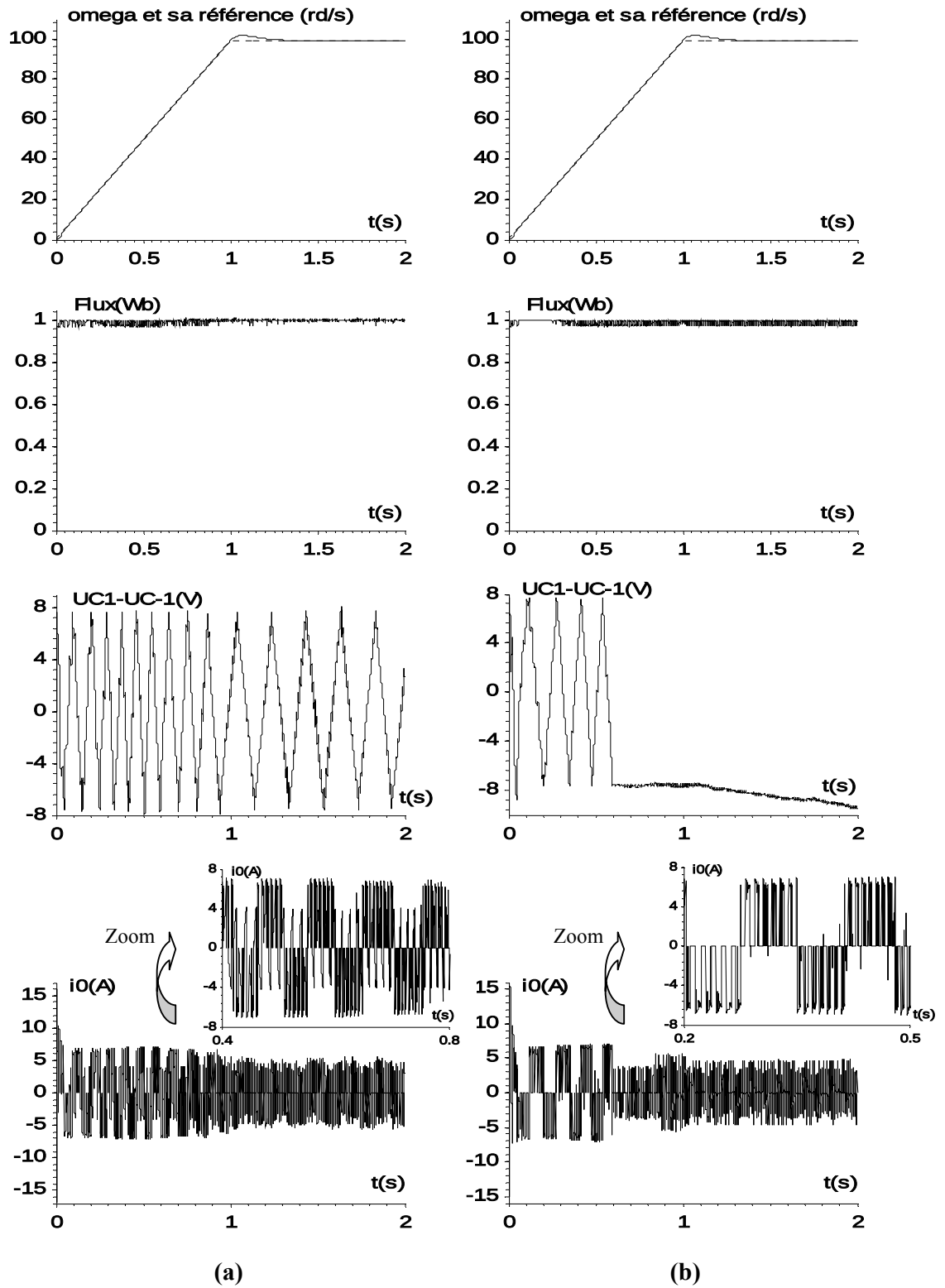


**Figure 3.31** Régulation du potentiel du point milieu de l'onduleur: vitesse de rotation et sa référence, tension de ligne, tensions de paires de condensateurs ( $U_{C12}, U_{C-12}$ ) et courant de potentiel du point milieu. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à plusieurs tables.

D'autre part, on a vu que cette stratégie de contrôle repose essentiellement sur des tables de commande qui gèrent le fonctionnement de l'onduleur de tension. On a montré que ces tables deviennent de plus en plus complexes et lourdes d'utilisation au fur et à mesure que le nombre de niveaux de l'onduleur augmente, le choix du vecteur de tension devant être de plus en plus sélectif. Cet état de fait présage des difficultés lors d'une éventuelle implantation notamment en terme d'espace mémoire et d'exécution en temps réel.

La suite logique de ce travail serait assurément la mise en œuvre d'une nouvelle commande basée sur l'intelligence artificielle, qui pourra optimiser la commande classique actuelle.

## APPLICATION DES RESEAUX DE NEURONES AU CONTROLE DIRECT DU COUPLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

### 4.1 INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons développé et analysé le contrôle direct du couple d'une machine asynchrone alimentée par onduleurs multiniveaux (2, 3 et 5 niveaux de tension). Les résultats prometteurs certes, nous poussent tout de même à soulever la problématique des dimensions des tables de commande qui augmentent au fur et à mesure que le niveau de l'onduleur augmente. En effet, cet état de fait pose de sérieuses contraintes dans l'espace mémoire à réserver pour le stockage et surtout dans l'exécution en temps réel lors d'une éventuelle implémentation sur  $\mu$ processeur.

Notre proposition qui fera d'ailleurs l'objet de ce chapitre, se résume à substituer cette table de commande par un sélecteur à base de réseaux de neurones [61,62]. Ces derniers sont connus pour leur capacité d'apprentissage, leur rapidité et leur faculté de généralisation [63]-[65]. Ainsi, un réseau de neurones, à propagation avant (ou feedforward en anglais), multicouche et entièrement connecté est le plus souvent utilisé dans les applications de commande de systèmes non linéaires [8,66], sa structure est montrée à la figure 4.1.

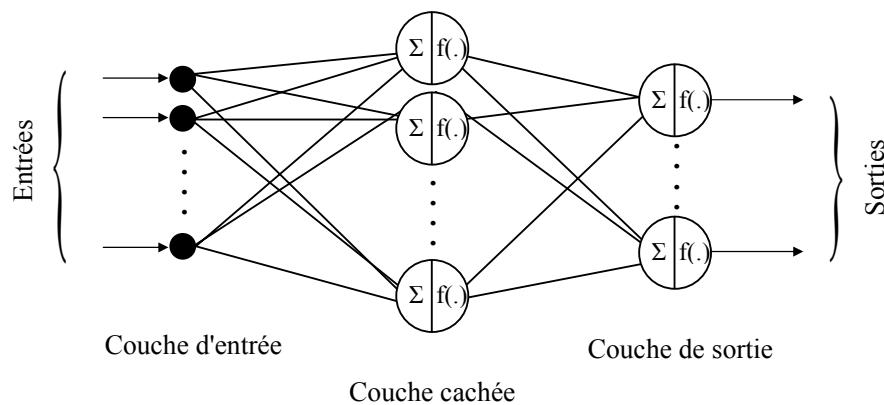


**Figure 4.1** Structure d'un réseau de neurones multicouche à propagation avant

La mise en œuvre de ces structures neuronales se résume dans les étapes décrites ci-après.

- Construction de la base d'apprentissage
- Choix de la structure du réseau
- Choix de la fonction d'activation
- L'apprentissage

## **4.2 CONCEPTION DE LA STRUCTURE A RESEAUX DE NEURONES**

Pour construire un réseau de neurones, la première chose à faire est de bien choisir les échantillons de données d'apprentissage, de test et validation. Ce n'est qu'ensuite que le choix du type de réseau interviendra.

Afin de clarifier les idées, on décrit de façon chronologique les quatre (4) grandes étapes en vu de la création d'une structure de réseau de neurones.

### **A) CONSTRUCTION DE LA BASE D'APPRENTISSAGE**

Cette étape est cruciale du moment qu'elle conçoit la base d'apprentissage et va aider à déterminer plus tard le type de réseau et sa structure.

Dans notre cas les échantillons ou les exemples devant être présentés à la structure pendant la phase d'apprentissage constitue la totalité des données de la table de commande et ceci à l'inverse des échantillons issus de la simulation qui peuvent ne pas refléter la table de commande en entier. En effet, dans ce cas, la structure neuronale adoptée risque de ne pas être valable pour toutes les machines et pour tous les tests.

### **B) CHOIX DE LA STRUCTURE DU RESEAU**

La structure du réseau dépend étroitement de la base d'apprentissage. Les échantillons ou les exemples de la table de commande pouvant être présentés au réseau lors de la phase d'apprentissage dans n'importe quel ordre, le jeu de donnée lui est présenté en un seul coup, on parle alors d'apprentissage par paquet (ou batch training). Le processus ne dépend pas du temps, on opte alors pour un réseau dit statique du type perceptron multicouche à connectivité complète et à propagation avant (feedforward en anglais) (Figure 4.1).

Le nombre de neurones de la couche d'entrée et de sortie est équivalent respectivement au nombre des entrées et de sortie de la table de commande. Le choix du nombre de neurones cachés ne peut être fixé à priori, et il est en général ajusté expérimentalement selon le succès de l'apprentissage.

### **C) CHOIX DE LA FONCTION D'ACTIVATION**

Le choix d'une fonction d'activation se révèle être un élément constitutif important des réseaux de neurones. Le plus souvent des fonctions non linéaires et évoluées sont nécessaires. C'est le cas d'ailleurs de toutes nos applications, la (les) couche (s) cachée (s) et la couche de sortie sont activées dans tous les cas de figure par une fonction de type sigmoïde tangentielle, son allure est donnée à la figure 4.2.

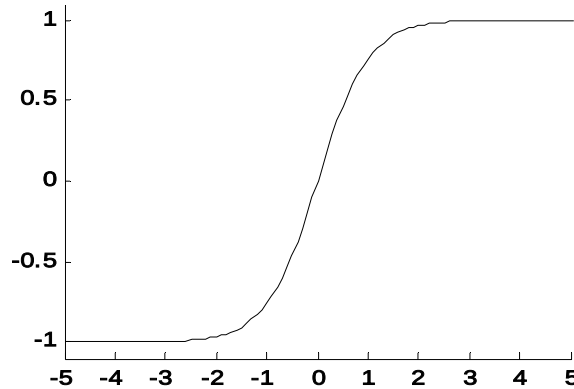


**Figure 4.2** Allure de la fonction tangente hyperbolique (Sigmoïde tangentielle)

#### **D) PHASE D'APPRENTISSAGE**

L'efficacité du réseau de neurones choisi dépend des valeurs des coefficients de pondération initiaux (poids et biais des neurones) de ce réseau. Pour qu'un réseau effectue une tâche donnée, il faut ajuster les valeurs de ses coefficients. La procédure d'ajustement des coefficients, de telle sorte que les sorties du réseau soient proches des sorties désirées, est appelée apprentissage.

L'apprentissage utilisé est du type supervisé, il a pour point de départ un ensemble d'apprentissage, c'est-à-dire un ensemble d'exemples, ou couples (valeurs des entrées-valeurs des sorties désirées correspondantes). Ces couples sont regroupés dans une matrice prototype pour un apprentissage dit différé ou "off line", à l'opposé de l'apprentissage interactif ou "on line". En effet, notre apprentissage s'effectuant à part et en dehors du fonctionnement du système global.

##### **▪ L'APPRENTISSAGE**

Le diagramme d'entraînement du réseau ainsi sélectionné est illustré par la figure 4.3. La base d'apprentissage utilisé provient des tables de commande élaborées précédemment. À chaque itération, les sorties calculées (sorties du réseau) sont comparées aux sorties désirées (sorties de la table de commande) et l'erreur commise (l'écart) sert à modifier la pondération. Ce processus est reproduit jusqu'à ce que l'erreur devienne acceptable.

L'apprentissage se faisant en différé et en utilisant la méthode de Levenberg-Marquardt qui est la plus puissante parmi les méthodes d'optimisation dites du second ordre [67]-[69]. Elle réalise un bon compromis entre la rapidité de la méthode de Newton et la convergence de la méthode du gradient conjugué.

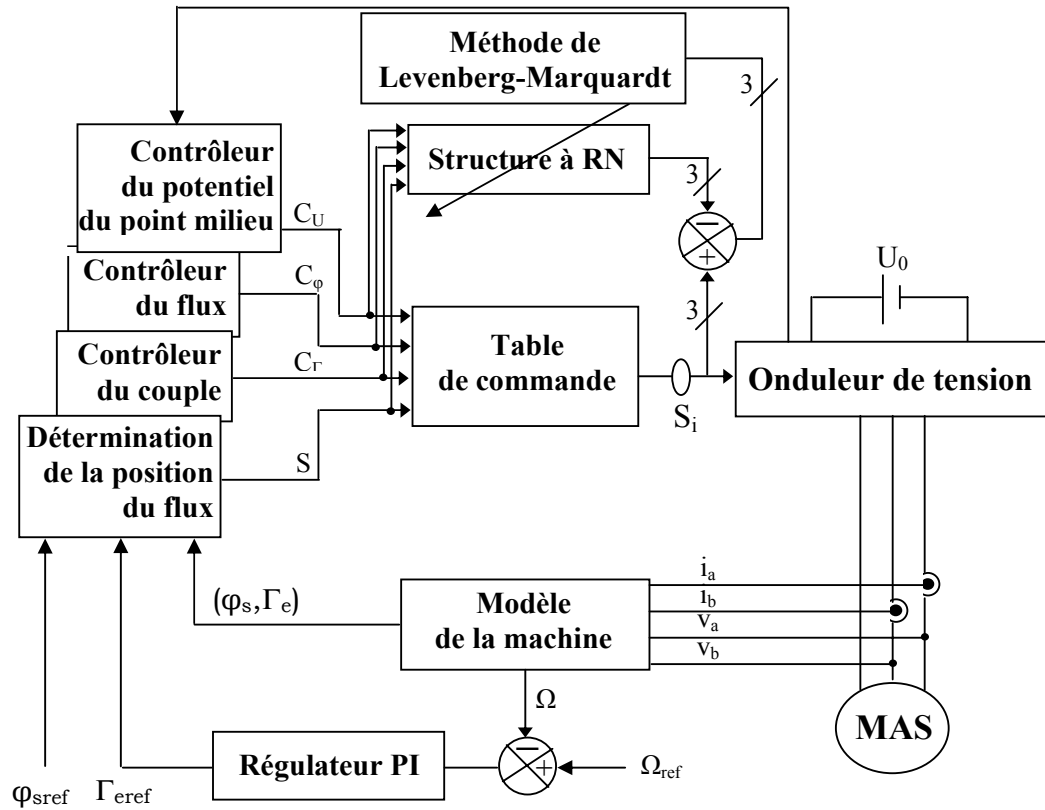


**Figure 4.3** Apprentissage "off line" du réseau de neurones

Le principe général des algorithmes d'apprentissage repose sur la minimisation d'une fonction de coût quadratique, des différences entre les sorties du réseau et celles désirées (eq.4-1). Aussi, le processus optimise un vecteur  $\omega$  représentant les poids et les biais du réseau:

$$E(w) = \sum_{p=1}^P \sum_{i=a,b,c} \left( o_i^{(p)} - nn_i^{(p)} \right)^2 \quad (4-1)$$

$o$  et  $nn$  sont les sorties respectivement désirée et réelle,  $i$  est l'indice de sortie (égal à  $a, b$  ou  $c$  dans tous les cas de figures) et  $P$  représentant le nombre d'exemples.

Appelée aussi fonction coût (MSE, Mean Square Error), cette fonction représente l'écart entre les sorties du processus à modéliser (sorties désirées), la table de commande dans notre cas, et les sorties du réseau (sorties réelles).

#### ▪ METHODE DE LEVENBERG-MARQUARDT

Nous classons la méthode de Levenberg-Marquardt dans les méthodes d'optimisation du second ordre. Ces dernières sont utilisées pour améliorer le choix de la direction à entreprendre dans l'espace des poids, à la recherche du minimum.

L'idée de base est de minimiser la fonction d'énergie suivante en considérant la surface d'erreur quadratique:

$$E(w + \Delta w) = E(w) + \nabla E(w)^T \Delta w + \frac{1}{2} \Delta w^T \nabla^2 E(w) \Delta w \quad (4-2)$$

où  $\nabla E(w)$  et  $\nabla^2 E(w)$  représentent respectivement le vecteur graduants et la matrice des dérivées secondes (ou matrice Hessienne) de la fonction d'énergie définie (eq. 4-1). Le pas optimal  $\Delta w$  est calculé sur la base de la relation ci-après [70]:

$$\Delta w = -[\nabla^2 E(w)]^{-1} \nabla E(w) \quad (4-3)$$

Le calcul du Hessien est remplacé par une approximation numérique de la forme [67]:

$$\nabla^2 E(w) = J^T(w)J(w) + \mu I \quad (4-4)$$

$J(w)$  représente la matrice Jacobienne des dérivées premières de la fonction  $e_i^{(p)} = (o_i^{(p)} - nn_i^{(p)})$ ,  $I$  est une matrice identité et  $\mu$  un paramètre d'apprentissage automatiquement ajusté à chaque itération afin d'assurer la convergence.

L'algorithme de Levenberg-Marquardt s'articule sur les étapes suivantes [69]:

- 1- Présenter les couples entrée/sortie au réseau, calculer les sorties et déduire les erreurs. Déterminer  $E$  à travers l'expression (eq. 4-1).
- 2- Calcul du Jacobien  $J(w)$ ,  $w$  représentant les poids et biais du réseau considéré.
- 3- Calculer  $\Delta w$  en appliquant (eq. 4-3).
- 4- Recalculer l'erreur en prenant  $w + \Delta w$ . Si cette valeur est plus faible que celle calculée lors de l'étape 1, réduire la valeur de  $\mu$  et aller à l'étape 1. Si non, augmenter la valeur de  $\mu$  et aller à l'étape 3.
- 5- L'algorithme converge lorsque le gradient ou l'erreur atteint une valeur prédéterminée.

#### ▪ TEST ET VALIDATION

Comme la totalité des données de la table de commande a été sélectionnée pour être la base d'apprentissage du réseau, la phase de test et de validation se résume alors en une simple vérification que le réseau reproduit fidèlement les données de la table de commande et ceci sans tenir compte de sa capacité de généralisation qui ne trouve pas sa place dans le cas de nos applications.

Le réseau de neurones utilisé est un multicouche dont la structure est déterminée à partir des essais jusqu'à aboutir à une erreur acceptable entre la sortie du réseau et celle attendue. Le choix de cette erreur est lié à l'approximation désirée entre le réseau et la table de commande, c'est-à-dire une erreur absolue entre les sorties désirées et réelles, dans le cas de nos applications elle est de l'ordre de 0.35 au maximum. Ceci permet de valider le réseau obtenu par apprentissage.

### 4.3 APPLICATION AUX CAS DES TABLES DE COMMANDE ELABOREES

Cette procédure de conception du réseau de neurones a été appliquée à toutes les tables de commande déjà dressées au cours des chapitres précédents dans le cas du contrôle direct du couple d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 2-niveaux, à 3-niveaux et à 5-niveaux de tension de type NPC sans et avec équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs d'entrée.

#### 4.3.1 CDC AVEC ONDULEUR A 2-NIVEAUX DE TENSION

L'architecture permettant la convergence du réseau RN22, donnée à la figure 4.4, est la suivante [3 6 3], soit une couche d'entrée et une couche de sortie de 3 neurones chacune correspondant aux entrées et sorties de la table de commande classique, et une couche cachée contenant 6 neurones. Cette structure correspond à la table de commande Tab22 développée au chapitre premier.

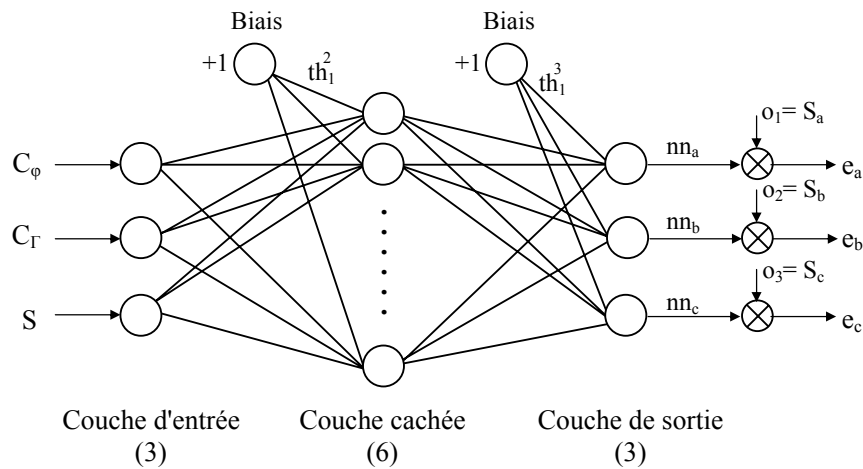


**Figure 4.4** Architecture du réseau RN22

La figure 4.5 présente la performance du réseau RN22 pour 180 exemples donnés et 1500 époques d'apprentissage, basée sur l'erreur quadratique entre la sortie du réseau et celle de la table de commande. Il est possible de continuer l'apprentissage afin de s'approcher encore plus du but 0. Cependant, la convergence de la performance au-delà de 1500 époques est lente. Donc, on peut accepter le résultat sans atteindre le but visé. C'est le cas d'ailleurs de plusieurs des réseaux mis en oeuvre au cours de notre travail.

La figure 4.6 montre l'amplitude des erreurs absolues commises entre les sorties désirées et les sorties réelles, et ce sur chacune des données de la table de commande Tab22 (soit 36 données). On remarque que cette dernière ne dépasse pas la valeur tolérée de 0.35. En effet, l'erreur maximale est de 0.25.

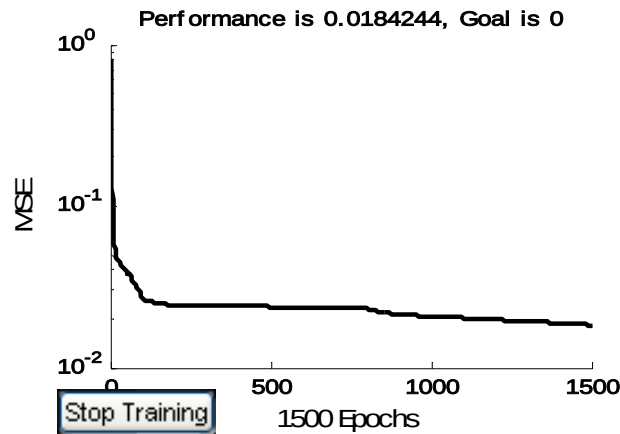


Figure 4.5 Performance d'apprentissage du réseau RN22

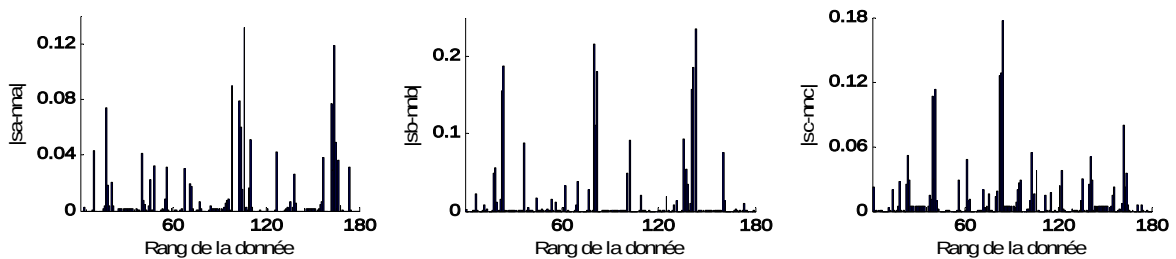


Figure 4.6 Erreurs entre les sorties désirée et réelle

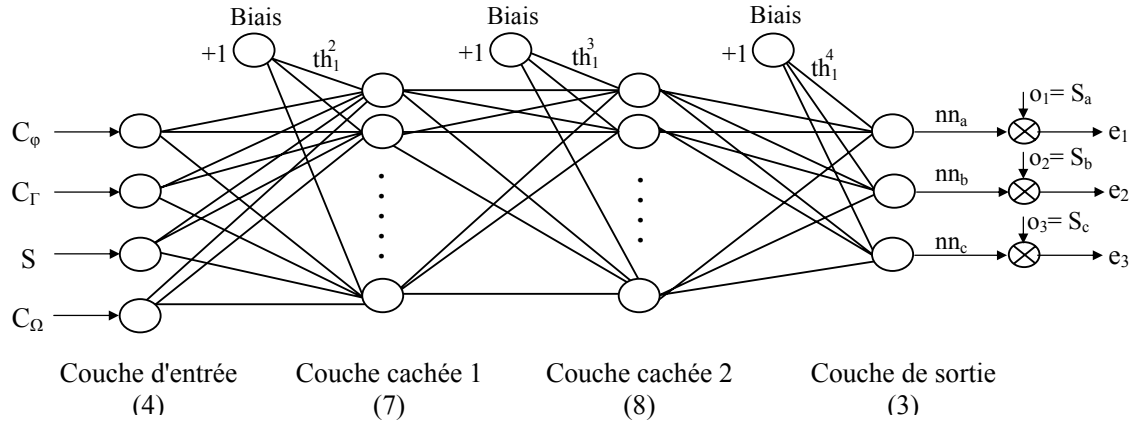
### 4.3.2 CDC AVEC ONDULEUR A 3-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC

#### 4.3.2.1 SANS EQUILIBRAGE DU POTENTIEL DU POINT MILIEU

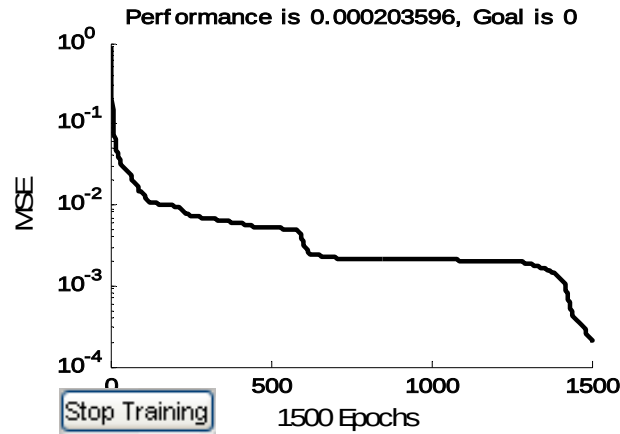
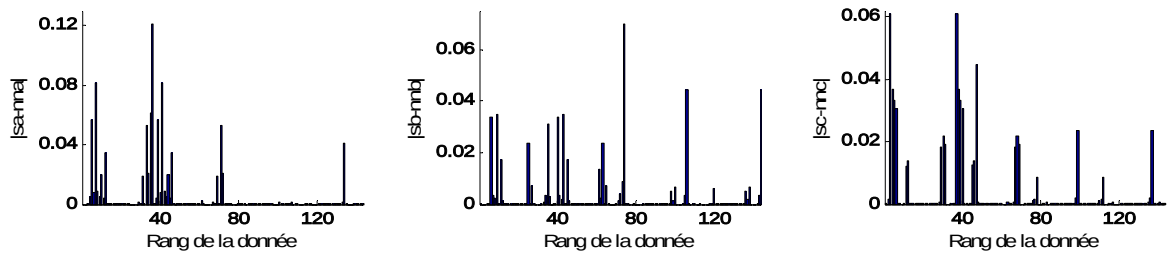
##### A) STRATEGIE A DEUX TABLES DE COMMANDE

L'architecture permettant la convergence du réseau RN3S est la suivante [4 7 8 3]. Ce réseau correspond aux tables de commande Tab31S et Tab32S, l'entrée supplémentaire  $C_\Omega$  procure une information sur la vitesse de rotation. L'apprentissage conduit à une erreur quadratique d'environ  $2.10^{-4}$  après 1500 itérations, pour 720 exemples donnés. Sa courbe d'erreur est représentée à la figure 4.8.

La figure 4.9 montre l'amplitude des erreurs absolues commises entre les sorties désirées et les sorties réelles, et ce sur chacune des données des tables de commande Tab31S et Tab32S (soit 144 données). L'erreur maximale ne dépassant pas la valeur de 0.13.

**Figure 4.7** Architecture du réseau RN3S

$$C_{\Omega} = 1 : \Omega \pi \frac{\Omega_{nom}}{5} \quad C_{\Omega} = 2 : \Omega \phi \frac{\Omega_{nom}}{5}$$

**Figure 4.8** Performance d'apprentissage du réseau RN3S**Figure 4.9** Erreurs entre les sorties désirée et réelle

#### B) STRATEGIE A UNE TABLE DE COMMANDE UNIQUE

L'architecture permettant la convergence du réseau RN33S est la suivante [3 10 11 3], ce dernier correspond à la table de commande Tab33S. L'erreur quadratique atteinte est

supérieure à  $3.10^{-7}$  après 1500 itérations et 1800 exemples donnés. La figure qui suit donne la courbe de réponse de ce système.

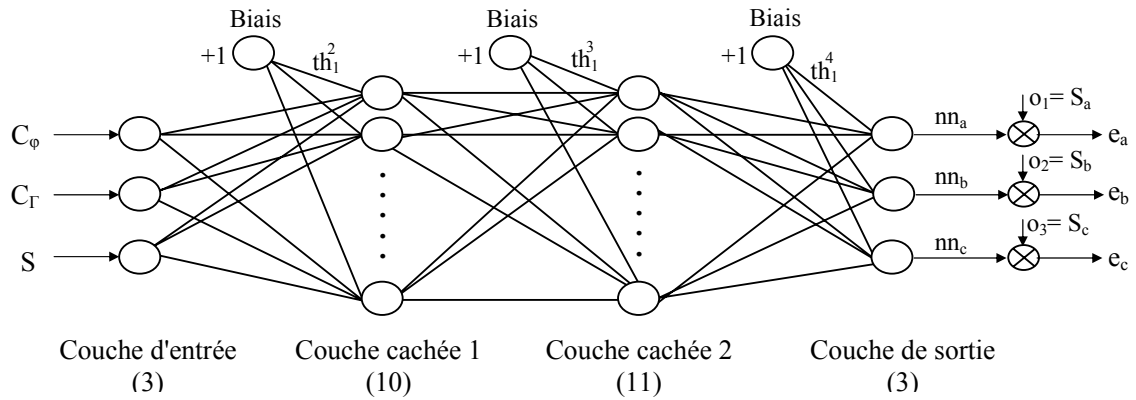


**Figure 4.10** Architecture du réseau RN33S

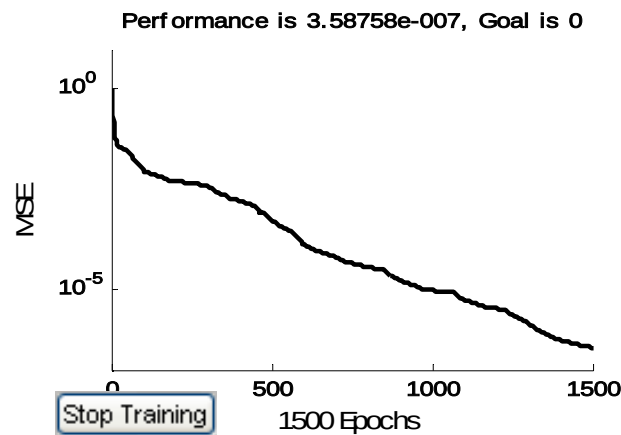


**Figure 4.11** Performance d'apprentissage du réseau RN33S

La figure 4.12 donne un aperçu des amplitudes des erreurs absolues entre les sorties désirées et les sorties réelles, et ce sur chacune des données de la table de commande Tab33S (soit 180 données). On remarque que ces erreurs sont très faibles et ne dépassent pas la valeur de 0.005.

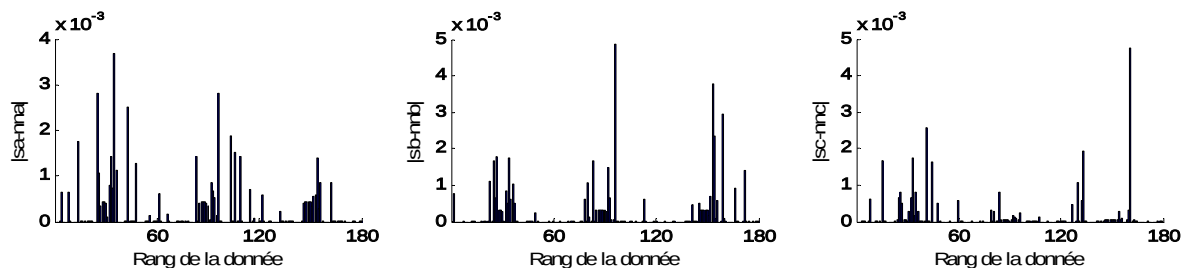


**Figure 4.12** Erreurs entre les sorties désirée et réelle

### 4.3.2.2 AVEC EQUILIBRAGE DU POTENTIEL DU POINT MILIEU

#### A) STRATEGIE A DEUX TABLES DE COMMANDE

Le réseau RN3E obtenu à l'issue de l'apprentissage est celui de la figure 4.13, son architecture est la suivante [5 12 12 3]. L'entrée  $C_U$  représente l'état de la sortie du contrôleur de tension des condensateurs d'entrée de l'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC, indiquant le déséquilibre existant entre ces tensions. L'erreur quadratique atteinte est moins de  $2.10^{-5}$  obtenue au terme de 1500 itérations et 1152 exemples donnés. La figure 4.14 représente sa performance d'apprentissage.

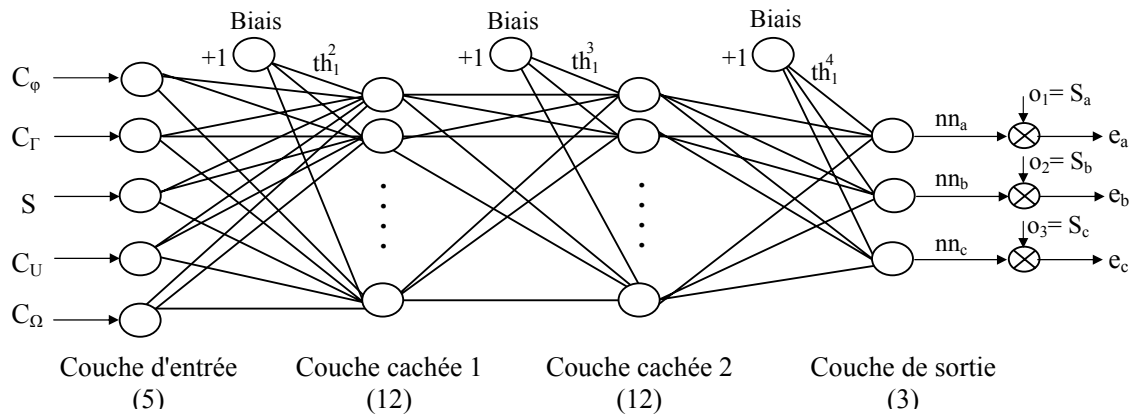


**Figure 4.13** Architecture du réseau RN3E avec équilibrage du potentiel du point milieu

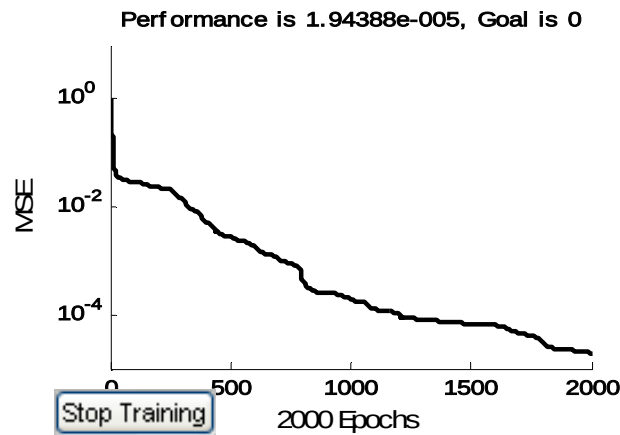


**Figure 4.14** Performance d'apprentissage du réseau RN3E

Les amplitudes des erreurs absolues donnant les écarts entre les sorties désirées et les sorties réelles sont illustrées par la figure 4.15, et ce sur chacune des données des tables de commande Tab31E et Tab32E (soit 288 données), l'équilibrage du potentiel du point milieu étant assuré. On peut constater que cette erreur est au maximum égale à 0.06.

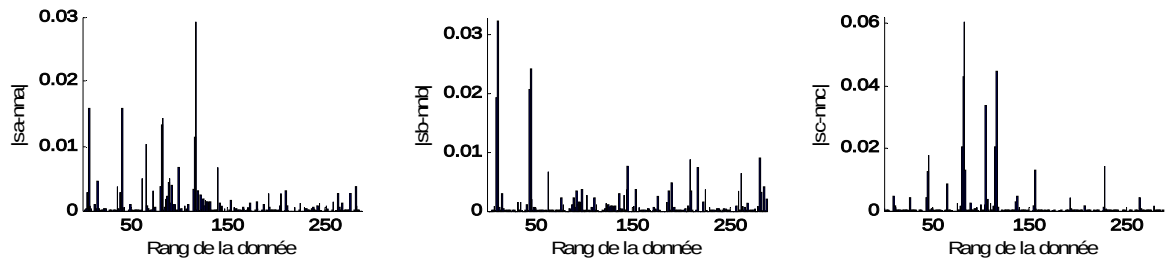


**Figure 4.15** Erreurs entre les sorties désirée et réelle

*B) STRATEGIE A UNE TABLE DE COMMANDE UNIQUE*

L'architecture permettant la convergence du réseau donné à la figure 4.16 est la suivante [4 16 17 3]. Ce réseau correspond à la table de commande classique Tab33E. L'erreur quadratique atteinte est d'environ  $9.5 \cdot 10^{-5}$  après 1500 itérations, pour une base d'apprentissage forte de 3600 exemples. Les variations de cette erreur sont représentées à la figure 4.17.

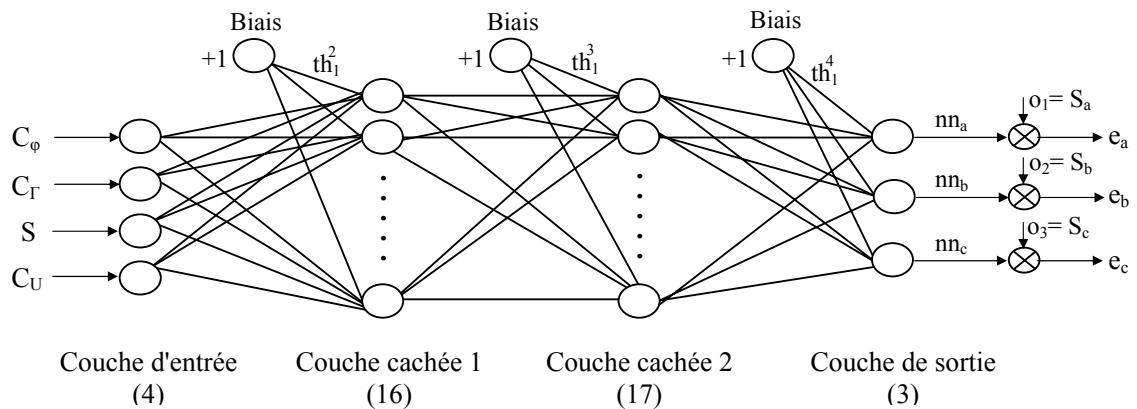


**Figure 4.16** Architecture du réseau RN33E avec équilibrage du potentiel du point milieu

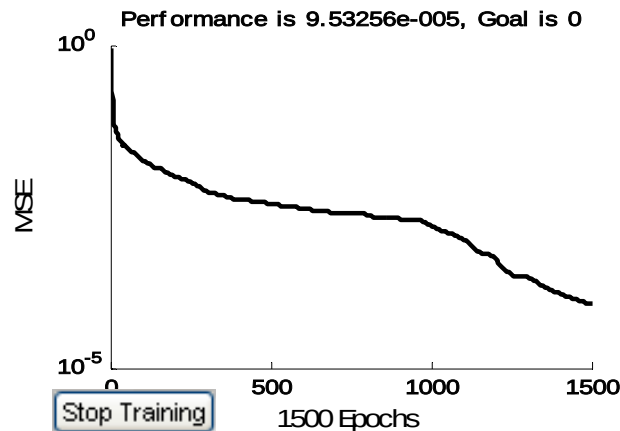


**Figure 4.17** Performance d'apprentissage du réseau RN33E

L'amplitude des erreurs absolues commises entre les sorties désirées et les sorties réelles est présentée à la figure 4.18, et ce sur chacune des données de la table de commande Tab33E avec équilibrage du potentiel du point milieu (soit au total 360 données). On remarque que la valeur maximale de cette dernière ne dépasse pas 0.1.

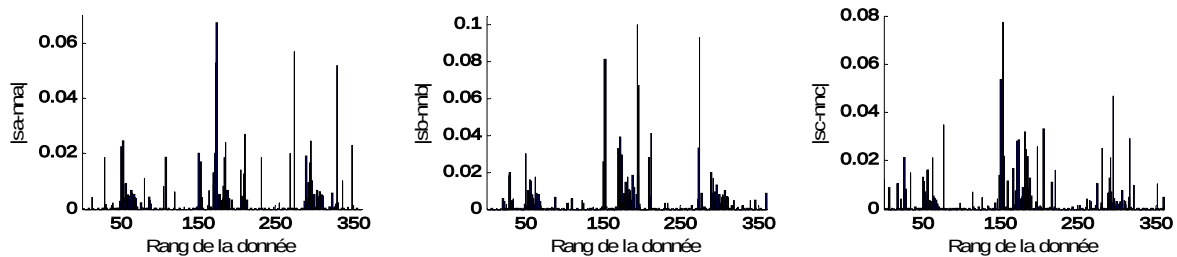


**Figure 4.18** Erreurs entre les sorties désirée et réelle

### 4.3.3 CDC AVEC ONDULEUR A 5-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC

#### 4.3.3.1 SANS EQUILIBRAGE DU POTENTIEL DU POINT MILIEU

##### A) STRATEGIE A PLUSIEURES TABLES DE COMMANDE

On a montré au chapitre troisième que la table de commande est répartie sur 4 plages de variation de la vitesse de rotation débouchant ainsi sur 4 tables de commande, données par Tab51S, Tab52S, Tab53S et Tab54S. Pour ce faire, deux choix sont envisageables:

- Un réseau unique.
- Un réseau par table de commande.

Théoriquement, la mise en œuvre d'un réseau unique englobant les 4 tables de commande à l'image du travail effectué dans le cas de l'onduleur à 3-niveaux de tension, représente certes une piste intéressante, cependant les essais entamés dans ce sens ont conduit à des structures neuronales de dimensions importantes. En effet, ceci implique inévitablement des contraintes critiques en ce qui concerne l'espace mémoire à réserver et le temps d'exécution de la structure.

Ainsi, notre choix s'est porté sur la deuxième solution basée elle sur des réseaux relativement simples et fonctionnant en mode multiplexé. Aussi, un commutateur C permet d'enclencher le réseau approprié sur la base d'une information sur la vitesse de rotation de la machine. Le détail de la structure globale est illustré à la figure 4.19.

Les structures établies, soient RN51S, RN52S, RN53S et RN54S sont semblables, leurs architectures sont décrites à la figure 4.20 chacune comme suit [3 15 16 3].

L'erreur quadratique atteinte pour le réseau RN51S est inférieure à  $6 \cdot 10^{-4}$  après 1500 époques d'apprentissage et 360 exemples donnés. Sa courbe d'erreur est représentée à la figure 4.21-a.

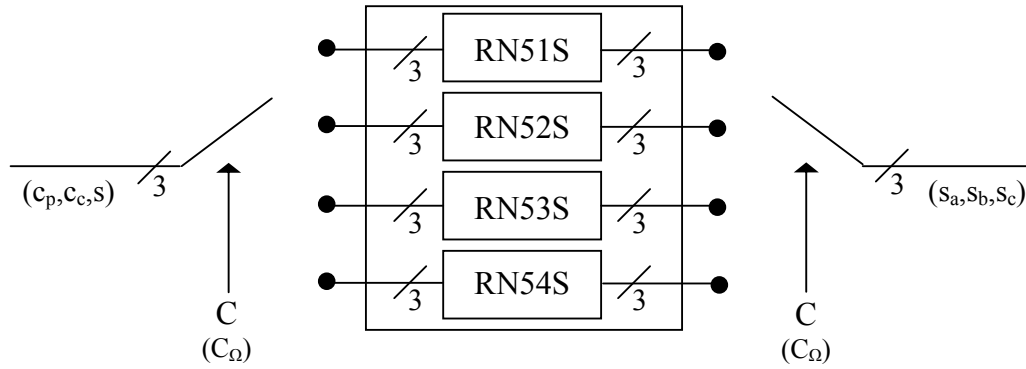


**Figure 4.19** Structure globale du réseau RN5S composé des sous réseaux RN51S, RN52S, RN53S et RN54S

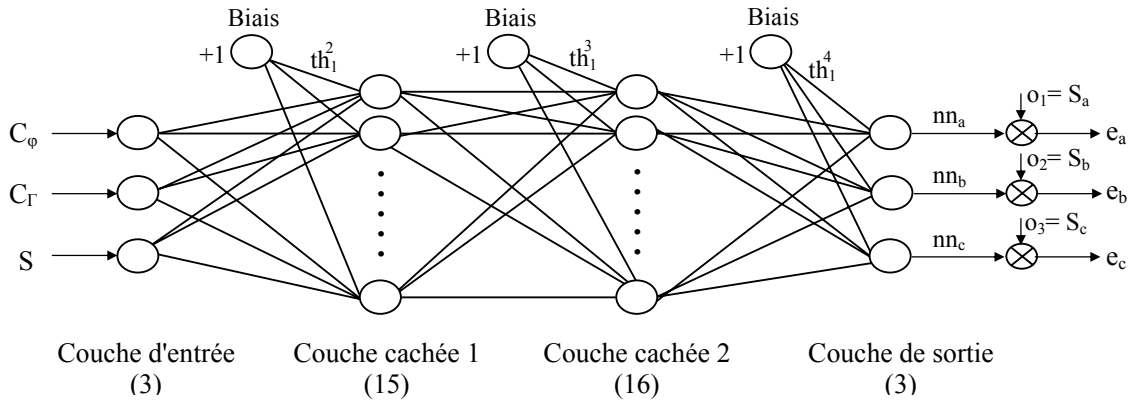


**Figure 4.20** Architecture des sous réseaux RN51S, RN52S, RN53S et RN54S

L'erreur quadratique atteinte pour le réseau RN52S est d'environ  $5.5 \cdot 10^{-4}$  après 1500 époques d'apprentissage et 540 exemples donnés. Sa courbe d'erreur est représentée à la figure 4.21-b.

L'erreur quadratique atteinte pour le réseau RN53S est d'environ  $4 \cdot 10^{-4}$  après 1000 époques d'apprentissage et 360 exemples donnés. Sa courbe d'erreur est représentée à la figure 4.21-c.

L'erreur quadratique atteinte pour le réseau RN54S est d'environ  $10^{-4}$  après 1100 époques d'apprentissage et 900 exemples donnés. Sa courbe d'erreur est représentée à la figure 4.21-d.

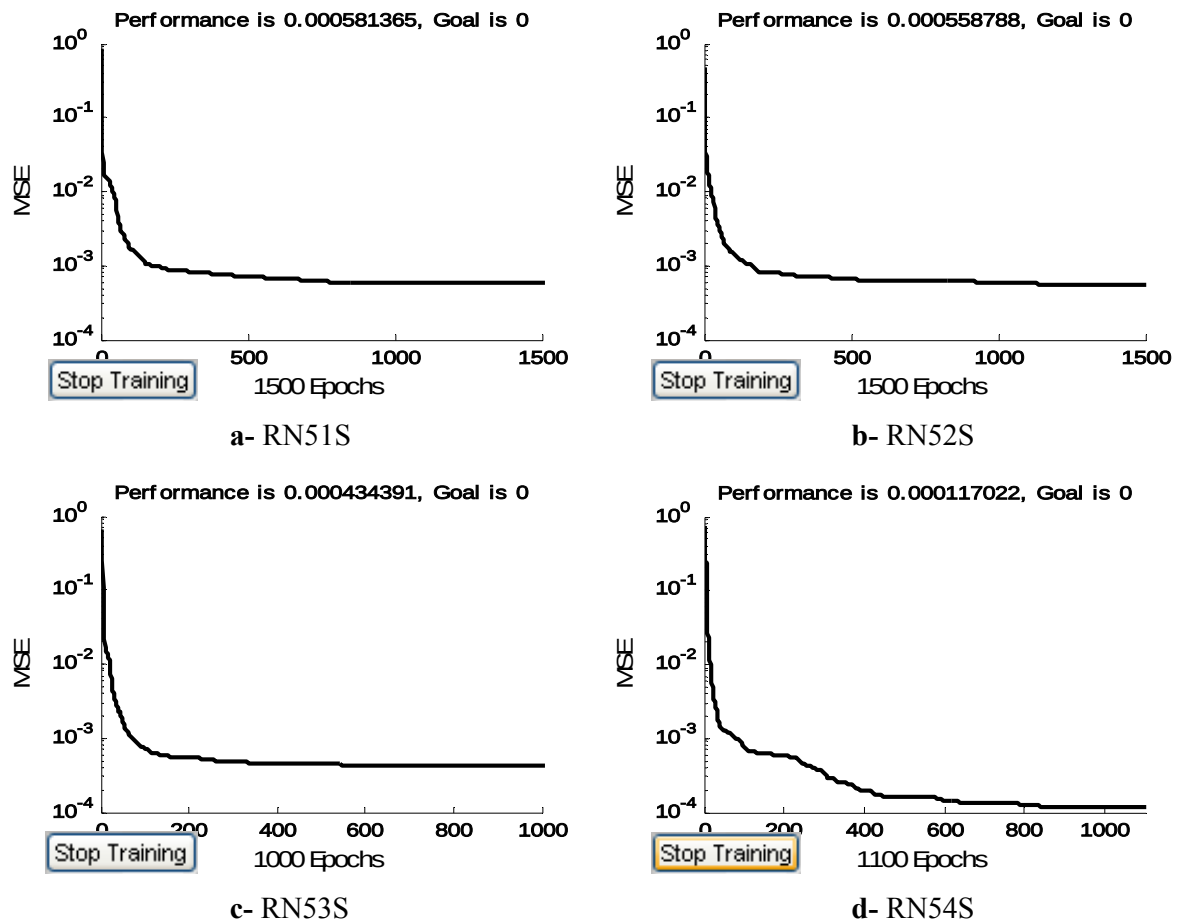


**Figure 4.21** Performances d'apprentissage des sous réseaux de RN5S

La figure 4.22 montre l'amplitude des erreurs absolues commises entre les sorties désirées et les sorties réelles, et ce sur chacune des données des tables de commande Tab51S, Tab52S, Tab53S et Tab54S (soit un total de 180 données par table). On note que la valeur maximale de cette erreur avoisine 0.34.

#### *B) STRATEGIE A UNE TABLE DE COMMANDE UNIQUE*

L'architecture du réseau adopté RN55S à la suite de l'apprentissage et correspondant à la table de commande Tab55S, est composée de 3 couches cachées (Figure 4.23), soit [3 16 17 17 3]. La valeur minimale atteinte par l'erreur quadratique est inférieure à  $4 \cdot 10^{-3}$  après 1000 itérations, pour 648 exemples donnés. Les variations de la courbe d'erreur sont représentées à la figure 4.24.

La figure 4.25 montre l'amplitude des erreurs absolues commises entre les sorties désirées et les sorties réelles, et ce sur chacune des données de la table de commande Tab55S, soit un total de 324 données. La valeur maximale de ces erreurs est autour de 0.32.

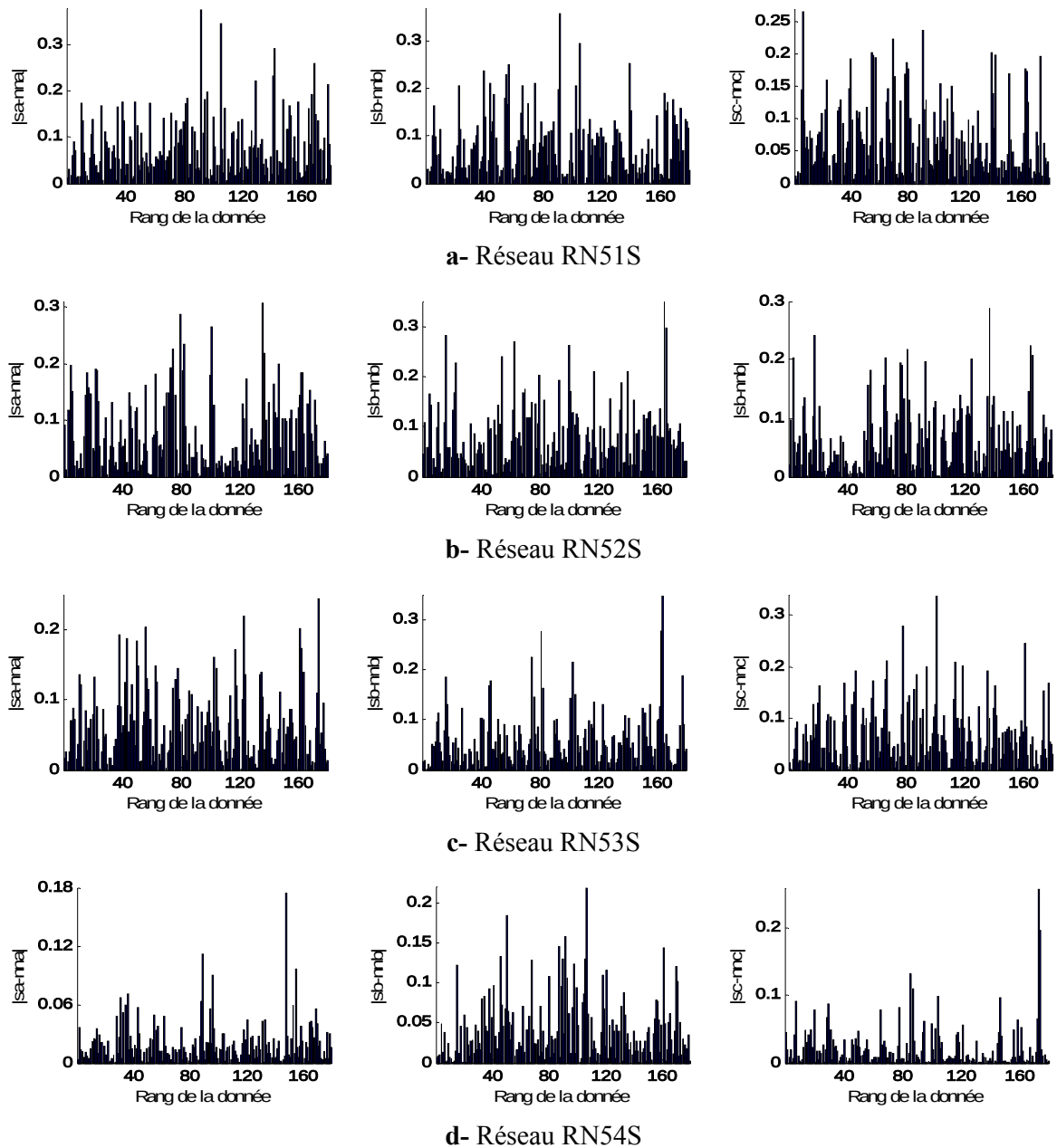


Figure 4.22 Erreurs entre les sorties désirée et réelle

#### 4.3.3.2 AVEC EQUILIBRAGE DU POTENTIEL DU POINT MILIEU

##### A) STRATEGIE A PLUSIEURES TABLES DE COMMANDE

Comme dans le cas où on considère que les tensions continues d'entrée de l'onduleur sont équilibrées, 4 tables de commande couvrent toute la plage de variation de la vitesse de rotation, ici il s'agit de Tab51E, Tab52E, Tab53E et Tab54E. Aussi et pour les mêmes raisons énumérées précédemment, on choisira de créer un réseau de neurones par table.

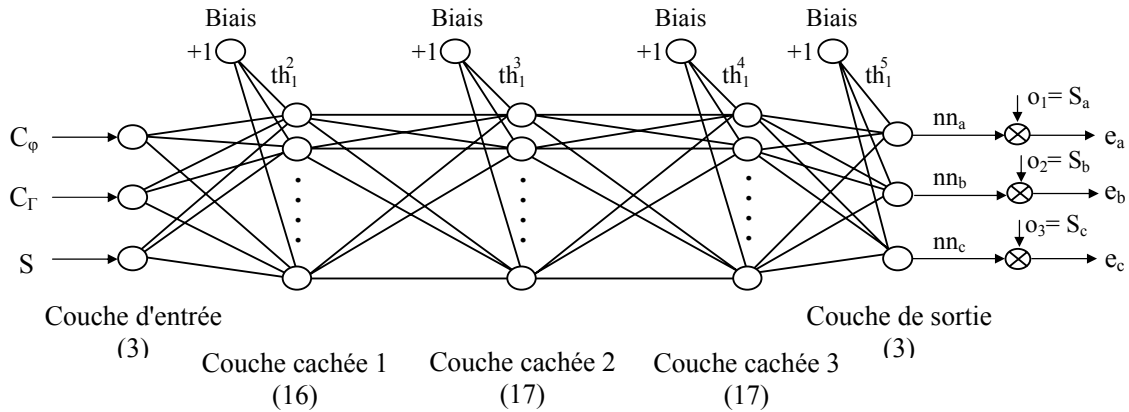


Figure 4.23 Architecture du réseau RN55S

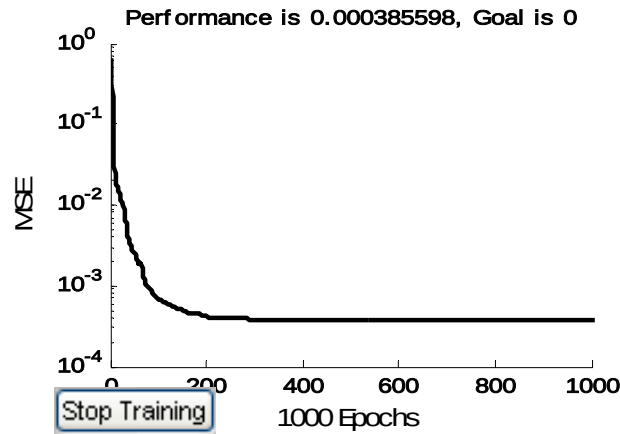


Figure 4.24 Performance d'apprentissage du réseau RN55S

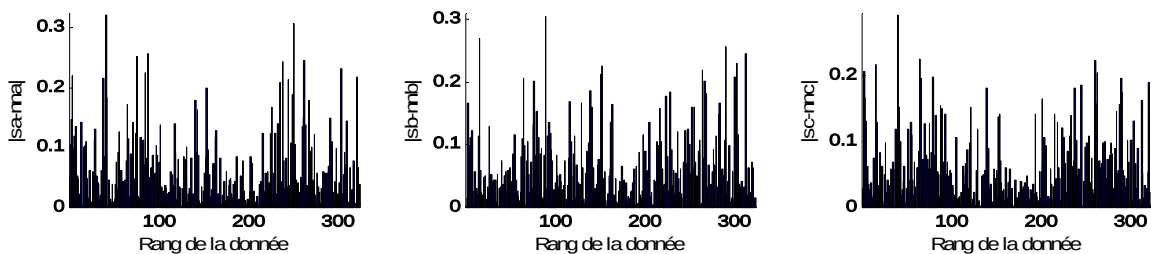


Figure 4.25 Erreurs entre les sorties désirée et réelle

Or, on a montré au chapitre troisième que les deux dernières tables assurent le contrôle du potentiel du point milieu par leur construction même, donc au lieu de 8 sous réseaux, la structure globale va contenir seulement 6 comme le montre bien la figure 4.26. Quatre de ces sous réseaux ont été déjà conçus en § 4.4.3.1 (soient RN51S, RN52S, RN53S et RN54S). Les deux restants (RN51E et RN52E) donnant sur une décharge de la paire de condensateurs  $C_{12}$  ( $C_U=-1$ ) complètent successivement les réseaux RN51S et RN52S, qui

eux permettent plutôt la décharge de l'autre paire  $C_{12}$  ( $C_U=1$ ). Ainsi, la présence d'un commutateur  $C$  va permettre d'enclencher le réseau approprié sur la base d'information et sur la vitesse de rotation de la machine et sur le sens de déséquilibre du potentiel du point milieu de l'onduleur.

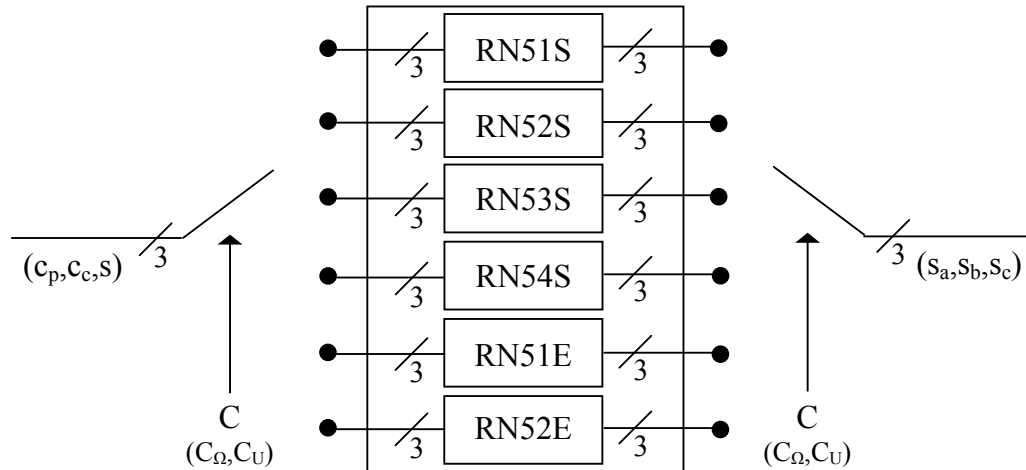


**Figure 4.26** Structure globale du réseau RN5E composé des sous réseaux RN51S, RN52S, RN53S, RN54S, RN51E et RN52E

Les deux nouvelles structures établies, RN51E et RN52E sont semblables aux 4 autres, leurs architectures s'identifient à celle représentée à la figure 4.20.

L'erreur quadratique atteinte lors de l'apprentissage par le réseau RN51E est d'environ  $5.5 \cdot 10^{-4}$  après 1000 itérations pour 180 exemples donnés, alors que pour la structure RN52E, l'erreur quadratique atteinte est d'environ  $5 \cdot 10^{-4}$  après 1100 itérations pour 900 exemples donnés.

Leurs courbes d'erreur sont représentées à la figure 4.27.

La figure 4.28 montre l'amplitude des erreurs absolues commises entre les sorties désirées et les sorties réelles, et ce pour chacune des sorties et chacune des données correspondant à  $C_U=1$  des tables de commande Tab51E et Tab52E (soit la moitié de la table, c'est à dire 180 données). On remarque que cette dernière est autour de la valeur de 0.25.

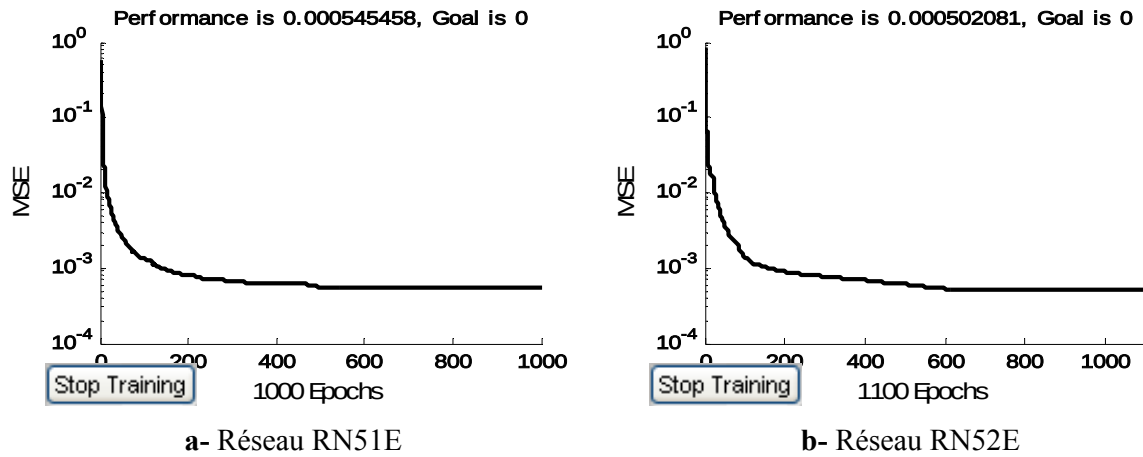


**Figure 4.27** Performances d'apprentissage des sous réseaux RN51E et RN52E

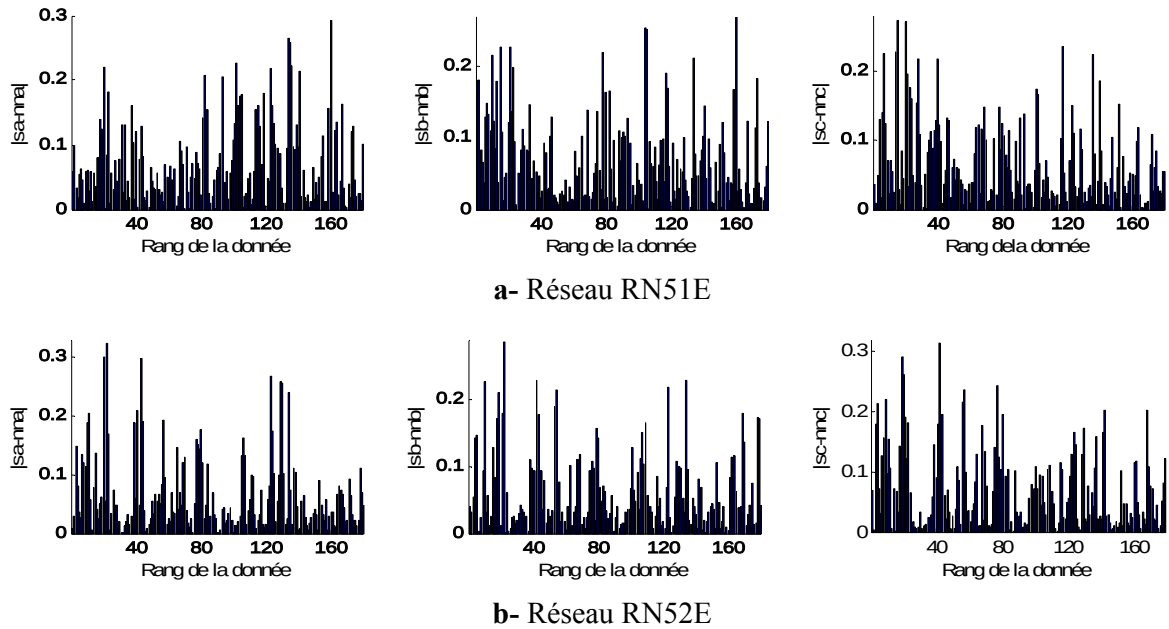


**Figure 4.28** Erreurs entre les sorties désirée et réelle

#### B) STRATEGIE A UNE TABLE DE COMMANDE UNIQUE

Pour assurer l'équilibrage du potentiel du point milieu, le réseau RN55S conçu au §4.4.3.1 (provoquant la décharge de la paire de condensateurs  $C_{12}$ ,  $C_U=-1$ ) est complété par un autre appelé RN55E (Figure 4.29) qui lui, cause plutôt la décharge de l'autre paire, soit  $C_{-12}$  ( $C_U=1$ ). Ces deux sous réseaux constituent le réseau RN55 donné à la figure 4.30 et permettant le contrôle du point milieu de l'onduleur à 5-niveaux de tension. Le commutateur permet de faire le choix d'un de ces sous réseaux sur la base d'une information sur le sens de déséquilibre des tensions aux bornes des condensateurs d'entrée de l'onduleur.

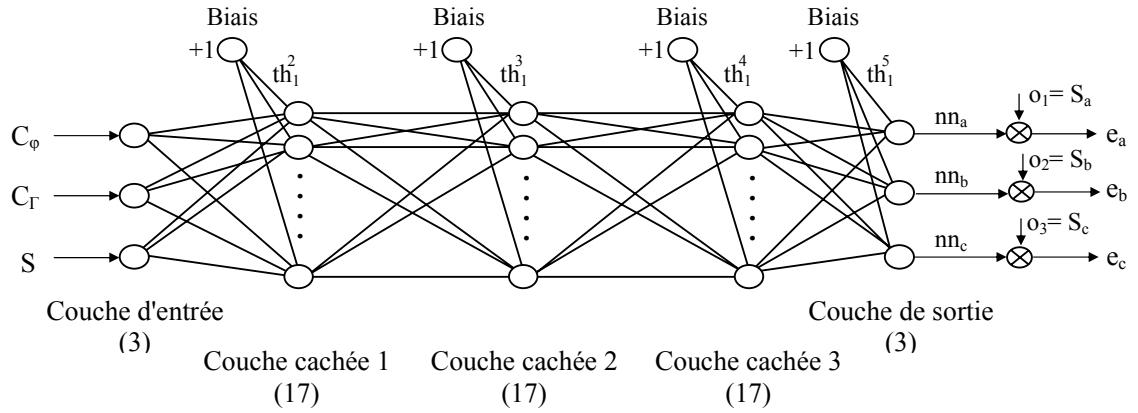


Figure 4.29 Architecture du réseau RN55E

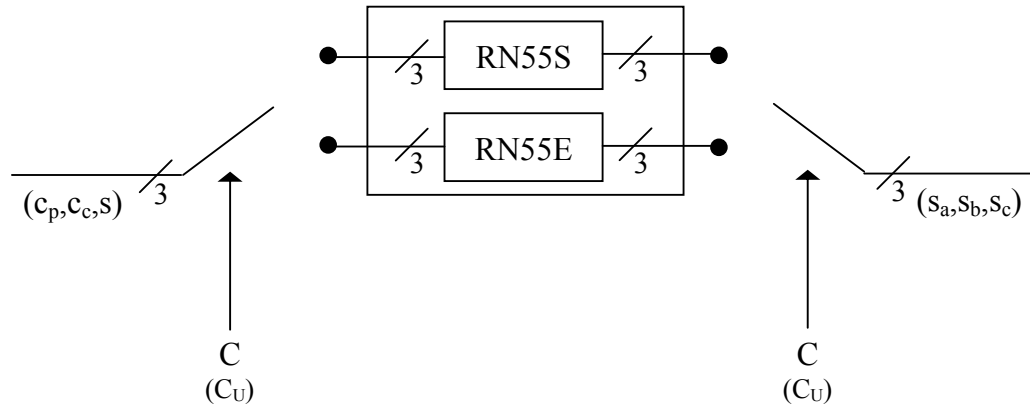


Figure 4.30 Structure globale du réseau RN55 composé des sous réseaux RN55S et RN55E

L'architecture permettant la convergence du réseau RN55E est la suivante [3 17 17 17 3]. L'erreur quadratique atteinte est inférieure à  $4.10^{-4}$  après 1500 itérations pour 648 exemples donnés. Sa courbe d'erreur est représentée à la figure 4.31.

La figure 4.32 montre l'amplitude des erreurs absolues commises entre les sorties désirées et les sorties réelles, et ce pour chacune des données de la table de commande Tab55E correspondant à  $C_U=1$  (soit la moitié de la table, autrement dit 324 données), l'équilibrage du potentiel du point milieu de l'onduleur étant assuré. On remarque que cette erreur ne dépasse pas la valeur acceptable de 0.30.

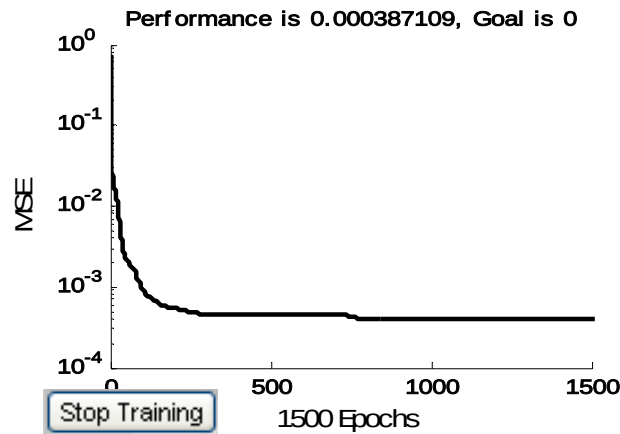


**Figure 4.31** Performance d'apprentissage du réseau RN55E

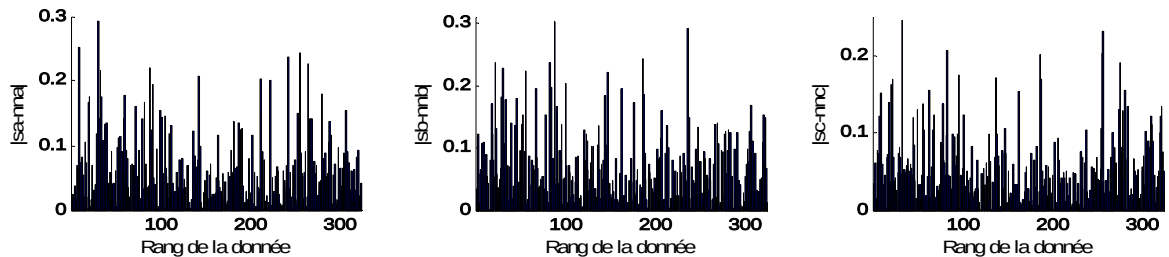


**Figure 4.32** Erreurs entre les sorties désirée et réelle

## 4.4 SIMULATION

Pour valider le modèle neuronal, des tests doivent être effectués sur les structures à réseau de neurones élaborées. D'abord, nous simulons le fonctionnement de la machine dans le cas d'une consigne vitesse de type pente entre 100 rad/s et -100 rad/s, la consigne est constante et équivaut à 33% de la vitesse nominale à partir d'un instant 1s, la machine étant alimentée à l'aide d'un onduleur à 5-niveaux de tension et l'équilibrage des tensions des condensateurs d'entrée est assuré. Les données relatives aux valeurs des capacités des condensateurs d'entrée de l'onduleur, les largeurs de bandes de tolérance ainsi que les paramètres du régulateur sont les mêmes que ceux du chapitre troisième.

Ainsi, la figure 4.33 montre que les résultats obtenus à l'aide de la commande neuronale (structure neuronale RN55 pour la stratégie à une table unique et RN5E pour la stratégie à plusieurs tables) sont semblables à ceux déjà obtenus à l'aide de la commande classique (tables de commande Tab55E pour la stratégie à une table unique et Tab51E-Tab52E-Tab53E-Tab54E pour la stratégie à plusieurs tables) et exposés à la figure 3.31. On peut naturellement conclure que l'erreur atteinte lors de l'apprentissage est alors suffisante, la

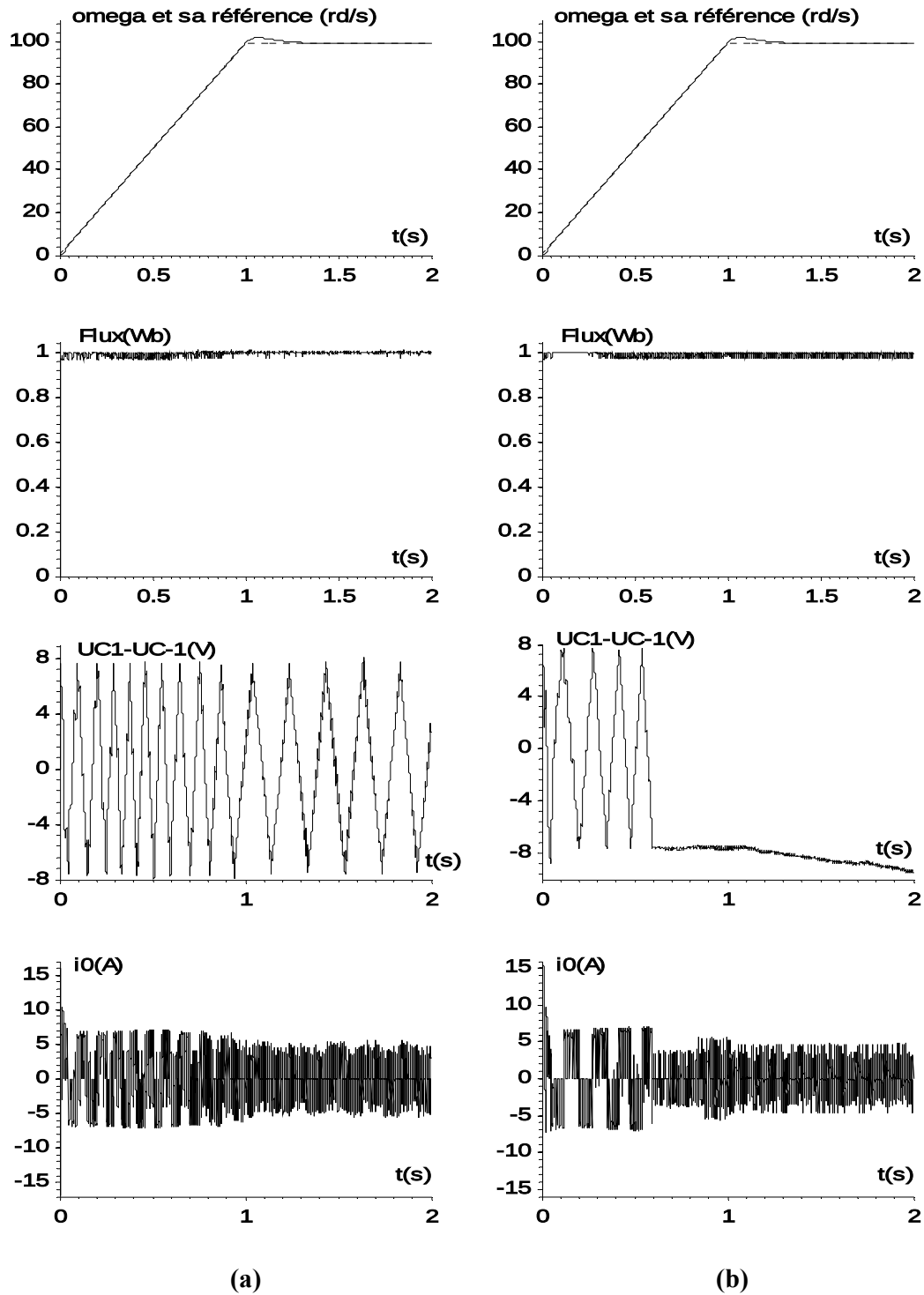


**Figure 4.33** Régulation du potentiel du point milieu de l'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC à l'aide de structures neuronales: vitesse de rotation et sa référence, tension de ligne, tensions de paires de condensateurs ( $U_{C12}, U_{C-12}$ ) et courant de potentiel du point milieu. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à plusieurs tables.

structure neuronale globale a appris parfaitement des tables de commande, reproduisant fidèlement les données de cette dernière.

Ensuite, pour mieux caractériser les capacités de la modélisation par ces réseaux de neurones adoptés, un autre test est effectué à travers un autre essai, soit une inversion à  $t=1.5s$  de la consigne vitesse entre  $\pm 33\%$  de la vitesse nominale de la machine en prenant le soin de décharger la machine en cours de fonctionnement. On présente sur les figures suivantes les résultats pour une alimentation à 2-niveaux, à 3-niveaux et à 5-niveaux de tension. Aussi, les données relatives aux valeurs des capacités des condensateurs d'entrée de l'onduleur, les largeurs de bandes de tolérance ainsi que les paramètres du régulateur de vitesse sont les mêmes que ceux appliquées au cours des chapitres précédents. L'effet de cette perturbation sur quelques grandeurs de la machine est alors mentionné.

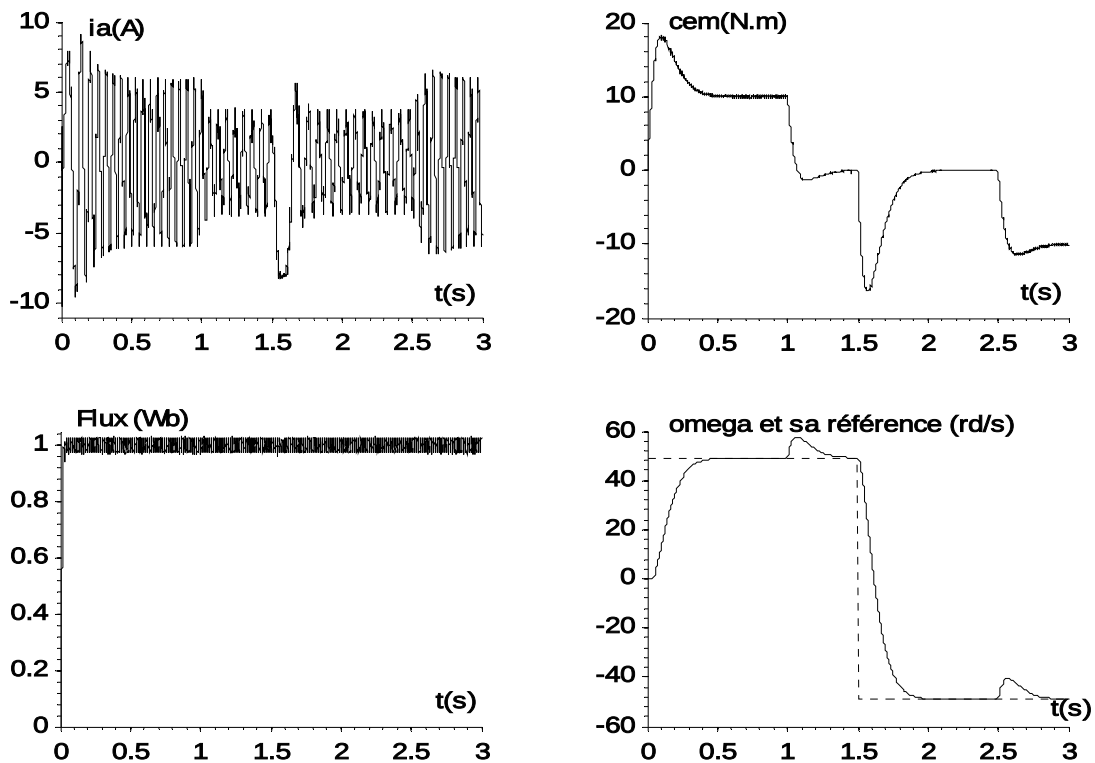


**Figure 4.34** Simulation du CDC à commande neuronale avec alimentation par un onduleur à 2-niveaux de tension: courant de phase, couple, flux, vitesse de rotation et sa référence

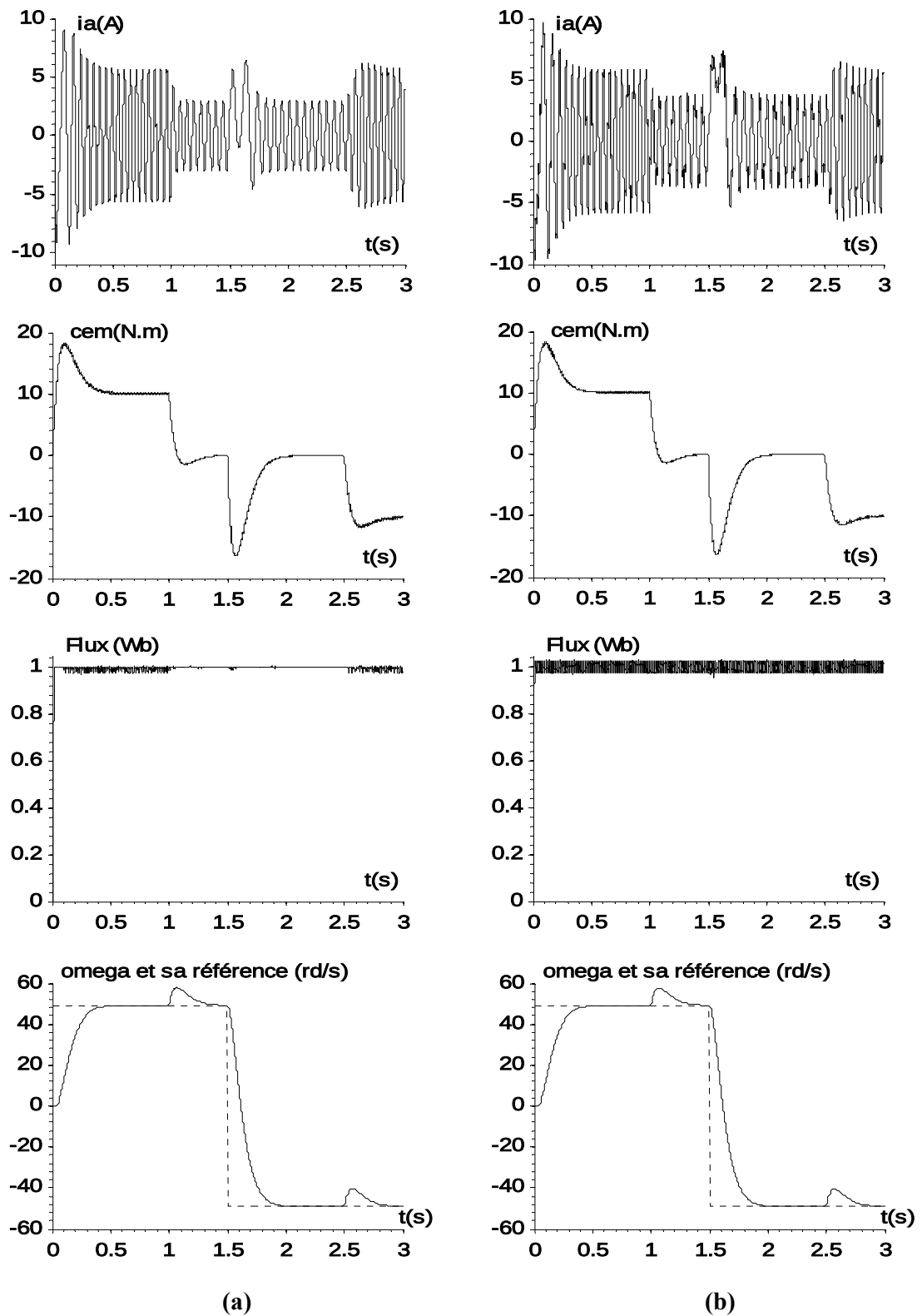


**Figure 4.35** Simulation du CDC à commande neuronale avec alimentation par un onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC: courant de phase, couple, flux, vitesse de rotation et sa référence. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à deux tables.

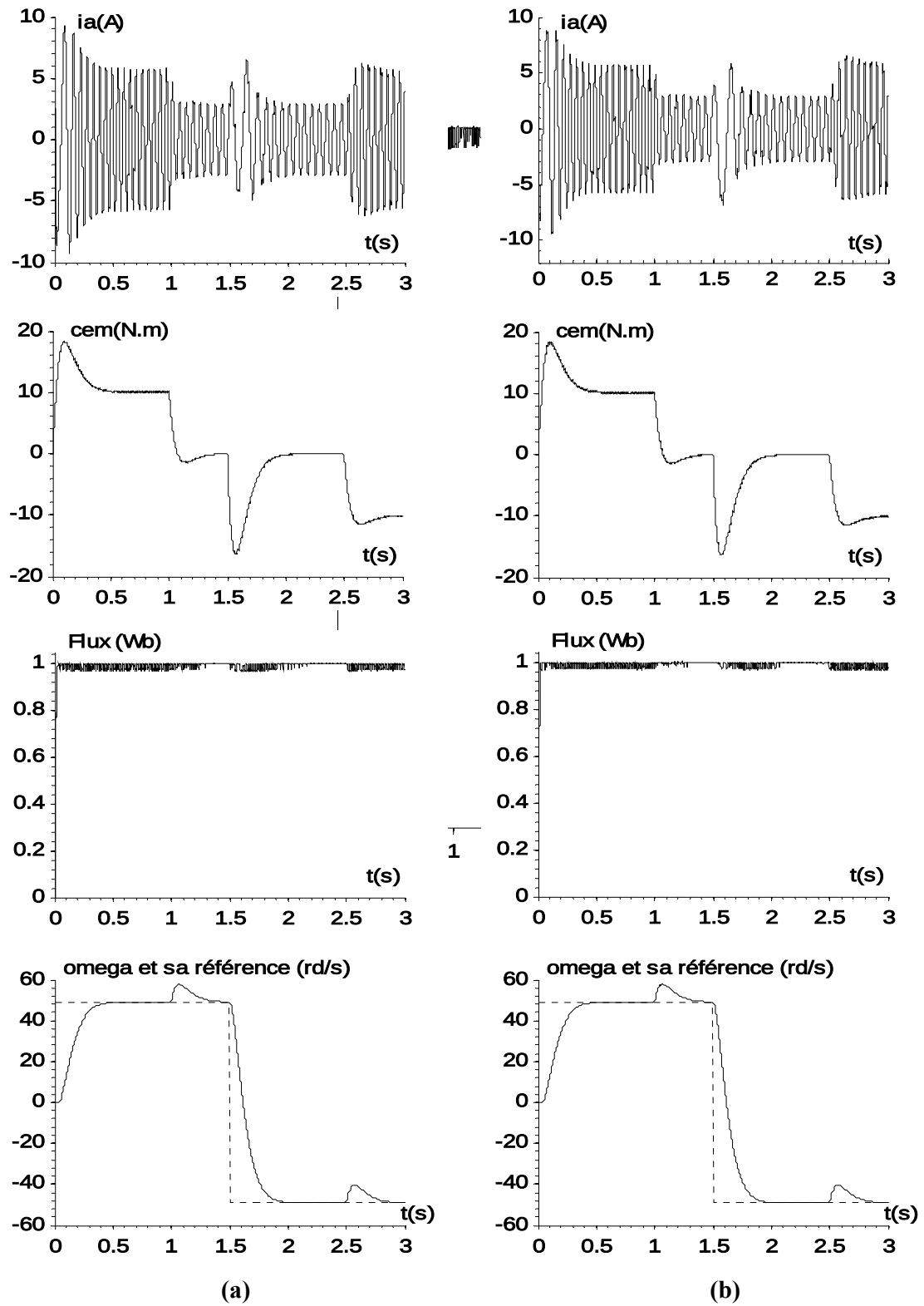


**Figure 4.36** Simulation du CDC à commande neuronale avec alimentation par un onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC: courant de phase, couple, flux, vitesse de rotation et sa référence. (a) Stratégie à une table unique. (b) Stratégie à plusieurs tables.

## 4.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, la structure flexible des réseaux de neurones a été exploitée pour remplacer le sélecteur classique des états des bras de l'onduleur de tension basé sur une table de commande. On s'aperçoit que des structures neuronales bien conçues peuvent se substituer à des tables de commande parfois de dimensions importantes. Ainsi, la sélection des états des interrupteurs de l'onduleur de tension devient plus simple et sans délais aucun. L'implémentation en temps réel de cette structure sur un circuit type FPGA par exemple, ne pose aucun problème, les structures utilisées étant simples (statiques à propagation avant) et dont l'apprentissage s'est effectué en mode différé. Aussi, la structure et le programme demeurant inchangés si la machine change.

## CONCLUSION GENERALE

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire proposent une contribution au développement de lois de commande non linéaire de la machine asynchrone sous différentes alimentations en tension. Parmi les techniques envisageables, nous nous sommes plus particulièrement intéressés, dans cette étude, à la stratégie de contrôle communément appelée contrôle direct du couple. Hormis le fait que comme toute stratégie de régulation basée sur un comparateur à hystérésis, le CDC offre un certain nombre d'avantages comme la grande robustesse par rapport aux variations paramétriques de la machine, simplicité de l'algorithme de commande et les bonnes performances aux faibles vitesses sans capteur mécanique. L'objectif de notre travail s'articule sur deux points liés l'un à l'autre:

- Élaboration de nouvelles tables de commande permettant une régulation la plus rigoureuse des grandeurs de contrôle de la machine, en exploitant toutes les possibilités qu'offre l'onduleur de tension.
- Mise en œuvre de structures à réseaux de neurones. Ce point peut être considéré comme une conséquence du premier. Ces structures représentent une bonne alternative aux tables de commande classiquement utilisées, et ceci en vue d'une implémentation en temps réel.

Ainsi, et afin d'imposer de façon adéquate les ordres de commande des interrupteurs de l'onduleur, il est fondamental de maîtriser au mieux les trajectoires des grandeurs de contrôle (flux et couple) de la machine, une partie qui a été largement évoquée au cours de notre travail.

D'abord, dans le cas d'une alimentation à l'aide d'un onduleur classique, nous avons montré qu'il existait deux stratégies de contrôle pour la commande de la machine.

- La première est basée sur l'application des séquences nulles (ou vecteur de tension nulle) en dehors de la bande d'hystérésis du couple, ceci est contraire à la stratégie de base de I. Takahashi où ces séquences nulles sont appliquées seulement à l'intérieur de cette bande. L'application de ces séquences a ainsi été adoptée au prix de deux tables de commande.
- Une seconde stratégie de contrôle à double bande d'hystérésis pour le couple a été exposée évitant ainsi l'utilisation de deux tables de commande.

La première stratégie contribue à travers ces 2 tables de commande, à diminuer la fréquence de commutation de l'onduleur donc des pertes par commutation correspondantes, mais répond mal à une inversion de la consigne de vitesse comparativement à la seconde stratégie de contrôle. Cette dernière a été considérée avantageuse par rapport à la stratégie à simple bande parce qu'elle ne nécessite qu'une seule table de commande pour tout point de fonctionnement du moteur.

La même procédure a été appliquée dans le cadre d'une alimentation par des onduleurs multiniveaux. Là encore deux stratégies différentes ont été utilisées pour la mise en œuvre des tables de commande.

- La première faisant appel à deux voir plusieurs tables de commande. La plage de vitesse est divisée de sorte que les vecteurs de tension de faible amplitude soient appliqués aux faibles vitesses.
- Une seconde stratégie appelée "à une table de commande unique" où le contrôleur du couple est plus performant. Les tables élaborées sont alors valables à tout point de fonctionnement de la machine.

Les performances à travers les différents tests, présentées dans le cas des deux stratégies sont jugées très comparables.

D'autre part, une solution au déséquilibre du potentiel du point milieu des onduleurs multiniveaux du type NPC a été proposée. Basée sur la redondance des vecteurs de tension atteignables par l'onduleur de tension, cette procédure de stabilisation a montré des résultats satisfaisants. En outre, on peut affirmer que l'équilibrage produit est homogène et la périodicité et la symétrie du courant du point milieu assurées dans le cas de la stratégie à une table unique. Ces critères ne sont obtenus que lorsque les vecteurs dits "stables par la commande" sont appliqués, ceci correspond aux tables Tab33 et Tab55 respectivement pour l'onduleur à 3-niveaux et l'onduleur à 5-niveaux de tension du type NPC.

Cependant, ces tables de commande peuvent prendre des dimensions importantes lorsque le niveau de l'onduleur augmente. Pour faire face à cet inconvénient majeur lorsqu'il s'agit d'une exécution en temps réel, on a proposé l'utilisation de structures à base de réseaux de neurones en lieu et place de ces tables de commande. Ces structures sont connues pour leur capacité de modélisation, leur structure facile à implémenter et leur rapidité. En effet, après un long apprentissage hors ligne effectué sur la base de la totalité des données de la table de commande, on a constaté que la structure neuronale obtenue reflète parfaitement la table de commande correspondante, pouvant donc se substituer à elle dans une future implémentation, avec à la clef tous les critères cités précédemment.

Parmi les perspectives de ce travail, nous pouvons songer à le compléter par:

- Tenir compte de l'influence de  $R_s$  notamment aux basses vitesses de fonctionnement, ou bien une méconnaissance de sa valeur réelle. En effet, s'il est le seul paramètre à

intervenir dans le contrôle, il est aussi le point faible du contrôle, le choix correct du vecteur de tension à imposer dépendant totalement de la connaissance du flux statorique. La recherche d'une technique d'adaptation en temps réel de cette résistance est alors souhaitée [71].

- Une meilleure maîtrise du spectre harmonique, phénomène imparfaitement contrôlé à l'aide de notre algorithme.
- Il convient de développer une méthode de contrôle de la fréquence de commutation de l'onduleur [73,74].
- Équilibrage des tensions aux bornes des quatre (4) condensateurs simultanément dans le cas d'une alimentation à 5-niveaux de tension, cela rendrait la loi de contrôle des tensions aux bornes des condensateurs d'entrée plus complexe.
- Minimiser les structures neuronales adoptées en approfondissant les recherches dans ce sens.
- Recourir à l'intelligence artificielle dans la conception du régulateur de vitesse et dans les blocs de contrôleurs à hystérésis.
- Finalement, l'implémentation de ces lois de commande sur une machine asynchrone de forte puissance, la généralisation de la méthode à des onduleurs à n-niveaux de tension permettrait de valider plus en avant encore l'utilisation de la loi de commande non linéaire pour des machines à forte puissance. Il reste donc encore nombre de terrains d'action pour cette stratégie de commande que les futurs chercheurs auront à cœur d'explorer.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] D. Roze and Y.A. Chapuis, "Possibilités de la filière asynchrone pour la propulsion du véhicule électrique," *C-VELEC'93*, Grenoble ENSIEG (8 avril 1993).
- [2] W. Leonhard, "30 Years Space Vectors, 20 Years Field Orientation, 10 Years Digital Signal Processing with Controlled AC-Drives, a Review," *EPE Journal*, Vol. 1, N°1, 2, pp. 13-20, 89-102, 1991.
- [3] D. Casadei, F. Profumo, G. Serra and A. Tani, "FOC and DTC: Two Viable Schemes for Induction Motors Torque Control," *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol.17, N°5, pp.779-787, Sep. 2002.
- [4] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, J.K. Pedersen, E. Cengelci, S.U. Sulistijo, B.O. Woo and P. Enjeti, "Multilevel converters-a-new breed of power converter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.32, pp.509-517, 1996.
- [5] L.M. Tolbert and F.Z. Peng, "Multilevel converters as a utility interface for renewable energy systems," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol.2, pp.1271-1274, 2000.
- [6] J-P. Cornou, "Les réseaux de neurones pour la modélisation et la conduite des procédés," Lavoisier Technique et documentation, Paris, France.
- [7] M.T. Hagan, H.B. Demuth and O. De Jesus, "An introduction to the use of neural networks in control systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol.12, pp. 959-985, 2002.
- [8] L. Boullart, A. Krijgsman and R.A. Vingerhoeds, "Application of Artificial Intelligence in Process Control," Pergamon Press Ltd, Oxford, UK, 2002.
- [9] F.Z. Peng, "A generalized multilevel inverter topology with self voltage balancing", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol.37, pp.611-618, 2001.
- [10] M. Marchesoni and P. Tenca, "Diode-clamped multilevel converters: A practicable way to balance DC-Link voltages", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.49, pp.752-765, 2002.
- [11] J. Pou, D. Boroyevich and R. Pindado, "New feedforward space-vector PWM method to obtain balanced AC output voltages in a three-level neutral-point-clamped converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.49, pp.1026-1034, 2002.
- [12] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor," *IEEE*, Vol.IA-22, N°5, pp 820-827, Sept. 1986.

- 
- [13] M. Depenbrock, "Direct Self Control (DSC) of inverter fed induction machines," *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol.3, N°4, pp.420-429, Oct.1988.
  - [14] I. Boldea and S.A. Nasar, "Torque Vector Control (TVC) – A class of fast and robust torque speed and position digital controller for electric drives," *Proc. of EMPS*, Vol. 15, pp.135-148, 1988.
  - [15] C. Carlos, "*Modélisation Contrôle Vectoriel et DTC. Commande des Moteurs Asynchrones I*," Édition Hermes Science Europe 2000.
  - [16] Y.A. Chapuis, D. Roye et S. Courtine, "Commande directe du couple d'une machine asynchrone par le contrôle direct de son flux statorique," *J. Phys. III*, T5, N°6, pp.863-880, 1995.
  - [17] E.V. Westerholt, "*Commande non linéaire d'une machine asynchrone*," Thèse de doctorat à l'INP Toulouse, France, 1994.
  - [18] G. Buja and M.P. Kazmiekowski, "Direct Torque Control of PWM Inverter-Fed AC Motors\_A Survey," *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol.51, N°4, pp.744-756, Aug.2004.
  - [19] R. Ortega, N. Barabanov and G. Escobar, "Direct torque control of induction motors: Stability analysis and performance improvement," *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp.100-112, 2001.
  - [20] F. Blaschke, "The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvector Closed-Loop Control System for Rotating Field Machines," *Siemens Review*, Vol. 39, pp-217-220, 1972.
  - [21] C. Canudas de Wit, "*Commande des moteurs asynchrones I- Modélisation, contrôle vectoriel et DTC*," Hermès Science Publication, France, 2000.
  - [22] D. Casadei, G. Grandi, G. Serra and A. Tani, "Effects of flux and torque hysteresis band amplitude in direct torque control of induction machines," *IECON*, Vol I. pp 299-304, Sept. 1994.
  - [23] P. Pohjalainen, P. Tiitinen and J. Ialu, "The next generation motor control method: Direct Torque Control," *EPE Journal*, Vol.5, N°1, March 1995.
  - [24] N.R.N. Idris and A.H.M. Yatim, "Reduced torque ripple and constant switching frequency strategy for direct torque control of induction machine," *Proc. Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp.154-161, 2000.
  - [25] D. Casadei, G. Grandi, G. Serra and A. Tani, "Switching strategies in direct torque control of induction machines," *ICEM 94*, Vol. 2, pp. 204-209, 1994.
  - [26] I. El Hassen, "*Commande Haute Performance d'un Moteur Asynchrone Sans Capteur de Vitesse par Contrôle Direct du Couple*," Thèse de Doctorat de l'institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 1999.
  - [27] I. Takahashi and Y. Ohmori, "High-performance direct torque control of an induction motor," *IEEE. Trans. IA.*, Vol.IA-25. N°2, pp 257-264, Mars/Avril 1989.

- 
- [28] A.-M. Arcker, "Contrôle direct du couple électromagnétique de machines asynchrones de grande puissance," Thèse de Doctorat de l'institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 1999.
- [29] I. Messaïf, E.M. Berkouk, N. Saadia and A. Talha, "Application of Direct Torque Control Scheme for Induction Motor," *International AMSE Conference MS'05*, 2005.
- [30] M. Silva, A.P. Martins and A.S. Carvalho, "Torque and speed Modes Simulation of a DTC-Controlled Induction Motor," *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation-MED2002*, Lisbon, Portugal, July 9-12, 2002.
- [31] I. Messaïf, E.M. Berkouk and N. Saadia, "Direct Torque Control for Induction Machines using Neural Networks," *Archives of Control Sciences*, Vol.17(LIII), No.1, pp.5-16, 2007.
- [32] A. El Bacha, M. T. Lamchichi et M. Charkaoui, "Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone. Système de régulation de vitesse anti-emballement," *Physical and chemical News*, ISSN 1114-3800 pp. 128-134, 2006.
- [33] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, "A New Neutral Point Clamped PWM inverter," *IEEE Trans. On Ind. Appl.*, Vol. IA-17, N°5, 1981.
- [34] K.B. Lee, J.H. Song, I. Choy and J.Y. Yoon, "Improvement of Low-Speed Operation Performance of DTC for Three-Level Inverter –Fed Induction Motors," *IEEE Transactions in Power Electronics*, Vol.48, N°5, pp. 1006-1014, October 2001.
- [35] K.B. Lee, J.H. Song, I. Choy and J.Y. Yoon, "Torque Ripple Reduction in DTC of Induction Motor Driven by Three-Level Inverter With Low Switching Frequency," *IEEE Transactions in Power Electronics*, Vol.17, N°2, pages 255-264, March 2002.
- [36] F. Labrique, G. Segulier et R. Bausiere, "Les convertisseurs de l'électronique de puissance. T4: La conversion Continu-Alternatif," Édition Lavoisier, France, 1995.
- [37] V. Perelmuter, "Three-level inverters with direct torque control," *Industry Applications Conference*, Vol.3, pp.1368-1374, 2000.
- [38] I. Messaïf, E.M. Berkouk et N. Saadia, "Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3-niveaux de tension," *4<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering CEE'06*, Batna, Algérie, 07-08 nov. 2006.
- [39] I. Messaïf, E.M. Berkouk and N. Saadia, "Ripple Reduction in DTC Drives by Using a Three-Level NPC VSI," *14<sup>th</sup> IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems ICECS 2007*, Marrakech, Morocco, 11-14 December 2007.
- [40] X. del Toro, S. Calls, M.G. Jayne, P.A. Witting, A. Arias and J.L. Pomerai, "Direct torque control of an induction motor using a three-level inverter and Fuzzy logic," *Industrial Electronics, International Symposium*, Vol.2, pp.923-927, 2004.
- [41] I. Messaïf, E.M. Berkouk and N. Saadia, "Selection of Voltage Switching Tables DTC of Induction Motor Driven by Three-Level NPC VSI," *The first Electrical Engineering Conference 2007 EE'07*, Aleppo, Syria, 26-28 June 2007.

- 
- [42] E. Sakasegawa and K. Shinohara, "Compensation for Neutral Point Potential in Three-Level Inverter by using Motor Currents," *International Conference on Electrical Machines ICEM 2002*, Bruges, Belgium, pp. 26-28, 2002.
- [43] M. Lafoz, I.J. Iglesias, C. Veganzones and M. Visiers, "A Novel Double Hysteresis-Band Control for Three-Level Voltage Source Inverter," in *Conf. Rec. IEEE Power Electronics Specialists Conf*, pp. 21-26, 2000.
- [44] P. Purkait, R.S. Sriramakavacham, "A New Generalized Space Vector Modulation Algorithm for Neutral-point-clamped Multilevel Converters," *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, Cambridge, USA, 2006.
- [45] J. Holtz and N. Oikonomou, "Neutral point potential balancing algorithm at low modulation index for three-level inverter medium voltage drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.43, No.3, p. 761-768, May/June 2007.
- [46] A. Talha, I. Messaïf, E.M. Berkouk and M.S. Boucherit, "Control of Six Two-Level PWM Rectifiers - Half Clamping Bridge - Seven Level NPC VSI Cascade," *International Conference On Electrical Machines (ICEM'2004, Cracow, Poland)*.
- [47] S. Alepuz, J. Salact, A. Gilabert, J. Bordonau and J. Peracaula, "Control of three-level VSI with a lqr-based gain-scheduling technique applied to dc-link neutral voltage and power regulation," *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vol.2, pp.914-919, 2002.
- [48] H.T. Mouton, "Natural balancing of three-level neutral-point-clamped inverters," *IEEE transactions on Industrial Electronics*, Vol.49, pp.1017-1025, 2002.
- [49] N. Celanovic, "*Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters*," Ph.D. dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Dept., 2000.
- [50] N. Celanovic and D. Boroyevich, "A Comprehensive Study of Neutral-Point Voltage Balancing Problem in Three-Level Neutral-Point-Clamped Voltage Source PWM inverters," *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol.14, n°1, pp.74-81, 1999.
- [51] J. Rodriguez, J-S Lai and F.Z. Peng, "Multilevel Inverters: A survey of topologies, controls, and applications," *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 49, No.4, 2002.
- [52] C. De Almeida Martins, "*Contrôle Direct du Couple d'une Machine Asynchrone Alimentée par Convertisseur Multiniveaux à Fréquence Imposée*," Thèse de Doctorat de l'institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2000.
- [53] M.F. Escalante, "*Contribution à la définition de structures optimales d'onduleurs pour la commande de machines à courant alternatif par DTC*," Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, Paris, France, 2001.
- [54] Z. Oudjebour, E.M. Berkouk, N. Sami, S. Belgasmi, S. Arezki and I. Messaïf, "Indirect space vector control of a double star induction machine fed by two five-levels NPC VSI," *International Conference On Electrical Machines (ICEM'2004, Cracow, Poland)*.
- [55] C. Martins, T.A. Meynard and A.S. Carvalho, "Switching Frequency Imposition and Ripple Reduction in DTC Drives by Using a Multilevel Converter," *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 17, No.2, March 2002.

- 
- [56] Josef Pou I Felix, "*Modulation and Control of Three-phase PWM Multilevel Converters*," PhD Thesis, Electronic Department, Catalanian Polytechnic University, 2002.
  - [57] M. Marchesoni and P. Tenca, "Theoretical and practical limits in multilevel NPC inverters with passive front ends," *European Conference on Power Electronics and Applications*, 2001.
  - [58] J. Rodriguez, J.S. Lai and F.Z. Peng, "Multilevel inverters: A survey of topologies, controls and applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.49, pp.724-738, Aug. 2002.
  - [59] C.A. Martins, X. Roboam, T.A. Meynard and A.S. Carvalho, "Switching frequency imposition and ripple reduction in dtc drives by using a multilevel converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.17, pp.286-296, 2002.
  - [60] M.F. Escalante, J-C. Vannier and A. Arzandé, "Flying Capacitor Multilevel Inverters and DTC Motor Drive Applications," *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 49, No.4, pp. 809-815, 2002.
  - [61] L.A. Cabrera, M.E. Elbuluk and D.S. Zinger, "Learning techniques to train neural networks as a state selector for inverter-fed induction machines using direct torque control," *IEEE Trans. On PE*, Vol.12, N°5, pp. 788-799, 1997.
  - [62] X. WU and L. Huang, "Direct Torque Control of Three-level Inverter Using Neural Networks as Switching Vector Selector", *IAS Annual meeting, IEEE Industry Applications Society*, pp. 939-944, 2001.
  - [63] K. Hunt, D. Sbarbaro, R. Zbikowski and P. Gowthrop, "Neural networks for control systems- A survey," *Automatica*, Vol.28, N°6, pp. 1083-1112.
  - [64] K. Hornik, "Multilayer networks are universal approximations," *Neural networks*, Vol.2, pp. 359-366, 1989.
  - [65] L.A. Cabrera, M.E. Elbuluk and I. Husain, "Tuning the stator resistance of induction motors using artificial neural network," *IEEE Trans. On PE*, Vol.12, N°5, pp. 779-787, 1997.
  - [66] P.H. Sorensen, M. Norgaard, O. Ravn, and N.K. Poulsen, "Implementation of Neural Network Based Non-linear Predictive Control," *Neurocomputing*, 28, pp. 37-51, 1999.
  - [67] K. Levenberg, "A method for the solution of certain problems in least squares," *Quarterly of Applied Mathematics*, 5, pp. 164-168, 1944.
  - [68] D. Marquardt, "An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters," *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11, pp.431-441, 1963.
  - [69] D. Mishra, A. Yadav, S. Ray and P.K. Kalra, "Levenberg-Marquardt Learning Algorithm for Integrate-and-Fire Neuron Model," *Neural Information Processing-Letters and Reviews*, Vol.9, N°2, Nov.2005.
  - [70] J. Nocedal and S.J. Wright, "*Numerical Optimization*," Springer-Verlag, 1999.
  - [71] Y.C. You, C.H. Lui and Y.S. Lai, "Adaptative stator resistance estimation and low speed torque ripple minimization for a sensorless discret torque control induction motor drive," *IPEC*, pp.1087-1092, 2000.

- [72] D. Casadei, G. Serra and A. Tani, "Constant frequency operation of DTC induction motor drive for electric vehicle," *ICEM'96*, Vigo, Spain, Sept.10-12, Vol. III, pp. 224-229, 1996.
- [73] C. Lochot, X. Roboam and P. Maussion, "A new direct torque control strategy for an induction motor with constant switching frequency operation," *EPE'95*, Sevilla, pp.2-431 2-436, 1995.
- [74] J. Chatelain, "*Machines électriques*," Tome 1, Dunod, Presse Polytechniques Romandes, 1983.
- [75] J.P. Caron et J.P. Hautier, "*Modélisation et commande de la machine asynchrone*," Méthodes et pratiques de l'ingénieur. Collection P. Borne Editions Technip.1995.

## ANNEXE 1

### MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

#### A1.1 INTRODUCTION

Le fonctionnement de la machine asynchrone est obtenu par alimentation de ses enroulements statoriques en tensions triphasées en pulsation  $\omega_s$ . Le champ statorique ainsi créé induit alors au rotor, fermé sur lui-même, un champ rotorique tournant de pulsation telle que, sommée à la vitesse de rotation du rotor, le résultat soit  $\omega_s$ . En analogie avec un transformateur équivalent monophasé [75], la machine asynchrone est souvent représentée par le schéma équivalent de la figure A1.1. Pour l'obtenir, il faut s'appuyer sur un certain nombre d'hypothèses, les pertes fer sont considérées comme négligeables, un système d'alimentation triphasé équilibré et on suppose qu'il n'y a pas de saturation des matériaux magnétiques [76]. Six paramètres de la machine y apparaissent:

- $R_s$  et  $R_r$  qui sont les résistances statorique et rotorique des enroulements.
- $M_{sr}$ , la mutuelle inductance représentative du couplage entre le stator et le rotor de la machine.
- $l_s$  et  $l_r$  qui représentent les pertes en flux statorique et rotorique. On les obtient par les relations  $l_s = L_s - M_{sr}$  et  $l_r = L_r - M_{sr}$  où  $L_s$  et  $L_r$  sont les inductances respectivement cycliques statorique et rotorique.
- $s$ , le glissement de la machine. On l'obtient par la relation (A1-1). Les variations du glissement reflètent les variations de charge de la machine.

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (\text{A1-1})$$

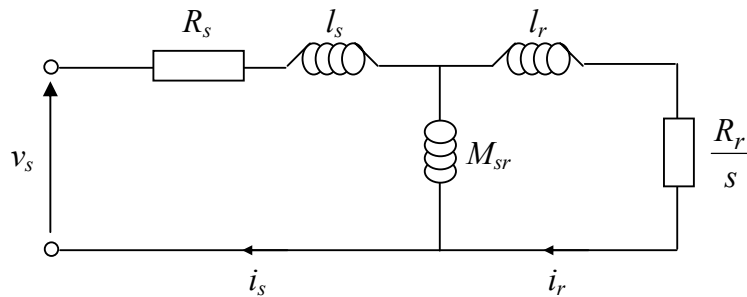


**Figure A1.1** Schéma équivalent par phase de la machine asynchrone

#### A1.2 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La machine asynchrone est un convertisseur électromécanique. Ce moteur triphasé est constitué d'un multiple de trois enroulements identiques logés symétriquement dans les

encoches du stator et d'une cage d'écureuil au rotor, assimilable électriquement à trois enroulements identiques parfaitement symétriques et en court circuit. Dans ces conditions, la machine asynchrone peut être modélisée selon l'expression (eq. A1-2).

$$\begin{cases} v_s = R_s i_s + \frac{d\varphi_s}{dt} \\ v_r = 0 = R_r i_r + \frac{d\varphi_r}{dt} \end{cases} \quad (\text{A1-2})$$

où  $v_s = [v_a \ v_b \ v_c]^T$ ,  $\varphi_{s,r} = [\varphi_{as,r} \ \varphi_{bs,r} \ \varphi_{cs,r}]^T$ ,  $i_{s,r} = [i_{as,r} \ i_{bs,r} \ i_{cs,r}]^T$

Une étude du comportement statique et dynamique permet d'établir un modèle général de connaissance qui représente au mieux la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique. Ce modèle est établi sur la base des hypothèses simplificatrices citées ci-dessous.

La non considération du phénomène de saturation magnétique conduit à une expression  $\varphi = L \cdot i$  linéaire avec l'inductance  $L$  constante. En conséquence, l'expression des flux en fonction des courants qui fait intervenir les inductances de la machine asynchrone s'écrit de la façon suivante:

$$\varphi_{s,r} = [L_{s,r}] i_{s,r} + [M_{s,r}] i_{r,s} \quad (\text{A1-3})$$

où

$$[L_{s,r}] = \begin{bmatrix} l_{s,r} & M_{s,r} & M_{s,r} \\ M_{s,r} & l_{s,r} & M_{s,r} \\ M_{s,r} & M_{s,r} & l_{s,r} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$M_{s,r}$  est l'inductance mutuelle entre 2 phases statoriques, rotoriques.

$M_{sr}$  est l'inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.

$\theta$  est la position de la phase a du rotor par rapport à la phase b du stator.

En calculant le flux totalisé dans une phase du stator, nous pouvons simplifier l'expression des flux en fonction des courants:

$$\begin{aligned} \varphi_s &= L_s i_s + L_m i_r \\ \varphi_r &= L_r i_r + L_m i_s \end{aligned} \quad (\text{A1-4})$$

avec:  $L_{s,r} = l_{s,r} - M_{s,r}$  et  $L_m = \frac{3}{2} M_{sr}$

### A1.3 TRANSFORMATION DE PARK

La transformation de Park consiste à transformer un système triphasé en un système

diphasé [75]. En l'absence de composante homopolaire (hypothèse d'équilibre des armatures et de l'alimentation), elle permet ainsi de réduire l'ordre des équations électriques de six à quatre. Les axes (d,q) du repère sont en rotation à une pulsation  $\omega_\psi$  égale à celle qui régit l'évolution des grandeurs électriques. De cette manière, les grandeurs dans ce repère sont continues en régime permanent.

Il existe deux types de transformations de Park les plus classiquement utilisées. La première conserve la puissance (transformation à puissance constante) qui est retenue par la suite, et la seconde conserve l'amplitude des grandeurs transformées (transformation à amplitude constante):

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = P(\psi) \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{A1-5})$$

et la transformation inverse est:

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = P^{-1}(\psi) \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad (\text{A1-6})$$

sachant que:

$$P(\psi) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\psi) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A1-7})$$

$\psi$  est la position de l'axe d du repère de Park par rapport à la phase a du stator.

$X_o$  est la composante homopolaire, elle est prise nulle dans notre cas (système équilibré).

En appliquant la transformation  $P(\psi)$  aux équations du stator et la transformation  $P(\psi-\theta)$  aux équations du rotor données en (eq. A1-2), nous obtenons:

$$\begin{cases} v_{dq(s)} = R_s i_{dq(s)} + \frac{d\varphi_{dq(s)}}{dt} - \frac{d\psi}{dt} \cdot [G] \cdot \varphi_{dq(s)} \\ 0 = R_r i_{dq(r)} + \frac{d\varphi_{dq(r)}}{dt} + \frac{d(\psi - \theta)}{dt} \cdot [G] \cdot \varphi_{dq(r)} \end{cases} \quad (\text{A1-8})$$

avec:  $[G] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

et

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (\text{A1-9})$$

Aucune formulation n'a été considérée quand à la pulsation  $\omega_\psi = d\psi/dt$  du repère tournant (d,q). Ce choix étant libre à priori et obéit aux caractéristiques et objectifs de l'application. Trois possibilités sont habituellement envisagées:

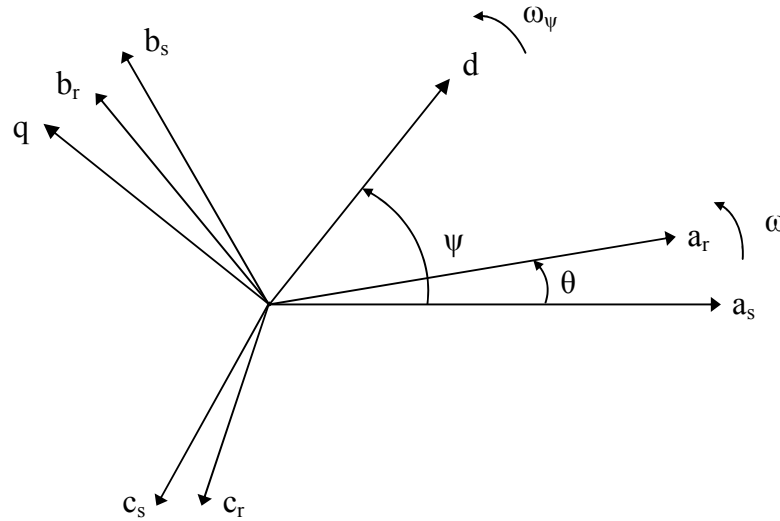


**Figure A1.2** Repérage angulaire des systèmes d'axes triphasés et diphasé

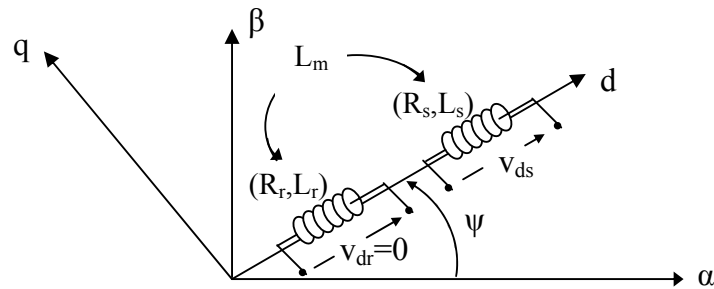


**Figure A1.3** Représentation des enroulements dans le repère (d,q)

- Le repère de Park (d,q) est lié au champ tournant (statorique ou rotorique). Lorsqu'on atteint le régime permanent électrique, cette pulsation est égale à la pulsation des tensions ou flux ou courants statoriques ( $\omega_\psi = \omega_s$ ) de telle sorte que les grandeurs électriques sont continues.

- Le repère de Park est lié au rotor, c'est-à-dire  $\psi=\theta$  et  $\omega_\psi=\omega$ . Dans ce cas, les grandeurs électriques évoluent en régime permanent électrique à la pulsation rotorique  $\omega_r$ , dite glissement.
- Le repère de Park est fixé au stator, c'est-à-dire  $\psi=0$  et  $\omega_\psi=0$ . Dans ce cas, les grandeurs électriques évoluent en régime permanent électrique à la pulsation statorique  $\omega_s$ . Ce repère a l'avantage de nécessiter une seule transformation linéaire sans rotation  $P(0)$ . C'est un repère fixe d'axes notés  $(\alpha, \beta)$ .

C'est ce dernier cas qui a été appliqué par la suite.

Nous remarquons enfin que l'expression du couple est beaucoup plus simple. En tenant compte des expressions du flux (A1-9) et pour une machine à  $p$  pôles, nous trouvons:

$$\Gamma_e = p(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds}) \quad (\text{A1-10})$$

#### A1.4 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE ALIMENTEE EN TENSION

Dans la configuration de notre étude, le changement de structure se fait par commutation au niveau de l'organe de commande, à savoir l'onduleur de tension. Il paraît alors intéressant d'opter pour un référentiel lié au stator et de choisir un vecteur d'état entièrement formé de grandeurs statoriques.

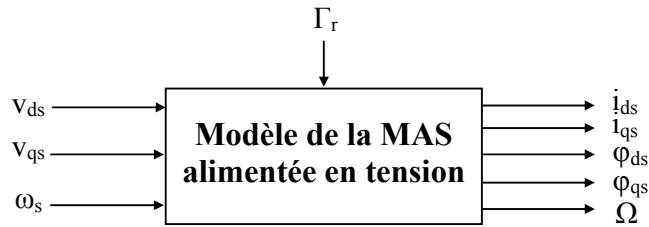


**Figure A1.4** Schéma bloc de la machine asynchrone alimentée en tension

Les équations électriques s'écrivent alors:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega \varphi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{A1-11})$$

L'équation du mouvement est donnée par:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma_e - \Gamma_r \quad (\text{A1-12})$$

**A1.5 PARAMETRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE**

Fréquence: 50Hz

Puissance: 1.5kW

Tension d'alimentation: 220V

Résistance statorique:  $4.85\Omega$

Résistance rotorique:  $3.80\Omega$

Inductance mutuelle: 0.258H

Inductance statorique: 0.274H

Inductance rotorique: 0.274H

Nombre de paires de pôles: 2

Inertie:  $0.031\text{kg.m}^2$

Force de frottement:  $0.001136\text{N.m.s/rd}$

Tension totale de la batterie: 514V

Pas d'échantillonnage:  $100\mu\text{s}$

## INFLUENCE DES VECTEURS DE L'ONDULEUR A 3-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC SUR LE POTENTIEL DE SON POINT MILIEU

### A2.1 INTRODUCTION

L'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC permet, par combinaison des 4 interrupteurs constituant chacun de ses trois bras, d'imposer à chaque phase trois niveaux de tension  $\left(+\frac{U_0}{2}, 0, -\frac{U_0}{2}\right)$ . L'un de ces niveaux correspond au niveau du potentiel du point milieu de l'onduleur, c'est-à-dire le niveau de tension d'un des deux condensateurs constituant le bus de tension continue d'entrée de l'onduleur, à savoir  $C_{-1}$ . Ainsi, pour assurer le bon fonctionnement de l'onduleur, il faut maintenir les tensions de ces deux condensateurs égales et valant la moitié de la tension continue d'entrée. Soit:

$$\begin{cases} U_{C1} + U_{C-1} = U_0 \\ U_{C1} = U_{C-1} \end{cases} \quad (\text{A2-1})$$

Or comme cela est développé au chapitre 2, certains des vecteurs que peut produire l'onduleur sont susceptibles de perturber cet équilibre. C'est le cas des vecteurs de tension des deux groupes appelés "demie tension" et "tension intermédiaire":

- Les vecteurs "demie tension" sont les vecteurs constituant l'hexagone interne dans la représentation spatiale des vecteurs de tension de sortie  $v_s$  de l'onduleur. Ce groupe est subdivisé encore en deux sous groupes puisque chaque vecteur de l'hexagone peut être obtenu par deux combinaisons différentes des interrupteurs.
  - Le premier sous groupe est constitué des vecteurs réalisés par des combinaisons où une ou deux phases de l'onduleur sont reliées au point milieu de l'onduleur, la ou les phases restantes sont connectées au potentiel  $+\frac{U_0}{2}$ .
  - Le deuxième sous groupe est constitué des vecteurs obtenus pour des combinaisons où une ou deux phases de l'onduleur sont reliées au point milieu de l'onduleur, la ou les phases restantes sont connectées au potentiel  $-\frac{U_0}{2}$ .
- Les vecteurs dits "tension intermédiaire" sont les vecteurs qui connectent chacune des trois phases de l'onduleur à un niveau de tension différent.

Les autres vecteurs des deux groupes restants, à savoir "tension nulle" et "pleine tension", n'ont pas d'influence sur l'évolution du potentiel du point milieu de l'onduleur car ils ne connectent aucune phase de sortie de l'onduleur au point o. On va examiner l'influence de l'application des vecteurs des deux premiers sous groupes sur la tension du point milieu à travers des exemples.

## A2.2 ÉTUDE DE L'APPLICATION D'UN VECTEUR DU GROUPE "DEMIE TENSION"

Étudions l'influence de l'application d'un vecteur de tension du groupe "demie tension" mais réalisé grâce à deux combinaisons différentes. On prendra par exemple les deux combinaisons  $(1,1,0)$  du vecteur  $v_2$  et  $(0,0,-1)$  du vecteur  $v_9$ .

### ■ APPLICATION DE $V_2$

La combinaison  $(1,1,0)$  connecte la phase "a" et la phase "b" de l'onduleur au point de tension de niveau haut par l'intermédiaire des interrupteurs  $S_{11}$  et  $S_{12}$ , rendus passants. La phase "c" est quant à elle connectée au point milieu de l'onduleur. C'est ce qu'illustre le schéma de la figure A2.1 où les voies possibles de circulation des courants de phase sont représentées en traits pleins.

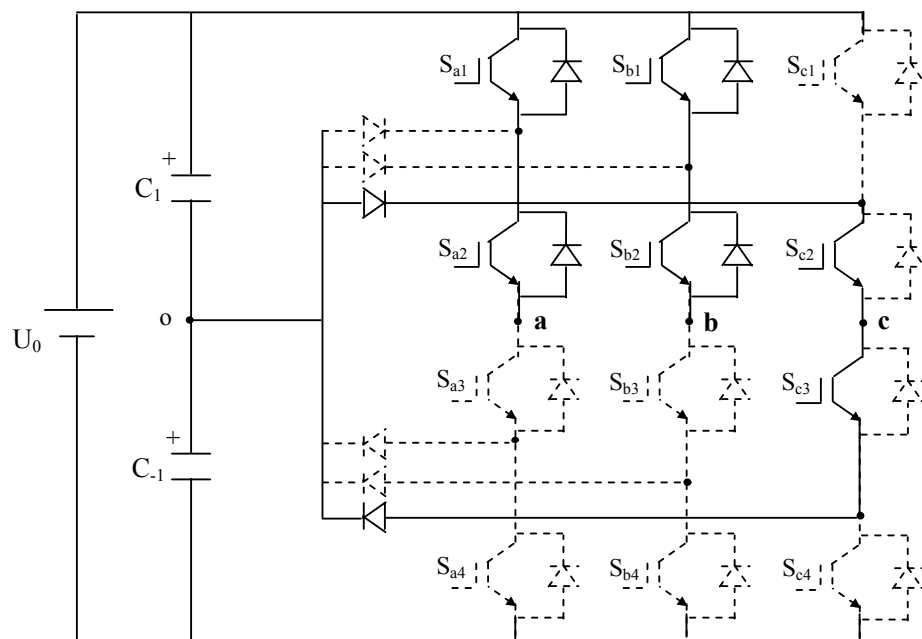


**Figure A2.1** Application du vecteur de tension  $v_2(1,1,0)$

On constate que seule le condensateur  $C_1$  est sollicité lors de l'application de la combinaison  $(1,1,0)$ . Ceci va avoir pour effet de diminuer la tension aux bornes de ce condensateur et d'augmenter celle aux bornes de  $C_{-1}$  puisque la première égalité de l'équation A2-1 reste vérifiée. Par contre, la deuxième ne l'est plus et la tension du point milieu de l'onduleur varie. Il est alors évident qu'un contrôle faisant appel aux seuls vecteurs du premier sous-groupe du groupe "demie tension" entraîne une déstabilisation du point milieu pouvant aller jusqu'à l'annulation de la tension aux bornes de  $C_1$  (dans notre cas) alimentant les trois phases. Une telle stratégie de contrôle ne peut donc pas fonctionner.

▪ *APPLICATION DE  $V_9$*

La combinaison (0,0,-1) connecte d'une part les deux phases "a" et "b" au point milieu de l'onduleur de tension par l'intermédiaire des interrupteurs  $S_{i2}$  et  $S_{i3}$ , rendus passants. D'autre part, la phase "c" est connectée au point de tension de niveau bas. C'est ce qu'illustre le schéma de la figure A2.2 où les voies possibles de circulation des courants de phase sont représentées en traits pleins.

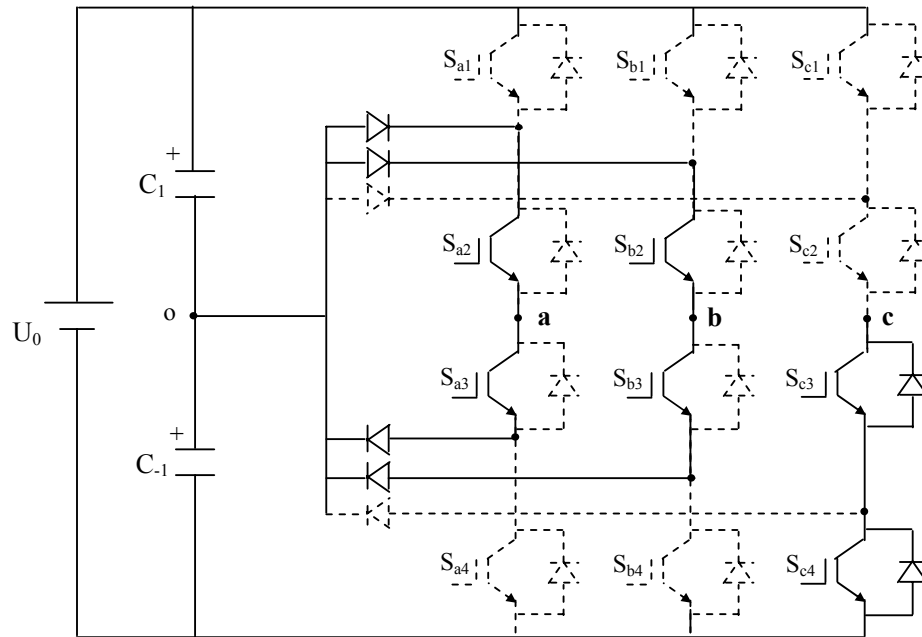


**Figure A2.2** Application du vecteur de tension  $v_9$  (0,0,-1)

De même façon que dans le cas précédent, on constate que seule la tension du condensateur  $C_{-1}$  est sollicitée lors de l'application de la combinaison (0,0,-1). Cette combinaison peut faire circuler un courant dans  $C_{-1}$  en sens inverse. Ceci va avoir pour effet de diminuer la tension aux bornes de ce condensateur et d'augmenter celle aux bornes de  $C_1$ . La deuxième équation du système A2.1 n'est plus vérifiée et la tension du point milieu de l'onduleur varie. Une stratégie de contrôle où seuls les vecteurs du deuxième sous-groupe du groupe "demi tension" sont appliqués, ne peut donc pas maintenir l'équilibre du point milieu de l'onduleur.

### A2.3 ÉTUDE DE L'APPLICATION D'UN VECTEUR DE TENSION DU GROUPE "TENSION INTERMEDIAIRE"

Pour étudier l'influence de l'application d'un vecteur du groupe "tension intermédiaire" sur la tension du point milieu de l'onduleur, on va prendre pour exemple le vecteur  $v_{22}$ . Ce vecteur est obtenu par la seule combinaison des interrupteurs (0,1,-1). La phase "a" est donc reliée au point milieu  $o$ , la seconde est connectée au point de niveau haut de tension et la

dernière au point de niveau bas de tension. La figure A2.3 illustre les voies possibles de circulation des courants de phase en trait plein.

L'application d'un vecteur du groupe "tension intermédiaire" va avoir un effet sur la valeur du potentiel du point milieu  $o$  puisqu'il connecte une des trois phases de sortie de l'onduleur, donc de la charge, à ce point. Par contre, on ne peut pas dire a priori si la variation de la tension du point milieu sera une augmentation ou une diminution. En effet, alors que  $v_{21}$ , par exemple, est appliqué, les deux condensateurs  $C_1$  et  $C_{-1}$  en entrée de l'onduleur sont sollicités, mais les courants ne sont pas les mêmes. Il y aura apparition d'un déséquilibre du potentiel du point milieu de l'onduleur. Ce déséquilibre dépend du signe du courant traversant le point  $o$ , c'est aussi, le signe du courant de la phase que connecte au point  $o$  le vecteur du groupe "tension intermédiaire" concerné.

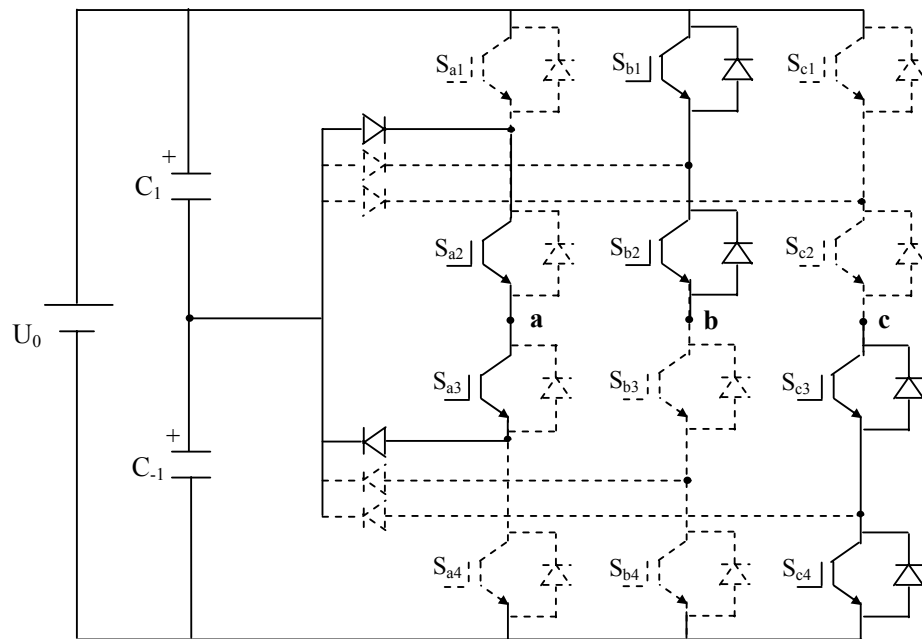


**Figure A2.3** Application du vecteur de tension  $v_{22}$  (0,1,-1)

On peut conclure que:

L'utilisation des vecteurs des groupes "demie tension" et "tension intermédiaire" doit être effectuée avec précaution car elles entraînent des déséquilibres entre les deux tensions des condensateurs d'entrée de l'onduleur à 3-niveaux de structure NPC.

- o Les vecteurs du premier sous-groupe du groupe "demie tension", à savoir  $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5$  et  $v_6$  entraînent une augmentation de la tension du point milieu de l'onduleur et une diminution de la tension aux bornes du condensateur  $C_1$ .
- o Les vecteurs du deuxième sous-groupe du groupe "demie tension", à savoir  $v_8, v_9, v_{10}, v_{11}, v_{12}$  et  $v_{13}$  entraînent une diminution du potentiel du point milieu de l'onduleur et une augmentation de la tension aux bornes du condensateur  $C_1$ .

- o Les vecteurs du groupe "tension intermédiaire", à savoir  $v_{21}$ ,  $v_{22}$ ,  $v_{23}$ ,  $v_{24}$ ,  $v_{25}$  et  $v_{26}$  entraînent une variation du potentiel du point milieu de l'onduleur de tension. Le sens de cette variation (augmentation ou diminution) est donné par le signe du courant de la phase connectée au point milieu.

De ce fait, l'utilisation de ces vecteurs nécessite la mise en place d'une technique de contrôle qui assure la stabilisation du potentiel du point milieu de l'onduleur à 3-niveaux de tension de type NPC.

## INFLUENCE DES VECTEURS DE L'ONDULEUR A 5-NIVEAUX DE TENSION DE TYPE NPC SUR LE POTENTIEL DE SON POINT MILIEU

### A3.1 INTRODUCTION

L'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC permet, par combinaison de ces interrupteurs constituant chacun de ses trois bras, d'imposer à chaque phase cinq niveaux de tension  $\left( +\frac{U_0}{2}, +\frac{U_0}{4}, 0, -\frac{U_0}{4}, -\frac{U_0}{2} \right)$ . L'un de ces niveaux correspond au niveau du potentiel du point milieu de l'onduleur, c'est-à-dire le niveau de tension d'un des deux ensembles de condensateurs constituant le bus de tension continue d'entrée de l'onduleur, à savoir  $C_{-12}$ . Ainsi, pour assurer le bon fonctionnement de l'onduleur, il faut maintenir les tensions de ces deux ensembles égales et valant la moitié de la tension continue d'entrée. En effet, on a opté pour l'équilibrage des tensions de condensateurs deux par deux:

$$\begin{cases} U_{C12} + U_{C-12} = U_0 \\ U_{C12} = U_{C-12} \end{cases} \quad (A3-1)$$

Or comme cela a été développé au chapitre 3, le choix d'équilibrage de tensions des condensateurs deux par deux conduit à une classification des vecteurs de tension en trois grands groupes dont deux seulement peuvent causer un déséquilibre de ces tensions. Ce sont les groupes dits "stables par la commande" et "instables":

- Les vecteurs dits "stables par la commande" sont les vecteurs de tension appartenant au sous groupes suivants: 2\_1 (1-6), 2\_3 (13-18), 3\_1 (44-49), 3\_3 (56-61), 4\_1 (26-31) et 4\_3 (38-43). Comme pour le cas précédent, on définit chaque groupe comme suit:
  - Le premier sous groupe est constitué des vecteurs réalisés par des combinaisons où une ou deux phases de l'onduleur sont reliées au point milieu de l'onduleur, la ou les phases restantes sont connectées au potentiel  $+\frac{U_0}{2}$  ou  $+\frac{U_0}{4}$ .
  - Le deuxième sous groupe est constitué des vecteurs obtenus pour des combinaisons où une ou deux phases de l'onduleur sont reliées au point milieu de l'onduleur, la ou les phases restantes sont connectées au potentiel  $-\frac{U_0}{2}$  ou  $-\frac{U_0}{4}$ .
- Les vecteurs dits "instables" sont les vecteurs qui connectent chacune des trois phases de l'onduleur à un niveau de tension différent: 3\_2 (50-55), 5\_1 (75-86) et 7 (118-123).

Les vecteurs de tension du groupe dit "intrinsèquement stable", n'ont aucun effet sur le potentiel du point milieu de l'onduleur car ils ne connectent aucune phase de sortie de l'onduleur au point o. On va examiner l'influence de l'application des vecteurs des deux premiers groupes sur la tension du point milieu à travers des exemples.

### A3.2 ÉTUDE DE L'APPLICATION D'UN VECTEUR DE TENSION DU GROUPE DIT "STABLE PAR LA COMMANDE"

Prenons l'exemple d'application de deux combinaisons différentes appartenant au groupe 3, soient 45 (1,2,0) et 57 (-1,0,-2).

#### ▪ APPLICATION DE 45

La combinaison (1,2,0) connecte la phase "a" de l'onduleur au potentiel  $+\frac{U_0}{4}$  par l'intermédiaire des interrupteurs  $S_{a2}$  et  $S_{a3}$ , rendus passants et la phase "b" au potentiel de niveau  $+\frac{U_0}{2}$  par l'intermédiaire des interrupteurs  $S_{b1}$ ,  $S_{b2}$  et  $S_{b3}$ . La phase "c" est quant à elle connectée au point milieu de l'onduleur. La figure A3.1 illustre les voies possibles de circulation des courants de phase sont représentées en traits pleins.

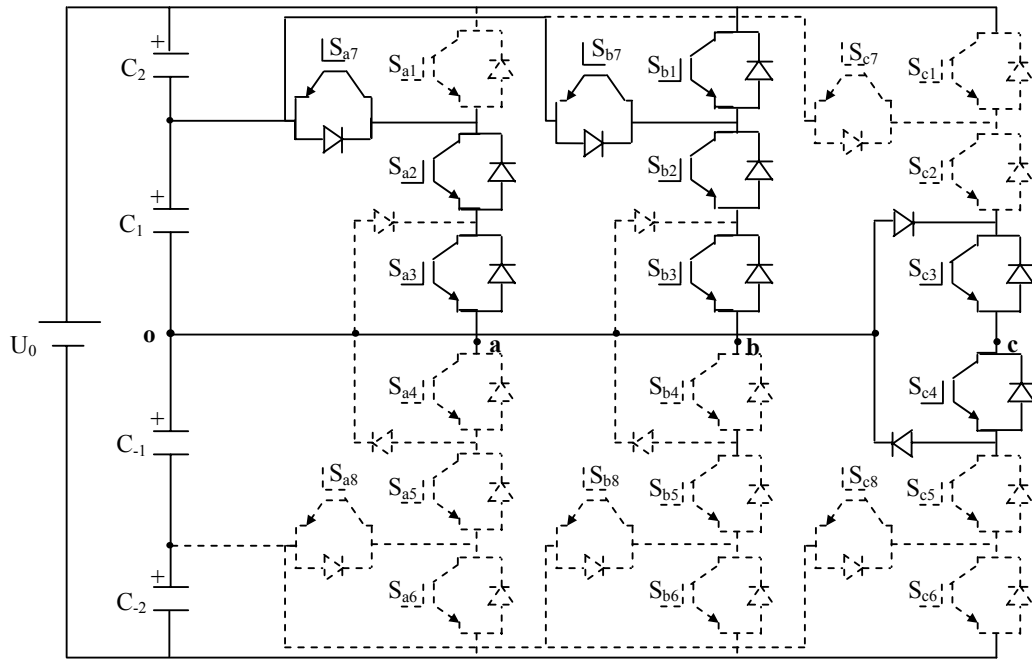


**Figure A3.1** Application du vecteur de tension 45(1,2,0)

On constate que l'application de la combinaison (1,2,0) a pour effet de diminuer la tension aux bornes de l'ensemble  $C_{12}$ . La deuxième équation de A3-1 n'étant plus vérifiée, alors le potentiel du point milieu de l'onduleur varie. Il est alors évident qu'un contrôle faisant appel aux seuls vecteurs du sous-groupe 3\_1 entraîne une déstabilisation du point milieu pouvant aller jusqu'à l'annulation de la tension aux bornes de  $C_{12}$  (dans notre cas) alimentant les trois phases. Une telle stratégie de contrôle ne peut donc pas fonctionner.

#### ▪ APPLICATION DE 57

La combinaison (-1,0,-2) connecte la phase "a" au potentiel  $-\frac{U_0}{4}$  par l'intermédiaire des

interrupteurs  $S_{a4}$  et  $S_{a5}$ , rendus passants, la phase "c" au potentiel de valeur  $-\frac{U_0}{2}$  par

l'intermédiaire des interrupteurs  $S_{c4}$ ,  $S_{c5}$  et  $S_{c6}$ . Enfin, la phase "b" est connectée au point milieu de l'onduleur. C'est ce qu'illustre le schéma de la figure A3.2 où les voies possibles de circulation des courants de phase sont représentées en traits pleins.

En suivant le même raisonnement, on constate que seule la tension de l'ensemble de condensateurs  $C_{-12}$  est sollicitée lors de l'application de la combinaison  $(-1,0,-2)$ . Cette combinaison peut faire circuler un courant dans  $C_{-12}$  en sens inverse, ceci va avoir pour effet de diminuer la tension aux bornes de ce condensateur et d'augmenter celle aux bornes de  $C_{12}$ . La deuxième équation du système A3.1 n'est plus vérifiée et la tension du point milieu de l'onduleur varie. On conclut alors qu'une stratégie de contrôle basée sur l'application des seuls vecteurs du sous-groupe 3\_3 ne peut donc pas maintenir l'équilibre du point milieu de l'onduleur.

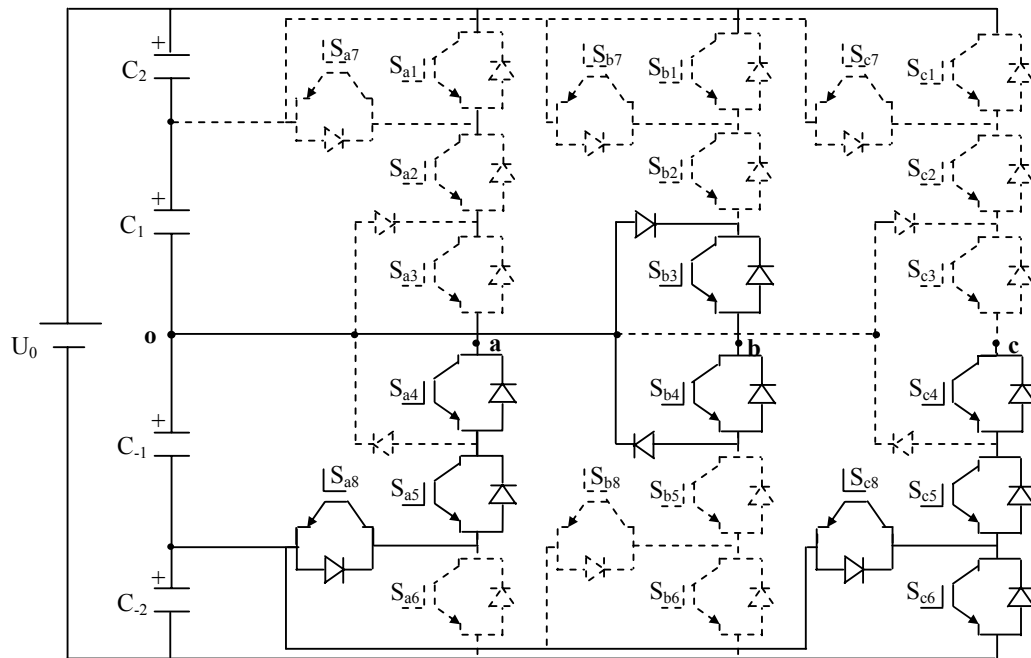


**Figure A3.2** Application du vecteur de tension 57(-1,0,-2)

### A3.3 ÉTUDE DE L'APPLICATION D'UN VECTEUR DE TENSION

#### DU GROUPE DIT "INSTABLE"

Le vecteur de tension 76 est obtenu par la seule combinaison des interrupteurs  $(1,0,-2)$ . La phase "a" est donc reliée au potentiel  $+\frac{U_0}{4}$ , la phase "c" au potentiel  $-\frac{U_0}{2}$  tandis que la phase "b" est connectée au point milieu de l'onduleur. La figure A3.3 illustre les voies possibles de circulation des courants de phase en trait plein.

L'application de ce vecteur fait intervenir les deux ensembles de condensateurs en entrée de l'onduleur  $C_{12}$  et  $C_{-12}$ , mais les courants ne sont pas les mêmes. Il y aura apparition d'un

déséquilibre du potentiel du point milieu de l'onduleur. Ce déséquilibre dépend du signe du courant traversant le point milieu  $o$ .

De ce qui précède, on peut conclure que les vecteurs de tension des groupes dits "stables par la commande" et "instables" ont un effet sur le potentiel du point milieu de l'onduleur à 5-niveaux de structure NPC:

- o Les vecteurs des sous-groupes suivants: 2\_1, 3\_1 et 4\_1 entraînent une augmentation de la tension du point milieu de l'onduleur.
- o Les vecteurs des sous-groupes suivants 2\_3, 3\_3 et 4\_3 entraînent une diminution du potentiel du point milieu de l'onduleur.
- o Les vecteurs des sous groupes suivants: 3\_2, 5\_1 et 7 entraînent une variation du potentiel du point milieu de l'onduleur de tension. Le sens de cette variation (augmentation ou diminution) est donné par le signe du courant de la phase connectée au point milieu.

Par conséquent, l'utilisation de ces vecteurs nécessite la mise en place d'une technique de contrôle qui assure la stabilisation du potentiel du point milieu de l'onduleur à 5-niveaux de tension de type NPC.

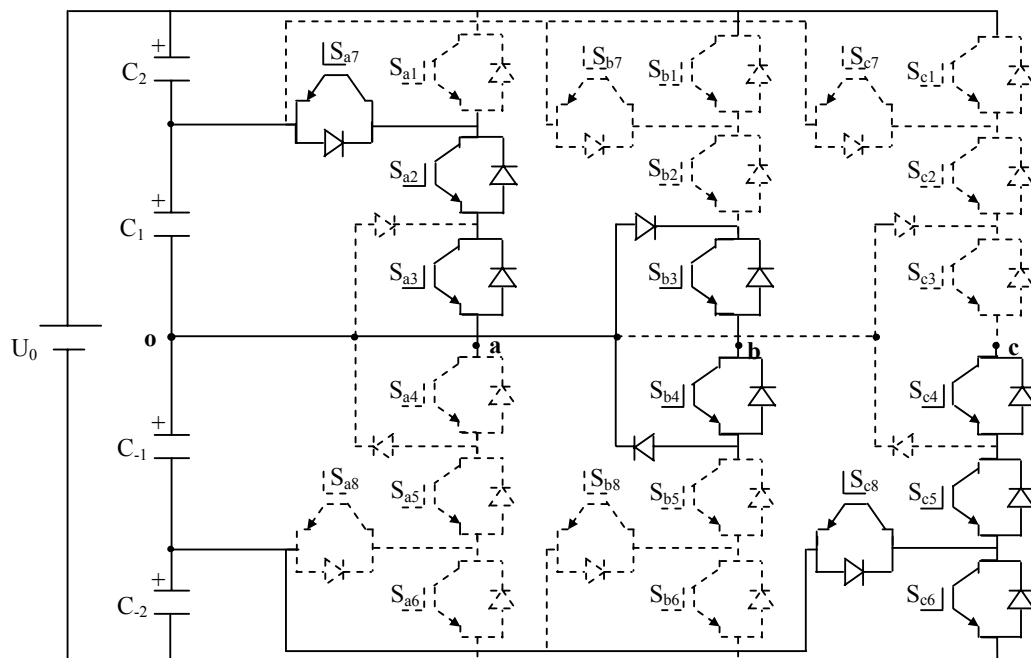


**Figure A3.3** Application du vecteur de tension 76(1,0,-2)