

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

École Nationale Polytechnique



Département Électrotechnique

Mémoire de  
Master en Électrotechnique

Alimentation de deux machines asynchrones  
pentaphasées en série par un onduleur NPC à trois  
niveaux

**Salah DJETNI**

Sous la direction de : M. L.NEZLI Pr

M. O.ZOUAID Dr

Présenté et soutenue le 18/06/2017

Composition du Jury :

Présidente	Mme. H.SAHRAOUI	Docteur ENP
Rapporteur/ Promoteur	Mr. L.NEZLI	Professeur ENP
Examineur	Mr T.ZEBBADJI	Docteur ENP

ENP 2017



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

École Nationale Polytechnique



Département Électrotechnique

Mémoire de  
Master en Électrotechnique

Alimentation de deux machines asynchrones  
pentaphasées en série par un onduleur NPC à trois  
niveaux

**Salah DJETNI**

Sous la direction de : M. L.NEZLI Pr

M. O.ZOUAID Dr

Présenté et soutenue le 18/06/2017

Composition du Jury :

Présidente	Mme. H.SAHRAOUI	Docteur ENP
Rapporteur/ Promoteur	Mr. L.NEZLI	Professeur ENP
Examineur	Mr T.ZEBBADJI	Docteur ENP

ENP 2017

## ملخص

في هذا العمل، قمنا بدراسة المكنتين لا متزامنتين خماسيتا الطور مربوطين على التسلسل ومغذتان عن طريق موج ذو ثلاث مستويات. قمنا بوضع نموذج رياضي لمكنتين لا متزامنتين خماسيتا الطور مربوطين على التسلسل. ثم قمنا بدراسة الموج ذو ثلاث مستويات، وبعدها توجهنا لدراسة إحدى إستراتيجيات التحكم في الموج. في الأخير تأكدنا من أن قلب أطوار المكنة الثانية بشكل مناسب يسمح بالتحكم بكل مكنة على حدى.

**كلمات مفتاحية:** مكنة لا متزامنة خماسية الطور. نظام متعدد المكنات. قلب الاطوار. تعديل شعاعي

## Abstract

In this work, we studied the control of series-connected five-phase two induction motors supplied with three level inverter.

After the presentation of the multiphase machines, we developed the mathematical model of series-connected five-phase two induction motors. The application of Park's transformation has considerably reduced the model of the machine.

In the second part, we presented and modeled the three level inverter. Then we used the computed PWM strategy to control this inverter.

We have found that an appropriate transposition of phase orders applied to the second machine allows the completely independent control of the two machines.

**Keywords:** Five-phase induction motor, multi-machine system, phase transposition, three level Inverter.

## Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié l'alimentation de deux MAS pentaphasées en série alimentées par un onduleur NPC à trois niveaux.

Après la présentation des machines polyphasées, nous avons étudié un système multi-machine composé de deux MAS pentaphasées en série. L'application de la transformation de Park a permis de réduire considérablement le modèle.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté et modélisé l'onduleur NPC à trois niveaux. Ensuite nous avons utilisé la stratégie MLI pour commander ce convertisseur. Enfin, on utilise le logiciel MATLAB pour simuler l'association onduleur machines.

Nous avons constaté qu'une transposition appropriée d'ordres de phases appliquée à la deuxième machine permet la commande complètement indépendante des deux machines.

**Mots clés :** Machine asynchrone pentaphasée, systèmes multi-machines, transposition de phases, Onduleur NPC.

# **Remerciements**

*Nous remercions, avant tout, notre Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.*

*Nous remercions nos encadrateurs : Mr L.NEZLI Professeurs à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et Mr O.ZOUID, pour leurs précieuses directives, leurs fructueux conseils, leurs courtoisie si raffinée et leurs qualités humaines.*

*Nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu juger notre travail et nous honorer avec leur participation.*

*Nous souhaitons également remercier tous les enseignants ayant assurés nos cours pendant nos années d'études.*

*DÉDICACES*

*À MON PÈRE, À MON PÈRE, À MON PÈRE.*

*À MA MÈRE, À MA MÈRE, À MA MÈRE.*

*À MES FRÈRES ET MES SŒURS.*

*À MES GRANDS-PARENTS.*

*À TOUTE MA FAMILLE.*

*À MES AMIS.*

*JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL.*

# Table des matières

Table des figures	
Liste de notations et des symboles	
Introduction générale : .....	9
<b>Chapitre I : Modélisation de deux MAS pentaphasées en série</b>	
I.1 Introduction : .....	11
I.2. Types des machines multiphasées .....	11
I.2.1. Machines multiphasées de type I :.....	11
I.2.2. Machines multiphasées de type II .....	12
I.3. Avantages des Machines Multiphasées .....	13
I.4. Inconvénients des machines multiphasées.....	14
I.5 Modélisation de deux MAS pentaphasées en série .....	14
I.5.1 Hypothèse de simplification .....	14
I.5.2 Modèle de la MAS pentaphasée dans la base naturelle.....	15
I.5.3 Présentation et modélisation du système : .....	15
I.5.4 Transformation de Park.....	16
I.5.5 Modèle d'état du système.....	19
I.6 Conclusion : .....	20
<b>Chapitre II : Alimentation de deux MAS pentaphasées en série par un onduleur à trois niveaux de structure NPC</b>	
II.1 Introduction : .....	22
II.2 Modélisation de l'alimentation.....	22
II.2.1 Modélisation du redresseur .....	23
II.2.2 Modélisation du Filtre intermédiaire .....	25
II.2.3 Modélisation du Pont de Clamping .....	25
II.3.4 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux.....	26
II.3.4.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux .....	26
II.3.4.1 Configurations d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.....	27
II.3.4.2 Commandabilité de l'onduleur .....	28
II.3.1.4 Stratégie de commande de l'onduleur pentaphasé à trois niveaux : .....	30
II.4 Alimentation des deux MAS pentaphasées en série par l'onduleur : .....	32
II.5 Conclusion : .....	34
Conclusion générale : .....	35
Bibliographie .....	36
Annexe.....	37

# Table des figures

<b>Figure I. 1</b> : Représentation de la machine dans la base naturelle .....	<b>15</b>
<b>Figure I. 2</b> : Connexion de deux machines pentaphasées en série .....	<b>16</b>
<b>Figure II. 1</b> : Schéma de principe de l'Association Onduleur –MAS pentaphasée .....	<b>22</b>
<b>Figure II. 2</b> : Représentation du redresseur triphasé à double alternance .....	<b>23</b>
<b>Figure II. 3</b> : L'allure de la tension de sortie de redresseur .....	<b>24</b>
<b>Figure II. 4</b> : Structure du filtre intermédiaire .....	<b>25</b>
<b>Figure II. 5</b> : Structure du Pont de Clamping.....	<b>25</b>
<b>Figure II. 6</b> : Structure générale d'un onduleur pentaphasée à trois niveaux de type NPC....	<b>27</b>
<b>Figure II. 7</b> : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire transistor-diode .....	<b>27</b>
<b>Figure II. 8</b> : Les différentes configurations d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux .....	<b>28</b>
<b>Figure II. 9</b> : Ondes de tensions des porteuses et modulante avec $r = 0.8$ et $m = 31$ .....	<b>30</b>
<b>Figure II. 10</b> : Tension de sortie de l'onduleur NPC à trois niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à deux porteuse bipolaire ( $r=0.8$ , $m=31$ ) .....	<b>31</b>
<b>Figure II. 11</b> : la vitesse de rotation (a) 1ère Machine (b) 2ème Machine .....	<b>32</b>
<b>Figure II. 12</b> : le couple électromagnétique (a) 1ère Machine (b) 2ème Machine.....	<b>32</b>
<b>Figure II. 13</b> : le courant statorique (a) 1ère Machine (b) 2ème Machine .....	<b>33</b>
<b>Figure II. 14</b> : le courant rotorique (a) 1ère Machine (b) 2èmeMachine .....	<b>33</b>

## Liste de notations et symboles

$s, r$	: Indice relatif au stator et rotor respectivement.
$a, b, c, d, e$	: Indices des phases statoriques et rotoriques dans la base naturelle.
$d, q$	: Indices des axes du repère de Park.
$V_{as} V_{bs} V_{cs} V_{ds} V_{es}$	: Tensions des phases statoriques.
$V_{ar} V_{br} V_{cr} V_{dr} V_{er}$	: Tensions des phases rotoriques.
$I_{as} I_{bs} I_{cs} I_{ds} I_{es}$	: Courants des phases statoriques.
$I_{ar} I_{br} I_{cr} I_{dr} I_{er}$	: Courants des phases rotoriques.
$\Phi_{as} \Phi_{bs} \Phi_{cs} \Phi_{ds} \Phi_{es}$	: Flux des phases statoriques.
$\Phi_{ar} \Phi_{br} \Phi_{cr} \Phi_{dr} \Phi_{er}$	: Flux des phases rotoriques
$R_s, L_s$	: Résistance et inductance propres d'une phase statorique
$R_r, L_r$	: Résistance et inductance propres d'une phase rotorique
$[L_{ss}]$	: Matrice inductance statorique.
$[L_{rr}]$	: Matrice inductance rotorique
$[M_{sr}]$	: Matrice mutuelle stator/rotor
$[R_s]$	: Matrice Résistance statorique
$[R_r]$	: Matrice Résistance rotorique
$L_{ls}$	: Inductance de fuite d'une phase statorique.
$L_{lr}$	: Inductance de fuite d'une phase rotorique
$[P]$	: Matrice de Park
$[T]$	: Matrice de Concordia
$[R]$	: Matrice de rotation
$p$	: Nombre de paires de pôles de la machine
$J$	: Moment d'inertie de la machine
$f$	: Coefficient de frottement
$C_{em}$	: Couple électromagnétique
$C_r$	: Couple résistant
$\Omega_r$	: Vitesse de rotation mécanique
$\theta_r$	: Position du rotor par rapport au stator
$\omega_s$	: Pulsation électrique statorique
$\omega_r$	: Pulsation électrique rotorique
$g$	: Glissement de la machine

$f_s$	: Fréquence statorique
$f_r$	: Fréquence rotorique
$T_s$	: Constante de temps statorique
$T_r$	: Constante de temps rotorique
$\sigma$	: Coefficient de fuites totales
$r$	: Indice de modulation
$m$	: Taux de modulation

### **Introduction générale :**

Au début des années 90, l'évolution des propriétés des semi-conducteurs de puissance a stimulé la croissance du marché des convertisseurs dédiés aux applications moyenne et forte puissance allant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts dans la gamme du kilovolt. Cette évolution a influencé principalement le domaine de l'industrie, mais a également eu un impact significatif sur les systèmes de génération d'énergie électrique.

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans les domaines d'application les plus variés, dont le plus connu sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif [1].

Les applications industrielles d'entraînement électrique nécessitent souvent un nombre de variateurs de vitesse. Les exemples incluent la robotique, la traction, les véhicules électriques, etc. La commande de ces multi-moteurs nécessite un contrôle indépendant de chaque moteur, la solution standard dans telles situations est de commander chaque machine par son propre onduleur et tous les onduleurs sont connectés à la même source DC, si un système multi-moteur comprend  $k$  machines triphasées, nécessite  $3k$  bras d'onduleur. De nombreuses solutions ont donc été proposées pour réduire le nombre total de bras d'onduleur requis dans un système multi-machines, l'une de ces solutions est de connecter plusieurs machines en série [3].

Ce projet est consacré à l'alimentation de deux machines asynchrones pentaphasées montées en série par un onduleur NPC à trois niveaux.

Dans le premier chapitre, on va établir un modèle mathématique du système multimachines (deux MAS pentaphasées en série).

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude de l'onduleur NPC à trois niveaux, en commençant par sa topologie et sa structure, puis la stratégie MLI triangulo-sinusoidale à deux porteuses sera utilisée pour la commande de l'onduleur, enfin, on va simuler sous MATLAB l'association de l'onduleur avec les deux MAS pentaphasées en série.

Chapitre I  
Modélisation de deux MAS  
pentaphasées en série

## **I.1 Introduction :**

Les machines asynchrones polyphasées sont utilisées généralement pour des applications industrielles de forte puissance et à vitesse variable (textile, marine, traction électrique, industrie pétrochimique,...etc.).

Pour alimenter les machines polyphasées, l'utilisation d'un convertisseur d'électronique de puissance est nécessaire, non seulement pour assurer une alimentation polyphasée, mais aussi pour pouvoir commander la machine en variant ses différents grandeurs d'entrées (tension, courant, fréquence).

Dans ce chapitre, nous allons définir un modèle mathématique de deux machines asynchrones pentaphasées en série en utilisant la modélisation matricielle.

## **I.2. Types des machines multiphasées :**

On peut classer ces moteurs à grand nombre de phase en deux types nommés typeI et typeII[1]:

### **I.2.1. Machines multiphasées de type I :**

Dans ce type de machines qui sont appelées aussi machines multi-étoile, le nombre de phases statoriques  $q$  est un multiple de trois, de sorte que l'on puisse les grouper en  $n$  étoiles triphasées :

$$q = 3n \text{ avec } (n = 1, 2, 3, 4, \dots).$$

Pour un nombre donné de phases, il est possible d'avoir plusieurs configurations suivant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes.

En effet, une machine double étoile dont le nombre de phases statoriques  $q = 6$  et les étoiles sont décalées de  $\beta = \frac{\pi}{6}$  a des caractéristiques différentes de celles d'une machine dont les étoiles sont décalées de  $\beta = \frac{\pi}{3}$ .

Pour différencier les configurations possibles, on peut introduire un nombre équivalent de phases, noté  $q_\beta$ , défini comme suit :  $q_\beta = \frac{q}{\beta}$ .

Le tableau [I.1] donne le détail de quelques exemples des machines multi-étoile.

Tableau I.1 : Machines multiphasées de Type I.

Nombre de phases ( $q$ )	Nombre équivalent de phase ( $q_{\beta}$ )	Décalage angulaire ( $\beta$ ) degré	Représentation des axes des bobinages
3	3	$\frac{\pi}{3}$	
6	3	$\frac{\pi}{3}$	
6	6	$\frac{\pi}{6}$	
9	9	$\frac{\pi}{9}$	
12	6	$\frac{\pi}{6}$	

### I.2.2. Machines multiphasées de type II

Dans ce type de machines, le nombre de phases statoriques  $q$  est un nombre impair. si  $\alpha$  représente le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes, les  $q$  phases sont alors régulièrement décalée de  $\frac{2\pi}{q} = 2\beta$  ; ce qui vérifie toujours la relation :

$$q_{\beta} = q = \frac{\pi}{\beta}.$$

Le tableau [I.2] donne le détail de quelques exemples de machines multiphasées de type 2.

Tableau I.2 : Machines multiphasées de Type II.

Nombre de phases ( $q$ )	Nombre équivalent de phase ( $q_\beta$ )	Décalage angulaire ( $\beta$ ) degré	Représentation des axes des bobinages
5	5	$\frac{\pi}{5}$	
7	7	$\frac{\pi}{7}$	
9	9	$\frac{\pi}{9}$	
11	11	$\frac{\pi}{11}$	
13	13	$\frac{\pi}{13}$	

### I.3. Avantages des Machines Multiphasées :

Les machines multiphasées ont plusieurs avantages tels que [2]:

- La minimisation des ondulations du couple électromagnétiques lorsque la machine est alimentée par des convertisseurs statiques (onduleur), et la diminution des pertes fer dans le rotor,

- Un moteur à grand nombre de phase a l'avantage de permettre un fonctionnement en mode dégradé. En effet, dans le cas d'une coupure d'un bras du convertisseur, les machines triphasées deviennent incontrôlables et de fortes ondulations du couple seront engendrées nécessitant l'aide d'une source externe pour démarrer. Ce qui n'est pas le cas avec les machines polyphasées,
- Segmenter la puissance afin de réaliser des ensembles convertisseurs-machines de forte puissance avec des composants de calibre réduit,
- Les enroulements statoriques polyphasés permettent de produire un champ avec des harmoniques d'amplitudes réduites, ce qui augmente le rendement de la machine.
- La fiabilité.

#### **I.4. Inconvénients des machines multiphasées :**

- L'inconvénient majeur de ce type de machine polyphasée avec leur convertisseur est leur coût élevé. En effet, le nombre d'éléments semi-conducteurs dont est constitué le convertisseur statique augmente avec l'augmentation du nombre de phases statoriques de la machine, ce qui augmente le coût de l'ensemble convertisseur-machine[2].
- Il est nécessaire de développer des techniques de commande rapprochée pour les convertisseurs statiques spécifiés et adapté pour les machines multiphasées de type 2, puisque les méthodes élaborées pour les systèmes triphasés ne peuvent pas directement être appliquées aux systèmes à nombre de phases impaires tel que (5 phases, 7 phases,...etc.)[2]

#### **I.5 Modélisation de deux MAS pentaphasées en série :**

##### **I.5.1 Hypothèse de simplification :**

Le fonctionnement de la machine asynchrone présente des phénomènes très complexes, comme les courants de Foucault, la saturation, ..... etc. Ces phénomènes compliquent le modèle de la machine.

Certaines hypothèses classiques sont admises pour la modélisation des machines électriques. Elles permettent d'avoir un modèle simplifié [3] :

- la distribution spatiale de la force magnétomotrice ( $F_{mm}$ ) est sinusoïdale.
- les circuits magnétiques sont linéaires (non saturés).
- les pertes par hystérésis et par courant de Foucault sont supposées nulles.
- les harmoniques spatiales de la distribution du flux sont négligées.

- la machine est parfaitement symétrique et l'épaisseur de l'entrefer est constante

Avec ces hypothèses, on peut considérer que :

- Il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles.
- Les inductances propres sont constantes.
- Les flux sont additifs.

### I.5.2 Modèle de la MAS pentaphasée dans la base naturelle :

La machine asynchrone pentaphasée est représentée par cinq enroulements décalés de  $72^\circ$  dans l'espace, et parcourus par cinq courants alternatifs formant un système pentaphasé équilibré en stator. Le rotor peut être modélisé comme le stator, par cinq enroulements court-circuités, décalés de  $72^\circ$ , la figure suivante dans une représentation de la MAS dans la base naturelle (FigI.1).

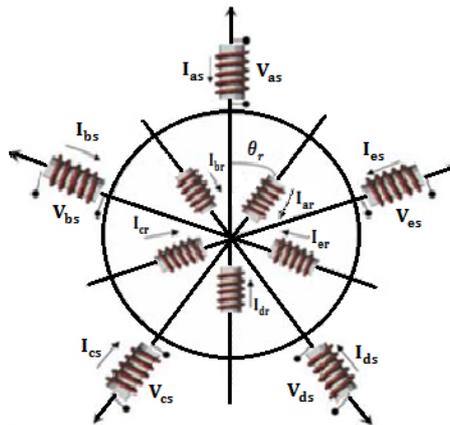


Figure I. 1 : Représentation de la machine dans la base naturelle

### I.5.3 Présentation et modélisation du système :

L'utilisation d'une structure composée de multi-machines alimentés par un seul convertisseur, permet d'une part, de réduire le nombre de composants de puissance et de contrôle, et d'autre part, d'établir une commande indépendante pour chaque machine. Dans cette étude le système global est constitué de deux machines asynchrones pentaphasées connectées en série.

La transposition de phase sur la figure (FigI.2) est régie par l'exigence selon laquelle les courants de génération de flux / couple de la 1<sup>ère</sup> machine apparaissent comme des courants qui ne contribuent pas à la production de flux et de couple dans la 2<sup>ème</sup> machine [4][5], et vice-versa. Les sorties de convertisseur matriciel sont identifiées par les lettres majuscules A, B, C, D et E, tandis que les minuscules a, b, c, d et e identifier les phases des deux machines.

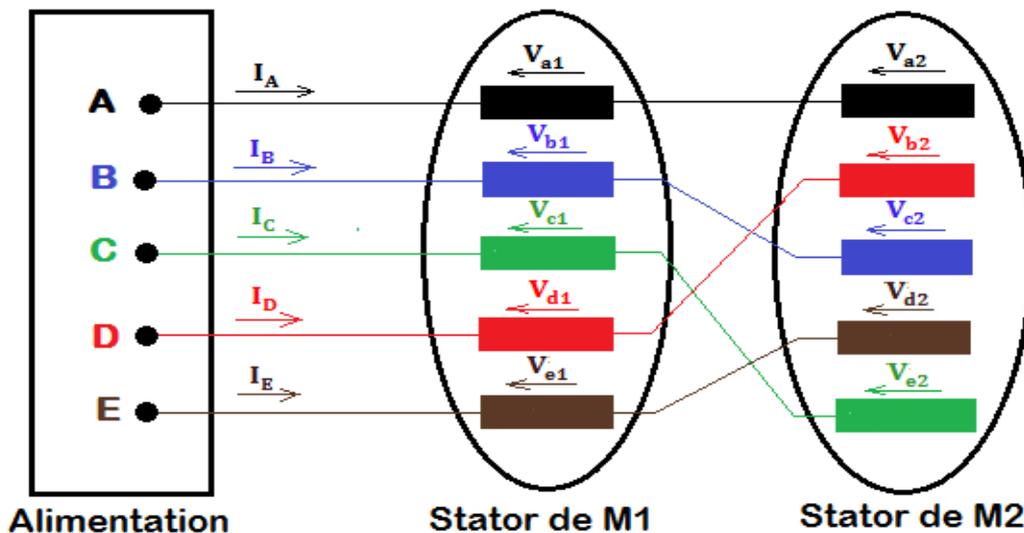


Figure I. 2 : Connexion de deux machines pentaphasées en série

Selon le schéma de raccordement de la figure (FigI.2), où les tensions de phase des deux machines sont définies, les tensions de convertisseur et la relation entre les courants de sortie de convertisseur et les courants des phases de deux machines sont donnés avec :

$$\begin{cases} V_A = V_{a1} + V_{a2} \\ V_B = V_{b1} + V_{c2} \\ V_C = V_{c1} + V_{e2} \\ V_D = V_{d1} + V_{b2} \\ V_E = V_{e1} + V_{d2} \end{cases} \quad \begin{cases} I_A = I_{a1} = I_{a2} \\ I_B = I_{b1} = I_{c2} \\ I_C = I_{c1} = I_{e2} \\ I_D = I_{d1} = I_{b2} \\ I_E = I_{e1} = I_{d2} \end{cases} \quad (I.1)$$

### I.5.4 Transformation de Park :

Mathématiquement, le passage du repère polyphasé fixe à un repère biphasé fixe se fait par projection de la résultante de la variable désirée (flux, courant,..... etc.) sur un système de deux axes (transformée de Clark). Ensuite, le passage d'un repère biphasé à un autre se fait par une rotation  $R(\varphi)$ , où  $\varphi$  est l'angle entre les deux repères.

L'ensemble de changements de variable qui transforme le système polyphasé fixe en un biphasé tournant est appelée transformation de Park. Cette transformation peut être interprétée comme la substitution, aux enroulements polyphasés immobiles par rapport au stator, de deux enroulements d et q, dont les axes magnétiques sont solidaires du repère biphasé tournant.

On applique la transformation de découplage [C] sur les équations (I.1) :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_x \\ V_y \\ V_0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} V_{a1} + V_{a2} \\ V_{b1} + V_{c2} \\ V_{c1} + V_{e2} \\ V_{d1} + V_{b2} \\ V_{e1} + V_{d2} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ I_x \\ I_y \\ I_0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_D \\ I_E \end{bmatrix} \quad (I.2)$$

Avec :

$$[C] = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\frac{2\pi}{5}) & \cos(\frac{4\pi}{5}) & \cos(\frac{4\pi}{5}) & \cos(\frac{2\pi}{5}) \\ 0 & \sin(\frac{2\pi}{5}) & \sin(\frac{4\pi}{5}) & \sin(\frac{4\pi}{5}) & \sin(\frac{2\pi}{5}) \\ 1 & \cos(\frac{4\pi}{5}) & \cos(\frac{8\pi}{5}) & \cos(\frac{2\pi}{5}) & \cos(\frac{6\pi}{5}) \\ 0 & \sin(\frac{4\pi}{5}) & \sin(\frac{8\pi}{5}) & \sin(\frac{2\pi}{5}) & \sin(\frac{6\pi}{5}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

On trouve :

$$\begin{cases} V_{\alpha} = V_{\alpha 1} + V_{x 2} \\ V_{\beta} = V_{\beta 1} - V_{y 2} \\ V_x = V_{x 1} + V_{\alpha 2} \\ V_y = V_{y 1} + V_{\beta 2} \\ V_o = V_{o 1} + V_{o 2} \end{cases} \quad \begin{cases} I_{\alpha} = I_{\alpha 1} = I_{x 2} \\ I_{\beta} = I_{\beta 1} = -I_{y 2} \\ I_x = I_{x 1} = I_{\alpha 2} \\ I_y = I_{y 1} = I_{\beta 2} \\ I_o = I_{o 1} = I_{o 2} \end{cases} \quad (I.3)$$

Afin d'exprimer toutes les grandeurs dans un même repère, les grandeurs statoriques sont projetées dans un repère tournant (d,q) décalé de  $\theta$  par rapport au repère fixe ( $\alpha, \beta$ ), cette transformation se calcule à partir de la matrice de rotation R. La transformation est appliquée avec l'angle  $\theta_1$  pour les équations d-q statoriques pour la machine1, et avec l'angle  $\theta_2$  pour les équations x-y statoriques pour la machine2, R est défini comme suit :

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La partie électromagnétique du système d'entraînement peut alors être représentée avec des équations de premier ordre.

Les équations de l'alimentation sont comme suit :

$$\begin{cases} V_d = (R_{s1} + R_{s2})I_d + (L_{s1} + Ll_{s2})\frac{dI_d}{dt} + L_{m1}\frac{dI_{dr1}}{dt} - \omega_1[(L_{s1} + Ll_{s2})I_q + L_{m1}I_{qr1}] \\ V_q = (R_{s1} + R_{s2})I_q + (L_{s1} + Ll_{s2})\frac{dI_q}{dt} + L_{m1}\frac{dI_{qr1}}{dt} + \omega_1[(L_{s1} + Ll_{s2})I_d + L_{m1}I_{dr1}] \\ V_x = (R_{s2} + R_{s1})I_x + (L_{s2} + Ll_{s1})\frac{dI_x}{dt} + L_{m1}\frac{dI_{dr2}}{dt} - \omega_2[(L_{s2} + Ll_{s1})I_q + L_{m1}I_{qr2}] \\ V_y = (R_{s2} + R_{s1})I_y + (L_{s2} + Ll_{s1})\frac{dI_y}{dt} + L_{m1}\frac{dI_{qr2}}{dt} + \omega_2[(L_{s2} + Ll_{s1})I_d + L_{m1}I_{dr2}] \end{cases} \quad (I.4)$$

Et les équations des deux rotors (M1 et M2) sont comme suit :

$$\begin{cases} V_{dr1} = 0 = R_{r1}I_{dr1} + \frac{d\Phi_{dr1}}{dt} - \omega_{g1}\Phi_{qr1} \\ V_{qr1} = 0 = R_{r1}I_{qr1} + \frac{d\Phi_{qr1}}{dt} + \omega_{g1}\Phi_{dr1} \\ V_{dr2} = 0 = R_{r2}I_{dr2} + \frac{d\Phi_{dr2}}{dt} - \omega_{g2}\Phi_{qr2} \\ V_{qr2} = 0 = R_{r2}I_{qr2} + \frac{d\Phi_{qr2}}{dt} + \omega_{g2}\Phi_{dr2} \end{cases} \quad (I.5)$$

$\omega_1, \omega_2$  : Vitesse de rotation du repère de Park dans la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> machine respectivement.

$\omega_{r1}, \omega_{r1}$  : Vitesse de rotation rotorique de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> machine respectivement.

$$\begin{cases} \omega_{g1} = \omega_1 - \omega_{r1} \\ \omega_{g2} = \omega_2 - \omega_{r2} \end{cases} \quad (I.6)$$

On a aussi :

$$\begin{cases} \Phi_{dr1} = L_{r1}I_{dr1} + L_{m1}I_d \\ \Phi_{qr1} = L_{r1}I_{qr1} + L_{m1}I_q \\ \Phi_{dr2} = L_{r2}I_{dr2} + L_{m2}I_d \\ \Phi_{qr2} = L_{r2}I_{qr2} + L_{m2}I_q \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{dr1} = \frac{\Phi_{dr1} - L_{m1}I_d}{L_{r1}} \\ I_{qr1} = \frac{\Phi_{qr1} - L_{m1}I_q}{L_{r1}} \\ I_{dr2} = \frac{\Phi_{dr2} - L_{m2}I_d}{L_{r2}} \\ I_{qr2} = \frac{\Phi_{qr2} - L_{m2}I_q}{L_{r2}} \end{cases} \quad (I.7)$$

On remplace l'équation (I.7) dans (I.4) et (I.5) :

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_1} \left[ -R_1I_d + \omega_1L_1I_q + \frac{L_{m1}}{T_{r1}L_{r1}}\Phi_{dr1} + \omega_{r1}\frac{L_{m1}}{L_{r1}}\Phi_{qr1} + V_d \right] \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_1} \left[ -\omega_1L_1I_d - R_1I_q - \omega_{r1}\frac{L_{m1}}{L_{r1}}\Phi_{dr1} + \frac{L_{m1}}{T_{r1}L_{r1}}\Phi_{qr1} + V_q \right] \\ \frac{d\Phi_{dr1}}{dt} = \frac{L_{m1}}{T_{r1}}I_d - \frac{1}{T_{r1}}\Phi_{dr1} + \omega_{g1}\Phi_{qr1} \\ \frac{d\Phi_{qr1}}{dt} = \frac{L_{m1}}{T_{r1}}I_q - \omega_{g1}\Phi_{dr1} - \frac{1}{T_{r1}}\Phi_{qr1} \end{cases} \quad (I.8)$$

$$\begin{cases} \frac{dI_x}{dt} = \frac{1}{L_2} \left[ -R_2I_x + \omega_2L_2I_y + \frac{L_{m2}}{T_{r2}L_{r2}}\Phi_{dr2} + \omega_{r2}\frac{L_{m2}}{L_{r2}}\Phi_{qr2} + V_x \right] \\ \frac{dI_y}{dt} = \frac{1}{L_2} \left[ -\omega_2L_2I_x - R_2I_y - \omega_{r2}\frac{L_{m2}}{L_{r2}}\Phi_{dr2} + \frac{L_{m2}}{T_{r2}L_{r2}}\Phi_{qr2} + V_y \right] \\ \frac{d\Phi_{dr2}}{dt} = \frac{L_{m2}}{T_{r2}}I_x - \frac{1}{T_{r2}}\Phi_{dr2} + \omega_{g2}\Phi_{qr2} \\ \frac{d\Phi_{qr2}}{dt} = \frac{L_{m2}}{T_{r2}}I_y - \omega_{g2}\Phi_{dr2} - \frac{1}{T_{r2}}\Phi_{qr2} \end{cases} \quad (I.9)$$

Avec :

$$\begin{cases} R_1 = \left( R_{s1} + R_{s2} + \frac{L_{m1}^2}{T_{r1}L_{r1}} \right) \\ L_1 = (\sigma_1L_{s1} + Ll_{s2}) \\ \sigma_1 = 1 - \frac{L_{m1}^2}{L_{s1}L_{r1}} \\ T_{r1} = \frac{L_{r1}}{R_{r1}} \end{cases} \quad \begin{cases} R_2 = \left( R_{s2} + R_{s1} + \frac{L_{m2}^2}{T_{r2}L_{r2}} \right) \\ L_2 = (\sigma_2L_{s2} + Ll_{s1}) \\ \sigma_2 = 1 - \frac{L_{m2}^2}{L_{s2}L_{r2}} \\ T_{r2} = \frac{L_{r2}}{R_{r2}} \end{cases}$$

### I.5.5 Modèle d'état du système :

D'après les équations (I.8) et (I.9) Le modèle d'état des deux machines dans un référentiel lié au champ tournant est donné avec les dynamiques des courants statoriques et des flux rotoriques

comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$

Modèle d'état de la 1<sup>ère</sup> machine :

$$\dot{X}_1 = A_1 X_1 + B_1 U_1 \quad [\dot{X}_1] = \begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \\ \dot{\Phi}_{dr1} \\ \dot{\Phi}_{qr1} \end{bmatrix} \quad [U_1] = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \\ \dot{\Phi}_{dr1} \\ \dot{\Phi}_{qr1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & \omega_1 & \frac{L_{m1}}{L_1 T_{r1} L_{r1}} & \omega_{r1} \frac{L_{m1}}{L_1 L_{r1}} \\ -\omega_1 & -\frac{R_1}{L_1} & -\omega_{r1} \frac{L_{m1}}{L_1 L_{r1}} & \frac{L_{m1}}{L_1 T_{r1} L_{r1}} \\ \frac{L_{m1}}{T_{r1}} & 0 & -\frac{1}{T_{r1}} & (\omega_1 - \omega_{r1}) \\ 0 & \frac{L_{m1}}{T_{r1}} & -(\omega_1 - \omega_{r1}) & -\frac{1}{T_{r1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \Phi_{dr1} \\ \Phi_{qr1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \\ J_1 \frac{d\Omega_{r1}}{dt} = C_{em1} - C_{r1} - K_{f1} \Omega_{r1} \\ C_{em1} = \frac{P_1 L_{m1}}{L_{r1}} (\Phi_{dr1} I_q - \Phi_{qr1} I_d) \end{cases} \quad (I.10)$$

Modèle d'état de la 2<sup>ème</sup> machine :

$$\dot{X}_2 = A_2 X_2 + B_2 U_2 \quad [\dot{X}_2] = \begin{bmatrix} \dot{I}_x \\ \dot{I}_y \\ \dot{\Phi}_{dr2} \\ \dot{\Phi}_{qr2} \end{bmatrix} \quad [U_2] = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{I}_x \\ \dot{I}_y \\ \dot{\Phi}_{dr2} \\ \dot{\Phi}_{qr2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_2}{L_2} & \omega_2 & \frac{L_{m2}}{L_2 T_{r2} L_{r2}} & \omega_{r2} \frac{L_{m2}}{L_2 L_{r2}} \\ -\omega_2 & -\frac{R_2}{L_2} & -\omega_{r2} \frac{L_{m2}}{L_2 L_{r2}} & \frac{L_{m2}}{L_2 T_{r2} L_{r2}} \\ \frac{L_{m2}}{T_{r2}} & 0 & -\frac{1}{T_{r2}} & (\omega_2 - \omega_{r2}) \\ 0 & \frac{L_{m2}}{T_{r2}} & -(\omega_2 - \omega_{r2}) & -\frac{1}{T_{r2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ \Phi_{dr2} \\ \Phi_{qr2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \\ J_2 \frac{d\Omega_{r2}}{dt} = C_{em2} - C_{r2} - K_{f2} \Omega_{r2} \\ C_{em2} = \frac{P_2 L_{m2}}{L_{r2}} (\Phi_{dr2} I_y - \Phi_{qr2} I_x) \end{cases} \quad (I.11)$$

**I.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons établi le modèle mathématique pour deux machines asynchrones pentaphasées montées en série avec une transposition des phases appropriée, cette transposition nous a permis d'avoir les composantes génératrices de couple de la première machine sur l'axe d-q, et celles de la deuxième machine sur l'axe x-y. La complexité de ce modèle a été réduite grâce à l'application de la transformation de Park, qui ramène le système pentaphasé à un système biphasé équivalente.

A partir de ce modèle, nous avons effectué une représentation sous forme de variables d'état qui nous a permis d'avoir une description de la dynamique de système (deux MAS pentaphasées en série).

## Chapitre II

Alimentation de deux MAS  
pentaphasées en série par un onduleur à  
trois niveaux de structure NPC

## **II.1 Introduction :**

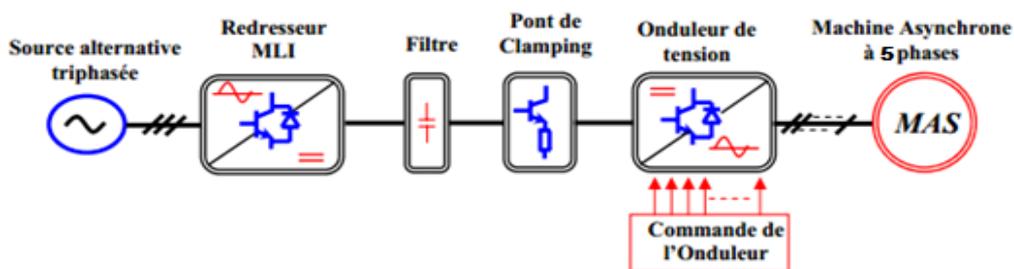
L'utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie est devenue un champ extrêmement vaste, car les équipements industriels utilisent de plus en plus d'entraînement à vitesse variable. Les onduleurs de tension sont largement utilisés pour la commande des moteurs asynchrones. Un onduleur de tension est un convertisseur statique alimenté soit par une source continue soit par un réseau redressé soit par une batterie d'accumulateur pour fournir une tension ou courant alternatifs de fréquence fixe (le cas des alimentations sans interruption) ou variable (le cas des moteurs à courant alternatifs). L'inconvénient majeur de l'onduleur est l'obtention d'une tension non sinusoïdale à sa sortie, ce qui provoque une dégradation du régime de fonctionnement de certaines charges surtout les machines électriques. Ces tensions de sortie sont très riches en harmoniques, d'où la nécessité de les réduire. Outre cela les onduleurs conventionnels (à deux niveaux) sont limités aux applications de faibles et de moyennes puissances seulement.

Dans les applications de fortes puissances, la structure à trois niveaux est plus adaptée, par rapport à la structure à deux niveaux, du fait que les tensions et les courants de sortie présentent un taux de distorsion harmoniques nettement inférieur.

Ce chapitre porte, sur l'étude détaillée de l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC (structure et principe de fonctionnement). Ensuite, nous présenterons la stratégie MLI triangulo-sinusoidale à deux porteuses qui sera utilisé pour la commande de l'onduleur. Enfin, on essayera de simuler l'alimentation de deux machines asynchrones pentaphasées en série à travers un onduleur à trois niveaux de structure NPC (Neutral Point Clamping).

## **II.2 Modélisation de l'alimentation :**

L'alimentation en tension de la machine (FigII.1) peut être modélisée par quatre étages, un redresseur triphasé connecté au réseau, un filtre qui permet de réduire les ondulations de la tension, un pont de Clamping qui permet d'améliorer les tensions d'entrée de l'onduleur, et un onduleur qui permet d'alimenter la machine [6].

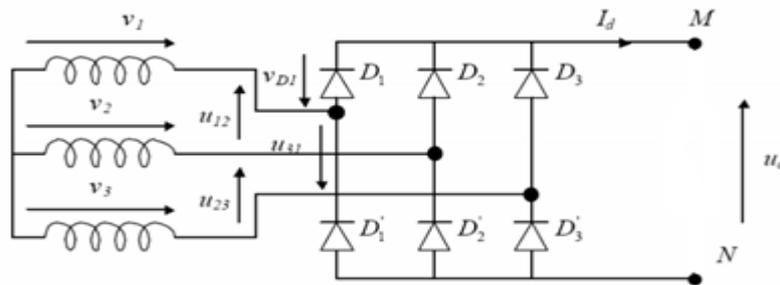


**Figure II. 1:** Schéma de principe de l'Association Onduleur –MAS pentaphasée

**II.2.1 Modélisation du redresseur :**

Le redresseur est un convertisseur statique qui permet d’obtenir des grandeurs continues à partir d’une source alternative (généralement le réseau public). Il existe plusieurs montages différents dont le choix se fait selon les performances désirées.

Dans notre présent travail, nous nous intéressons seulement au redresseur triphasé à double alternance non commandé dont les composants sont des diodes comme le montre la figure (FigII.2).



**Figure II. 2 :** Représentation du redresseur triphasé à double alternance

L’alimentation du redresseur se fait par le réseau électrique triphasé où le système de tension est équilibré. Un premier groupe monté en cathode commune (nommé commutateur plus positif M) et un deuxième groupe monté en anode commune (nommé commutateur plus négatif N).

De plus, nous supposons que la source triphasée d’alimentation est équilibrée, d’amplitude de tensions et de fréquence constantes. On néglige également les chutes de tension dues au phénomène d’empiètement anodique et aux pertes dans les diodes [7]. Le redresseur est alors alimenté par le système triphasé suivant :

$$\begin{cases} V_a = \sqrt{2}V_{\text{eff}} \sin(\omega t) \\ V_b = \sqrt{2}V_{\text{eff}} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = \sqrt{2}V_{\text{eff}} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$\omega$ : Pulsation du réseau,

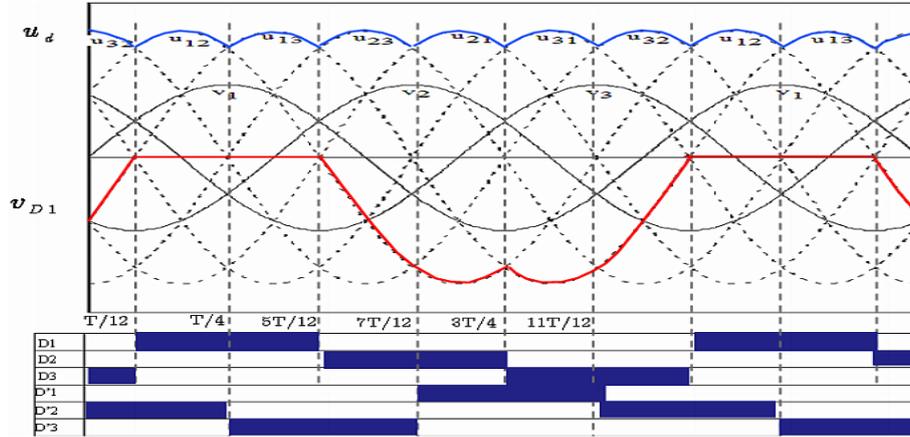
$V_{\text{eff}}$  : Tension efficace du réseau.

Pour le commutateur à cathode commune, la diode dont l’anode est au potentiel le plus élevé conduit, d’où la dénomination « + positif » ;

Pour le commutateur à anode commune, la diode dont la cathode est au potentiel négatif le plus faible conduit, d’où la dénomination « - négatif ».

On a donc

- Si  $(V_1 > V_3 > V_2)$   $D_1$  et  $D_2'$  conduisent et  $U_d = V_1 - V_2$
- Si  $(V_1 > V_2 > V_3)$   $D_1$  et  $D_3'$  conduisent et  $U_d = V_1 - V_3$
- Si  $(V_2 > V_1 > V_3)$   $D_2$  et  $D_3'$  conduisent et  $U_d = V_2 - V_3$



**Figure II. 3 : L'allure de la tension de sortie de redresseur**

Chaque diode conduit pendant un tiers de la période, tandis que la tension redressée se compose de six portions de sinusoïdes par période T.

La tension redressée  $U_d$  est périodique de période  $\frac{T}{6}$ .

Entre  $\frac{T}{12}$  et  $\frac{T}{4}$ , cette tension s'exprime par :

$$U_d = V_1 - V_2 = \sqrt{2}V_{\text{eff}}(\sin(\omega t) - \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})) \quad (\text{II.2})$$

La tension moyenne est donnée par :

$$U_{\text{dmoy}} = \frac{6}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{4}} \sqrt{2}V_{\text{eff}} \left( \sin(\omega t) - \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right) dt = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad (\text{II.3})$$

La tension efficace donnée par :

$$U_{\text{deff}} = \sqrt{\frac{6}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{4}} (\sqrt{2}V_{\text{eff}} \sin(\omega t) - \sqrt{2}V_{\text{eff}} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}))^2 dt} \quad (\text{II.4})$$

$$U_{\text{deff}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_m \sqrt{1 + \frac{\sin(\frac{2\pi}{6})}{2\pi/6}} \quad (\text{II.5})$$

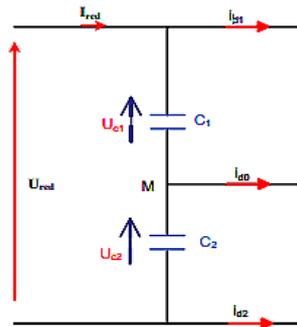
Le facteur d'ondulation du redresseur est donné par :

$$F = \frac{U_{\text{deff}}}{U_{\text{dmoy}}} = \frac{U_{\text{dmax}} - U_{\text{dmin}}}{2U_d} \quad (\text{II.6})$$

Ce facteur caractérise la qualité de la tension redressée, plus ce facteur est petit plus la tension redressée est moins ondulée.

**II.2.2 Modélisation du Filtre intermédiaire :**

Grace au ce filtre, la tension délivrée sera stable puisque le filtre va diminuer les ondulations te la tension venue du pont redresseur. La structure du filtre intermédiaire est la suivante :



**Figure II. 4:** Structure du filtre intermédiaire

Le modèle du filtre est défini par le système suivant :

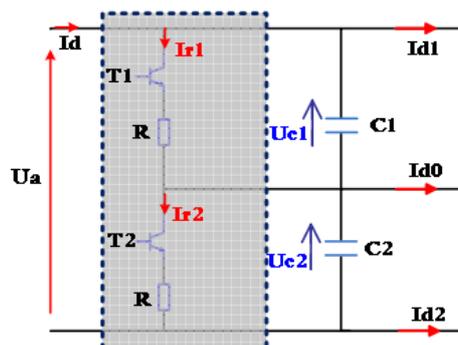
$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = I_{red} - I_{d1} \\ C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = I_{red} - i_{d1} - i_{d0} \end{cases} \quad (II.7)$$

**II.2.3 Modélisation du Pont de Clamping :**

Après que le redresseur diminue les ondulations de la tension, cette dernière sera définie comme une tension d’entrée pour l’ondeur à trois niveaux. Néanmoins, le problème qui se pose consiste en l’apparition d’un déséquilibre entre les tensions délivrées par le redresseur.

Afin de solutionner ce problème, on place un pont de Clamping ou autrement dit un pont d’équilibrage constitué d’un transistor et d’une résistance aux bornes de chaque condensateur .

La structure du pont de Clamping est donnée par la figure suivante [6]:



**Figure II. 5 :** Structure du Pont de Clamping

Le modèle du Pont de Clamping est défini par le système suivant :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} = I_d - I_{d1} - I_{r1} \\ C_2 \frac{dU_{C2}}{dt} = I_d - I_{d1} - I_{d0} - I_{r2} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$\begin{cases} I_{r1} = \frac{U_{C1}}{R} \\ I_{r2} = \frac{U_{C2}}{R} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

L'algorithme de commande du pont de Clamping est le suivant :

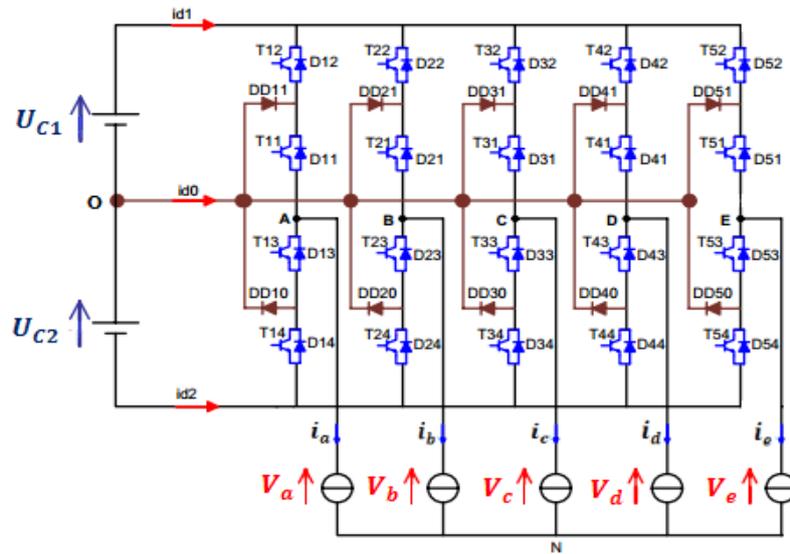
$$\begin{cases} \text{si } U_{C1} > \frac{U_d}{2} \Rightarrow & T_1 = 1 \text{ et } T_2 = 0 \\ \text{si } U_{C2} > \frac{U_d}{2} \Rightarrow & T_2 = 1 \text{ et } T_1 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

### **II.3.4 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux :**

En général, les onduleurs de tension multi-niveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets [8][9].

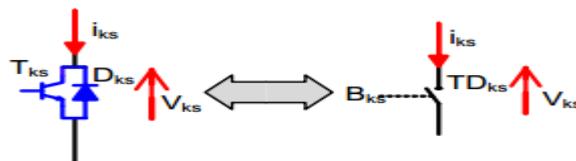
#### **II.3.4.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux :**

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte. L'onduleur pentaphasé à trois niveaux utilisé est constitué de cinq bras et de deux sources de tension continue. Chaque bras comporte quatre interrupteurs en série et deux diodes médianes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche. Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue, de force électromotrice (E). A l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage  $C_1$  et  $C_2$  de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi-tension ( $\frac{E}{2}$ ). Étant connectés entre eux en un point neutre noté O. Ces derniers sont identiques de manière à éviter le déséquilibre de charge ( $C_1 = C_2$  c'est-à-dire  $U_{C1} = U_{C2}$ ). Le point (O) est connecté avec les deux diodes médianes ( $DD_{k1}, DD_{k2}$ ) [10]. La figure (1.5) fournit une représentation schématique de cet onduleur.



**Figure II. 6 :** Structure générale d’un onduleur pentaphasée à trois niveaux de type NPC

Pour simplifier la complexité de la structure de l’onduleur à trois niveaux, on présente chaque paire (Transistor-diode) par un seul interrupteur bidirectionnel  $TD_{KS}$ (FigII.7).



**Figure II. 7 :** Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire transistor-diode

L’ouverture et la fermeture des interrupteurs dépendent des trois règles de connexion :

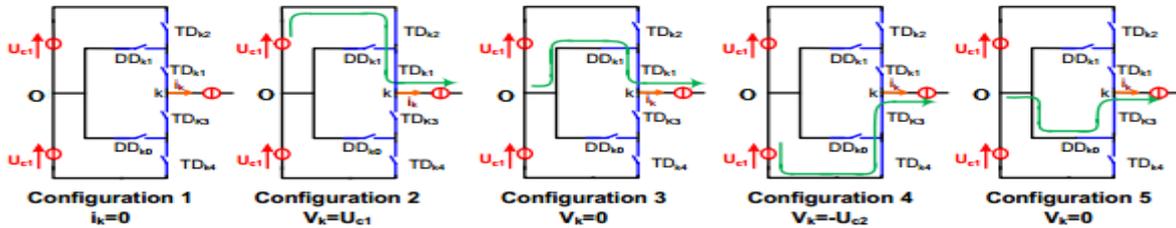
- Ne pas ouvrir sur une source de courant.
- Ne pas court-circuiter une source de tension.
- Ne pas connecter deux sources de même nature.

### II.3.4.1 Configurations d’un bras de l’onduleur à trois niveaux :

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple  $V_{kO}$  entre la borne (k) d’une phase de la machine et le point neutre O. Cette tension est entièrement définie par l’état (0ou1) des quatre interrupteurs  $TD_{KS}$  du bras.

Sur les  $2^4$  configurations possibles, seules cinq configurations sont mises en œuvre. Toutes les autres séquences ne sont pas fonctionnelles et sont donc à éviter. En effet, elles provoquent soit des court-circuit des sources de tension continue, soit elles provoquent la déconnexion de la machine.

L'onduleur à trois niveaux étant symétrique, l'étude peut se limiter au fonctionnement d'un seul bras. On présente les configurations d'un seul bras (FigII.8) et on donne ci-dessous le tableau récapitulatif (tabII.1) représente la tension de sortie  $V_{kO}$  (qu'est constituée de trois étages  $U_{C1}$ , 0 et  $-U_{C2}$ ) d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l'état des interrupteurs.



**Figure II.8 :** Les différentes configurations d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux

**Tableau II.1 :** les différentes combinaisons des interrupteurs

Tension de sortie $V_{kO}$	Etat des interrupteurs			
	$TD_{k1}$	$TD_{k2}$	$TD_{k3}$	$TD_{k4}$
$U_{C1}$	1	1	0	0
0	1	0	1	0
$-U_{C2}$	0	0	1	1

**II.3.4.2 Commandabilité de l'onduleur :**

Un convertisseur statique est dit en mode commandable si les transitions entre les différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (Commande des bases des semi-conducteurs). , Dans ce qui va suivre, on suppose que cette condition est toujours vérifiée

**II.3.4.2.1 Fonction de connexion des interrupteurs :**

Pour un bras K de l'onduleur pentaphasé à trois niveaux et en mode commandable, on définit les trois commandes complémentaires comme suit :

$$N^{\circ 1}: \begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k2}} \\ B_{k3} = \overline{B_{k4}} \end{cases} \quad N^{\circ 2}: \begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k3}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k4}} \end{cases} \quad N^{\circ 3}: \begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \quad (II.11)$$

La commande  $N^{\circ 3}$  est la seule qui permet d'exploiter les trois niveaux de tension de sortie (tab1.2).

**Tableau II.2 :** les différentes combinaisons des interrupteurs

Tension de sortie $V_{kO}$	Etat des interrupteurs			
	$B_{k1}$	$B_{k2}$	$B_{k3}$	$B_{k4}$
$U_{C1}$	1	1	0	0
0	1	0	1	0
Inconnue	0	1	0	1
$-U_{C2}$	0	0	1	1

## Chapitre II Alimentation de deux MAS pentaphasées en série par un onduleur NPC

La fonction de connexion  $F_{ks}$  traduit l'état ouvert ou fermé de l'interrupteur  $TD_{KS}$  est défini par :

$$\begin{cases} F_{ks} = 1 & \text{si } TD_{ks} \text{ est fermé} \\ F_{ks} = 0 & \text{si } TD_{ks} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad k = (1, 5) ; s = (1, 4) \quad (\text{II.12})$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs au bras « k », on trouve :

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

### II.3.4.2 Fonction de conversion :

En considérant l'association de l'onduleur avec une machine asynchrone pentaphasée tels que :

- $V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}, V_{DN}, V_{EN}$  sont les tensions des phases de la machine.
- $V_{NO}$  : tension de neutre de la machine par rapport au point fictif « 0 ».
- Le système  $V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}, V_{DN}, V_{EN}$  étant équilibré.

Les tensions aux nœuds A, B, C, D et E de l'onduleur par rapport au point milieu O s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs et des tensions d'entrée comme suit :

$$\begin{cases} V_{AO} = F_{11}F_{12}U_{C1} - F_{13}F_{14}U_{C2} \\ V_{BO} = F_{21}F_{22}U_{C1} - F_{23}F_{24}U_{C2} \\ V_{CO} = F_{31}F_{32}U_{C1} - F_{33}F_{34}U_{C2} \\ V_{DO} = F_{41}F_{42}U_{C1} - F_{43}F_{44}U_{C2} \\ V_{EO} = F_{51}F_{52}U_{C1} - F_{53}F_{54}U_{C2} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Et d'après Charles on a :

$$\begin{cases} V_{AO} = V_{AN} + V_{NM} \\ V_{BO} = V_{BN} + V_{NM} \\ V_{CO} = V_{CN} + V_{NM} \\ V_{DO} = V_{DN} + V_{NM} \\ V_{EO} = V_{EN} + V_{NM} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Alors : } V_{NM} = \frac{1}{5}(V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} + V_{DN} + V_{EN}) \quad (\text{II.16})$$

On remplace (II.16) dans le système (I.15), on trouve (II.17) :

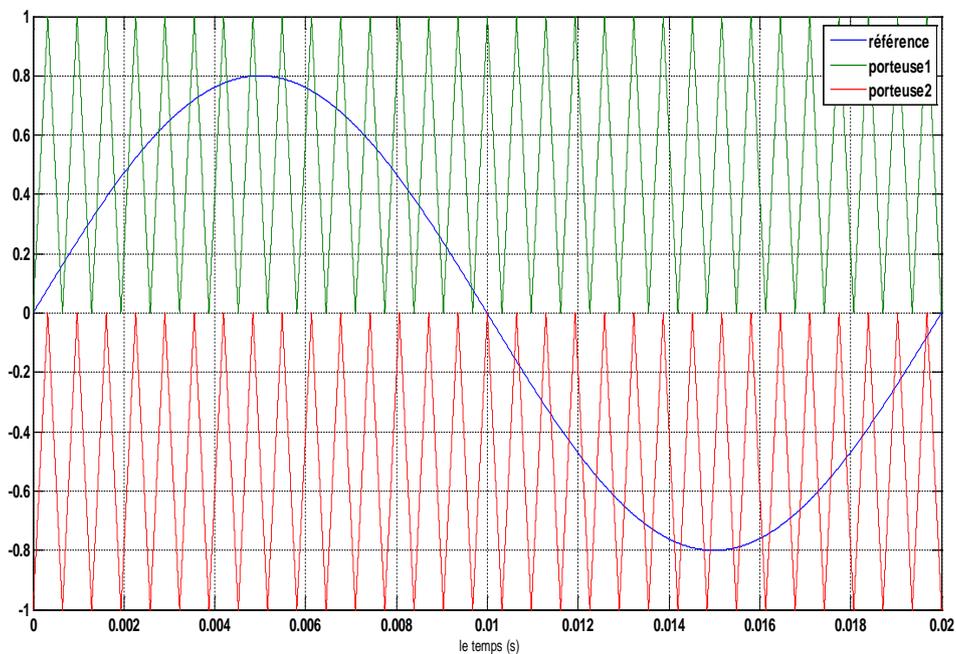
$$\begin{cases} V_{AN} = \frac{1}{5}(4V_{AO} - V_{BO} - V_{CO} - V_{DO} - V_{EO}) \\ V_{BN} = \frac{1}{5}(-V_{AO} + 4V_{BO} - V_{CO} - V_{DO} - V_{EO}) \\ V_{CN} = \frac{1}{5}(-V_{AO} - V_{BO} + 4V_{CO} - V_{DO} - V_{EO}) \\ V_{DN} = \frac{1}{5}(-V_{AO} - V_{BO} - V_{CO} + 4V_{DO} - V_{EO}) \\ V_{EN} = \frac{1}{5}(-V_{AO} - V_{BO} - V_{CO} - V_{DO} + 4V_{EO}) \end{cases} \quad \begin{cases} \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \\ V_{DN} \\ V_{EN} \end{bmatrix} = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 4 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 4 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \\ V_{DO} \\ V_{EO} \end{bmatrix} \end{cases}$$

**II.3.1.4 Stratégie de commande de l'onduleur pentaphasé à trois niveaux :**

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable.

Pour l'alimentation de notre machine, l'onduleur sera commande par une stratégie MLI triangulo-sinusoidale à deux porteuses. Le principe de cette technique consiste à comparer un signal triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure appelée porteuse, au cinq signaux sinusoïdaux d'amplitude variable et de fréquence (f) appelée référence (FigII.8).

L'intersection de la porteuse avec un signal de référence donne les instants de commutation des interrupteurs.



**Figure II. 9 :** Ondes de tensions des porteuses et modulateur avec  $r = 0.8$  et  $m = 31$

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la modulation :

**L'indice de modulation « m » :** qui représente le rapport de la fréquence de la porteuse  $f_p$  et la fréquence de la tension de référence  $f$ .

$$m = \frac{f_p}{f}$$

**Le taux de modulation « r » :** qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence  $V_m$  et celle de la porteuse  $V_p$ .

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

Pour l'onduleur à trois niveaux, on peut résumer la commande d'un bras « k » en deux étapes :

1- détermination des signaux intermédiaires :

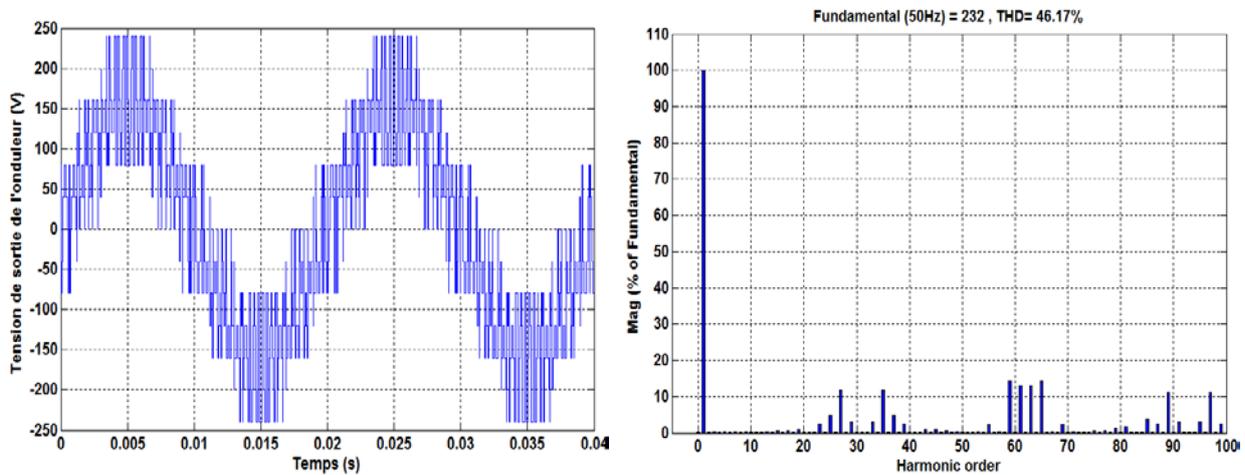
$$\begin{cases} V_{ref}^k \geq V_{p1} \Rightarrow V_{k1} = \frac{E}{2} \\ V_{ref}^k < V_{p1} \Rightarrow V_{k1} = 0 \end{cases} \quad (I.37)$$

$$\begin{cases} V_{ref}^k \geq V_{p2} \Rightarrow V_{k0} = 0 \\ V_{ref}^k < V_{p2} \Rightarrow V_{k0} = -\frac{E}{2} \end{cases} \quad (I.38)$$

2- détermination du signal  $V_{k2}$  et des ordres de commande  $B_{ks}$  des interrupteurs :

$$\begin{cases} V_{k2} = V_{k1} + V_{k0} \\ B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \iff \begin{cases} V_{k2} = \frac{E}{2} & B_{k1} = 1, B_{k2} = 1 \\ V_{k2} = -\frac{E}{2} & B_{k1} = 0, B_{k2} = 0 \\ V_{k2} = 0 & B_{k1} = 1, B_{k2} = 0 \end{cases} \quad (I.39)$$

On peut visualiser la tension de phase en sortie de l'onduleur NPC trois niveaux et la FFT de signale sur la figure (FigII.9), avec l'application de la stratégie de commande MLI triangulo-sinusoidale à deux porteuses pour plusieurs valeurs de m.



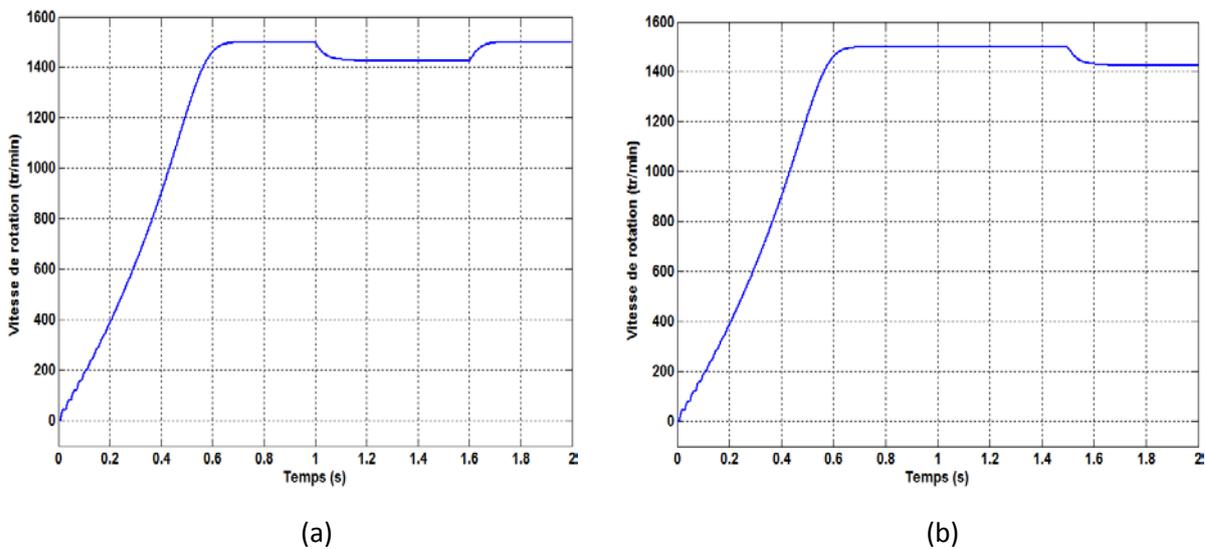
**Figure II. 10** : Tension de sortie de l'onduleur NPC à trois niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuse bipolaire ( $r=0.8$ ,  $m=31$ )

On voit bien que la tension de sortie est de trois niveaux, on remarque aussi, que les amplitudes des harmoniques sont très faibles, cependant, on notera des pics autour de l'harmonique d'ordre ( $n * 31$ ), cela est du au choix de l'indice de modulation (m).

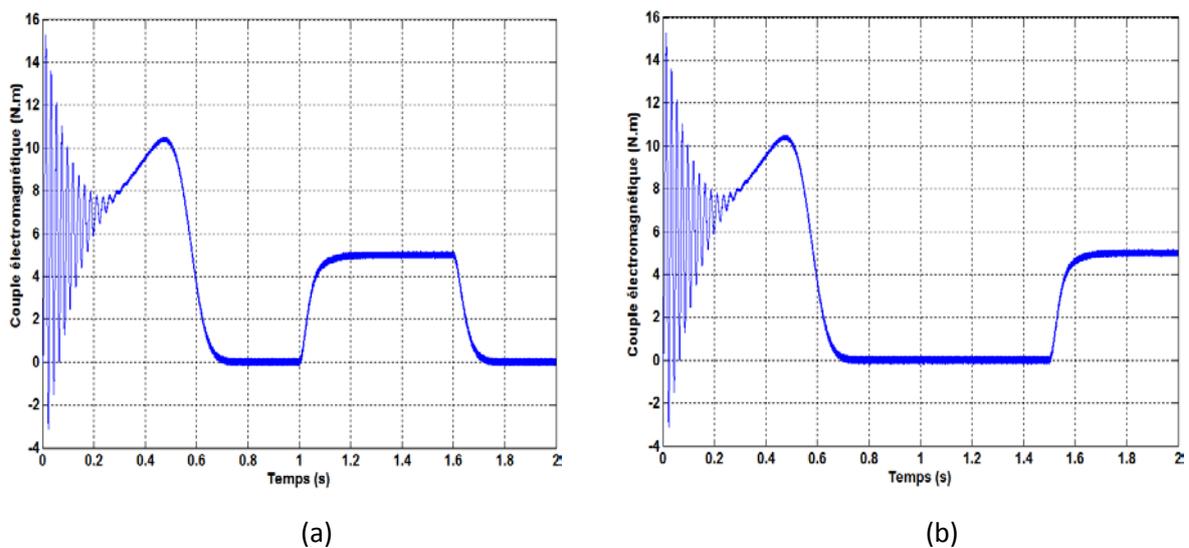
**II.4 Alimentation des deux MAS pentaphasées en série par l'onduleur :**

Pour assurer un fonctionnement à vitesse variable d'une telle machine asynchrone, il est nécessaire d'utiliser une source à fréquence et amplitude variable contrôlable. Pour cela, l'alimentation du système se fera à l'aide d'un convertisseur statique (onduleur), il faut prendre en considération la transposition des phases lors de l'injection des tensions de référence.

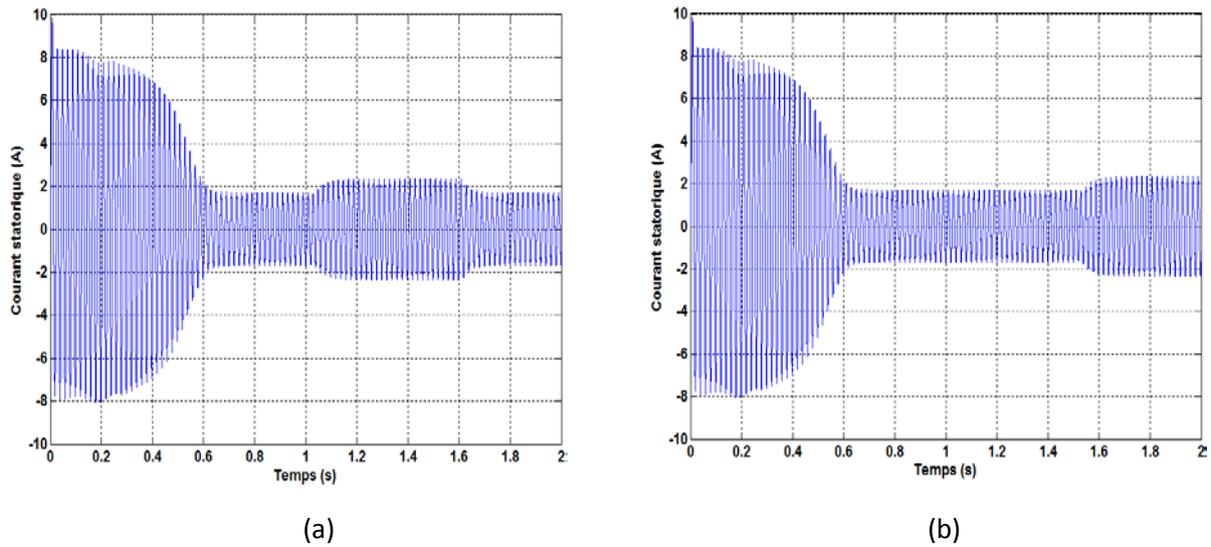
Les résultats de simulation de l'association de l'onduleur à trois niveaux de structure NPC avec le système multimachines (deux MAS pentaphasées en série) sont représentées sur les figures suivantes :



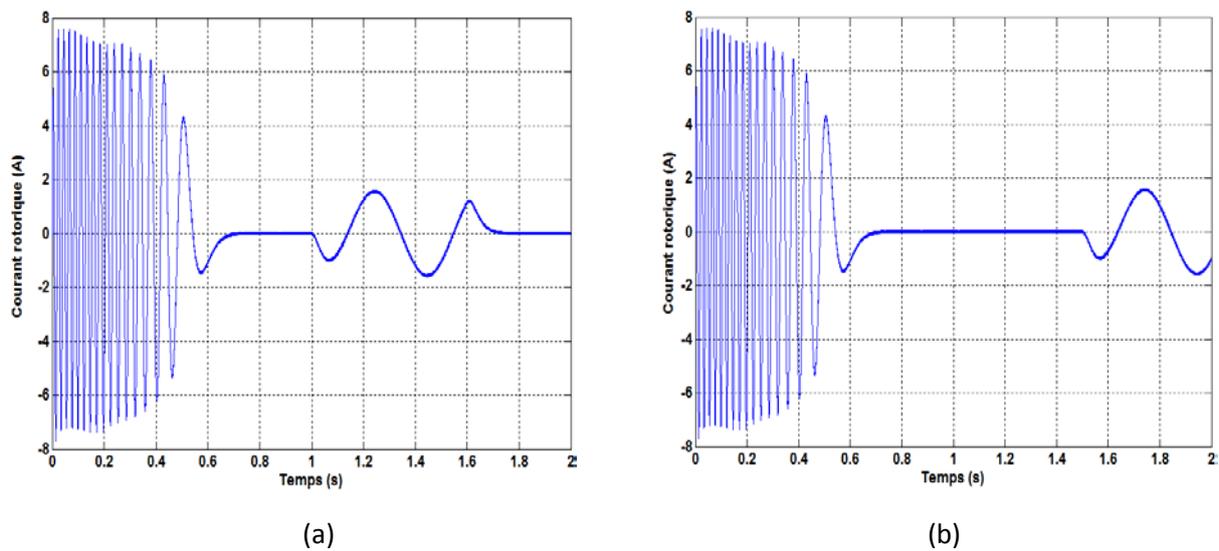
**Figure II. 11 :** la vitesse de rotation (a) 1ère Machine (b) 2ème Machine



**Figure II. 12 :** le couple électromagnétique (a) 1ère Machine (b) 2ème Machine



**Figure II. 13 :** le courant statorique (a) 1ère Machine (b) 2ème Machine



**Figure II. 14 :** le courant rotorique (a) 1ère Machine (b) 2ème Machine

**Interprétation des résultats :**

Pour la 1<sup>ère</sup> Machine

1. Au démarrage, la machine atteint sa vitesse à vide à l’instant  $t= 0.6$  s, lors de l’application de couple à l’instant  $t=1$  s la vitesse diminue, puis elle reprend sa valeur initiale lorsqu’on enlève le couple résistant.
2. On voit que le couple électromagnétique oscille au début, puis il se stabilise presque à zéro à l’instant où la machine atteint sa vitesse à vide nominale, une fois on applique un couple résistant de 5 N.m à l’instant  $t=1$  s, le couple électromagnétique augmente aussi

à 5 N.m pour le vaincre et il suit exactement ce couple. On remarque une présence de l'ondulation de couple, cela due à la commutation des interrupteurs commandés par la MLI.

3. Le courant statorique au démarrage atteint presque trois fois le courant nominale, puis il se stabilise à 1.8 A, lors de l'application de couple le courant statorique augmente à 2.5 A pour répondre à la demande du couple électromagnétique.
4. Le courant rotorique de démarrage atteint 7 A, une fois la machine atteint la vitesse à vide le courant devient nul. A l'instant  $t=1$  s le courant augmente pour répondre à la demande de couple électromagnétique, et il oscille à une fréquence faible par rapport à celle de stator.

Pour la 2<sup>ème</sup> machine on voit bien qu'elle est le même comportement que la 1<sup>ère</sup> machine, parceque les deux machines sont identiques.

### **II.5 Conclusion :**

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons étudié l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC (structure et principe de fonctionnement). Ensuite, nous avons utilisé la stratégie MLI triangulo-sinusoidale à deux porteuses pour commander l'onduleur.

Par la suite, nous avons alimenté notre machine par un onduleur de tension à MLI contrôlé par la stratégie triangulo-sinusoidale. Dans ce cas, les résultats obtenus ont prouvés que cet étage onduleur introduit des oscillations supplémentaires sur toutes les grandeurs de la machine en particulier sur le couple électromagnétique et le courant.

**Conclusion générale :**

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à l'alimentation de deux machines asynchrones pentaphasées montées en série avec un onduleur NPC à trois niveaux.

Dans le premier chapitre, on a présenté deux machines asynchrones pentaphasées montées en série, et l'avantage de monter plusieurs machines en série. Par la suite, on a élaboré le modèle de deux machines en série dans les deux repères pentaphasé puis biphasés à l'aide de la transformation de Park.

Dans le deuxième chapitre, on a étudié l'onduleur NPC à trois niveaux, sa structure, sa modélisation et sa commande, on a simulé l'association de l'onduleur-multimachines.

Les résultats obtenus après simulation sous MATLAB, nous montrent l'efficacité de l'algorithme de commande à MLI triangulo-sinusoidale à deux porteuses utilisé.

L'onduleur à trois niveaux commandé par MLI s triangulo-sinusoidale à deux porteuses nous a donné un signal plus proche de la sinusoïde, il contient moins d'harmoniques.

L'alimentation d'un système multimachines en série par un seul onduleur permet de réduire l'encombrement du système, assurer le bon fonctionnement et la possibilité de commander chaque machine séparément.

## Bibliographie

- [1] H.BRIGHEN et S.HALAIMIA, «**Étude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale**», mémoire de master Université Larbi Tebssi–Tebessa
- [2] Djafer HADIOUCHE. «**Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure**» thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Techniques Nancy,p200, FST Nancy2001
- [3] Mohamad Koteich. «**Modélisation et observabilité des machines électriques en vue de la commande sans capteur mécanique**». Automatique / Robotique. Université Paris-Saclay, 2016.
- [4]. E. Levi, M. Jones, S.N. Vukosavic and H.A.Toliat, «**Operating principles of a novel multi-phase multi-motor vector controlled drive**», IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 19, no. 3, pp. 508-517, 2004.
- [5]. E. Levi, M. Jones and S.N. Vukosavic, «**Even-phase multi-motor vector controlled drive with single inverter supply and series connection of stator windings**» IEEE Proc. - Electric Power Applications, vol. 150, no.5, pp. 580-590, 2003.
- [6]Boubakr.BOUSSIALA.«**Commande vectorielle d'une machine asynchrone polyphasée alimentée par onduleur à trois niveaux (Application sur la Machine Heptaphasée)**» mémoire de magister, École Nationale Polytechnique, p 110,ENP 2010.
- [7]: G.Seguirer, «**Convertisseurs de L'électronique de puissance, V.1: la conversion Alternative-Continue** », Techniques et Documentation de Lavoisier (paris) ,1984.
- [8] N.Celanovic, D.Boroyevich, «**A Fast Space Vector Modulation Algorithm for Multilevel Three Phase Converters** », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 37,March/April2001.
- [9] K.V. Patil, R.M. Mathur, J. Jiang, S.H. Hosseini, «**Distribution System Compensation Using a New Binary Multilevel Voltage Source Inverter** », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N°2, pp. 459-464, April 1999.
- [10] P. Purkait, R.S. Sriramakavacham, «**A New Generalized Space Vector Modulation Algorithm for Neutral Point Clamped Multilevel Converters** », Progress in Electromagnetics Research Symposium, Cambridge, pp. 330-335, March 2006.
- [11]. E.Levi, M.Jones, S.N.Vukosavic, and H.A.Toliat, «**A novel concept of a multi-phase, multi-motor vector controlled drive system supplied from a single voltage source inverter**», IEEE Trans. on Power Electronics, vol.19, 2004, pp. 320-335.
- [12].W. Ben Mabrouk, J. Belhadj, M. Pietrzak-David, «**Modelling and Control of electromechanical Multi machine System for Railway Traction**», 2nd International conference on Electrical Engineering Design and Technologies, ICEEDT, 8-10, 2008, Hammamet Tunisia.

**Annexe**

Les paramètres de la machine asynchrone pentaphasée utilisée :

**A.1 Paramètres électriques**

$V = 220 \text{ V}$	Tension nominale
$I_n = 3 \text{ A}$	Courant nominale
$R_s = 10 \ \Omega$	Résistance du stator
$R_r = 6.3 \ \Omega$	Résistance du rotor
$L_s = 0.4642 \text{ H}$	Inductance du stator
$L_r = 0.4612 \text{ H}$	Inductance du rotor
$M = 0.4212 \text{ H}$	Inductance Mutuelle
$p_n = 1.5 \text{ kW}$	Puissance nominale
$C_n = 10 \text{ N.m}$	Couple nominale

**A.2 Paramètres mécaniques**

$J = 0.03 \text{ Kg.m}^2$	Moment d'inertie
$f = 0.0001 \text{ SI}$	Coefficient de frottement

**A.3 Paramètres électromagnétiques**

$p = 2$	Nombre de paires de pôle
---------	--------------------------