

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole National Polytechnique



Département de Génie Electrique
Laboratoire de Commande des Processus
Thèse de doctorat en Electrotechnique

Présentée par : Hakim GHERAIA
Magister en électrotechnique

Thème

Etude de différentes structures de cascade à onduleur NPC à sept niveaux. Application à la conduite de la machine asynchrone triphasée

Soutenu le : 12/02/2008

Président : M.TADJINE, Prof. à l'ENP

Rapporteurs : E.M. BERKOUK, Prof. à l'ENP
M.S. BOUCHERIT, Prof. à l'ENP

Examineurs : L.NEZLI, Maitre de conférences à l'ENP
K. ALIOUANE, Maitre de conférences à l'EMP
A. TALHA, Maitre de conférences à l'USTHB
A. LARABI, Maitre de conférences à l'USTHB

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I. Modélisation de l'association onduleur NPC à sept niveaux - MAS	
I. Modélisation de la machine asynchrone triphasée	4
I.1. Hypothèses simplificatrices	5
I.2. Conventions	5
I.3. Equations d'état	7
II. Modélisation de l'onduleur à sept niveaux à structure NPC	7
II.1. Structure de l'onduleur	7
II.2. Hypothèses	8
II.3. Fonction de connexion	8
II.4. Fonction génératrice	8
II.5. Commande complémentaire	9
II.6. Modélisation aux valeurs instantanées (Modèle de connaissance)	11
II.7. Modélisation aux sens des valeurs moyennes (Modèle de commande)	11
II.8. Stratégies de commande de l'onduleur	12
II.8.1. Modulation calculée	17
III. Conclusion	
Chapitre II. Cascades à redresseurs de courant à MLI triphasés - onduleur de tension triphasé NPC à sept niveaux	
Introduction	18
I. Cascades redresseurs de courant à MLI triphasés à deux niveaux - onduleur de tension triphasé à sept niveaux	18
I.1. Redresseur de courant à MLI triphasé à deux niveaux	19
I.1.1. Modèle de commande du redresseur	19
I.1.2. Stratégie de commande à hystérésis du redresseur	
I.1.3. Détermination des paramètres de la cascade redresseur à MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - machine asynchrone	20
I.2. Cascade un redresseur MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS	21
I.2.1. Filtre capacitif	21
I.3. Cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS	24
I.3.1. Filtre capacitif	24
I.4. Cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS	27
I.4.1. Structure série	27
I.4.1.1. Filtre capacitif	31
I.4.2. Structure imbriquée	31
I.4.2.1. Filtre capacitif	

I.5. Cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS	34
I.5.1. Filtre capacitif.	34
II. Cascades redresseurs de courant à MLI triphasés à trois niveaux - onduleur de tension triphasé à sept niveaux..	38
II.1. Utilisation des onduleurs à trois niveaux en redresseurs de courant	38
II.2. Cascade un redresseur MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS	39
II.2.1. Filtre capacitif.	39
II.3. Cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS	43
II.3.1. Structure série.	43
II.3.1.1. Filtre capacitif...	43
II.3.2. Structure imbriquée.....	47
II.3.2.1. Filtre capacitif.	47
III. Cascade redresseur de courant à MLI triphasé à sept niveaux - onduleur de tension triphase à sept niveaux..	51
III.1. Utilisation des onduleurs à sept niveaux en redresseur de courant..	51
III.2. Cascade redresseur de courant triphasé à sept niveaux - onduleur de tension NPC à sept niveaux - MAS	52
III.2.1. Filtre capacitif	52
IV. Conclusion	56

Chapitre III. Asservissement des redresseurs MLI à deux et multiniveaux. Application aux cascades à onduleur de tension NPC à sept niveaux

Introduction	57
I. Asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à deux niveaux	58
I.1. Modèle de la boucle de courant et de tension	58
I.2. Cascade un redresseur MLI triphasé à deux niveaux - onduleur de tension triphase à sept niveaux - MAS	60
I.3. Cascade deux redresseurs MLI triphasés à deux niveaux - onduleur de tension triphase à sept niveaux - MAS.	65
I.4. Cascade trois redresseurs MLI triphasés à deux niveaux - onduleur de tension triphase à sept niveaux - MAS.	70
I.4.1. Structure série.	70
I.4.2. Structure imbriquée.	76
I.5. Cascade six redresseurs MLI triphasés à deux niveaux - onduleur de tension triphase à sept niveaux - MAS.	82
II. Asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à trois niveaux	88
II.1. Modèle de la boucle de courant et de tension.	88
II.2. Cascade un redresseur MLI triphasé à trois niveaux - onduleur de tension triphase à sept niveaux - MAS	90
II.3. Cascade trois redresseurs MLI triphasés à trois niveaux - onduleur de tension triphase à sept niveaux - MAS	95
II.3.1. Structure série	95
II.3.2. Structure imbriquée	101
III. Asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à sept niveaux	109
III.1. Modèle de la boucle de courant et de tension.	109
III.2. Cascade un redresseur MLI triphasé à sept niveaux - onduleur de tension	109

triphasé à sept niveaux - MAS.	111
IV. Conclusion.	117

Chapitre IV. Equilibrage des sources de tension continue de l'onduleur à sept niveaux utilisant le pont de clamping

Introduction	119
I. Description du pont de clamping	119
II. Cascades redresseurs de courant à MLI triphasés à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux	120
II.1. Cascade un redresseur MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS	120
II.2. Cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS.. . . .	123
II.3. Cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS...	127
II.3.1. Structure série..	127
II.3.2. Structure imbriquée.	130
II.4. Cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS.	134
III. Cascades redresseurs de courant à MLI triphasés à trois niveaux - pont de clamping - onduleur triphasé à sept niveaux	138
III.1. Cascade un redresseur MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS.. . . .	138
III.2. Cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS.. . . .	141
III.2.1. Structure série.	141
III.2.2. Structure imbriquée.	145
IV. Cascade redresseur de courant à MLI triphasé à sept niveaux - pont de clamping - onduleur triphasé à sept niveaux	148
IV.1. Cascades un redresseur MLI à sept niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS...	148
V. Conclusion	152

Chapitre V. Asservissement et équilibrage des sources de tension continue de l'onduleur NPC à sept niveaux

Introduction	153
I. Cascades redresseurs de courant à MLI triphasés à deux niveaux - pont de clamping - onduleur triphasé à sept niveaux	153
I.1. Cascade un redresseur MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS	154
I.2. Cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS.	157
I.3. Cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS.. . . .	161
I.3.1. Structure série.	161
I.3.2. Structure imbriquée.	165

I.4. Cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS.	170
II. Cascades redresseurs de courant à MLI triphasés à trois niveaux - pont de clamping - onduleur triphasé à sept niveaux	174
II.1. Cascade un redresseur MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS..	174
II.2. Cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS....	178
II.2.1. Structure série.	183
II.2.2. Structure imbriquée	
III. Cascades redresseur de courant à MLI triphasé à sept niveaux - pont de clamping - onduleur triphasé à sept niveaux	188
III.1. Cascades un redresseur MLI à sept niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS.	189
IV. Conclusion.	193
	196
Conclusion générale..	
	200
Bibliographie	204
Annexe I	205
Annexe II	

La liste des symboles

MAS	: Machine asynchrone.
s,r	: Indices correspondant respectivement au stator et au rotor.
a_r, b_r, c_r	: Axes correspondant aux trois phases rotoriques.
A_s, B_s, C_s	: Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant.
I_{ds}, I_{qs}	: Courants statoriques dans le référentiel (d,q).
V_{ds}, V_{qs}	: Tensions statoriques dans le référentiel (d,q).
Φ_{ds}, Φ_{qs}	: Flux statorique dans le référentiel (d,q).
ω_s	: Vitesse synchrone.
ω_{gl}	: Vitesse de glissement.
ω_r	: Vitesse angulaire du rotor.
Ω	: Vitesse mécanique du rotor.
p	: nombre de paire de pôles.
C_{em}	: Couple électromagnétique.
C_r	: Couple de charge.
J	: Moment d'inertie de la partie tournante.
K_f	: Coefficient de frottement.
L_s	: Inductance cycliques statorique par phase.
R_s	: Résistance du stator.
T_r, T_s	: Constante de temps rotorique et statorique.
V_{AM}, V_{BM}, V_{CM}	: Tensions de sortie de l'onduleur par rapport au point milieu M.
V_A, V_B, V_C	: Tensions simples de l'onduleur par rapport au neutre de la machine.
V_a, V_b, V_c	: Tensions du redresseur par rapport au neutre du réseau.
I_e	: Valeur efficace des courants de référence du réseau.
I_c	: Courant du filtre capacitif intermédiaire.
I_{cref}	: Courant de référence du filtre capacitif intermédiaire.
I_{ch}	: Courant de charge de l'onduleur multiniveaux.
$i_{k(k=1,2,3)}$: Courant de phase de la MAS respectivement A_s, B_s, C_s .
V_{resij}	: Tension simple du réseau correspondante à la phase « i » et au redresseur « j ».
I_{resij}	: Courant du réseau correspondant à la phase « i » et au redresseur « j ».
U_{redi}	: Tension de sortie du redresseur « i ».
I_{redi}	: Courant de sortie du redresseur « i ».
U_{Ci}	: Tension au borne du condensateur « i ».
$I_{di(i=0,1,2..6)}$: Courant d'entrée de l'onduleur multiniveaux.
I_{redi}	: Courant de sortie du redresseur « i ».
U_{pci}	: Tension de limitation de charge du pont de clamping.
U_{refi}	: Tension de référence du redresseur « i ».
R	: Résistance du filtre d'entrée du redresseur.
L	: Inductance du filtre d'entrée du redresseur.
R_C	: Résistance du pont de clamping.
S	: Opérateur de laplace.
T_V, T_h	: Période d'échantillonnage.
P_j	: Perte par effet de joule.

Introduction générale

La conduite des actionneurs électriques à moteur asynchrone (MAS) triphasé avec des performances élevées est beaucoup plus demandée dans les domaines d'applications industriels de forte puissance, au lieu de la solution à courant continu. La maintenance réduite du moteur asynchrone, la crédibilité des onduleurs de tension, la grande précision de la commande et l'accroissement de l'efficacité des systèmes avec la capacité de surcharge ; permettent à la solution alternatif d'être considérée comme le meilleur choix pour l'industrie de forte puissance, et particulièrement le domaine de la traction électrique. Aujourd'hui, la machine asynchrone est de plus en plus utilisée dans le domaine des entraînements réglés à vitesse variable. L'alimentation de ce moteur par un convertisseur de fréquence et les circuits de réglage et de commande sont plus compliqués que ceux du moteur à courant continu. Cependant, grâce à des processeurs performants, il est possible d'implémenter des stratégies de commande assez complexes. Ainsi, on peut donner à ce type d'entraînement une performance dynamique élevée, égale à celle d'un entraînement avec un moteur à courant continu, voire meilleur. Pour ce type d'applications, le transfert d'énergie électrique entre la source et la machine asynchrone s'opère à travers un convertisseur de puissance tel que l'onduleur. Pour un fonctionnement optimal de la machine asynchrone, les performances requises de ces convertisseurs statiques sont de plus en plus élevées : tant de point de vue de la puissance délivrée que de la qualité de la tension générée. Néanmoins, l'alimentation en créneaux par l'onduleur à deux niveaux utilisé à ce jour présente des inconvénients tels que : la limitation en puissance et le taux d'harmoniques élevé, qui limite considérablement le développement du domaine des entraînements alternatifs. Actuellement, l'étude des machines asynchrones alimentées par des convertisseurs statiques constitue un vaste thème de recherche dans les laboratoires d'électrotechnique. Ces travaux de recherche ont conduit à l'apparition de nouveaux composants de puissance plus performants commandables à l'ouverture et à la fermeture tels que les GTO et IGBT, et qui ont permis la conception de nouveaux convertisseurs fiables, rapides et puissants [Carrere 95]. Ainsi, l'ensemble des variateurs (convertisseur statique - machine asynchrone) a vu son coût diminué considérablement. Les progrès accomplis dans le domaine de la microinformatique (DSP, microcontrôleurs puissants et rapides) ont permis la synthèse d'algorithmes de contrôle de ces ensembles convertisseur-machine plus performants et plus robustes. Dans les dernières années, on a vécu à la naissance de nouvelles structures de convertisseurs de puissance destinées pour les applications de haute tension appelées convertisseurs multiniveaux [Menziez 93][Foch 93][Berkouk 95][Jih-shang Lai 96][Bahman 98][Gheraia 2001]. On peut citer : les onduleurs multiniveaux à cellules imbriquées, à diodes flottantes, et à structure NPC.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons aux onduleurs multiniveaux à structure NPC. Grâce à leur topologie, les onduleurs multiniveaux permettent une association série de plusieurs cellules de commutation [Yao 94][Ben Romdhane 94.1][Ben Romdhane 94.2][Berkouk 95.2], ce qui permet une augmentation du niveau de tension appliqué et également la puissance transmise. Cette structure permet aussi d'avoir une tension de sortie proche de la sinusoïde; grâce aux plusieurs niveaux de tension fournis par ce convertisseur. Cette nouvelle forme de tension permet également de minimiser la chute de tension brusque ($\frac{dV}{dt}$) lors du passage d'un niveau de tension à l'autre ce qui nous permet d'éviter le filtrage de la tension. Alors l'utilisation de ce type de convertisseur dans les domaines de forte puissance et/ou haute tension permet de résoudre simultanément les difficultés relatives à l'encombrement et à la commande des groupements d'onduleurs à deux niveaux généralement utilisés dans ce type d'applications. Afin de satisfaire certains critères d'optimisation à savoir la réduction des harmoniques, plusieurs stratégies de commande de ces convertisseurs ont été proposées [Berkouk 95][Gheraia 99.3][Gheraia 2002.1]. Généralement, ces stratégies sont inspirées de celles des onduleurs classiques à deux niveaux. D'autre part, des stratégies de commande utilisant le modèle de commande de l'onduleur (modèle instantané moyen) ont été développées, en vue d'une implémentation numérique. L'utilisation de ces onduleurs dans les processus industriels nécessite une alimentation à travers un pont redresseur. L'association du redresseur et l'onduleur multiniveaux constitue une cascade de puissance multiniveaux très efficaces pour les entraînements à vitesse variable des machines tournantes de forte puissance[Berkouk 95][Gheraia 97][Gheraia 98.1][Gheraia 98.2][Gheraia 98.3][Gheraia 99.1]. C'est dans ce contexte que se situe notre étude. Ce mémoire comporte cinq chapitres. Le premier chapitre sera consacré à la modélisation de l'association onduleur NPC à sept niveaux et la machine asynchrone triphasée. Nous avons déterminé sous l'hypothèse de linéarité du circuit magnétique le modèle de la machine asynchrone triphasée. Ensuite, nous avons présenté les modèles de connaissance et de commande de l'onduleur à sept niveaux [Gheraia 99]. On montrera dans ce chapitre l'extrapolation des notions utilisées dans l'élaboration des modèles de commande des onduleurs à deux niveaux et à trois niveaux à celui à sept niveaux. Ainsi, on montrera le caractère général du modèle de commande élaboré pour l'onduleur à sept niveaux. Pour commander l'onduleur, nous avons proposé deux stratégies de modulation calculée en utilisant le modèle de commande. Une étude comparative entre les différentes stratégies de commande développées pour l'onduleur à sept niveaux sera établie.

Dans le chapitre II, on présentera les différents convertisseurs AC/DC (redresseur MLI à deux, trois et à sept niveaux) permettant de générer une alimentation continue. Le comportement de l'association de ces différents convertisseurs AC/DC avec l'ensemble onduleur à sept niveaux - moteur asynchrone sera développé au cours de ce chapitre pour une stratégie de modulation calculée de l'onduleur vue dans le chapitre précédent. Ainsi, on met en évidence le problème d'instabilité des tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Cette instabilité des

tensions continues provoque non seulement la déformation de la tension de sortie de l'onduleur et la dégradation du facteur de puissance du côté réseau, mais elle conduit également à la destruction certaine de l'onduleur multiniveaux et la machine asynchrone. Cette situation, nous a conduit à trouver une solution à ce problème. Pour ce faire, on a proposé dans ce mémoire deux solutions complémentaires pour résoudre ce problème d'instabilité :

- Asservissement des tensions continues d'entrée de l'onduleur
- Pont de clamping

On montrera dans le chapitre III, l'asservissement des différents redresseurs MLI (à deux, trois et à sept niveaux) afin d'asservir les tensions continues d'entrée de l'onduleur et contrôler ainsi le potentiel du point milieu, et avoir un facteur de puissance côté réseau proche de l'unité avec un minimum d'harmoniques.

Dans le chapitre IV, nous présenterons le principe du pont de clamping et on développera un algorithme de commande de ce pont de clamping. Une étude en boucle ouverte des différentes cascades proposées dans le chapitre II, en introduisant le pont de clamping, sera développée en vue d'étudier l'influence de la structure du pont de clamping sur la stabilité des tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux.

Le dernier chapitre (Chapitre V) sera consacré à l'étude des performances des différentes cascades proposées, en utilisant les deux solutions complémentaires. Les résultats de cette étude montrent l'efficacité de cette solution afin de rendre les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux stables et égales, avec la possibilité de choisir des condensateurs de capacité réduite.

Chapitre I

Modélisation de l'association onduleur NPC à sept niveaux - machine asynchrone

I. Modélisation de la machine asynchrone triphasée

La modélisation d'un système quelconque est indispensable lorsque nous voulons étudier une commande particulière de ce système. Le modèle de la machine asynchrone triphasée est un système de six équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps. La résolution d'un tel système est difficile même avec l'utilisation de l'outil informatique. L'utilisation d'une transformation dite de PARK, qui est un changement convenable des variables, permet de détourner cette difficulté [Chatelain 84][Krause 86][Boussak 89].

I.1. Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices :

- La machine est de constitution symétrique.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont tous négligés. Les relations entre les flux et les courants sont linéaires.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est alors négligé.
- On admet de plus que la force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé. Les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotorique et statorique.

I.2. Conventions

La machine est représentée par trois phases statoriques A_s, B_s, C_s et trois phases rotoriques a_r, b_r, c_r .

On a :

$$\omega = p\Omega = \frac{d\theta}{dt}; \quad \theta_r = \theta_s - \theta$$

$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$: vitesse angulaire des axes (d,q)
par rapport au stator.

$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$: vitesse angulaire des axes (d,q)
par rapport au rotor.

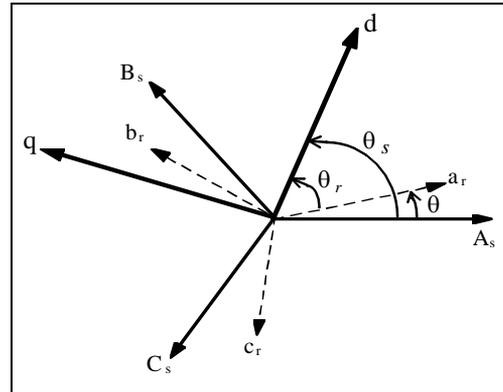


Fig.I.1.Repérage angulaire des axes d'axes dans l'espace

I.3. Equations d'état

La représentation d'état consiste à exprimer le modèle de la machine sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{X} = f (X, U, t) \\ Y = g (X, U, t) \end{cases} \tag{I.1}$$

Avec :

X : vecteur d'état.

U : vecteur d'entrée.

Y : vecteur de sortie.

Afin d'obtenir le modèle complet de la machine, il faut tenir compte de l'équation mécanique :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - Cr - K_f \cdot \Omega \tag{I.2}$$

Cr: représente le couple résistant ; et (J, K_f) respectivement l'inertie totale du moteur et le coefficient de frottement visqueux.

Nous avons choisi le modèle avec deux composantes de courant statorique et celle du flux rotorique.

Les entrées du modèle de la machine asynchrone sont les tensions de commande dans le repère (d,q).

Le système d'état est :

$$\begin{cases} \dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (p \cdot C_{em} - p \cdot Cr - K_f \cdot \omega) \\ Y = X \end{cases} \tag{I.3}$$

Avec:

$$X = (I_{ds} \quad I_{qs} \quad \Phi_{ds} \quad \Phi_{qs})$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{\sigma} \cdot \left(\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_r} \right) & \omega_{gl} & \frac{1}{\sigma \cdot T_s \cdot T_r} & \frac{\omega}{\sigma \cdot L_s} \\ -\omega_{gl} & \frac{-1}{\sigma} \cdot \left(\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_r} \right) & -\frac{\omega}{\sigma \cdot L_s} & \frac{1}{\sigma \cdot T_r \cdot T_s} \\ -R_s & 0 & 0 & \omega_s \\ 0 & -R_s & -\omega_s & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma \cdot L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

et $U = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}$

• Simulation numérique

Pour la simulation, nous avons considéré une machine asynchrone triphasée à cage [Annexe I] alimentée par un réseau alternatif 50 Hz ayant une tension efficace de 220V.

Lors du démarrage à vide (Fig.I.2), on constate d'emblée l'importance du courant statorique pouvant être à l'origine de la destruction de la machine par sur-échauffement en cas de répétitions excessives. Pendant le régime transitoire, le couple électromagnétique est fortement pulsatoire. Ce qui explique le bruit engendré par la partie mécanique.

Après le régime transitoire qui dure 0.25 seconde, la vitesse de la machine s'approche de la vitesse de synchronisme de 1500 tr/mn (157 rd/sec)(glissement très faible) ; puisque la charge est nulle. Le couple électromagnétique se stabilise à la valeur 0.2 Nm qui compense les pertes par frottements et le flux rotorique atteint la valeur de 1.14 Wb.

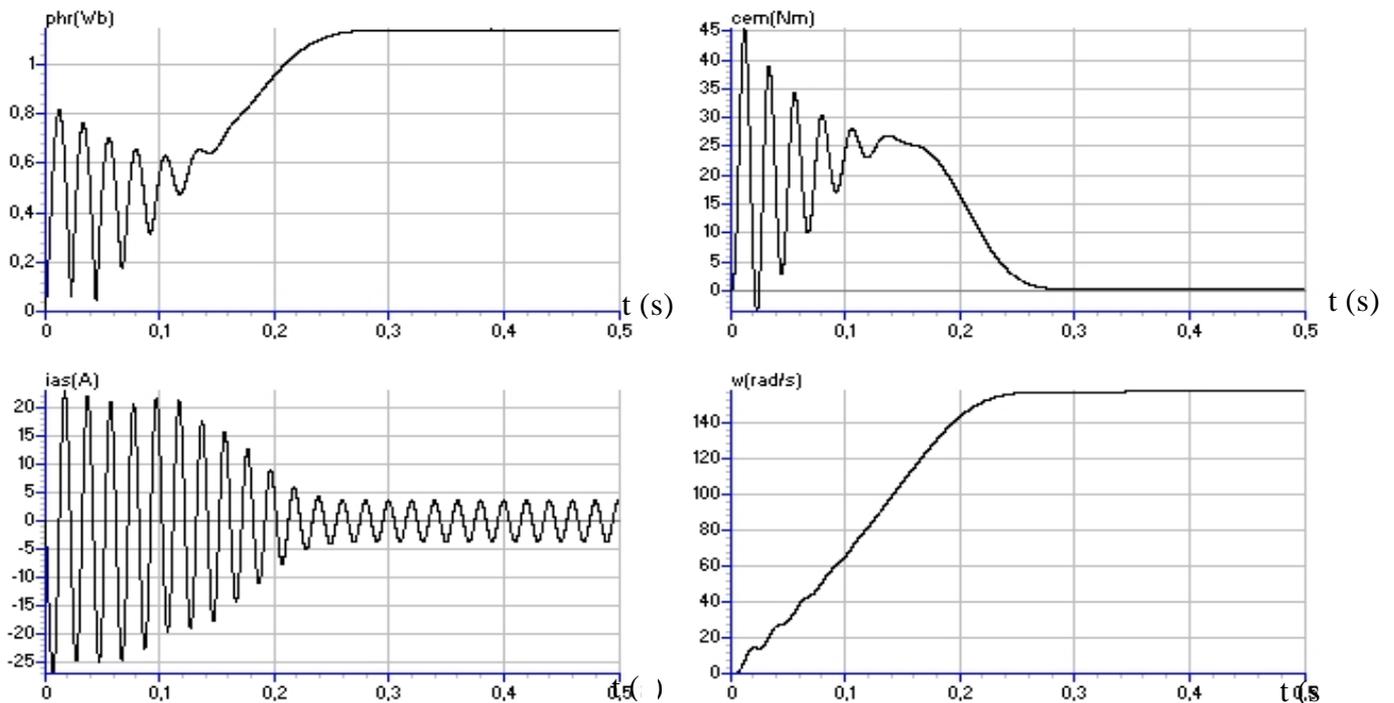


Fig.I.2. Conduite de la machine asynchrone triphasée à vide

II. Modélisation de l'onduleur à sept niveaux à structure NPC

II.1. Structure de l'onduleur

L'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping) étudié est constitué de trois bras et de six sources de tension continue. Chaque bras comporte douze interrupteurs dont huit en série et quatre en parallèle, ainsi que de deux diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montés en tête bêche. La figure I.3 donne une représentation schématique de cet onduleur.

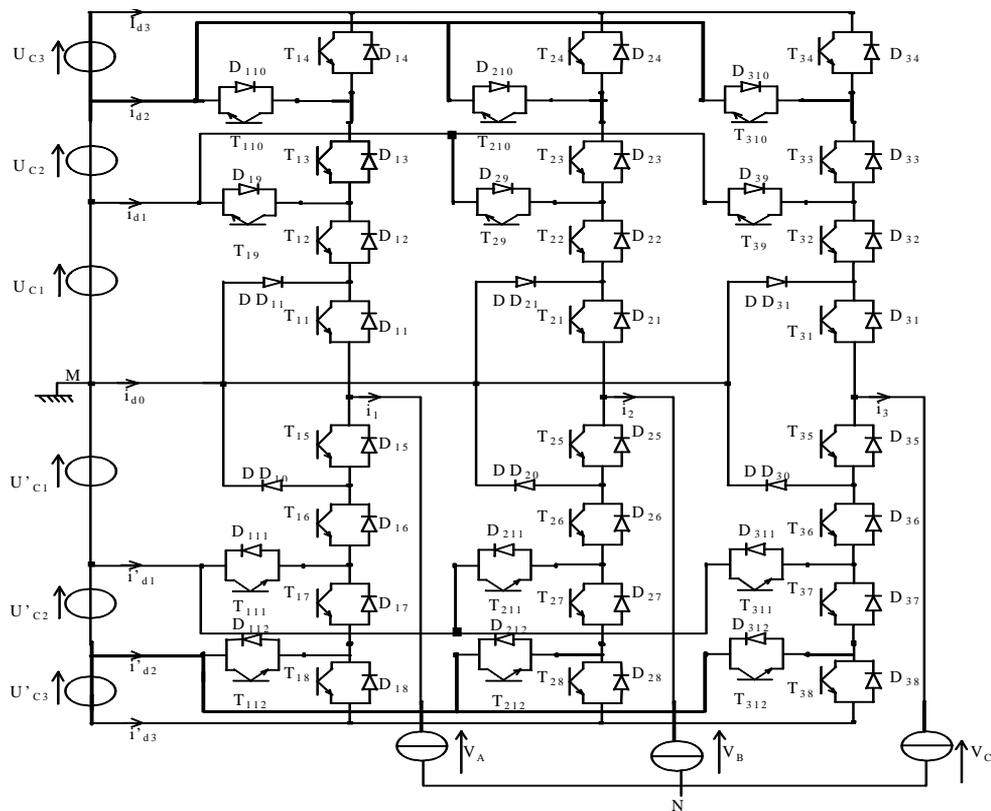


Fig.I.3. Onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC (VSI)

II.2. Hypothèses

- 1- Les tensions d'entrée de l'onduleur sont supposées parfaites. En pratique, cela se traduit par le fait que, quelque soit le courant i_k délivré par cette alimentation, la tension à ses bornes reste constante ($U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U'_{C1} = U'_{C2} = U'_{C3} = U_C$).
- 2- La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable devant la tension d'alimentation qui est de l'ordre de quelques centaines de Volts.
- 3- L'onduleur est en mode commandable.

Dans ces conditions, on peut définir la notion de fonction de connexion des interrupteurs [Guillaud 92][Guillaud 94.1][Guillaud 94.2][Plateaux 94].

II.3. Fonction de connexion

Chaque interrupteur TD_{ks} introduit une fonction de connexion F_{ks} , qui décrit son état ouvert ou fermé [Berkouk 95.2][Gheraia 99.2], tel que :

$$F_{ks} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur } TD_{ks} \text{ est fermé.} \\ 0 & \text{dans le cas contraire.} \end{cases}$$

II.4. Fonction génératrice

La fonction génératrice de connexion F_{ksg} est une fonction continue qui représente la valeur moyenne de la fonction discontinue de connexion F_{ks} sur une période de commutation T_h [Guillaud 94.1][Berkouk 95.2][Gheraia 99.2]. Cette période T_h est supposée infiniment petite. La fonction génératrice de connexion F_{ksg} est donnée par l'expression suivante :

$$F_{ksg} = \left[\frac{1}{T_h} \int_{nT_h}^{(n+1)T_h} F_{ks}(\tau) d\tau \right] \in [0,1] \quad \text{avec } n \in N \text{ et } T_h \rightarrow 0 \quad (I.4)$$

II.5. Commande complémentaire

La structure de l'onduleur à sept niveaux est représentée à la figure I.3. Pour cet onduleur, on remarque qu'il ya vingt quatre commandes complémentaires possibles, mais seulement deux entre elles sont intéressantes. Pour notre étude, nous avons choisi la commande complémentaire définie comme suit :

$$\begin{cases} B_{k5} = \overline{B_{k2}} \\ B_{k6} = \overline{B_{k1}} \\ B_{k7} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k8} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \quad (I.5)$$

Avec B_{ks} , commande de base du transistor T_{ks} de ce bras k. Ainsi avec cette commande complémentaire, les fonctions de connexion des interrupteurs du bras K sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{k5} = 1 - F_{k2} \\ F_{k6} = 1 - F_{k1} \\ F_{k7} = 1 - F_{k4} \\ F_{k8} = 1 - F_{k3} \end{cases} \quad (I.6)$$

Pour l'onduleur à sept niveaux, on définit en plus, une fonction de connexion du demi-bras, qu'on notera F_{km}^b avec :

k : numéro du bras.

m=1 pour le demi-bras du haut, et m=0 pour le demi-bras du bas.

Pour un bras k, les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \cdot F_{k3} \cdot F_{k4} \\ F_{k0}^b = F_{k5} \cdot F_{k6} \cdot F_{k7} \cdot F_{k8} \end{cases} \quad (I.7)$$

F_{k1}^b est associée au demi-bras du haut ($TD_{k1}, TD_{k2}, TD_{k3}, TD_{k4}$), F_{k0}^b est associée au demi-bras du bas ($TD_{k5}, TD_{k6}, TD_{k7}, TD_{k8}$).

II.6. Modélisation aux valeurs instantanées (Modèle de connaissance)

Cette modélisation sera effectuée en considérant l'association de l'onduleur de tension triphasé à sept niveaux avec une charge triphasée couplée en étoile avec neutre isolé. Dans notre cas particulier, cette charge sera constituée par la machine asynchrone (MAS). Sous forme matricielle, les potentiels des noeuds A, B et C de l'onduleur triphasé à sept niveaux par rapport au point milieu M sont donnés par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{19} + F_{110} + F_{11}^b \\ F_{29} + F_{210} + F_{21}^b \\ F_{39} + F_{310} + F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} + \begin{bmatrix} F_{110} + F_{11}^b \\ F_{210} + F_{21}^b \\ F_{310} + F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C2} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C3} - \begin{bmatrix} F_{111} + F_{112} + F_{10}^b \\ F_{211} + F_{212} + F_{20}^b \\ F_{311} + F_{312} + F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C1} - \begin{bmatrix} F_{112} + F_{10}^b \\ F_{212} + F_{20}^b \\ F_{312} + F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C2} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C3} \quad (I.8)$$

Le système d'équations (I.8) montre qu'un onduleur à sept niveaux est une mise en série de six onduleurs à deux niveaux ou de trois onduleurs à trois niveaux [Gheraia 99]. Dans le cas où $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U'_{C1} = U'_{C2} = U'_{C3} = U_C$, la relation (I.8) se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{19} + 2F_{110} + 3F_{11}^b - F_{111} - 2F_{112} - 3F_{10}^b \\ F_{29} + 2F_{210} + 3F_{21}^b - F_{211} - 2F_{212} - 3F_{20}^b \\ F_{39} + 2F_{310} + 3F_{31}^b - F_{311} - 2F_{312} - 3F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \quad (I.9)$$

Les relations de conversion simples de l'onduleur à sept niveaux sont données par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d3} \\ i'_{d1} \\ i'_{d2} \\ i'_{d3} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ U'_{C3} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (I.10)$$

On appelle $[N(t)]$ la matrice de conversion simple. Elle est définie comme suit :

$$[N(t)] = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} & N_{14} & N_{15} & N_{16} & 0 & 0 & 0 \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} & N_{24} & N_{25} & N_{26} & 0 & 0 & 0 \\ N_{31} & N_{32} & N_{33} & N_{34} & N_{35} & N_{36} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{19} & F_{29} & F_{39} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{110} & F_{210} & F_{310} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{111} & F_{211} & F_{311} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{112} & F_{212} & F_{312} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{11} \cdot F_{15} & F_{21} \cdot F_{25} & F_{31} \cdot F_{35} \end{bmatrix} \quad (I.11)$$

Avec :

$$\begin{aligned} N_{11} &= 1/3 \left[2.(F_{19} + F_{110} + F_{11}^b) - (F_{29} + F_{210} + F_{21}^b) - (F_{39} + F_{310} + F_{31}^b) \right] \\ N_{12} &= 1/3 \left[2.(F_{110} + F_{11}^b) - (F_{210} + F_{21}^b) - (F_{310} + F_{31}^b) \right] \\ N_{13} &= 1/3 \left[2.(F_{11}^b) - (F_{21}^b) - (F_{31}^b) \right] \\ N_{14} &= 1/3 \left[2.(-F_{111} - F_{112} - F_{10}^b) - (-F_{211} - F_{212} - F_{20}^b) - (-F_{311} - F_{312} - F_{30}^b) \right] \\ N_{15} &= 1/3 \left[2.(-F_{112} - F_{10}^b) - (-F_{212} - F_{20}^b) - (-F_{312} - F_{30}^b) \right] \\ N_{16} &= 1/3 \left[2.(-F_{10}^b) - (-F_{20}^b) - (-F_{30}^b) \right] \\ N_{21} &= 1/3 \left[-(F_{19} + F_{110} + F_{11}^b) + 2.(F_{29} + F_{210} + F_{21}^b) - (F_{39} + F_{310} + F_{31}^b) \right] \\ N_{22} &= 1/3 \left[-(F_{110} + F_{11}^b) + 2.(F_{210} + F_{21}^b) - (F_{310} + F_{31}^b) \right] \\ N_{23} &= 1/3 \left[-(F_{11}^b) + 2.(F_{21}^b) - (F_{31}^b) \right] \\ N_{24} &= 1/3 \left[-(-F_{111} - F_{112} - F_{10}^b) + 2.(-F_{211} - F_{212} - F_{20}^b) - (-F_{311} - F_{312} - F_{30}^b) \right] \\ N_{25} &= 1/3 \left[-(-F_{112} - F_{10}^b) + 2.(-F_{212} - F_{20}^b) - (-F_{312} - F_{30}^b) \right] \\ N_{26} &= 1/3 \left[-(-F_{10}^b) + 2.(-F_{20}^b) - (-F_{30}^b) \right] \\ N_{31} &= 1/3 \left[-(F_{19} + F_{110} + F_{11}^b) - (F_{29} + F_{210} + F_{21}^b) + 2.(F_{39} + F_{310} + F_{31}^b) \right] \\ N_{32} &= 1/3 \left[-(F_{110} + F_{11}^b) - (F_{210} + F_{21}^b) + 2.(F_{310} + F_{31}^b) \right] \\ N_{33} &= 1/3 \left[-(F_{11}^b) - (F_{21}^b) + 2.(F_{31}^b) \right] \\ N_{34} &= 1/3 \left[-(-F_{111} - F_{112} - F_{10}^b) - (-F_{211} - F_{212} - F_{20}^b) + 2.(-F_{311} - F_{312} - F_{30}^b) \right] \\ N_{35} &= 1/3 \left[-(-F_{112} - F_{10}^b) - (-F_{212} - F_{20}^b) + 2.(-F_{312} - F_{30}^b) \right] \\ N_{36} &= 1/3 \left[-(-F_{10}^b) - (-F_{20}^b) + 2.(-F_{30}^b) \right] \end{aligned}$$

La figure I.4 montre le modèle de connaissance global de l'onduleur triphasé à sept niveaux en mode commandable associé à sa source de tension d'entrée et sa charge triphasée. On distingue :

- La partie commande qui est représentée par le réseau de Petri de fonctionnement de l'onduleur triphasé en mode commandable. Cette partie génère la matrice de conversion en utilisant la relation (I.9).

- La partie opérative qui est constituée :

- D'un bloc discontinu délivrant les entrées internes générées par le convertisseur à partir de ses variables d'état et de la matrice de conversion.

- D'un bloc continu qui représente le modèle d'état de la charge de l'onduleur et de sa source de tension d'entrée.

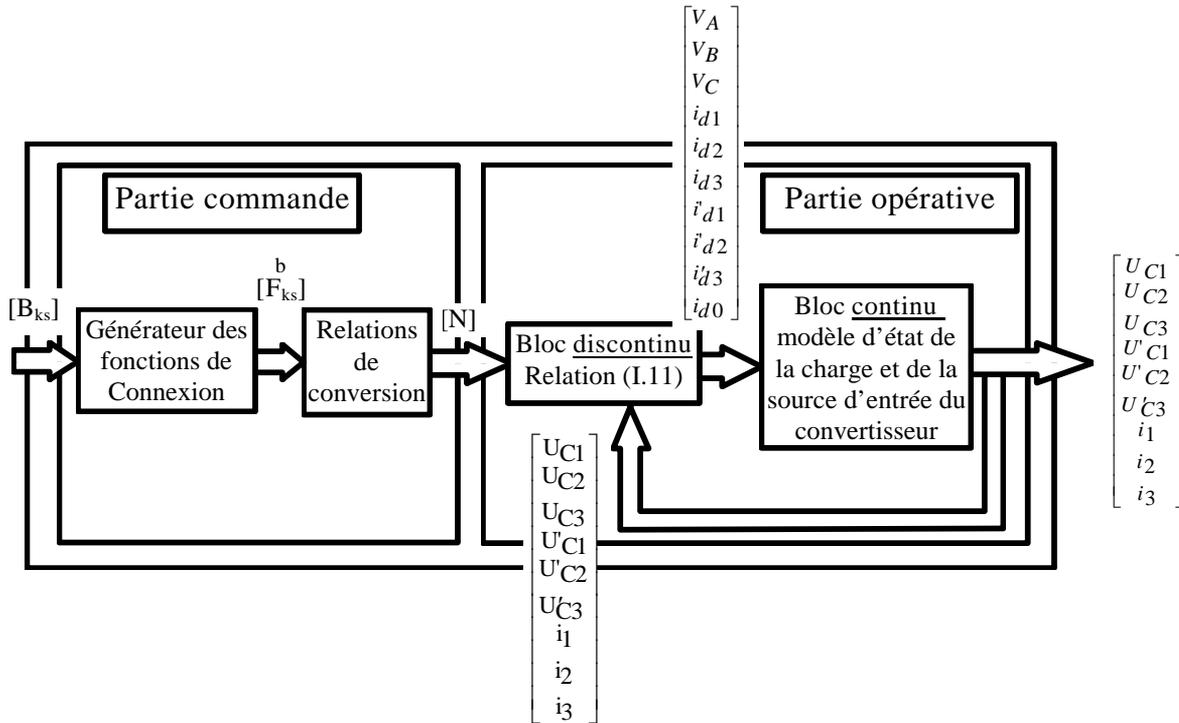


Fig.I.4. Modèle de connaissance de l'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC

II.7. Modélisation au sens des valeurs moyennes (Modèle de commande)

Le modèle de connaissance global présenté précédemment (Fig.I.4) est bien adapté à la simulation, et donc à la validation des stratégies de commande. Pour l'adapter à la commande de l'onduleur par un calculateur numérique, on définit un modèle de commande en utilisant la notion de fonction génératrice (Eq.I.4) [Gheraia 99][Gheraia 99.2]. Cette notion consiste à découper le fonctionnement de l'onduleur en intervalles de temps réguliers qui définissent la période de son fonctionnement. Nous noterons cette période par T_h . L'utilisation de ces fonctions génératrices permet une modélisation aux valeurs moyennes du bloc discontinu du modèle de connaissance sur un intervalle T_h .

II.8. Stratégies de commande de l'onduleur

Le développement rapide des algorithmes de commande très performants des machines à courant alternatif impose des moyens de réglage tout aussi performants des tensions et de la fréquence d'alimentation de ces machines. Afin de générer une source de tension la plus sinusoïdale possible, différentes stratégies de commande ont été proposées pour les onduleurs à deux niveaux et à trois niveaux [Bowes 75][Bowes 85][Seguier 89][Boudjerda 93][Faucher 93][Berkouk 95]. Concernant l'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC plusieurs stratégies de commande ont été proposées [Gheraia 99][Gheraia 99.3][2002.1]. Généralement ces stratégies sont des extensions de celles des onduleurs à deux et à trois niveaux. Dans ce contexte, nous allons présenter deux algorithmes de modulation calculée.

L'analyse de ces stratégies sera basée sur les performances de la conduite de la machine asynchrone triphasée alimentée par cet onduleur, la bande de réglage et le taux d'harmoniques des tensions de sortie.

II.8.1. Modulation calculée

Dans cette partie, on va présenter deux algorithmes de commande de l'onduleur NPC à sept niveaux destinés à une réalisation numérique en utilisant le modèle de commande de ce convertisseur [seixas 88][Berkouk 95][Gheraia 99]. L'organigramme général d'une stratégie MLI utilisant le modèle de commande est présenté à la figure I.5.

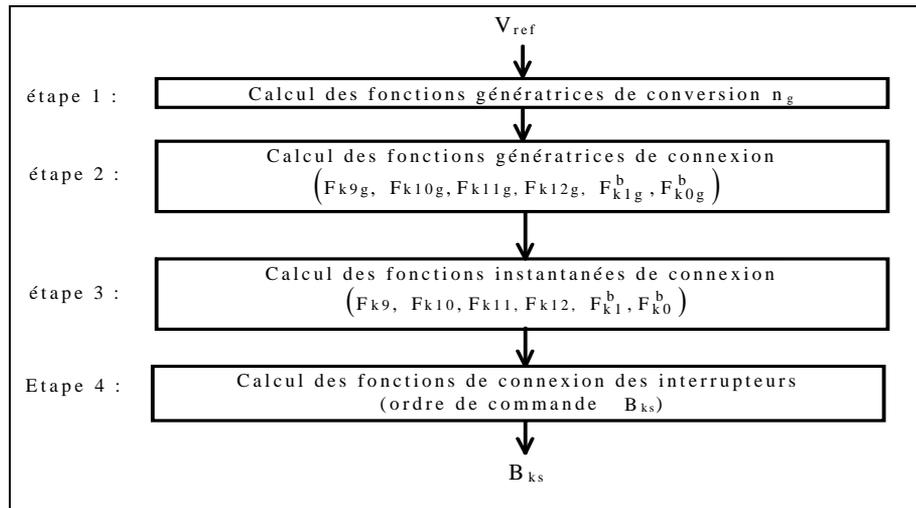


Fig.I.5. Organigramme d'une modulation calculée utilisant le modèle de commande de l'onduleur à sept niveaux à structure NPC

• Algorithme 1 :

Cet algorithme est basé sur la commande triangulo-sinusoïdale à une seule porteuse [Gheraia 99][Gheraia 2001]. Les différentes étapes de l'organigramme de la figure I.5 s'exprime pour cet algorithme comme suit :

Etape 1: calcul des fonctions génératrices de conversion simples ng_k :

$$ng_k = V_{refk} / U_c$$

Avec : $k=1,2,3$

Etape 2: calcul des fonctions génératrices de connexion des demi bras et celles des interrupteurs :

$$\begin{aligned}
 & \bullet 0 \leq ng_k \leq 1 \Rightarrow (F_{k9})_g = ng_k \\
 & \bullet 1 < ng_k \leq 2 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (F_{k9})_g + 2 \cdot (F_{k10})_g = ng_k \\ (F_{k9})_g + (F_{k10})_g = 1 \end{array} \right\} \\
 & \bullet 2 < ng_k \leq 3 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot (F_{k10})_g + 3 \cdot (F_{k1}^b)_g = ng_k \\ (F_{k10})_g + (F_{k1}^b)_g = 1 \end{array} \right\}
 \end{aligned}$$

- $-1 < ng_k \leq 0 \Rightarrow (F_{k11})_g = ng_k$
- $-2 < ng_k \leq -1 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (F_{k11})_g + 2.(F_{k12})_g = ng_k \\ (F_{k11})_g + (F_{k12})_g = 1 \end{array} \right\}$
- $-3 \leq ng_k \leq -2 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 2.(F_{k12})_g + 3.(F_{k0}^b)_g = ng_k \\ (F_{k12})_g + (F_{k0}^b)_g = 1 \end{array} \right\}$

Etape 3: calcul des fonctions instantanées de connexion des interrupteurs et celles des demi-bras :

La figure I.6 décrit le passage des fonctions génératrices continues $(F_{ks})_g$ aux fonctions de connexion F_{ks} qui apparaissent comme une distribution temporelle d'impulsions de largeurs variables (modulation de largeurs d'impulsion). Si l'échantillonnage a lieu au début de la période comprise entre les instants $((q-1).T_h)$ et $(q.T_h)$, $((F_{ks})_g)_{(q-1)}$ représente sur cette même période, l'amplitude de la fonction génératrice échantillonnée. La valeur moyenne de la connexion établie pendant cette période doit être égale à $((F_{ks})_g)_{(q-1)}$, soit :

$$(1/T_h) \cdot \int_{(q-1)T_h}^{qT_h} F_{ks} \cdot dt = \delta_{(q-1)} = (F_{ks_g})_{(q-1)} \quad (I.12)$$

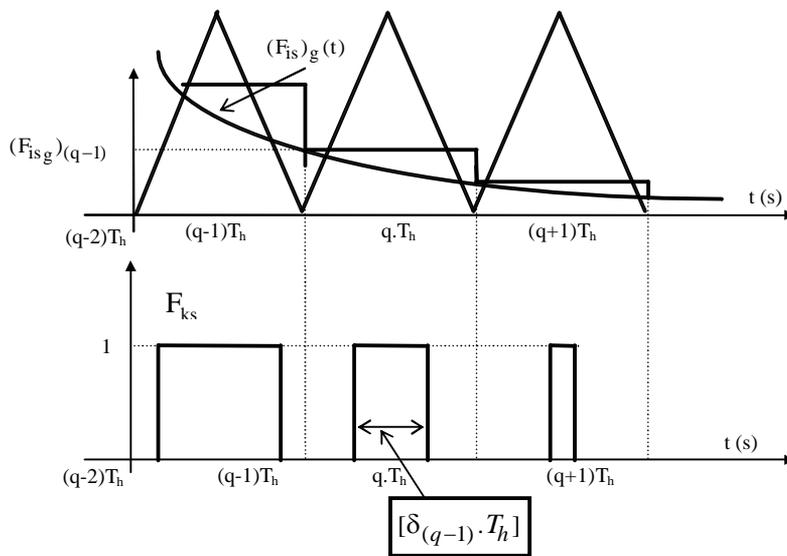


Fig.I.6. Elaboration des fonctions de connexion discontinues à partir de leurs fonctions génératrices

• Simulation numérique :

Pour une simulation numérique du comportement de l'association onduleur à sept niveaux et la machine asynchrone, on considère une alimentation parfaite de l'onduleur ($U_c = 100V$), et un fonctionnement en charge de la machine asynchrone ($Cr=4Nm$). Ainsi, un changement du sens de rotation de la machine asynchrone triphasée est appliqué à l'instant $t=1s$.

La figure I.7 représente la tension simple de sortie de l'onduleur à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée (Algorithme 1). On note pour les résultats obtenus avec cet algorithme que :

- Pour m (indice de modulation) pair, la tension de sortie V_A présente une symétrie par rapport à $\frac{\pi}{2}$ et π , et donc seuls les harmoniques impairs existent.
- Pour m impair, on a une symétrie par rapport à π seulement et donc en plus des harmoniques impairs, des harmoniques pairs existent.
- les harmoniques de tension se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de $m.f$. La première famille est centrée autour de la fréquence $m.f$ est la plus importante de point de vue amplitude (Fig.I.7).
- Pour $m=42$, les harmoniques les plus importants en amplitude sont de rang 41 et 43.
- La caractéristique de réglage de la tension de sortie de l'onduleur est linéaire de $r=0$ à $r=1$, et le taux d'harmoniques décroît quand r augmente (Fig.I.8).
- La figure I.9 représente le couple électromagnétique développé par la machine asynchrone triphasée alimentée par l'onduleur à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée type 1 (Algorithme 1 : $m=42, r=0.8$). La fréquence du couple est six fois celle de la tension.

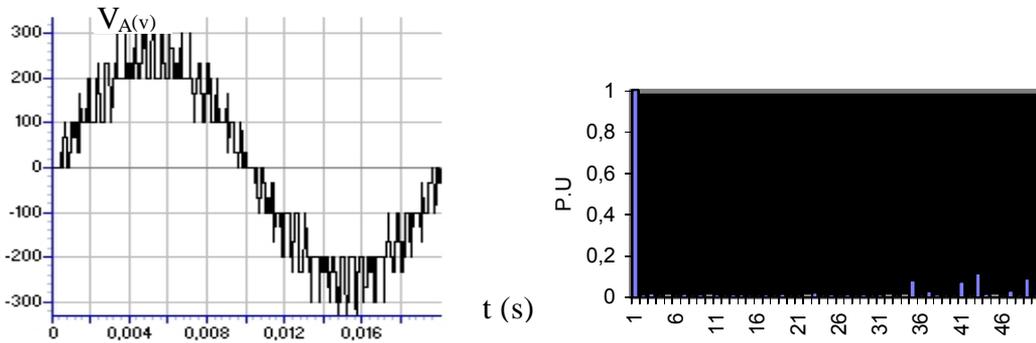


Fig.I.7. La tension de sortie de l'onduleur et son spectre d'harmoniques pour ($m=42, r=0.8$)

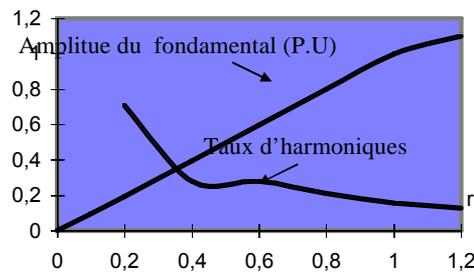


Fig.I.8. Caractéristiques de la tension de sortie V_A de l'onduleur triphasé à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée (Algorithme 1)

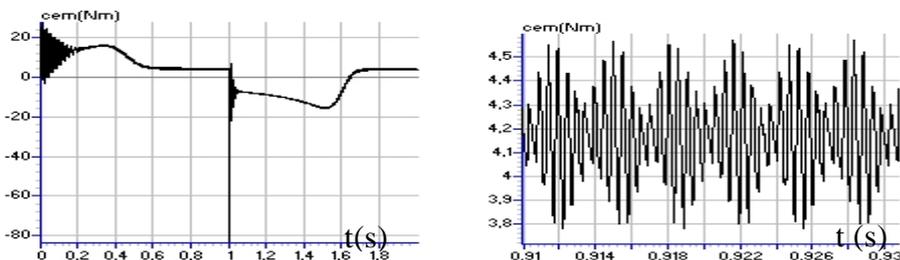


Fig. I.9. Le couple électromagnétique transitoire et permanent de la machine asynchrone triphasée alimentée par l'onduleur à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée (Algorithme 1) ($r=0.8, m=42$)

• **Algorithme 2 :**

Pour faciliter l'implémentation de la modulation vectorielle, nous proposons cet algorithme utilisant le modèle de commande de l'onduleur à sept niveaux.

Etape 1: calcul des fonctions génératrices de conversion simples ng_k^* : $ng_k^* = V_{refk}^* / U_c$

telle que :

$$V_{refk}^* = V_{refk} + V_0$$

$$V_0 = -\left\{ \max(V_{refk=1,2,3}) + \min(V_{refk=1,2,3}) \right\} / 2$$

Etape 2: calcul des fonctions génératrices de connexion des demi bras et celles des interrupteurs :

$$\begin{aligned} & \bullet 0 \leq ng_k^* \leq 1 \Rightarrow (F_{k9})_g = ng_k^* \\ & \bullet 1 < ng_k^* \leq 2 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (F_{k9})_g + 2 \cdot (F_{k10})_g = ng_k^* \\ (F_{k9})_g + (F_{k10})_g = 1 \end{array} \right\} \\ & \bullet 2 < ng_k^* \leq 3 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot (F_{k10})_g + 3 \cdot (F_{k1}^b)_g = ng_k^* \\ (F_{k10})_g + (F_{k1}^b)_g = 1 \end{array} \right\} \\ & \bullet -1 \leq ng_k^* \leq 0 \Rightarrow (F_{k11})_g = ng_k^* \\ & \bullet -2 \leq ng_k^* < -1 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (F_{k11})_g + 2 \cdot (F_{k12})_g = ng_k^* \\ (F_{k11})_g + (F_{k12})_g = 1 \end{array} \right\} \\ & \bullet -3 \leq ng_k^* < -2 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot (F_{k12})_g + 3 \cdot (F_{k0}^b)_g = ng_k^* \\ (F_{k12})_g + (F_{k0}^b)_g = 1 \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Etape 3: calcul des fonctions de connexion des interrupteurs et celles des demi-bras : Le passage des fonctions génératrices de connexion des interrupteurs et celle des demi-bras à leurs fonctions instantanées est effectué en utilisant la même méthodologie que celui de la stratégie précédente (Algorithme 1). On note :

- Comme pour l'algorithme 1, la tension simple V_A présente une symétrie par rapport à $\frac{\pi}{2}$ et π dans le cas de m (indice de modulation) pair, et donc seuls les harmoniques impairs existent.
- Pour m impair, on a plus des harmoniques impairs, des harmoniques pairs existent.
- Les harmoniques de tension se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de $m.f$. La première famille est centrée autour de la fréquence $m.f$ est la plus importante de point de vue amplitude (Fig.I.10).
- Pour $m=42$, les harmoniques les plus importants en amplitude sont de rang 41 et 43.
- La caractéristique de réglage de la tension de sortie de l'onduleur est linéaire de $r=0$ à $r=1.2$, et le taux d'harmoniques décroît quand r augmente (Fig.I.11).

■ La figure I.12 représente le couple électromagnétique développé par la machine asynchrone triphasée alimentée par l'onduleur à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée type 2 (Algorithme 2 : $m=42$, $r=0.8$).

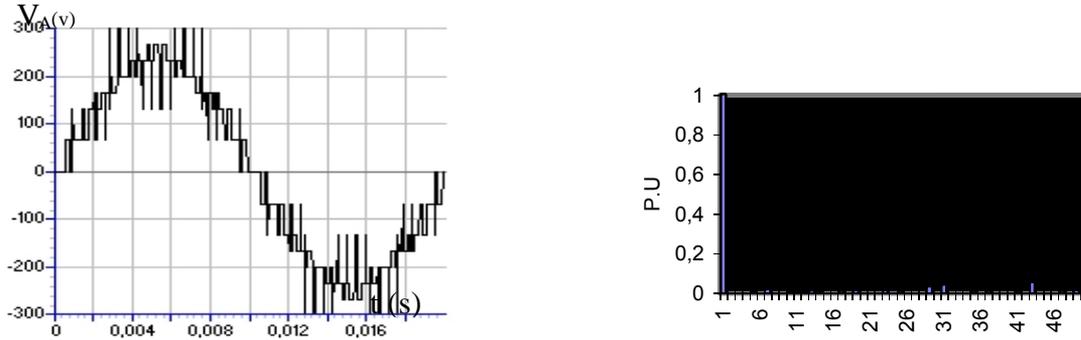


Fig.I.10. La tension de sortie de l'onduleur et son spectre d'harmoniques pour ($m=42, r=0.8$)

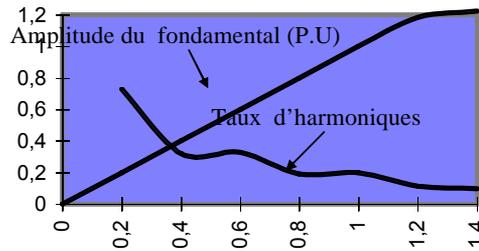


Fig.I.11. Caractéristiques de la tension de sortie V_A de l'onduleur triphasé à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée (Algorithme 2)

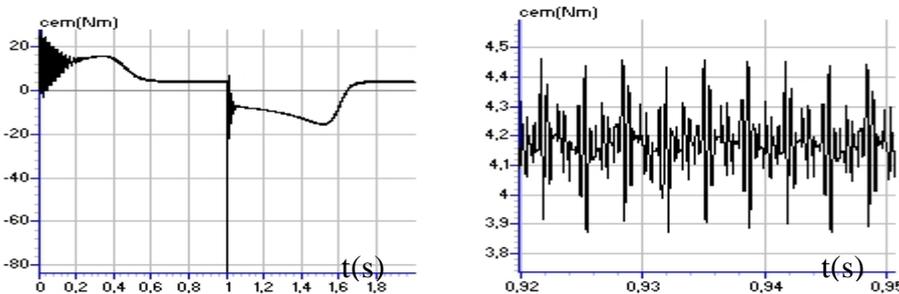


Fig. I.12. Le couple électromagnétique transitoire et permanent de la machine asynchrone triphasée alimentée par l'onduleur à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée (Algorithme 2) ($r=0.8$, $m=42$)

• **Tableau récapitulatif :**

Le choix d'une stratégie de commande d'un convertisseur de puissance se fait sur la base de la caractéristique de réglage de la stratégie, et l'étude des harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur. A cet effet, une étude comparative entre les différentes stratégies de commande de l'onduleur à sept niveaux a été élaborés [Gheraia 99][Gheraia 2002.1], et qui révèle des résultats présentées dans le tableaux ci-dessous.

Stratégie de commande	r_{\max} de la caractéristique de réglage	TDH maximal	TDH minimal	Fréquence centrale de la première famille d'harmoniques	Fréquence du couple
Triangulo-sinusoidale à une seule porteuse	1	0.67	0.12	m.f	6.f où 3.f
Triangulo-sinusoidale à six porteuses triangulaires	1	0.697	0.113	6.m.f	6.f où 3.f
Triangulo-sinusoidale à six porteuses (algorithme 1)	1	0.44	0.1	6.m.f	6.f où 3.f
Triangulo-sinusoidale à six porteuses (algorithme 2)	1	0.44	0.11	m.f	6.f où 3.f
Triangulo-sinusoidale à six porteuses (algorithme 3)	1	0.686	0.11	m.f	6.f où 3.f
Modulation vectorielle	1.15	0.694	0.14	m.f	6.f où 3.f
Modulation calculée (algorithme 1)	1	0.71	0.127	m.f	6.f où 3.f
Modulation calculée (algorithme 2)	1.2	0.73	0.098	m.f	6.f où 3.f

III. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élaboré le modèle simplifié de la machine asynchrone triphasée en vue d'une alimentation par convertisseur statique, et le modèle de fonctionnement de l'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC. L'utilisation des fonctions de connexion des demi-bras, en mode commandable, nous permet d'avoir l'analogie entre le modèle de l'onduleur NPC à sept niveaux et celui de l'onduleur à deux et à trois niveaux (structure NPC). On a montré en particulier que la structure de l'onduleur triphasé à sept niveaux est une mise en série de six onduleurs à deux niveaux ou trois onduleurs à trois niveaux (structure NPC). L'utilisation des fonctions génératrices permet l'élaboration d'un modèle homogène de l'onduleur multiniveaux où toutes ses grandeurs sont continues. Deux stratégies de commande utilisant le modèle de commande élaboré de l'onduleur ont été proposées.

Chapitre II

Cascades à redresseurs de courant à MLI triphasés - onduleur de tension triphasé NPC à sept niveaux

Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons d'étudier plusieurs structures de cascade permettant de réaliser un changeur de fréquence ayant en sortie un onduleur de tension à sept niveaux. Le pont d'entrée de ces cascades est constitué de redresseurs de courant triphasés à MLI. Ces cascades sont appliquées à la conduite de la machine asynchrone triphasée. On étudiera les cascades suivantes :

- * Cascade un redresseur MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
- * Cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
- * Cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
 - 1- trois redresseurs MLI à deux niveaux en série
 - 2- trois redresseurs MLI à deux niveaux imbriqués
- * Cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
- * Cascade un redresseur MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
- * Cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
 - 1- trois redresseurs MLI à trois niveaux en série
 - 2- trois redresseurs MLI à trois niveaux imbriqués
- * Cascade un redresseur MLI à sept niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

I. Cascades redresseurs de courant à MLI triphasés à deux niveaux - onduleur de tension triphasé à sept niveaux

I.1. Redresseur de courant à MLI triphasé à deux niveaux

La réversibilité de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux lui permet de fonctionner en redresseur de courant. Les modèles élaborés pour les onduleurs de tension à deux niveaux sont utilisables en tenant compte des nouvelles conventions des deux sources (réseau et la charge)[Lienart 89][Berkouk 95]. Toutes les stratégies de commande utilisées pour la commande de l'onduleur de tension à deux niveaux sont également utilisables pour les redresseurs de courant. Pour notre étude, nous avons choisi la commande par hystérésis de courant.

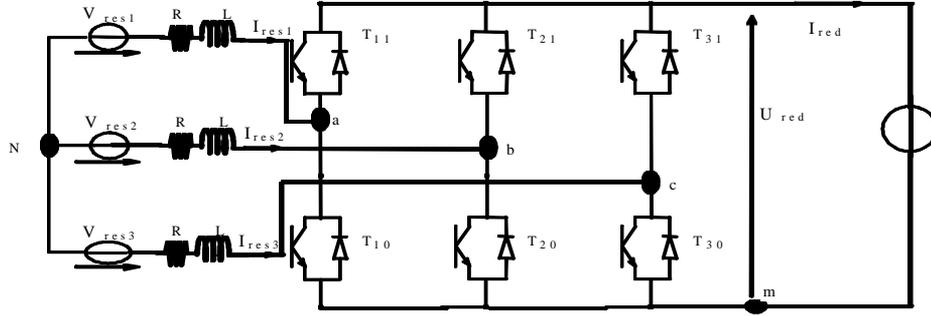


Fig.II.1. Redresseur de courant triphasé à deux niveaux

I.1.1. Modèle de commande du redresseur

La structure du redresseur triphasé à MLI à deux niveaux est montrée à la figure II.1. Soit F_{ks} ($k \in \{1,2,3\}, s \in \{0,1\}$) la fonction de connexion d'un interrupteur T_{ks} et F_k la fonction de commutation de la cellule de commutation associée au bras k de ce redresseur. Les potentiels des noeuds (a,b,c) du redresseur triphasé à deux niveaux sont donnés par les relations suivantes :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = 1/3 \cdot \begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{pmatrix} \cdot U_{red} \quad (II.1)$$

Pour les courants, on peut écrire la relation (II.2) donnant le courant redressé I_{red} en fonction des courants ($I_{res1}, I_{res2}, I_{res3}$) du réseau triphasé :

$$\begin{aligned} I_{red} &= F_{11} \cdot I_{res1} + F_{21} \cdot I_{res2} + F_{31} \cdot I_{res3} \\ &= 1/2 \cdot (1 + F_1) \cdot I_{res1} + 1/2 \cdot (1 + F_2) \cdot I_{res2} + 1/2 \cdot (1 + F_3) \cdot I_{res3} \end{aligned} \quad (II.2)$$

I.1.2. Stratégie de commande à hystérésis du redresseur

Dans cette partie, on présente la commande par hystérésis en courant des redresseurs de courant triphasé à deux niveaux. Le principe général de cette stratégie est de comparer le courant de référence I_{refk} au courant réel I_k , et à partir de l'écart entre eux, on déduit la commande des interrupteurs du redresseur. La figure II.2 montre le schéma synoptique de cette stratégie.

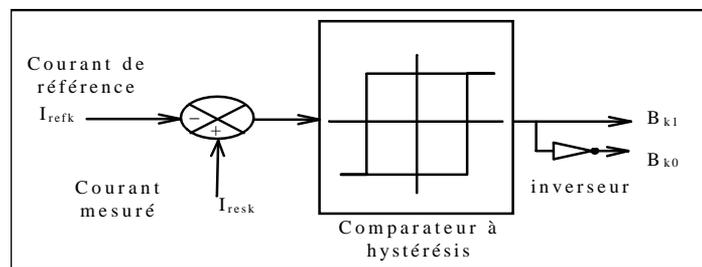


Fig.II.2. Schéma synoptique de la commande à hystérésis en courant des redresseurs de courant à deux niveaux

Si on désigne par ε_k l'écart entre le courant réel I_k et le courant de référence I_{refk} :

$$\varepsilon_k = I_k - I_{refk} \quad (k=1,2,3) ; \text{ avec : } I_{refk} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{2 \pi (k-1)}{3})$$

L'algorithme de cette stratégie est donnée comme suit :

$$\begin{cases} \varepsilon_k > \Delta i \Rightarrow B_{k1} = 1 \ \& \ B_{k0} = 0 \\ \varepsilon_k < -\Delta i \Rightarrow B_{k1} = 0 \ \& \ B_{k0} = 1 \end{cases} \quad (II.3)$$

si non : on garde la même commande

I.1.3. Détermination des paramètres de la cascade redresseur à MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - machine asynchrone

Pour avoir un fonctionnement en régime nominal du moteur asynchrone, il faut que ce dernier reçoit une puissance suffisante au démarrage. Cette puissance est fournie par le réseau à travers la cascade redresseur à MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux. La valeur efficace des courants de référence du réseau se déduit par l'application du principe de la conservation de puissance comme suit :

$$\begin{aligned} P_{res} &= P_J + P_{em} + P_m \\ \Leftrightarrow 3 \cdot V_{res_{eff}} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi - 3 \cdot R \cdot I_{eff}^2 &= P_J + C_{em} \cdot \Omega + P_m \end{aligned} \quad (II.4)$$

tel que :

P_{res} : Puissance du réseau .

P_J : Pertes Joules du moteur .

P_{em} : Puissance électromagnétique .

P_m : Pertes mécaniques .

En supposant un facteur de puissance réseau unitaire et en négligeant les pertes Joules et les pertes mécaniques, on obtient :

$$3 \cdot V_{res_{eff}} \cdot I_{eff} = C_{em} \cdot \Omega \quad (II.5)$$

En tenant compte des valeurs importantes du couple électromagnétique au démarrage et en imposant à I_{eff} la valeur suivante :

$$I_{eff} = C_{em_{max}} \cdot \Omega_{nom} / 3 \cdot V_{res_{eff}}$$

$$C_{em_{max}} = 1,2 \cdot C_{em_{nom}}$$

$C_{em_{nom}}$: couple nominal de la machine .

Ω_{nom} : vitesse nominale de la machine .

Pour assurer la commandabilité du redresseur, la valeur initiale que doit prendre chacune des tensions du pont capacitif doit être supérieure à 1/6 de la valeur maximale de la tension fournie par le réseau. Ceci est nécessaire également pour assurer un facteur de puissance unitaire [Guillaud 92][Berkouk 95].

I.2. Cascade un redresseur MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

La structure de cette cascade est présentée dans la figure II.3 [Gheraia 99.5].

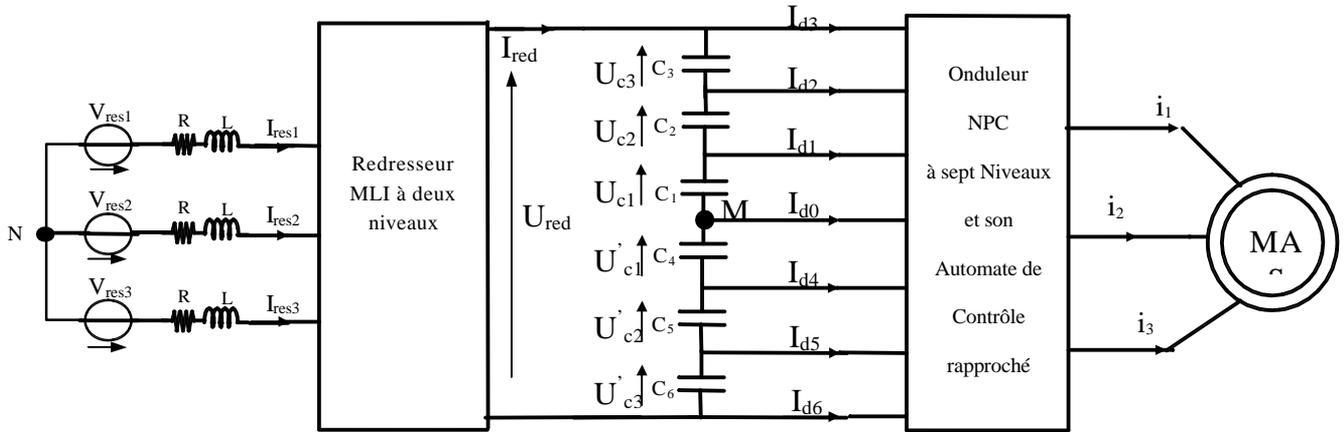


Fig.II.3. cascade un redresseur MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

($V_{res-ef} = 220V$, $R = 0.25\Omega$, $L = 10\text{ mH}$, $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 60\text{mF}$)

I.2.1. Filtre capacitif : Le modèle mathématique du filtre capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux est donné par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \cdot \frac{d U_{C1}}{dt} = I_{red1} - I_{d3} - I_{d2} - I_{d1} \\ C_2 \cdot \frac{d U_{C2}}{dt} = I_{red1} - I_{d3} - I_{d2} \\ C_3 \cdot \frac{d U_{C3}}{dt} = I_{red1} - I_{d3} \\ C_4 \cdot \frac{d U'_{C1}}{dt} = I_{red1} + I_{d6} + I_{d5} + I_{d4} \\ C_5 \cdot \frac{d U'_{C2}}{dt} = I_{red1} + I_{d6} + I_{d5} \\ C_6 \cdot \frac{d U'_{C3}}{dt} = I_{red1} + I_{d6} \end{array} \right. \quad (II.6)$$

Sous forme matricielle, on peut écrire comme suit :

$$[C] \cdot [\dot{U}_C] = [I_{red}] - [I_{Ch}]$$

$$[U_C] = \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ U'_{C3} \end{bmatrix} ; [I_{red}] = \begin{bmatrix} I_{red1} \\ I_{red1} \\ I_{red1} \\ I_{red1} \\ I_{red1} \\ I_{red1} \end{bmatrix} ; [I_{Ch}] = \begin{bmatrix} I_{d3} + I_{d2} + I_{d1} \\ I_{d3} + I_{d2} \\ I_{d3} \\ -I_{d6} - I_{d5} - I_{d4} \\ -I_{d6} - I_{d5} \\ -I_{d6} \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

$$[C] = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6]$$

Les figures II.4.* montrent les performances de la cascade un redresseur MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - MAS. Le redresseur MLI à deux niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.05A$).

Les tensions continues du pont capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont complètement déséquilibrées et non égales (Fig II.4.a), et par conséquent la tension de sortie de l'onduleur est instable (Fig II.4.b). La fréquence du couple électromagnétique développé par la machine asynchrone est trois fois celle de la tension de sortie de l'onduleur (Fig II.4.c). Les courants de réseaux suivent leurs références sinusoïdaux (Fig II.4.d). Les courants d'entrés de l'onduleur à sept niveaux sont pratiquement inversés par paire ($I_{d1} = -I_{d4}$, $I_{d2} = -I_{d5}$, $I_{d3} = -I_{d6}$), et la valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle (Fig II.4.e). La figure II.4.f montre la possibilité d'inversion du sens de rotation de la machine asynchrone. La figure II.4.g présente le courant absorbé par la machine asynchrone triphasée qui a pratiquement la forme sinusoïdale.

- Simulation numérique

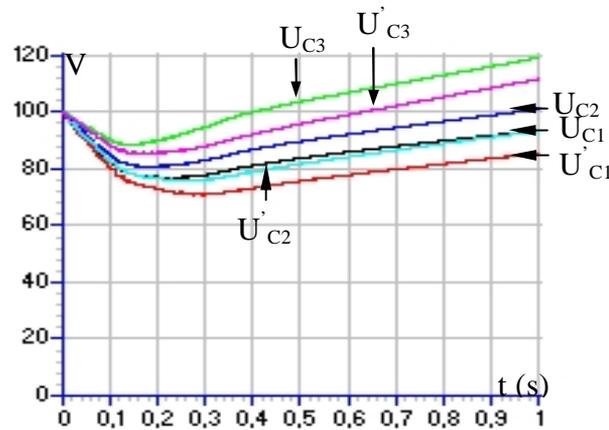


Fig.II.4.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

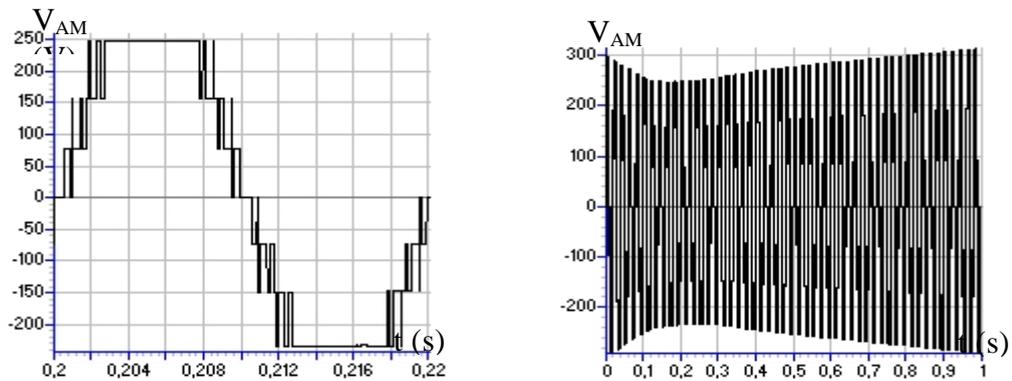


Fig.II.4.b. Tension de sortie de l'onduleur

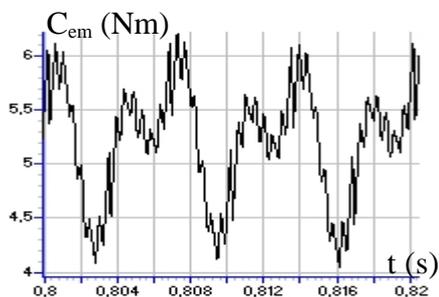


Fig.II.4.c. Couple électromagnétique de la machine asynchrone sa référence

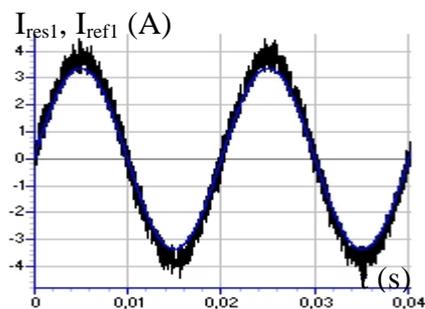


Fig.II.4.d. Courant du réseau et sa référence

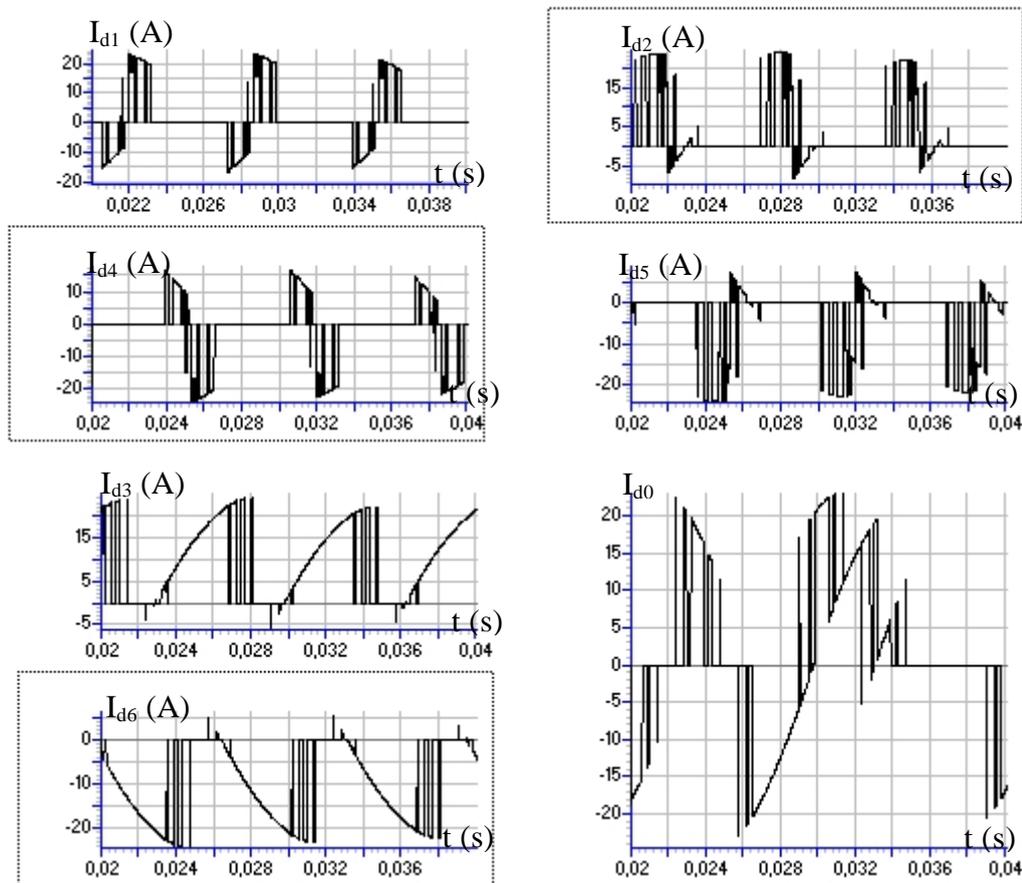


Fig.II.4.e. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

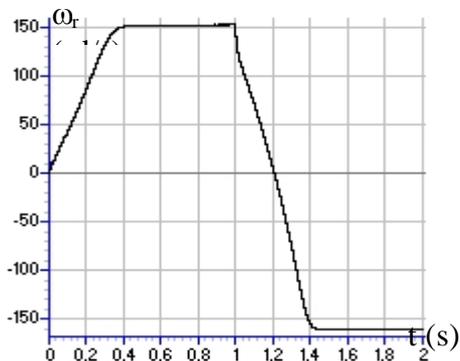


Fig.II.4.f. Vitesse de la machine asynchrone

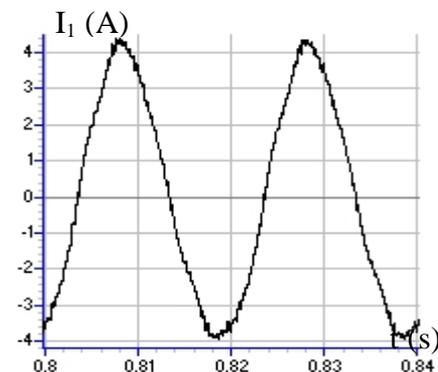


Fig.II.4.g. Courant absorbé par la MAS

I.3. Cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

La structure de cette cascade est présentée dans la figure II.5 [Gheraia 2002.2].

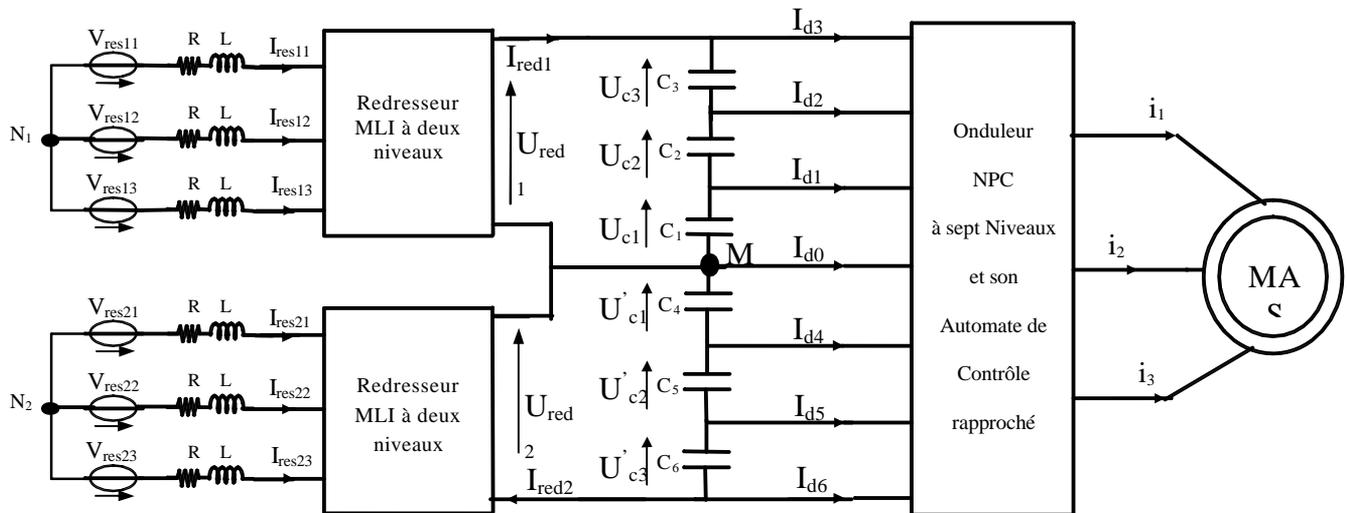


Fig.II.5. cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
 ($V_{res-ef}=110V$, $R=0.25\Omega$, $L=10\text{ mH}$, $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=60mF$)

I.3.1. Filtre capacitif : Le modèle mathématique du filtre capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux est donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases}
 C_1 \cdot \frac{d U_{C1}}{dt} = I_{red1} - I_{d3} - I_{d2} - I_{d1} \\
 C_2 \cdot \frac{d U_{C2}}{dt} = I_{red1} - I_{d3} - I_{d2} \\
 C_3 \cdot \frac{d U_{C3}}{dt} = I_{red1} - I_{d3} \\
 C_4 \cdot \frac{d U'_{C1}}{dt} = I_{red2} + I_{d6} + I_{d5} + I_{d4} \\
 C_5 \cdot \frac{d U'_{C2}}{dt} = I_{red2} + I_{d6} + I_{d5} \\
 C_6 \cdot \frac{d U'_{C3}}{dt} = I_{red2} + I_{d6}
 \end{cases} \tag{II.8}$$

Sous forme matricielle, on peut écrire comme suit :

$$[C] \cdot [\dot{U}_C] = [I_{red}] - [I_{Ch}]$$

$$[U_C] = \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ U'_{C3} \end{bmatrix}; [I_{red}] = \begin{bmatrix} I_{red1} \\ I_{red1} \\ I_{red1} \\ I_{red2} \\ I_{red2} \\ I_{red2} \end{bmatrix}; [I_{Ch}] = \begin{bmatrix} I_{d3} + I_{d2} + I_{d1} \\ I_{d3} + I_{d2} \\ I_{d3} \\ -I_{d6} - I_{d5} - I_{d4} \\ -I_{d6} - I_{d5} \\ -I_{d6} \end{bmatrix} \tag{II.9}$$

$$[C] = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6]$$

Les figures II.6.* montrent les performances de la cascade : deux redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - MAS. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$). Les tensions continues du pont capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont instables (Fig II.6.a). Ces tensions sont pratiquement égales par paire ($U_{C1}=U'_{C1}$, $U_{C2}=U'_{C2}$, $U_{C3}=U'_{C3}$) (Fig II.6.b). La tension de sortie de l'onduleur est instable mais symétrique (Fig II.6.c). La fréquence du couple électromagnétique développé par la machine asynchrone est six fois celle de la tension de sortie de l'onduleur (Fig II.6.d). Les courants du réseau suivent leurs références sinusoidaux (Fig II.6.e). Les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont pratiquement inversés par paire ($I_{d1} = -I_{d4}$, $I_{d2} = -I_{d5}$, $I_{d3} = -I_{d6}$), et la valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle (Fig II.6.f). La figure II.6.g montre la possibilité d'inversion du sens de rotation de la machine asynchrone. La figure II.5.h présente le courant absorbé par la machine asynchrone triphasée qui a pratiquement la forme sinusoidale.

- Simulation numérique

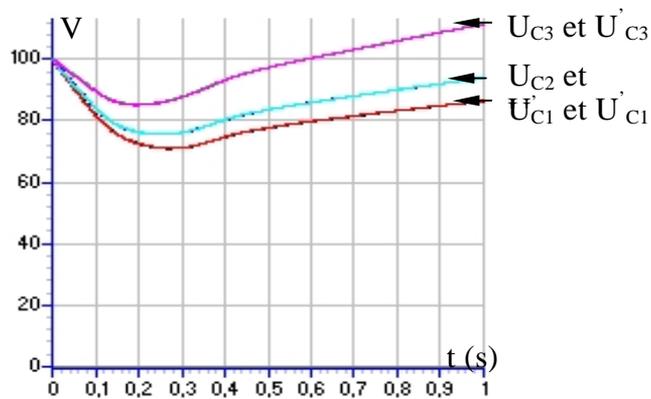


Fig.II.6.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

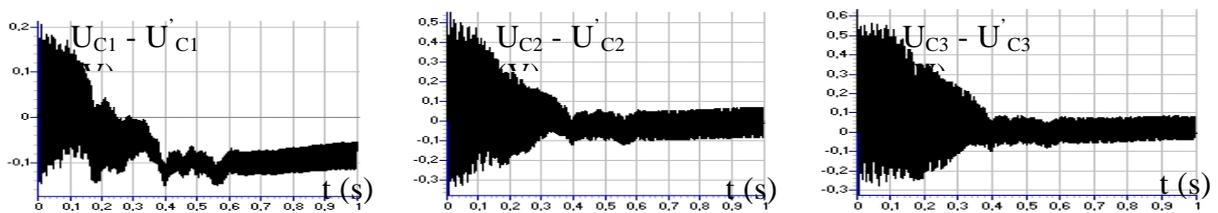


Fig.II.6.b. Différences de tensions $U_{C1}-U'_{C1}$, $U_{C2}-U'_{C2}$, $U_{C3}-U'_{C3}$

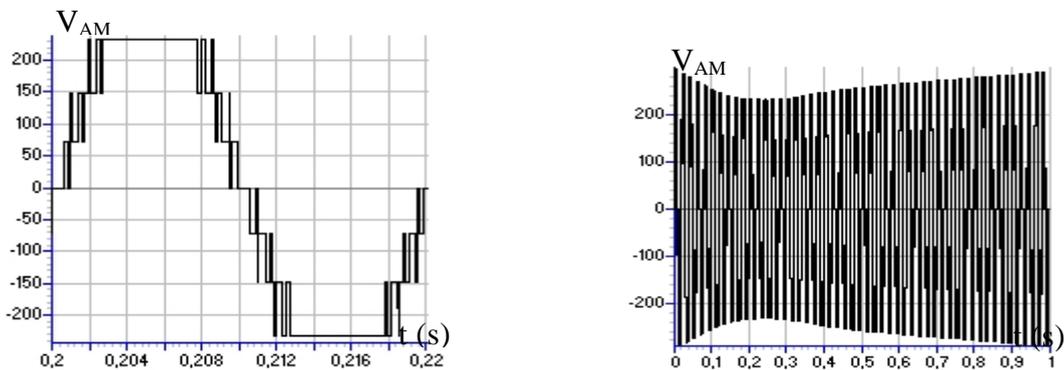


Fig.II.6.c. Tension de sortie de l'onduleur

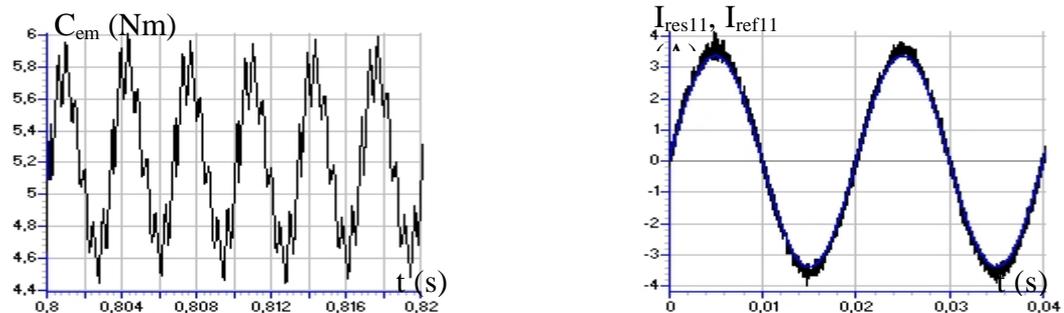


Fig.II.6.d. Couple électromagnétique de la machine asynchrone sa référence

Fig.II.6.e. Courant du réseau et sa référence

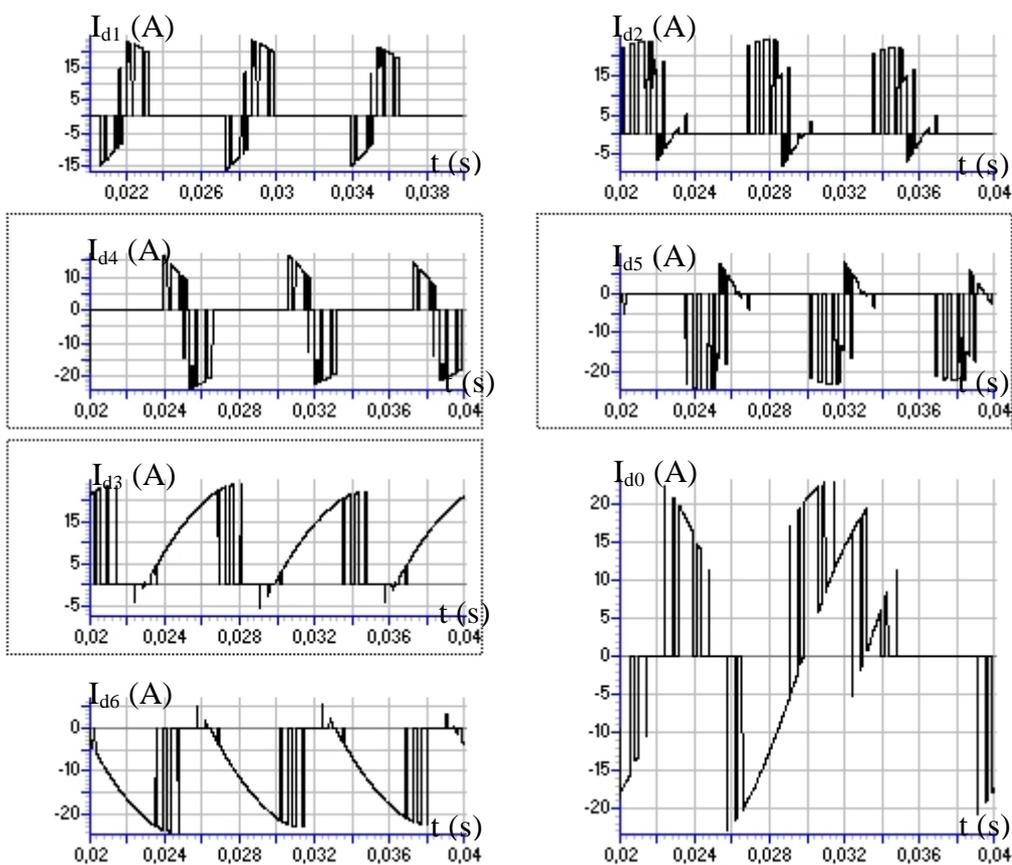


Fig.II.6.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

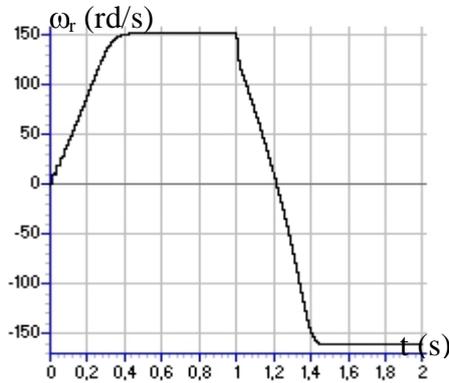


Fig.II.6.g. Vitesse de la machine asynchrone

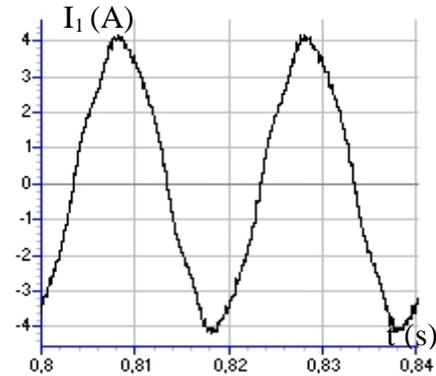


Fig.II.6.h. Courant absorbé par la MAS

I.4. Cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

I.4.1. Structure série : Cette cascade est présentée dans la figure II.7.

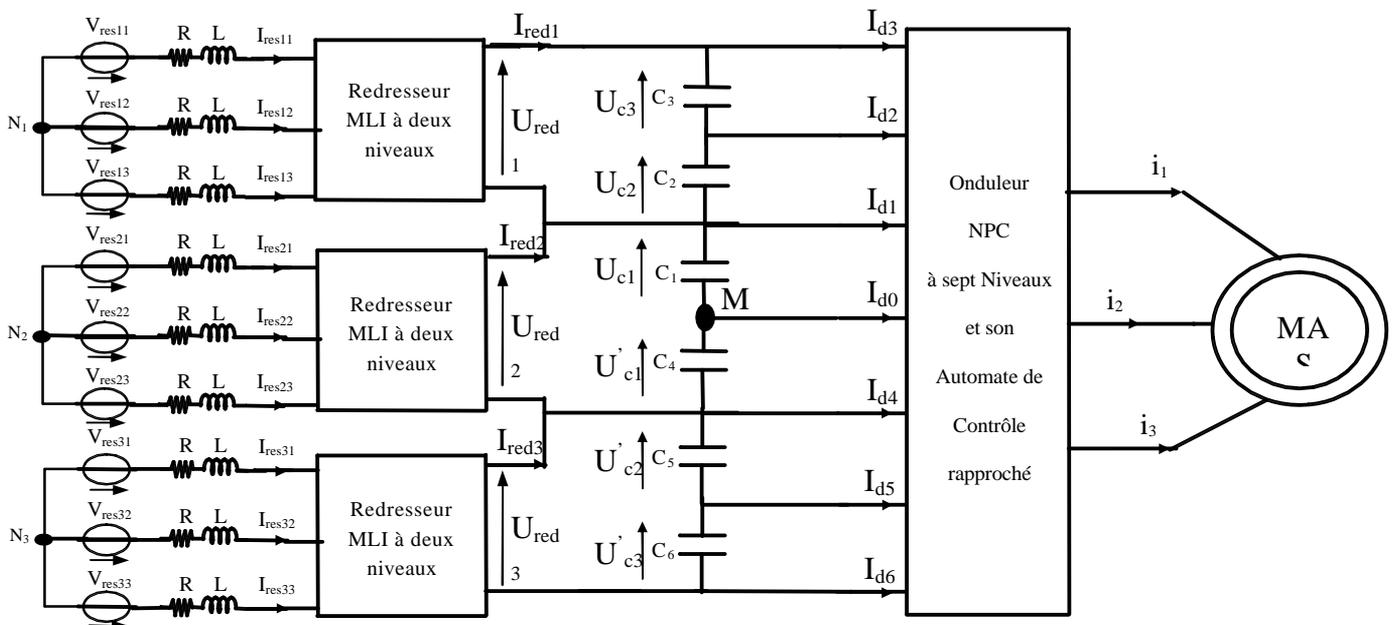


Fig.II.7. cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC sept niveaux - MAS

$$(V_{\text{res-eff}}=(220/3)V, R=0.25\Omega, L=10\text{ mH}, C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=60\text{mF})$$

I.4.1.1. Filtre capacitif : Le modèle mathématique du filtre capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux est donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases}
 C_1 \cdot \frac{d U_{C1}}{dt} = I_{red2} - I_{d3} - I_{d2} - I_{d1} \\
 C_2 \cdot \frac{d U_{C2}}{dt} = I_{red1} - I_{d3} - I_{d2} \\
 C_3 \cdot \frac{d U_{C3}}{dt} = I_{red1} - I_{d3} \\
 C_4 \cdot \frac{d U'_{C1}}{dt} = I_{red2} + I_{d6} + I_{d5} + I_{d4} \\
 C_5 \cdot \frac{d U'_{C2}}{dt} = I_{red3} + I_{d6} + I_{d5} \\
 C_6 \cdot \frac{d U'_{C3}}{dt} = I_{red3} + I_{d6}
 \end{cases} \quad (II.10)$$

Sous forme d'état, on peut écrire comme suit :

$$[C] \cdot [\dot{U}_C] = [I_{red}] - [I_{Ch}]$$

$$[U_C] = \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ U'_{C3} \end{bmatrix} ; [I_{red}] = \begin{bmatrix} I_{red2} \\ I_{red1} \\ I_{red1} \\ I_{red2} \\ I_{red3} \\ I_{red3} \end{bmatrix} ; [I_{Ch}] = \begin{bmatrix} I_{d3} + I_{d2} + I_{d1} \\ I_{d3} + I_{d2} \\ I_{d3} \\ -I_{d6} - I_{d5} - I_{d4} \\ -I_{d6} - I_{d5} \\ -I_{d6} \end{bmatrix} \quad (II.11)$$

$$[C] = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6]$$

Les figures II.8.* montrent les performances de la cascade : trois redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - MAS. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$).

Les tensions continues du pont capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont instables (Fig II.8.a). Ces tensions sont pratiquement égales par paire ($U_{C1}=U'_{C1}$, $U_{C2}=U'_{C2}$, $U_{C3}=U'_{C3}$) (Fig II.8.b). La tension de sortie de l'onduleur est instable mais symétrique (Fig II.8.c). La fréquence du couple électromagnétique développé par la machine asynchrone est six fois celle de la tension de sortie de l'onduleur (Fig II.8.d). Les courants du réseau suivent leurs références sinusoïdaux (Fig II.8.e). Les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont pratiquement inversés par paire ($I_{d1}=-I_{d4}$, $I_{d2}=-I_{d5}$, $I_{d3}=-I_{d6}$), et la valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle (Fig II.8.f). La figure II.8.g montre la possibilité d'inversion du sens de rotation de la machine asynchrone. La figure II.8.h présente le courant absorbé par la machine asynchrone triphasée qui a pratiquement la forme sinusoïdale.

• Simulation numérique

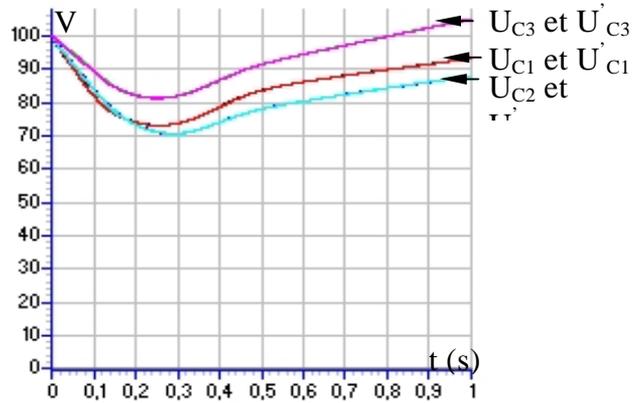


Fig. II.8.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

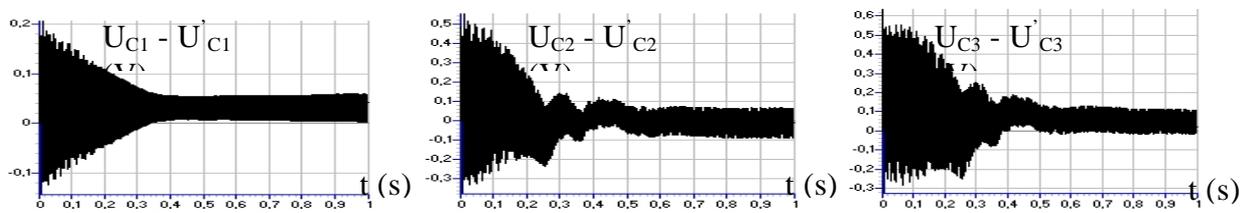


Fig. II.8.b. Différences de tensions $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$, $U_{C3} - U'_{C3}$

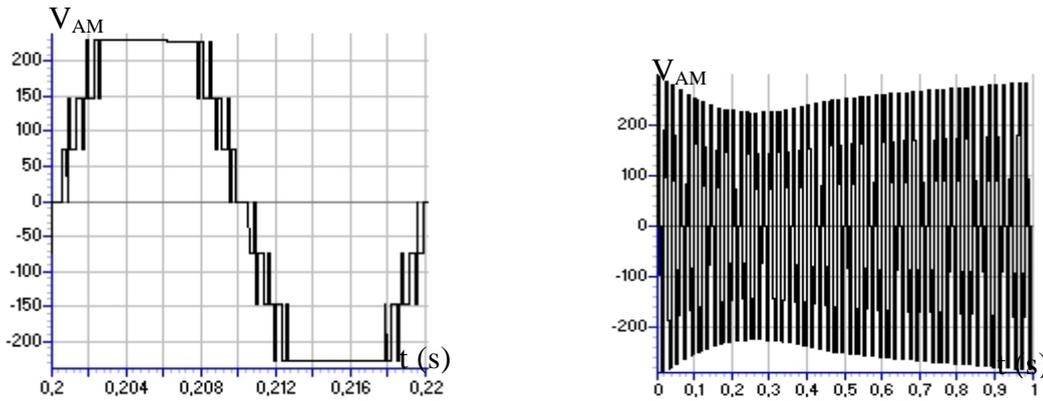


Fig. II.8.c. Tension de sortie de l'onduleur

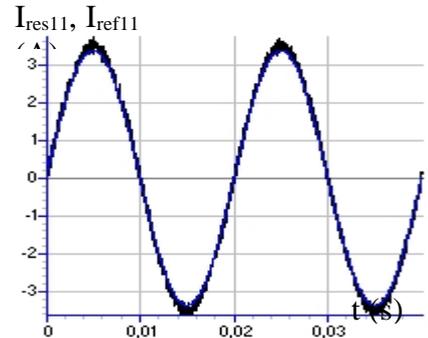
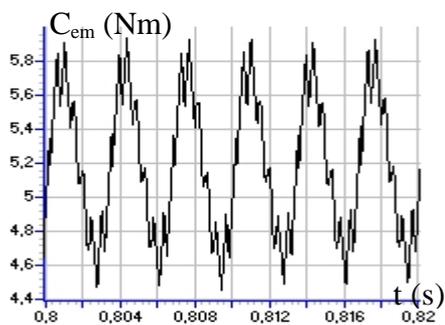


Fig. II.8.d. Couple électromagnétique de la machine asynchrone Fig. II.8.e. Courant du réseau et sa référence

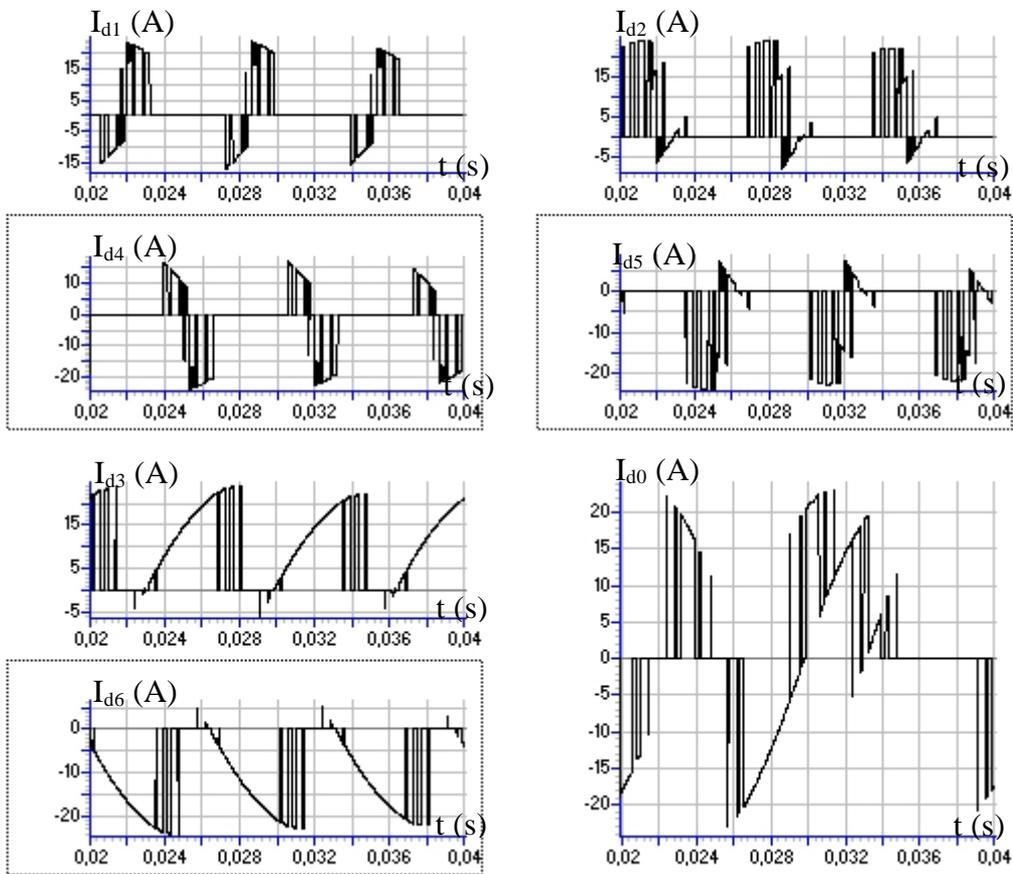


Fig. II.8.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

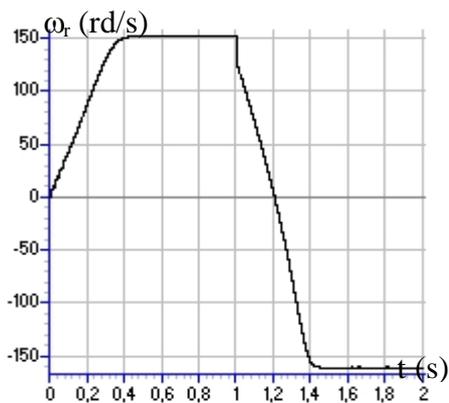


Fig.II.8.g. Vitesse de la machine asynchrone

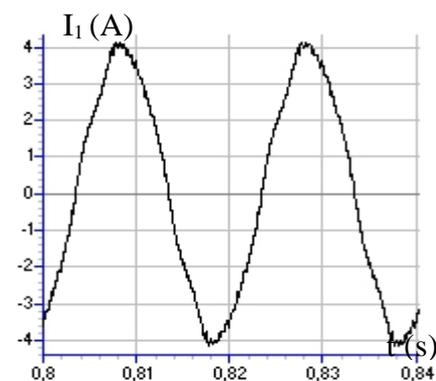


Fig.II.8.h. Courant absorbé par la MAS

I.4.2. Structure imbriquée : La cascade correspondante à cette structure est présentée dans la figure II.9 [Gheraia 2003].

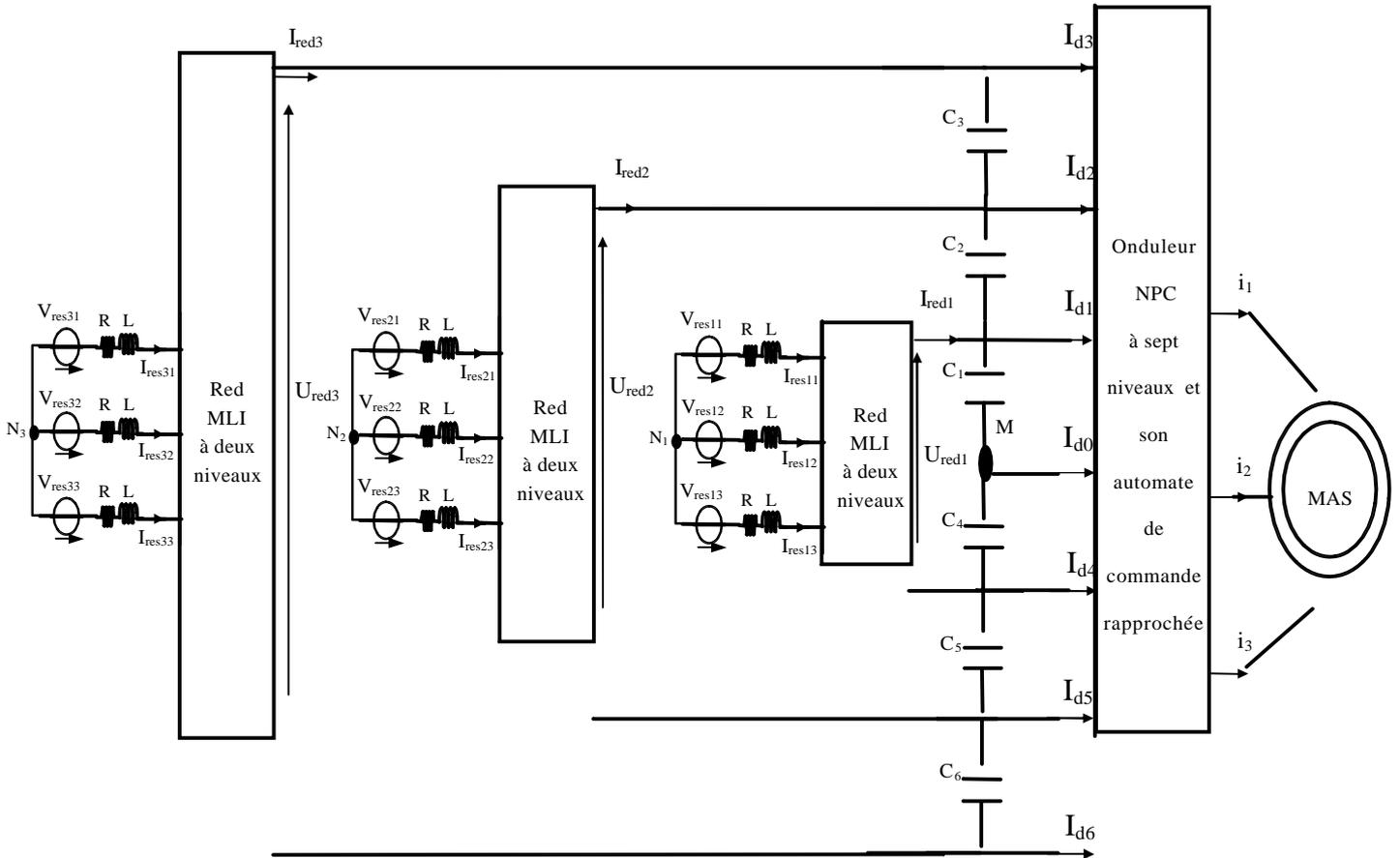


Fig.II.9. cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS ($V_{res1-eff}=(220/3)V$, $V_{res2-eff}=(220*2/3)V$, $V_{res3-eff}=220V$, $R=0.25 \Omega$, $L=10 \text{ mH}$, $C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6= 60 \text{ mF}$)

I.4.2.1. Filtre capacitif : Le modèle mathématique du filtre capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux est donné par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \cdot \frac{d U_{C1}}{dt} = I_{red1} + I_{red2} + I_{red3} - I_{d3} - I_{d2} - I_{d1} \\ C_2 \cdot \frac{d U_{C2}}{dt} = I_{red1} + I_{red2} - I_{d3} - I_{d2} \\ C_3 \cdot \frac{d U_{C3}}{dt} = I_{red1} - I_{d3} \\ C_4 \cdot \frac{d U'_{C1}}{dt} = I_{red1} + I_{red2} + I_{red3} + I_{d6} + I_{d5} + I_{d4} \\ C_5 \cdot \frac{d U'_{C2}}{dt} = I_{red1} + I_{red2} + I_{d6} + I_{d5} \\ C_6 \cdot \frac{d U'_{C3}}{dt} = I_{red1} + I_{d6} \end{array} \right. \quad (II.12)$$

Sous forme matricielle, on peut écrire comme suit :

$$[C] \cdot [\dot{U}_C] = [I_{red}] - [I_{Ch}]$$

$$[U_C] = \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ U'_{C3} \end{bmatrix}; [I_{red}] = \begin{bmatrix} I_{red1} + I_{red2} + I_{red3} \\ I_{red1} + I_{red2} \\ I_{red1} \\ I_{red1} + I_{red2} + I_{red3} \\ I_{red1} + I_{red2} \\ I_{red1} \end{bmatrix}; [I_{Ch}] = \begin{bmatrix} I_{d3} + I_{d2} + I_{d1} \\ I_{d3} + I_{d2} \\ I_{d3} \\ -I_{d6} - I_{d5} - I_{d4} \\ -I_{d6} - I_{d5} \\ -I_{d6} \end{bmatrix} \quad (II.13)$$

$$[C] = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6]$$

Les figures II.10.* montrent les performances de la cascade : trois redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée - MAS (structure imbriquée). Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.05A$).

Les tensions continues du pont capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont instables (Fig II.10.a). Ces tensions sont pratiquement égales par paire ($U_{C1}=U'_{C1}$, $U_{C2}=U'_{C2}$, $U_{C3}=U'_{C3}$) (Fig II.10.b). La tension de sortie de l'onduleur est instable mais symétrique (Fig II.10.c). La fréquence du couple électromagnétique développé par la machine asynchrone est six fois celle de la tension de sortie de l'onduleur (Fig II.10.d). Les courants des réseaux suivent leurs références sinusoïdaux (Fig II.10.e). Les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont pratiquement inversés par paire ($I_{d1}=-I_{d4}$, $I_{d2}=-I_{d5}$, $I_{d3}=-I_{d6}$), et la valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle (Fig II.10.f). La figure II.10.g montre la possibilité d'inversion du sens de rotation de la machine asynchrone. La figure II.10.h présente le courant absorbé par la machine asynchrone qui a pratiquement la forme sinusoïdale.

- **Simulation numérique**

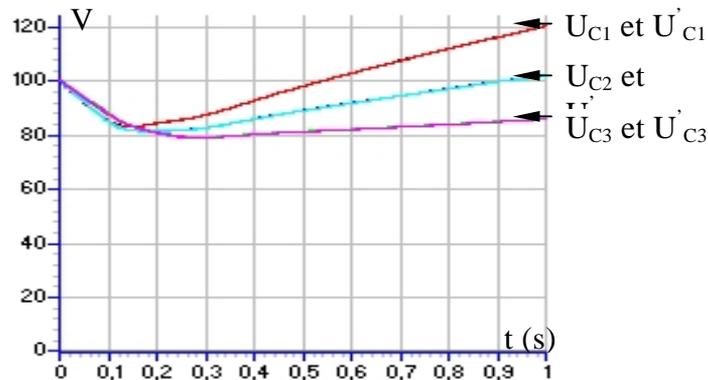


Fig.II.10.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

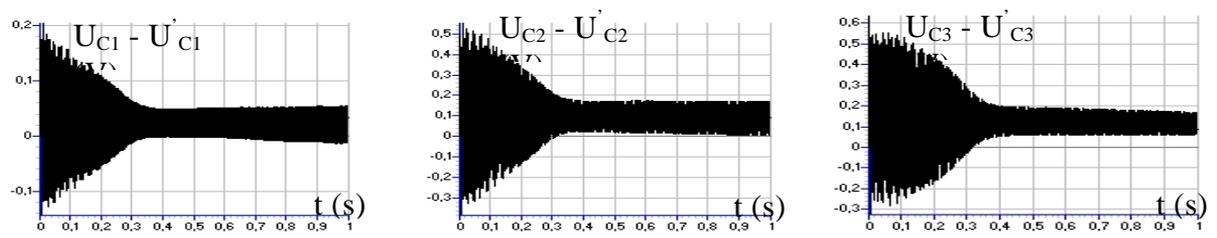


Fig. II.10.b. Différences de tensions $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$, $U_{C3} - U'_{C3}$

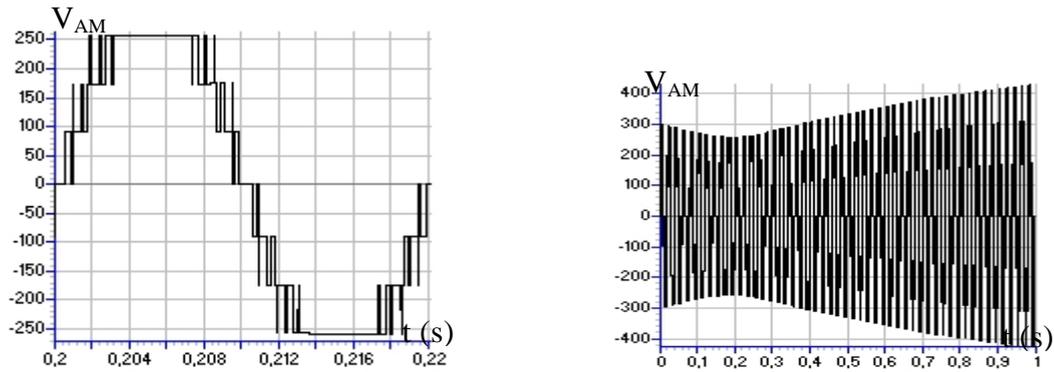


Fig. II.10.c. Tension de sortie de l'onduleur

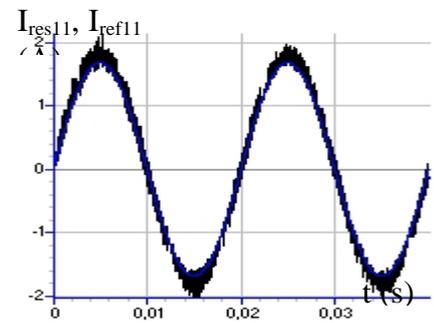
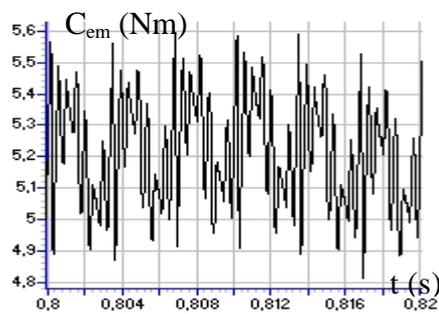
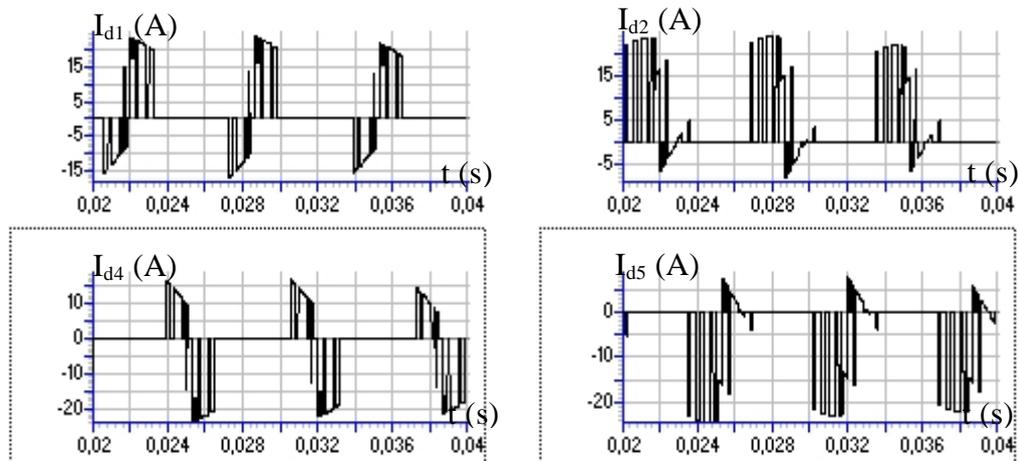


Fig. II.10.d. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

Fig. II.10.e. Courant du réseau et sa référence



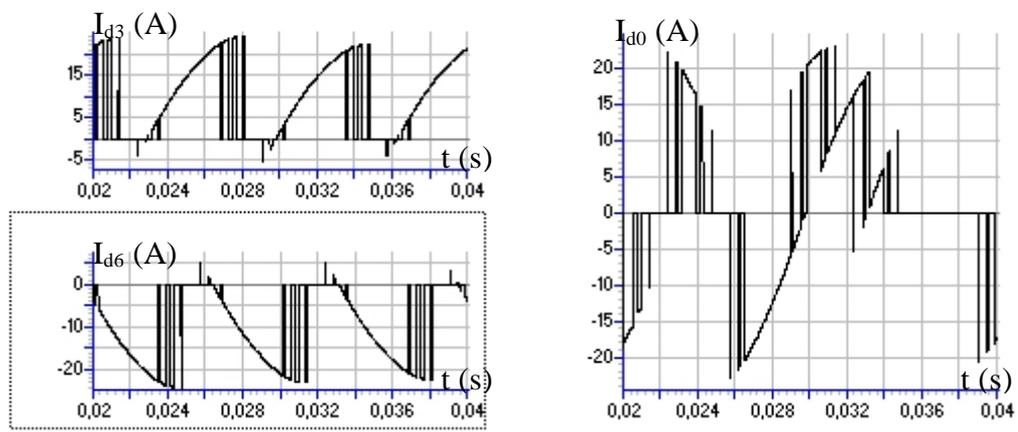


Fig.II.10.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

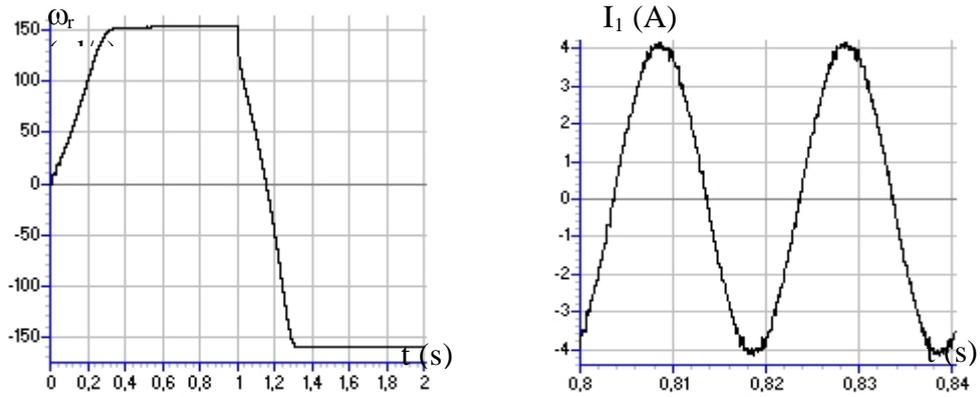


Fig.II.10.g. Vitesse de la machine asynchrone Fig.II.10.h. Courant absorbé par la MAS

I.5. Cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

La structure de cette cascade est présentée dans la figure II.11.

I.5.1. Filtre capacitif : Le modèle mathématique du filtre capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux est donné par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \cdot \frac{d U_{C1}}{dt} = I_{red1} - I_{d3} - I_{d2} - I_{d1} \\ C_2 \cdot \frac{d U_{C2}}{dt} = I_{red2} - I_{d3} - I_{d2} \\ C_3 \cdot \frac{d U_{C3}}{dt} = I_{red3} - I_{d3} \\ C_4 \cdot \frac{d U'_{C1}}{dt} = I_{red4} + I_{d6} + I_{d5} + I_{d4} \\ C_5 \cdot \frac{d U'_{C2}}{dt} = I_{red5} + I_{d6} + I_{d5} \\ C_6 \cdot \frac{d U'_{C3}}{dt} = I_{red6} + I_{d6} \end{array} \right. \quad (II.14)$$

$$[C] \cdot [\dot{U}_C] = [I_{red}] - [I_{Ch}]$$

$$[U_C] = \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ U'_{C3} \end{bmatrix}; [I_{red}] = \begin{bmatrix} I_{red1} \\ I_{red2} \\ I_{red3} \\ I_{red4} \\ I_{red5} \\ I_{red6} \end{bmatrix}; [I_{Ch}] = \begin{bmatrix} I_{d3} + I_{d2} + I_{d1} \\ I_{d3} + I_{d2} \\ I_{d3} \\ -I_{d6} - I_{d5} - I_{d4} \\ -I_{d6} - I_{d5} \\ -I_{d6} \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

$$[C] = [C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6]$$

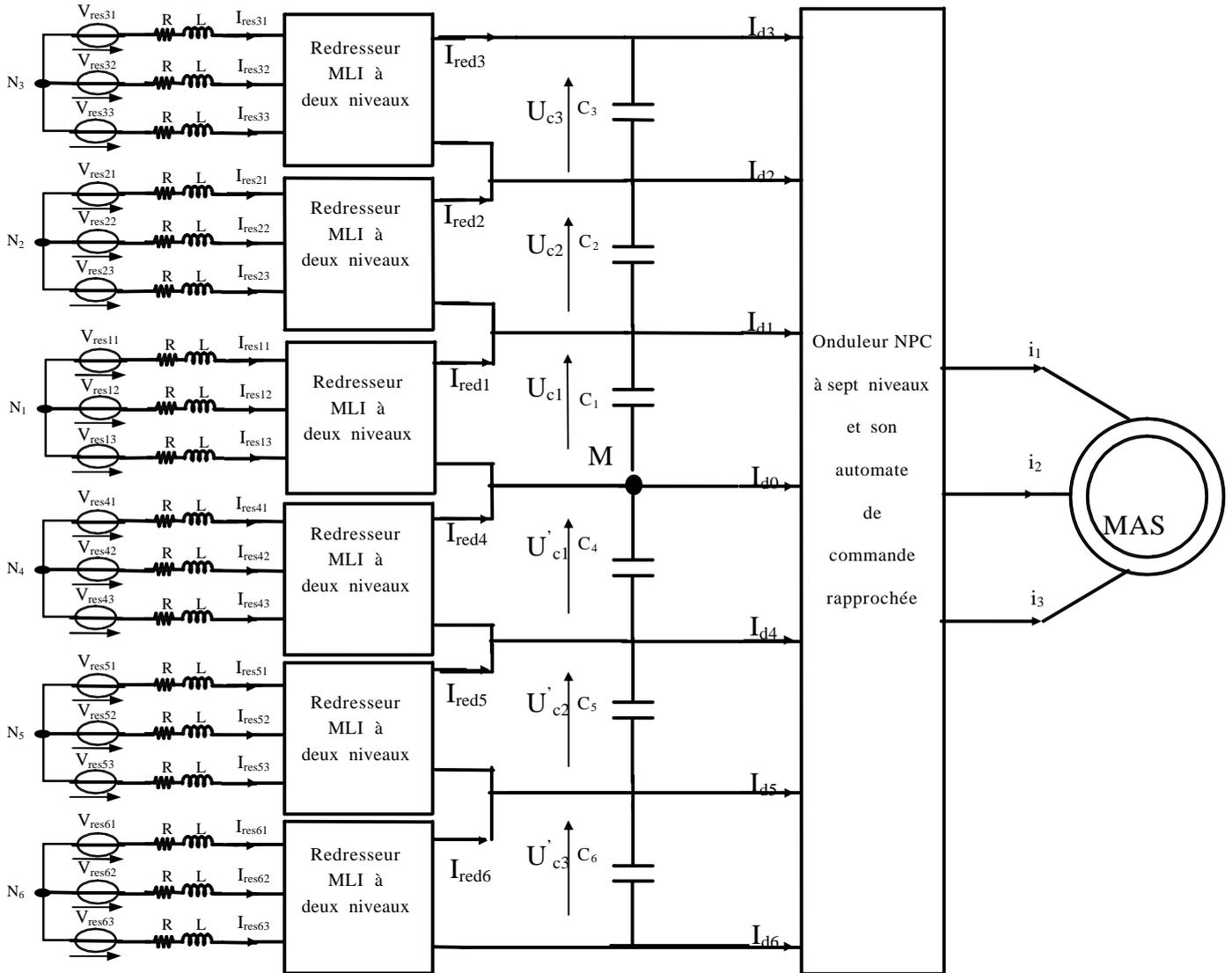


Fig.II.11. cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
 $(V_{res-eff}=(220/6)V, R=0.25 \Omega, L=10 \text{ mH}, C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=60 \text{ mF})$

Les figures II.12.* montrent les performances de la cascade : six redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée - MAS. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$).

Les tensions continues du pont capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont instables (Fig II.12.a). Ces tensions sont pratiquement égales par paire ($U_{C1}=U'_{C1}$, $U_{C2}=U'_{C2}$, $U_{C3}=U'_{C3}$) (Fig II.12.b). La tension de sortie de l'onduleur est instable mais symétrique (Fig II.12.c). La fréquence du couple électromagnétique développé par la machine asynchrone est six fois celle de la tension de sortie de l'onduleur (Fig II.12.d). Les courants des réseaux suivent leurs références sinusoïdaux (Fig II.12.e). Les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont pratiquement inversés par paire ($I_{d1} = -I_{d4}$, $I_{d2} = -I_{d5}$, $I_{d3} = -I_{d6}$), et la valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle (Fig II.12.f). La figure II.12.g montre la possibilité d'inversion du sens de rotation de la machine asynchrone. La figure II.12.h présente le courant absorbé par la machine asynchrone qui a pratiquement la forme sinusoïdale.

- Simulation numérique

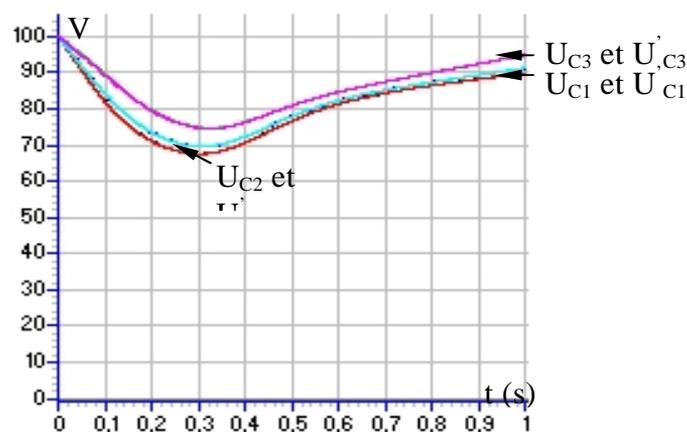


Fig.II.12.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

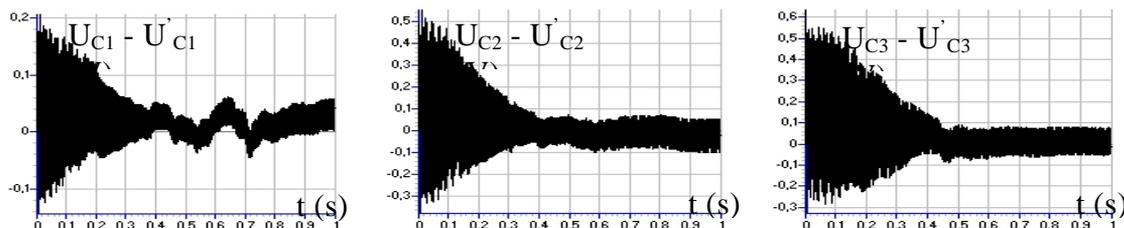


Fig.II.12.b. Différences de tensions $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$, $U_{C3} - U'_{C3}$

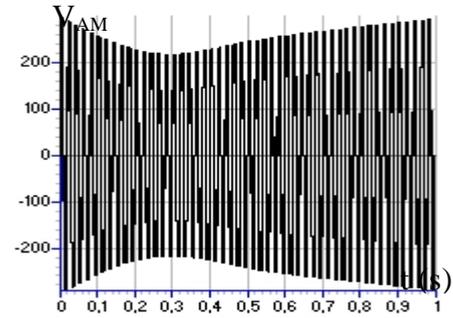
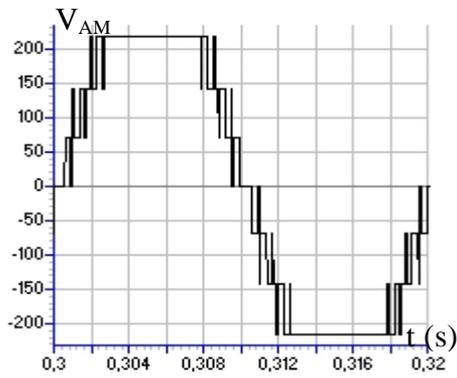


Fig.II.12.c. Tension de sortie de l'onduleur

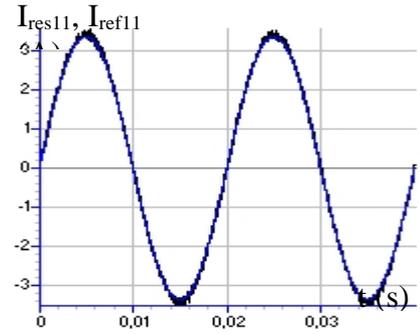
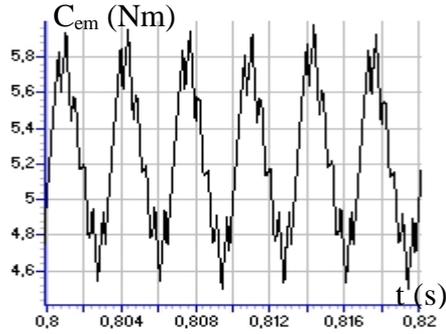


Fig.II.12.d. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

Fig.II.12.e. Courant du réseau et sa référence

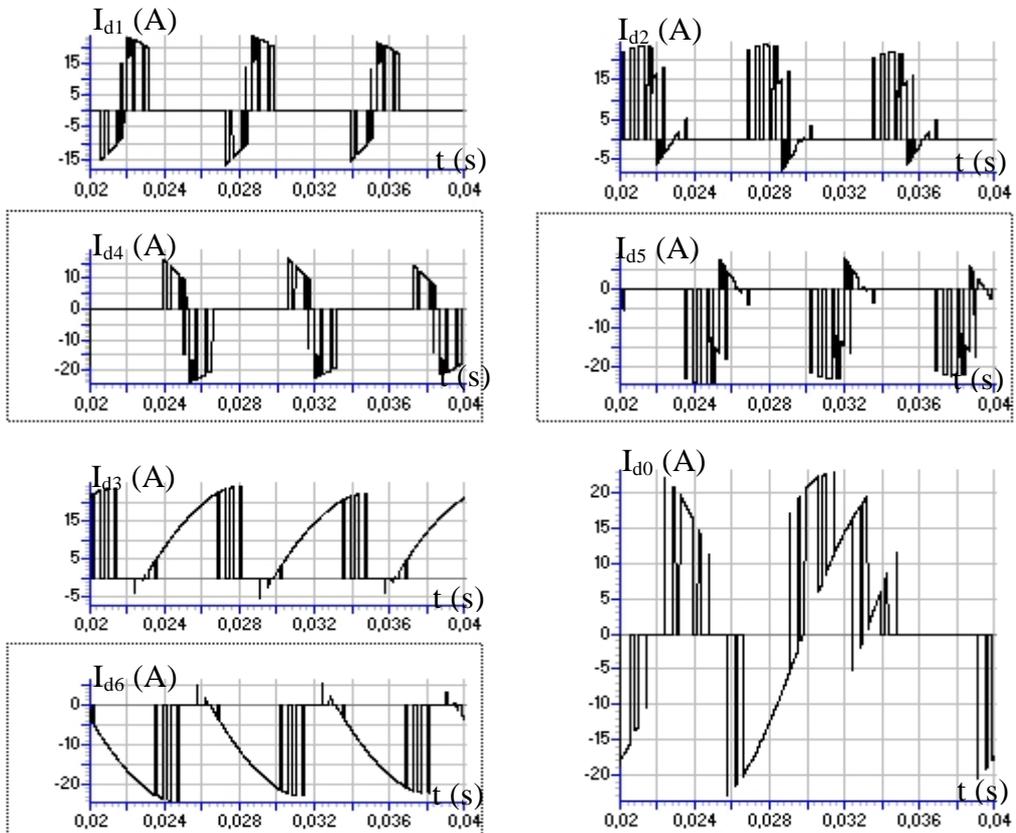


Fig.II.12.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

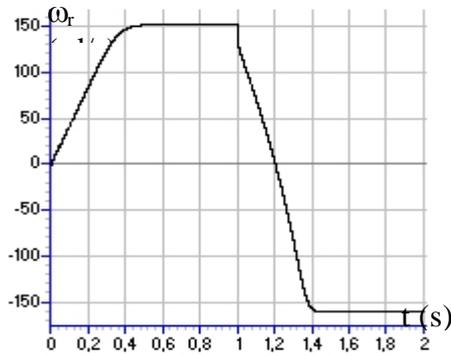


Fig.II.12.g. Vitesse de la machine asynchrone

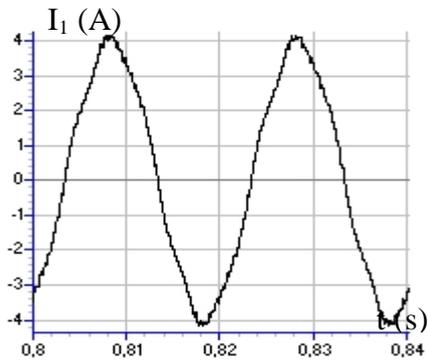


Fig.II.12.h. Courant absorbé par la MAS

II. Cascades redresseurs de courant à MLI triphasés à trois niveaux - onduleur de tension triphasé à sept niveaux

On étudiera dans cette partie les cascades multiniveaux constituées de redresseurs de courant triphasés à trois niveaux, et de l'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC. Ces cascades sont appliquées à la conduite de la machine asynchrone triphasée.

II.1. Utilisation des onduleurs à trois niveaux en redresseur de courant

Les onduleurs à trois niveaux sont réversibles par leur structure. Ils peuvent fonctionner en onduleur et ainsi transférer de l'énergie de la source de tension continue à la source de courant alternative où bien fonctionner en redresseur et assurer alors le transfert énergétique dans le sens inverse [Berkouk 95.1]. La figure II.13 montre le redresseur de courant triphasé à trois niveaux. On adopte la convention récepteur pour la source de tension continue. Les modèles élaborés pour les onduleurs à trois niveaux sont valables bien sur pour ces redresseurs à condition de tenir compte de ces nouvelles conventions. Toutes les stratégies proposées pour l'onduleur à trois niveaux sont valables pour ces redresseurs.

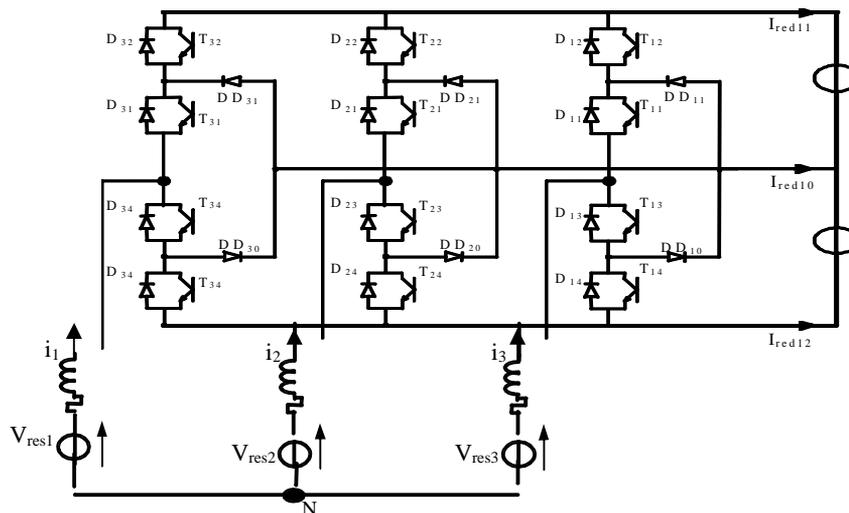


Fig.II.13. redresseur de courant MLI à trois niveaux

II.2. Cascade un redresseur MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux -MAS
 La structure de cette cascade est présentée dans la figure II.14.

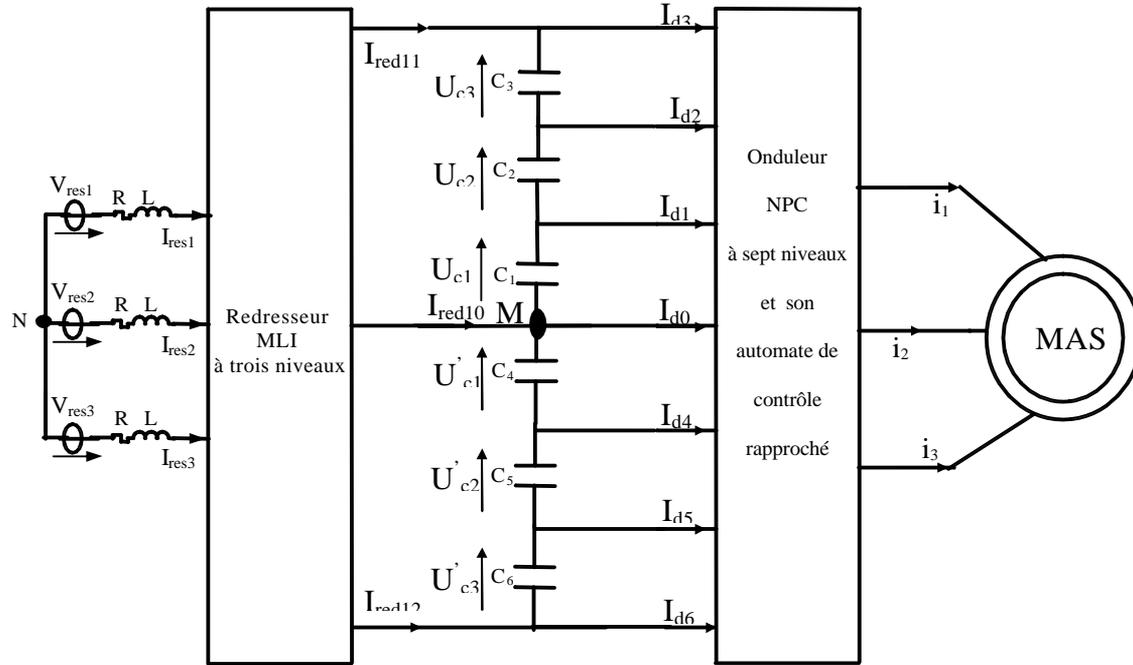


Fig.II.14. cascade un redresseur MLI à trois niveaux - onduleur NPC sept niveaux - MAS
 ($V_{res-eff}=220V$, $R=0.25 \Omega$, $L=10 \text{ mH}$, $C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6= 60 \text{ mF}$)

II.2.1. Filtre capacitif : Le modèle mathématique du filtre capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux est donné par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 C_1 \cdot \frac{d U_{C1}}{dt} = I_{red11} - I_{d3} - I_{d2} - I_{d1} \\
 C_2 \cdot \frac{d U_{C2}}{dt} = I_{red11} - I_{d3} - I_{d2} \\
 C_3 \cdot \frac{d U_{C3}}{dt} = I_{red11} - I_{d3} \\
 C_4 \cdot \frac{d U'_{C1}}{dt} = - I_{red12} + I_{d6} + I_{d5} + I_{d4} \\
 C_5 \cdot \frac{d U'_{C2}}{dt} = - I_{red12} + I_{d6} + I_{d5} \\
 C_6 \cdot \frac{d U'_{C3}}{dt} = - I_{red12} + I_{d6}
 \end{array} \right. \quad (II.16)$$

Sous forme d'état, on peut écrire comme suit :

$$[C] \cdot [\dot{U}_C] = [I_{red}] - [I_{Ch}]$$

$$[U_C] = \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ U'_{C3} \end{bmatrix} ; [I_{red}] = \begin{bmatrix} I_{red11} \\ I_{red11} \\ I_{red11} \\ -I_{red12} \\ -I_{red12} \\ -I_{red12} \end{bmatrix} ; [I_{Ch}] = \begin{bmatrix} I_{d3} + I_{d2} + I_{d1} \\ I_{d3} + I_{d2} \\ I_{d3} \\ -I_{d6} - I_{d5} - I_{d4} \\ -I_{d6} - I_{d5} \\ -I_{d6} \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

$$[C] = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6]$$

Les figures II.15.* montrent les performances de la cascade un redresseur MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée - MAS. Le redresseur MLI à trois niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$).

Les tensions continues du pont capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont instables (Fig II.15.a). Ces tensions sont pratiquement égales par paire ($U_{C1}=U'_{C1}$, $U_{C2}=U'_{C2}$, $U_{C3}=U'_{C3}$) (Fig II.15.b). La tension de sortie de l'onduleur est instable mais symétrique (Fig II.15.c). La fréquence du couple électromagnétique développé par la machine asynchrone est six fois celle de la tension de sortie de l'onduleur (Fig II.15.d). Les courants des réseaux suivent leurs références sinusoïdaux (Fig II.15.e). La figure II.15.f présente les courants de sortie du redresseur MLI à trois niveaux. Les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont pratiquement inversés par paire ($I_{d1}=-I_{d4}$, $I_{d2}=-I_{d5}$, $I_{d3}=-I_{d6}$), et la valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle (Fig II.15.g). La figure II.15.h montre la possibilité d'inversion du sens de rotation de la machine asynchrone. La figure II.15.i présente le courant absorbé par la machine asynchrone qui a pratiquement la forme sinusoïdale.

- Simulation numérique

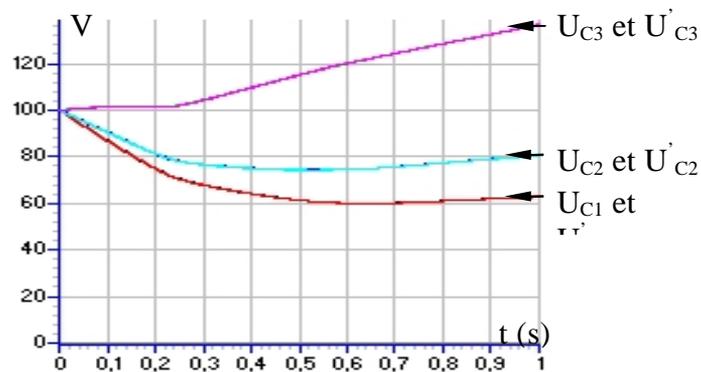


Fig.II.15.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

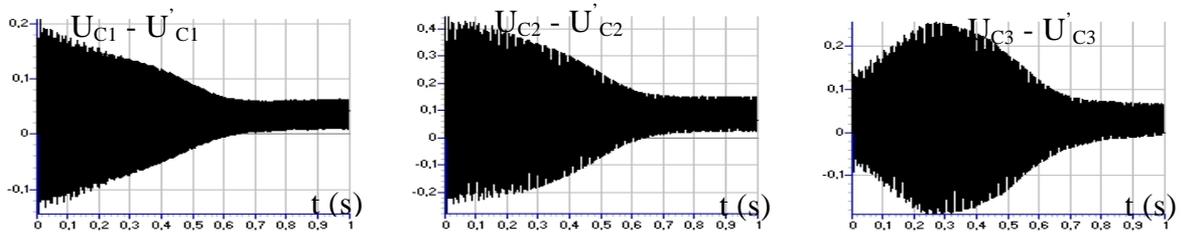


Fig.II.15.b. Différences de tensions $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$, $U_{C3} - U'_{C3}$

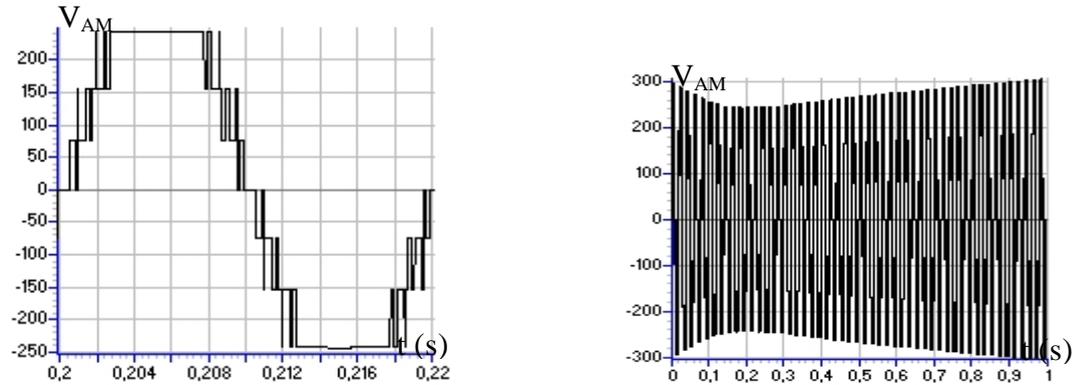


Fig.II.15.c. Tension de sortie de l'onduleur

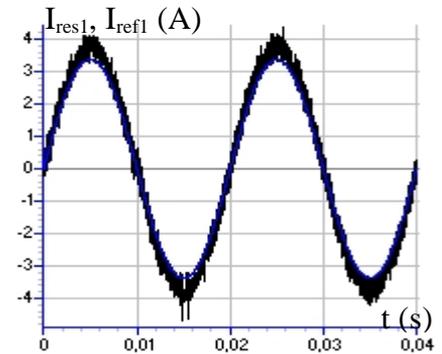
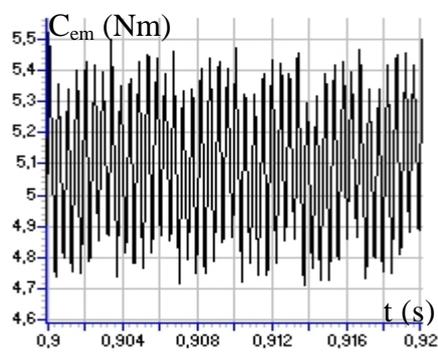


Fig.II.15.d. Couple électromagnétique de la machine asynchrone et sa référence

Fig.II.15.e. Courant du réseau

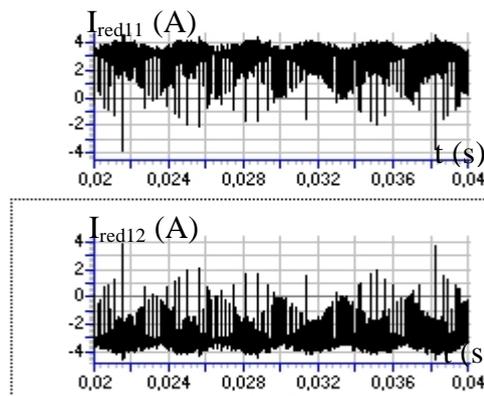


Fig.II.15.f. Courants de sortie du redresseur MLI à trois niveaux

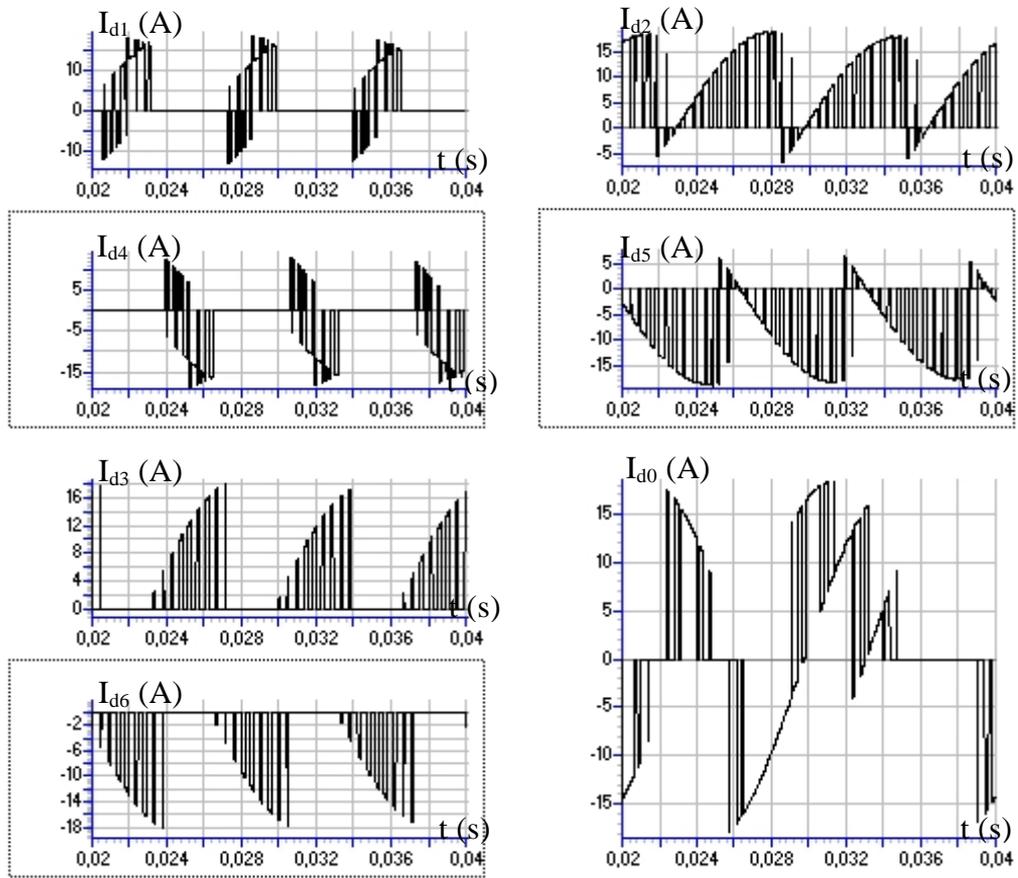


Fig.II.15.g. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

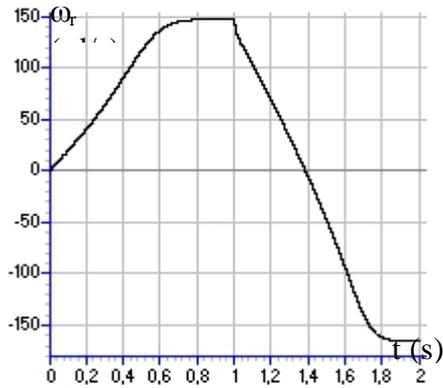


Fig.II.15.h. Vitesse de la machine asynchrone

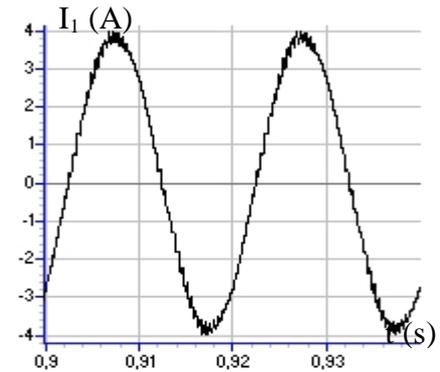


Fig.II.15.i. Courant absorbé par la MAS

II.3. Cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

II.3.1. Structure série : La cascade correspondante à cette structure est donnée par la figure II.16.

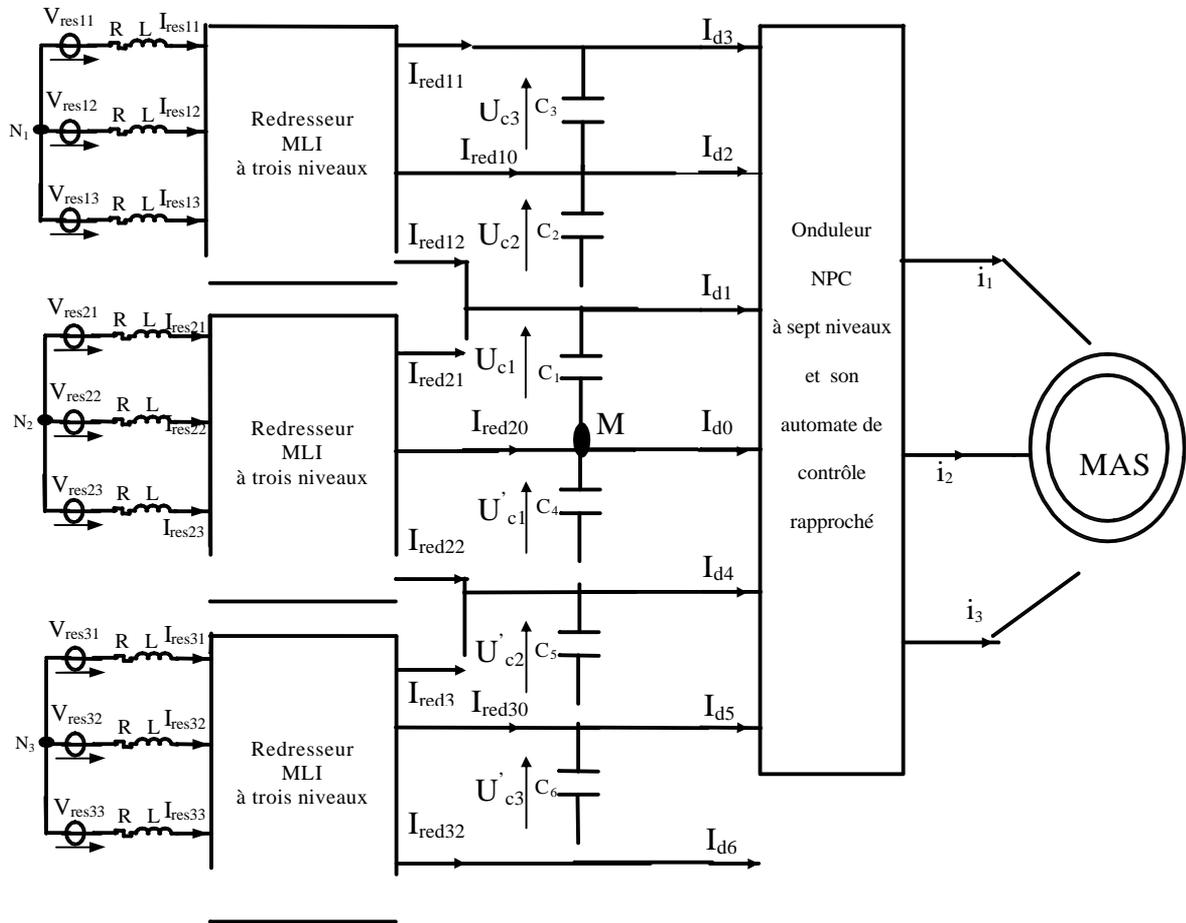


Fig.II.16. cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
 $(V_{res-eff}=(220/3)V, R=0.25 \Omega, L=10 \text{ mH}, C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6= 60 \text{ mF})$

II.3.1.1. Filtre capacitif : Le modèle mathématique du filtre capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux est donné par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \cdot \frac{d U_{C1}}{dt} = I_{red11} + I_{red10} + I_{red12} + I_{red21} - I_{d3} - I_{d2} - I_{d1} \\ C_2 \cdot \frac{d U_{C2}}{dt} = I_{red11} + I_{red10} - I_{d3} - I_{d2} \\ C_3 \cdot \frac{d U_{C3}}{dt} = I_{red11} - I_{d3} \\ C_4 \cdot \frac{d U'_{C1}}{dt} = -I_{red32} - I_{red30} - I_{red31} - I_{red22} + I_{d6} + I_{d5} + I_{d4} \\ C_5 \cdot \frac{d U'_{C2}}{dt} = -I_{red32} - I_{red30} + I_{d6} + I_{d5} \\ C_6 \cdot \frac{d U'_{C3}}{dt} = -I_{red32} + I_{d6} \end{array} \right. \quad (II.18)$$

Sous forme d'état, on peut écrire comme suit :

$$[C] \cdot [\dot{U}_C] = [I_{red}] - [I_{Ch}]$$

$$[U_C] = \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ U'_{C3} \end{bmatrix} ; [I_{red}] = \begin{bmatrix} I_{red11} + I_{red10} + I_{red12} + I_{red21} \\ I_{red11} + I_{red10} \\ I_{red11} \\ -I_{red32} - I_{red30} - I_{red31} - I_{red22} \\ -I_{red32} - I_{red30} \\ -I_{red32} \end{bmatrix} ; [I_{Ch}] = \begin{bmatrix} I_{d3} + I_{d2} + I_{d1} \\ I_{d3} + I_{d2} \\ I_{d3} \\ -I_{d6} - I_{d5} - I_{d4} \\ -I_{d6} - I_{d5} \\ -I_{d6} \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

$$[C] = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4 \ c_5 \ c_6]$$

Les figures II.17.* montrent les performances de la cascade : trois redresseurs MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée - MAS. Les redresseurs MLI à trois niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.001A$).

Les tensions continues du pont capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont instables (Fig II.17.a). Ces tensions sont pratiquement égales par paire ($U_{C1}=U'_{C1}$, $U_{C2}=U'_{C2}$, $U_{C3}=U'_{C3}$) (Fig II.17.b). La tension de sortie de l'onduleur est instable mais symétrique (Fig II.17.c). La fréquence du couple électromagnétique développé par la machine asynchrone est six fois celle de la tension de sortie de l'onduleur (Fig II.17.d). Les courants des réseaux suivent leurs références sinusoïdaux (Fig II.17.e). La figure II.17.f présente les courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux. Les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont pratiquement inversés par paire ($I_{d1}=-I_{d4}$, $I_{d2}=-I_{d5}$, $I_{d3}=-I_{d6}$), et la valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle (Fig II.17.g). La figure II.17.h montre la possibilité d'inversion du sens de rotation de la machine asynchrone. La figure II.17.i présente le courant absorbé par la machine asynchrone qui a pratiquement la forme sinusoïdale.

- Simulation numérique

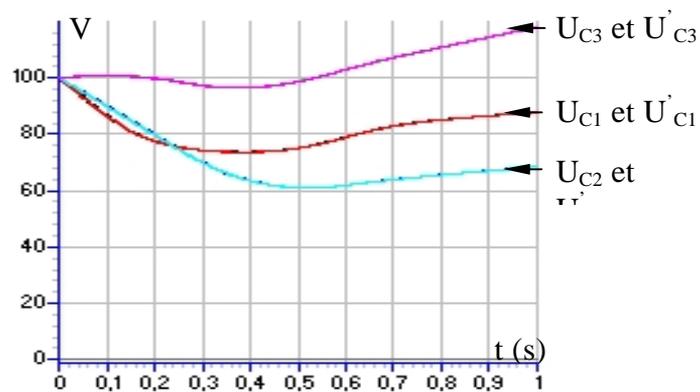


Fig.II.17.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

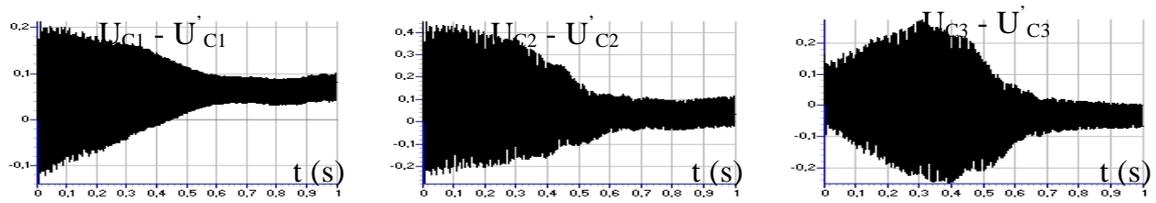


Fig.II.17.b. Différences de tensions $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$, $U_{C3} - U'_{C3}$

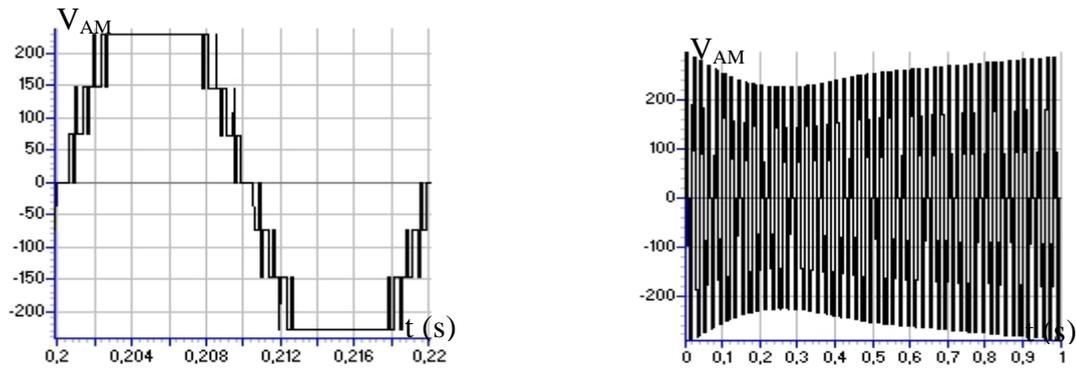


Fig. II.17.c. Tension de sortie de l'onduleur

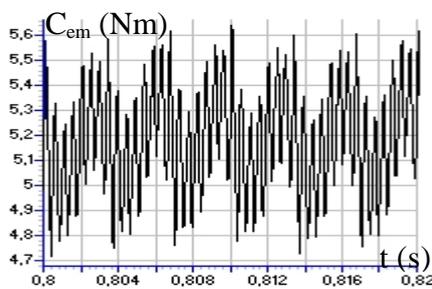


Fig.II.17.d. Couple électromagnétique de la machine asynchrone sa référence

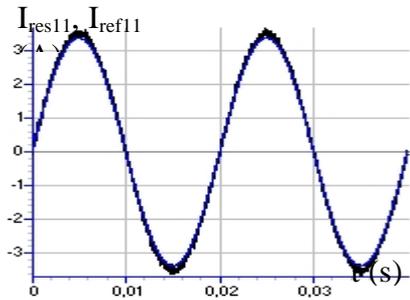
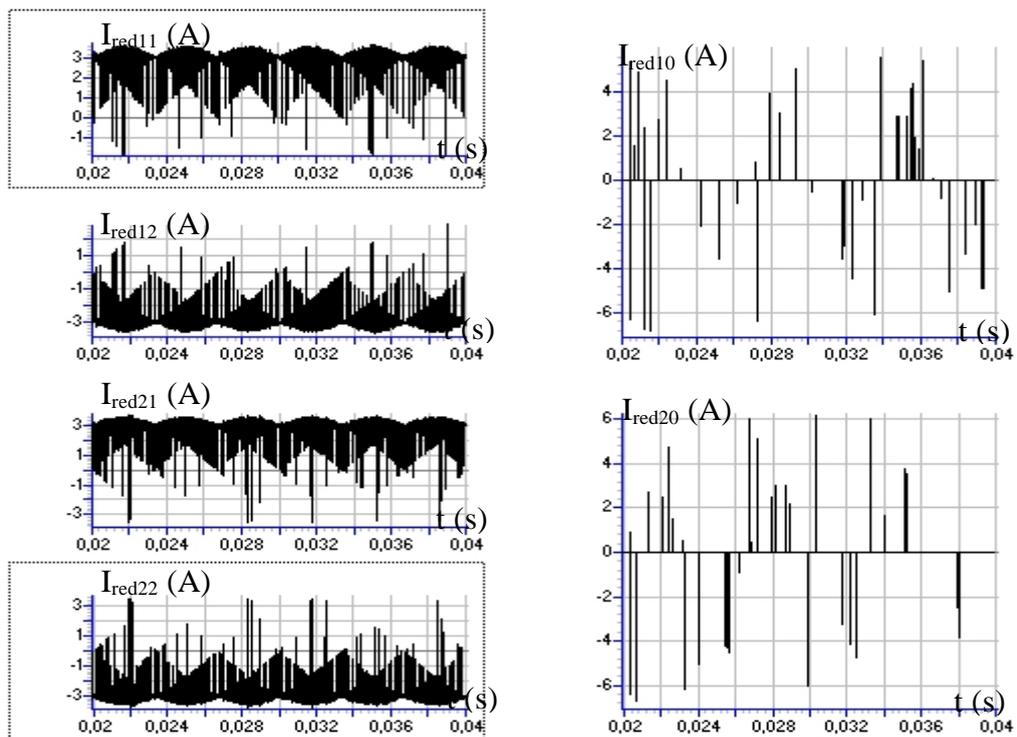


Fig.II.17.e. Courant du réseau et sa référence



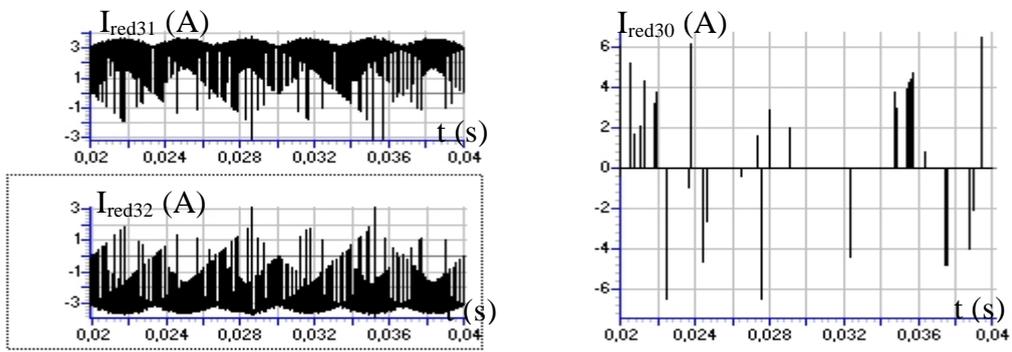


Fig.II.17.f. Courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux

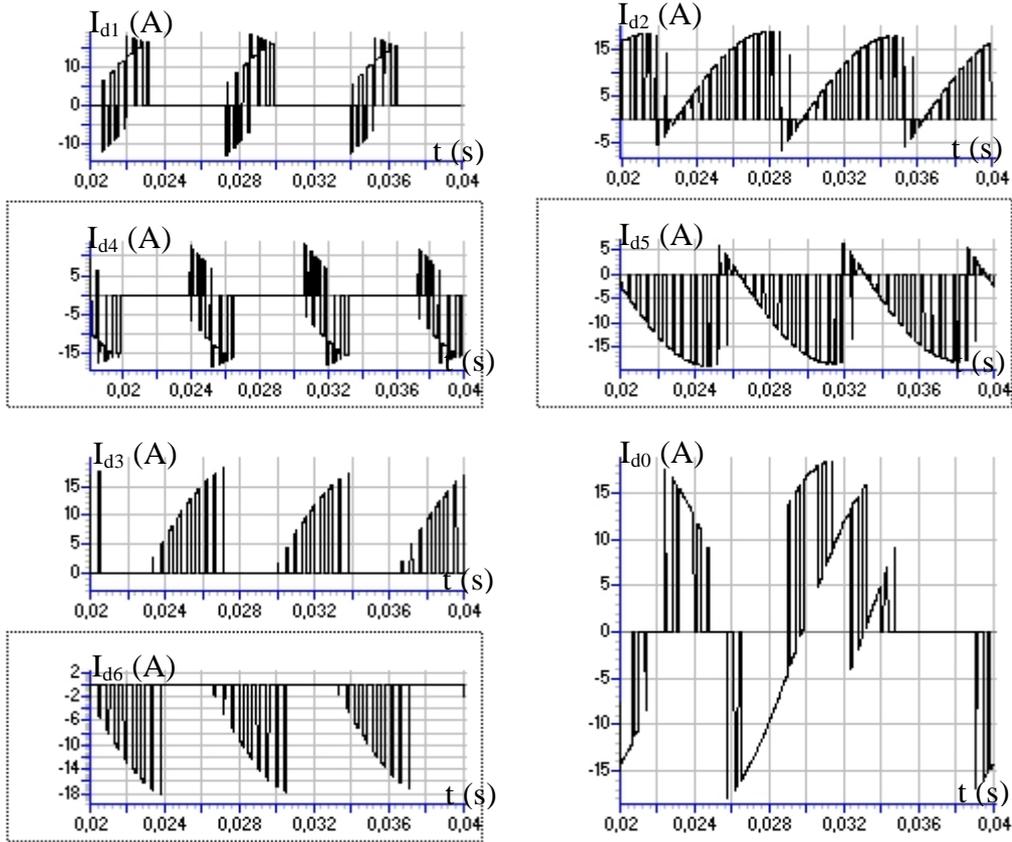


Fig.II.17.g. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

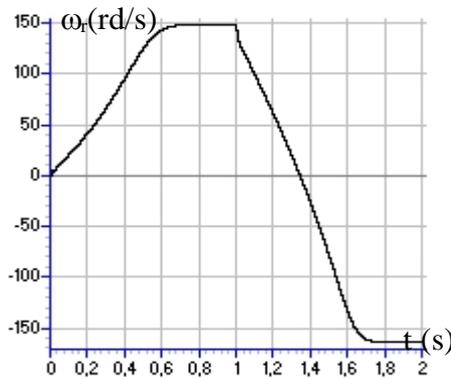


Fig.II.17.h. Vitesse de la machine asynchrone

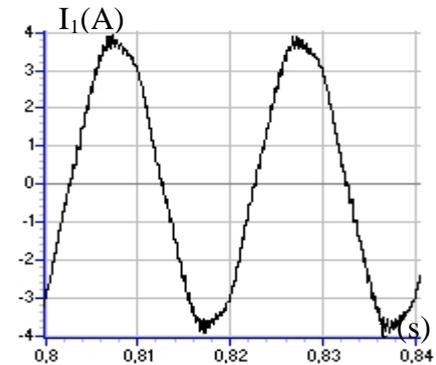


Fig.II.17.i. Courant absorbé par la MAS

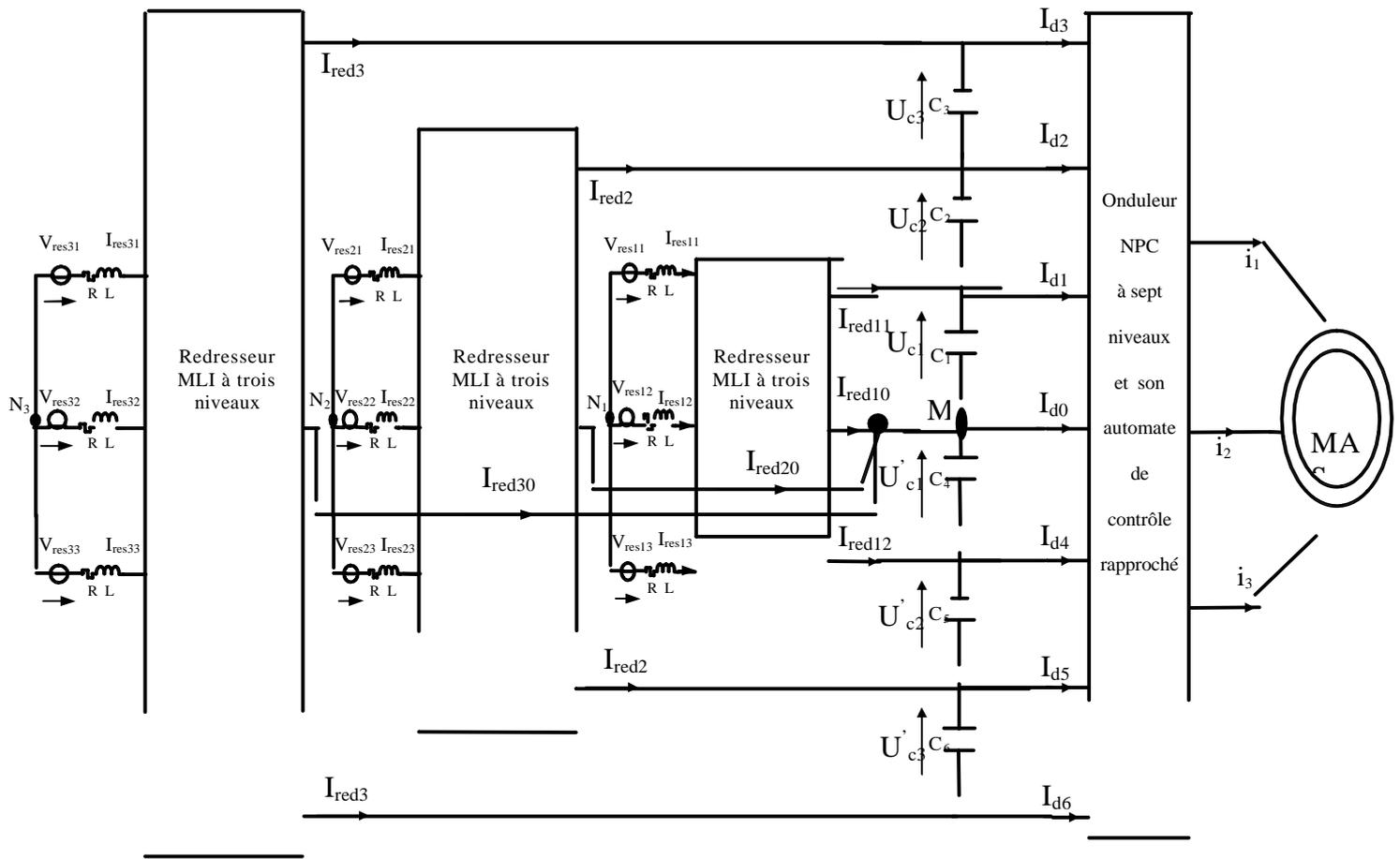


Fig. II.18. cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS ($V_{res1\text{-eff}}=(220/3)V$, $V_{res2\text{-eff}}=(220*2/3)V$, $V_{res3\text{-eff}}=220V$, $R=0.25 \Omega$, $L=10 \text{ mH}$, $C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6= 60 \text{ mF}$)

II.3.2.1. Filtre capacitif : Le modèle mathématique du filtre capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux est donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases}
 C_1 \cdot \frac{d U_{C1}}{dt} = I_{red1} + I_{red2} + I_{red3} - I_{d3} - I_{d2} - I_{d1} \\
 C_2 \cdot \frac{d U_{C2}}{dt} = I_{red2} + I_{red3} - I_{d3} - I_{d2} \\
 C_3 \cdot \frac{d U_{C3}}{dt} = I_{red3} - I_{d3} \\
 C_4 \cdot \frac{d U'_{C1}}{dt} = - I_{red6} - I_{red5} - I_{red4} + I_{d6} + I_{d5} + I_{d4} \\
 C_5 \cdot \frac{d U'_{C2}}{dt} = - I_{red6} - I_{red5} + I_{d6} + I_{d5} \\
 C_6 \cdot \frac{d U'_{C3}}{dt} = - I_{red6} + I_{d6}
 \end{cases} \quad (II.20)$$

Sous forme d'état, on peut écrire ce système comme suit :

$$[C] \cdot [\dot{U}_C] = [I_{red}] - [I_{Ch}]$$

$$[U_C] = \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ U'_{C3} \end{bmatrix}; [I_{red}] = \begin{bmatrix} I_{red3} \\ I_{red2} + I_{red3} \\ I_{red1} + I_{red2} + I_{red3} \\ -I_{red4} - I_{red5} - I_{red6} \\ -I_{red5} - I_{red6} \\ -I_{red6} \end{bmatrix}; [I_{Ch}] = \begin{bmatrix} I_{d3} + I_{d2} + I_{d1} \\ I_{d3} + I_{d2} \\ I_{d3} \\ -I_{d6} - I_{d5} - I_{d4} \\ -I_{d6} - I_{d5} \\ -I_{d6} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

$$[C] = [C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6]$$

Les figures II.19.* montrent les performances de la cascade : trois redresseurs MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée - MAS (structure imbriquée). Les redresseurs MLI à trois niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.001A$).

Les tensions continues du pont capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont instables (Fig II.19.a). Ces tensions sont pratiquement égales par paire ($U_{C1}=U'_{C1}$, $U_{C2}=U'_{C2}$, $U_{C3}=U'_{C3}$) (Fig II.19.b). La tension de sortie de l'onduleur est instable mais symétrique (Fig II.19.c). La fréquence du couple électromagnétique développé par la machine asynchrone est six fois celle de la tension de sortie de l'onduleur (Fig II.19.d). Les courants des réseaux suivent leurs références sinusoïdaux (Fig II.19.e). La figure II.19.f présente les courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux. Les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont pratiquement inversés par paire ($I_{d1}=-I_{d4}$, $I_{d2}=-I_{d5}$, $I_{d3}=-I_{d6}$), et la valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle (Fig II.19.g). La figure II.19.h montre la possibilité d'inversion du sens de rotation de la machine asynchrone. La figure II.19.i présente le courant absorbé par la machine asynchrone qui a pratiquement la forme sinusoïdale.

- **Simulation numérique**

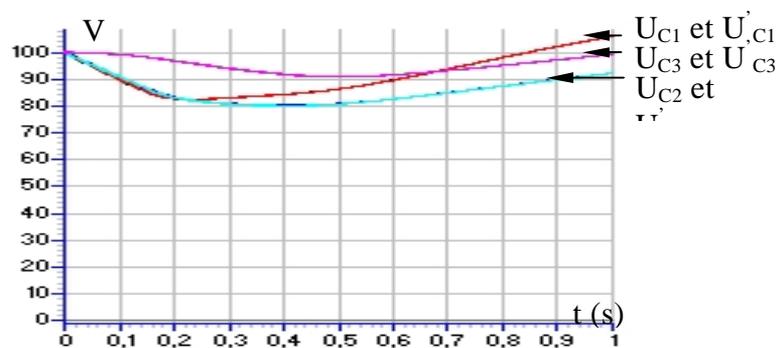


Fig.II.19.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

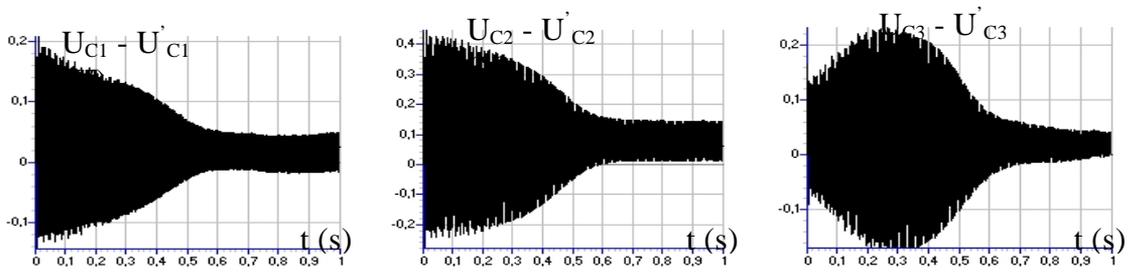


Fig.II.19.b. Différences de tensions $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$, $U_{C3} - U'_{C3}$

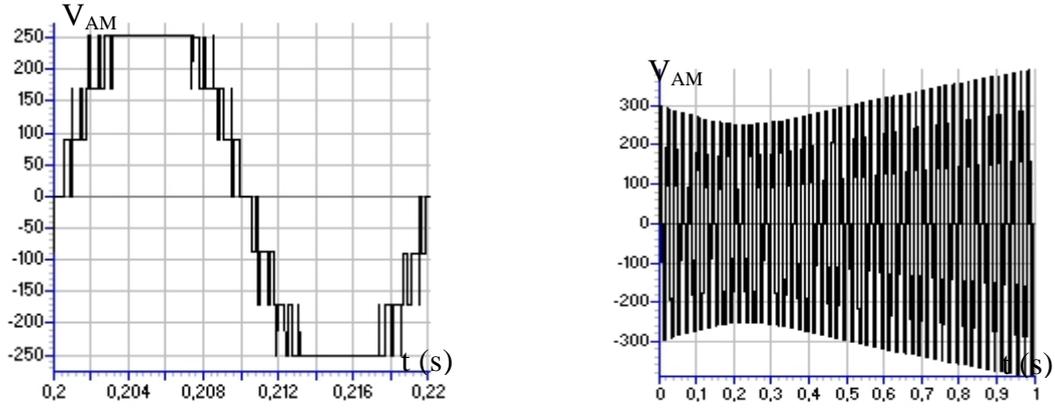


Fig. II.19.c. Tension de sortie de l'onduleur

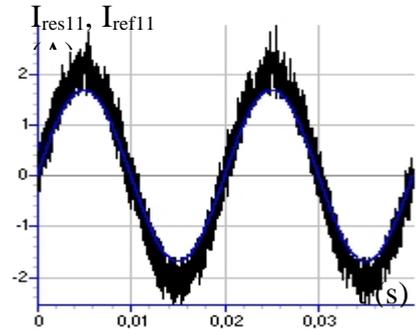
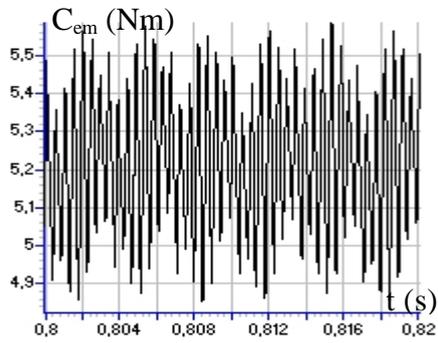
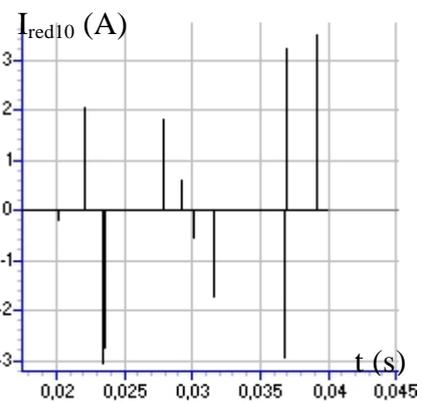
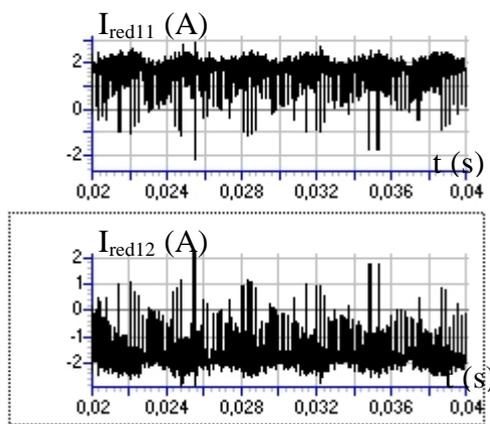


Fig. II.19.d. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

Fig. II.19.e. Courant du réseau et sa référence



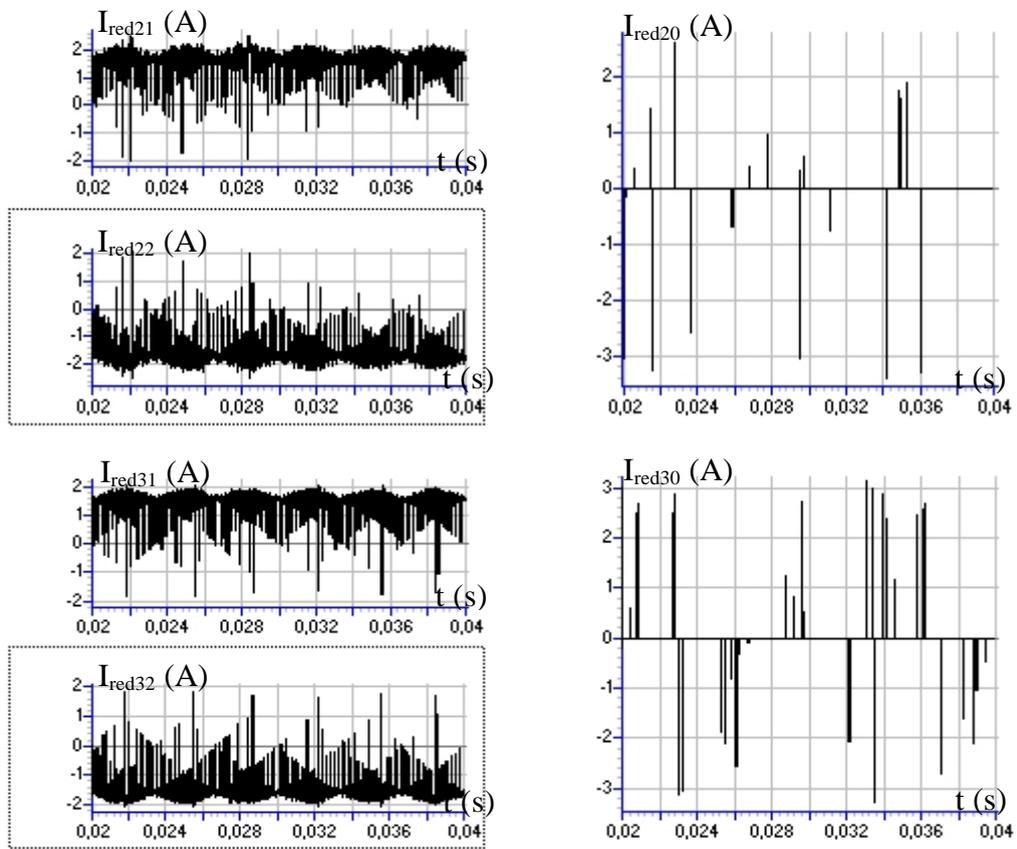


Fig. II.19.f. Courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux

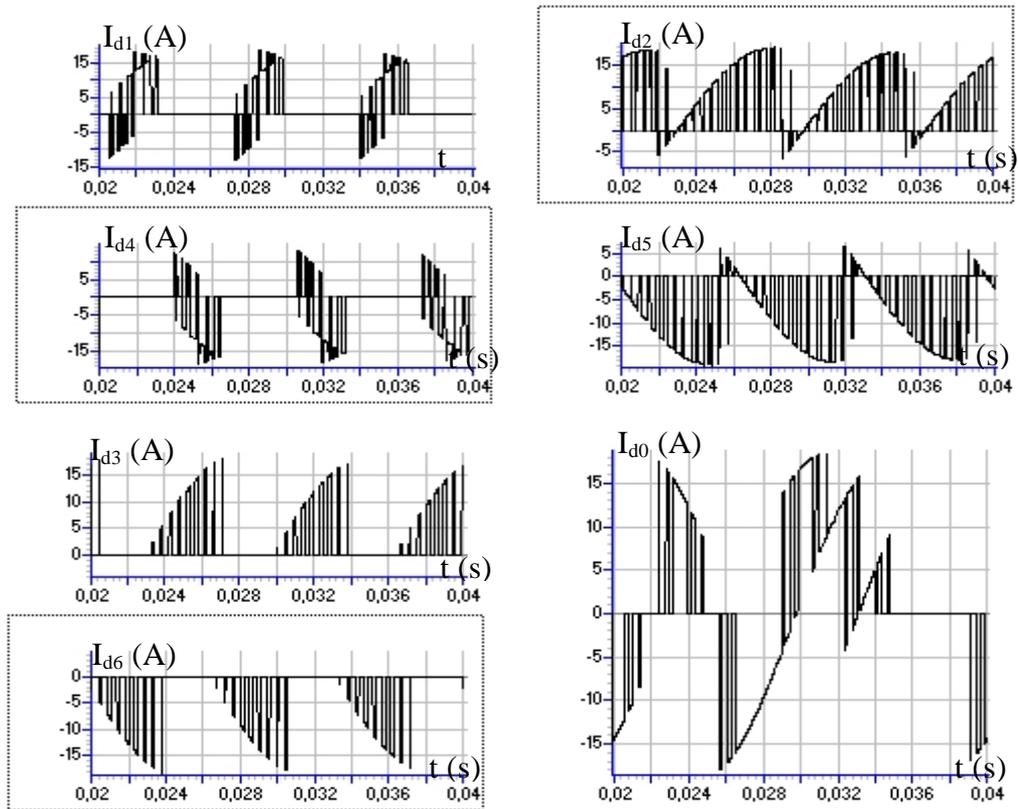


Fig. II.19.g. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

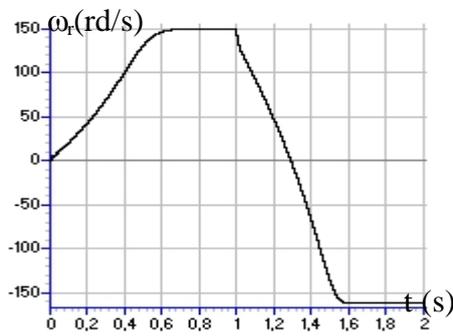


Fig. II.19.h. Vitesse de la machine asynchrone

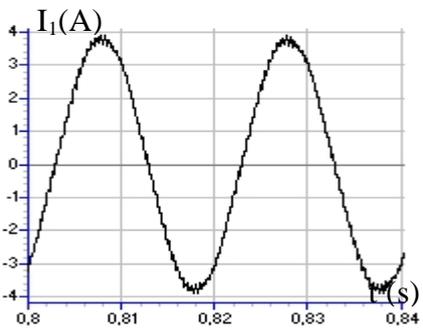


Fig.II.19.i. Courant absorbé par la MAS

III. Cascade redresseur de courant à MLI triphasé à sept niveaux - onduleur de tension triphasé à sept niveaux

III.1. Utilisation des onduleurs à sept niveaux en redresseur de courant

L'analogie du modèle de l'onduleur de tension à sept niveaux avec celui de l'onduleur à trois niveaux induit la réversibilité de l'onduleur à sept niveaux. Cette caractéristique permet à l'onduleur à sept niveaux de fonctionner en redresseur de courant. Les modèles élaborés pour les onduleurs de tension à sept niveaux sont utilisables en tenant compte des nouvelles conventions des deux sources (réseau et la charge)[Berkouk 95]. Toutes les stratégies de commande utilisées pour la commande de l'onduleur de tension à sept niveaux sont également utilisables pour les redresseurs de courant. Pour notre étude, nous avons choisi la commande par hystérésis de courant. La structure de ce redresseur est présentée dans la figure II.20.

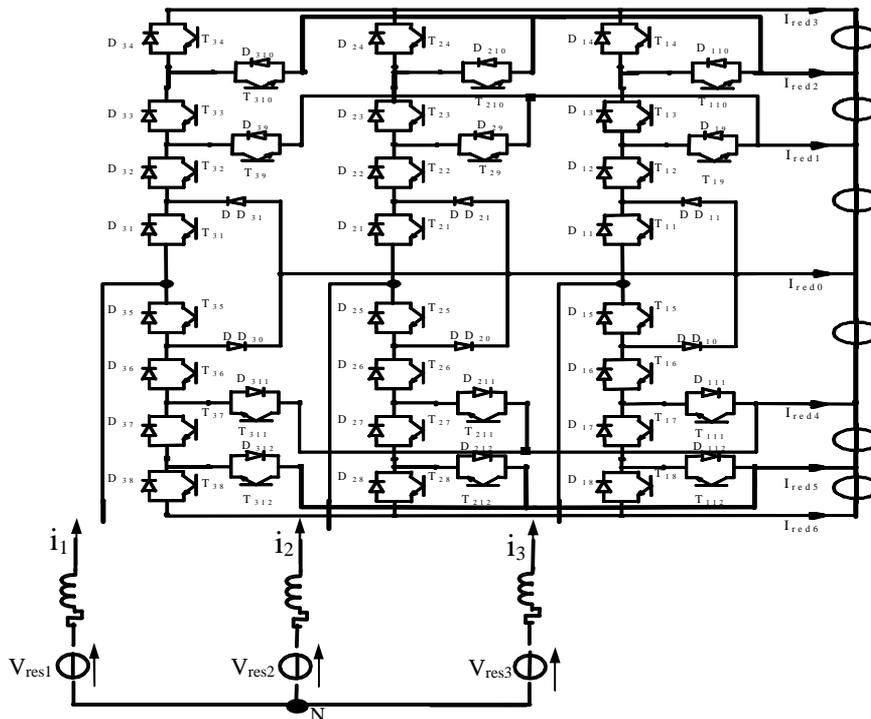


Fig.II.20. redresseur MLI à sept niveaux

La structure de la cascade est donnée par la figure II.21.

III.2.1. Filtre capacitif : Le modèle mathématique du filtre capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux est donné par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \cdot \frac{d U_{C1}}{dt} = I_{red1} + I_{red2} + I_{red3} - I_{d3} - I_{d2} - I_{d1} \\ C_2 \cdot \frac{d U_{C2}}{dt} = I_{red2} + I_{red3} - I_{d3} - I_{d2} \\ C_3 \cdot \frac{d U_{C3}}{dt} = I_{red3} - I_{d3} \\ C_4 \cdot \frac{d U'_{C1}}{dt} = -I_{red6} - I_{red5} - I_{red4} + I_{d6} + I_{d5} + I_{d4} \\ C_5 \cdot \frac{d U'_{C2}}{dt} = -I_{red6} - I_{red5} + I_{d6} + I_{d5} \\ C_6 \cdot \frac{d U'_{C3}}{dt} = -I_{red6} + I_{d6} \end{array} \right. \quad (II.22)$$

Sous forme d'état, on peut écrire comme suit :

$$[C] \cdot [\dot{U}_C] = [I_{red}] - [I_{Ch}]$$

$$[U_{Ci}] = \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ U'_{C3} \end{bmatrix} ; [I_{red}] = \begin{bmatrix} I_{red3} \\ I_{red2} + I_{red3} \\ I_{red1} + I_{red2} + I_{red3} \\ -I_{red4} - I_{red5} - I_{red6} \\ -I_{red5} - I_{red6} \\ -I_{red6} \end{bmatrix} ; [I_{Ch}] = \begin{bmatrix} I_{d3} + I_{d2} + I_{d1} \\ I_{d3} + I_{d2} \\ I_{d3} \\ -I_{d6} - I_{d5} - I_{d4} \\ -I_{d6} - I_{d5} \\ -I_{d6} \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

$$[C] = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6]$$

Les figures II.22.* montrent les performances de la cascade : un redresseur MLI à sept niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée - MAS. Le redresseur MLI à sept niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.01A$).

Les tensions continues du pont capacitif d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont instables (Fig II.22.a). Ces tensions sont pratiquement égales par paire ($U_{C1}=U'_{C1}$, $U_{C2}=U'_{C2}$, $U_{C3}=U'_{C3}$) (Fig II.22.b). La tension de sortie de l'onduleur est instable mais symétrique (Fig II.22.c). La fréquence du couple électromagnétique développé par la machine asynchrone est six fois celle de la tension de sortie de l'onduleur (Fig II.22.d). Les courants des réseaux suivent leurs références sinusoïdaux (Fig II.22.e). La figure II.22.f présente les courants de sortie du redresseur MLI à sept niveaux. Les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux sont pratiquement inversés par

paire ($I_{d1} = -I_{d4}$, $I_{d2} = -I_{d5}$, $I_{d3} = -I_{d6}$), et la valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle (Fig II.22.g). La figure II.22.h montre la possibilité d'inversion du sens de rotation de la machine asynchrone. La figure II.22.i présente le courant absorbé par la machine asynchrone qui a pratiquement la forme sinusoïdale.

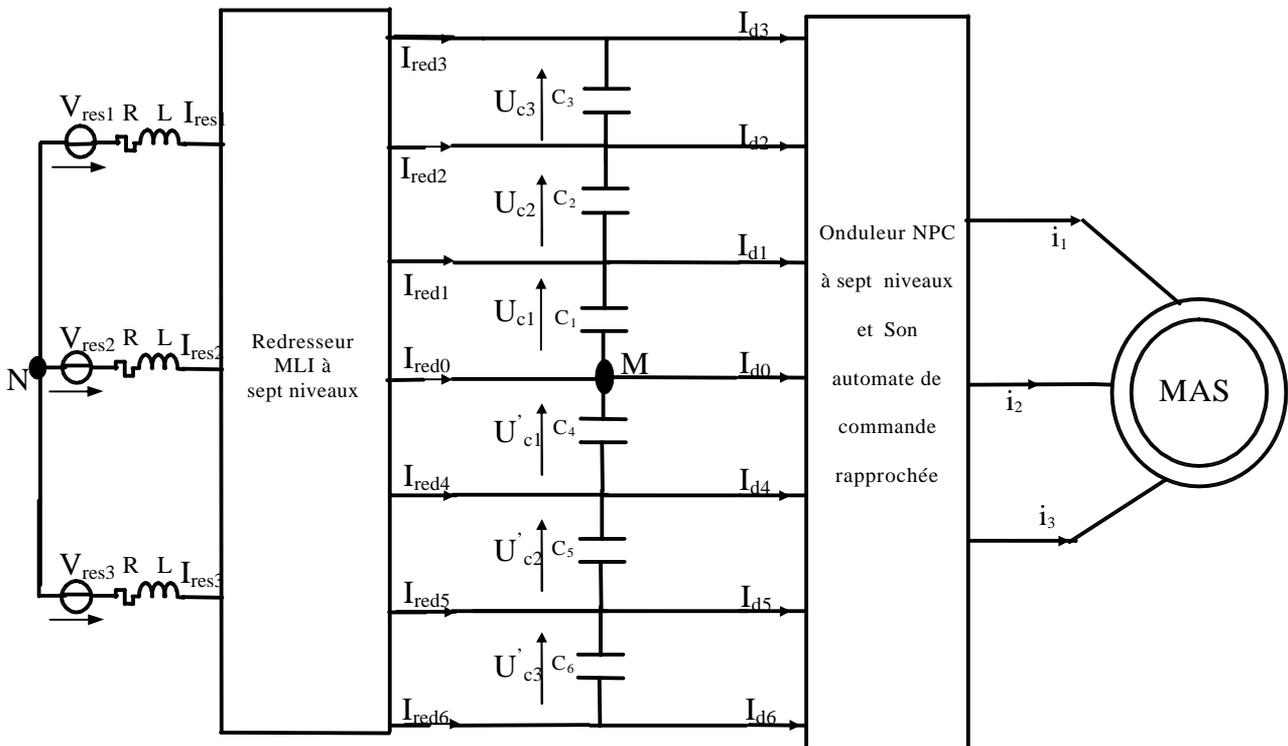


Fig.II.21. cascade un redresseur MLI à sept niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

($V_{res-eff}=220V$, $R=0.25 \Omega$, $L=10 \text{ mH}$, $C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6= 60 \text{ mF}$)

• Simulation numérique

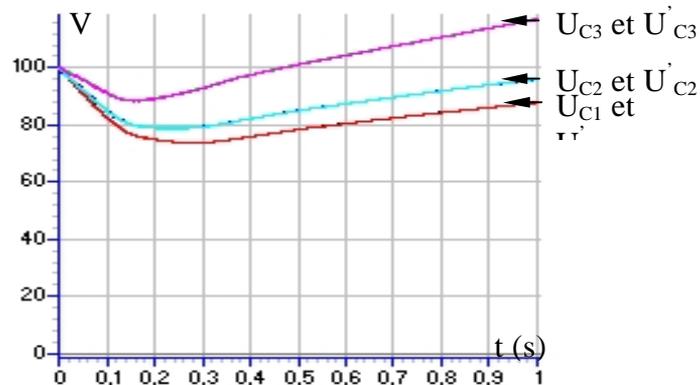


Fig.II.22.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

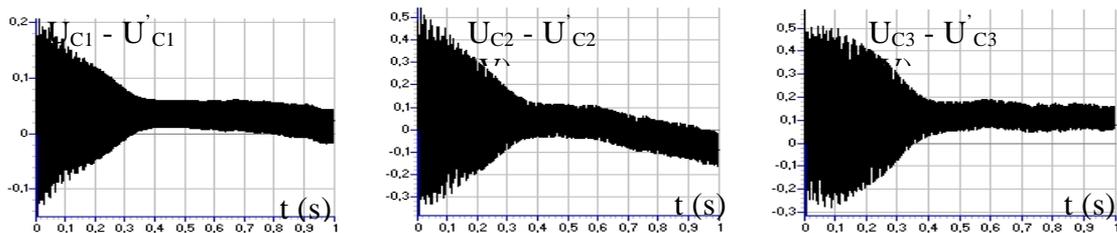


Fig.II.22.b. Différences de tensions $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$, $U_{C3} - U'_{C3}$

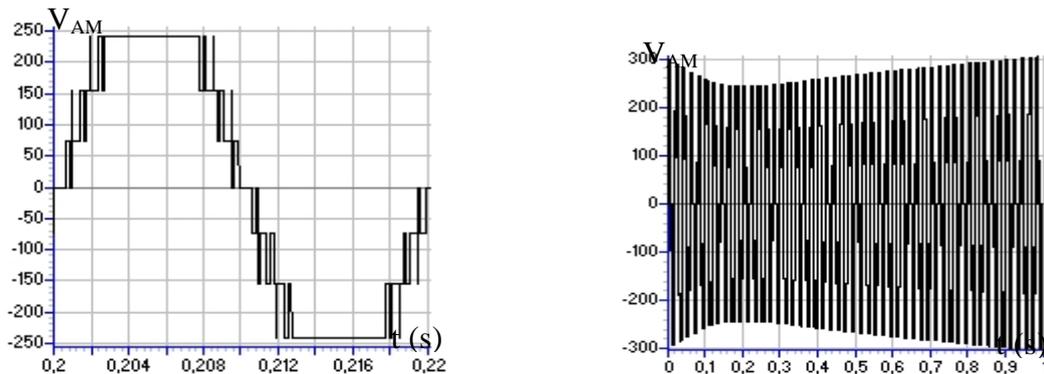


Fig.II.22.c. Tension de sortie de l'onduleur

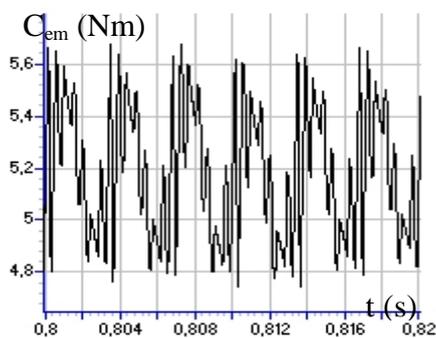
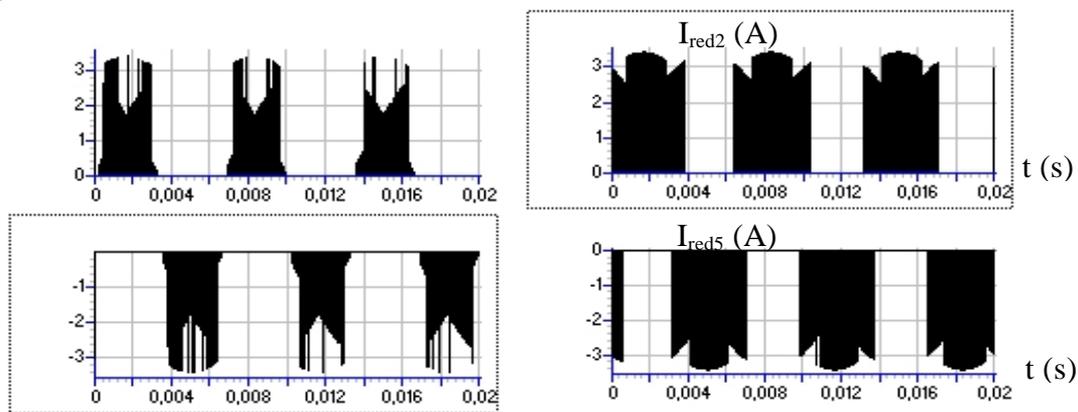
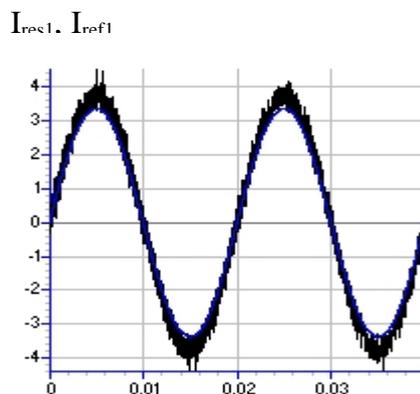


Fig.II.22.d. Couple électromagnétique de la

MAS

Fig.II.22.e. Courant du réseau et sa référence



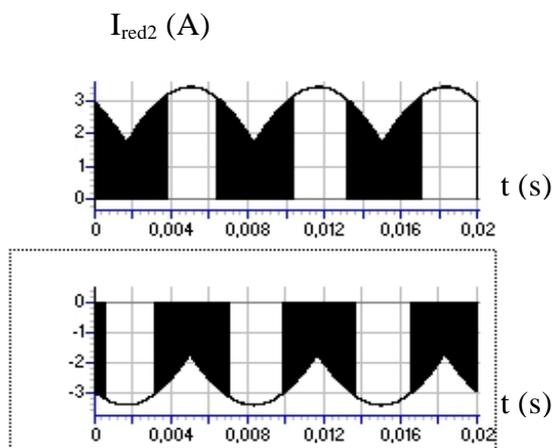


Fig.II.22.f. Courants de sortie du redresseur MLI à sept niveaux

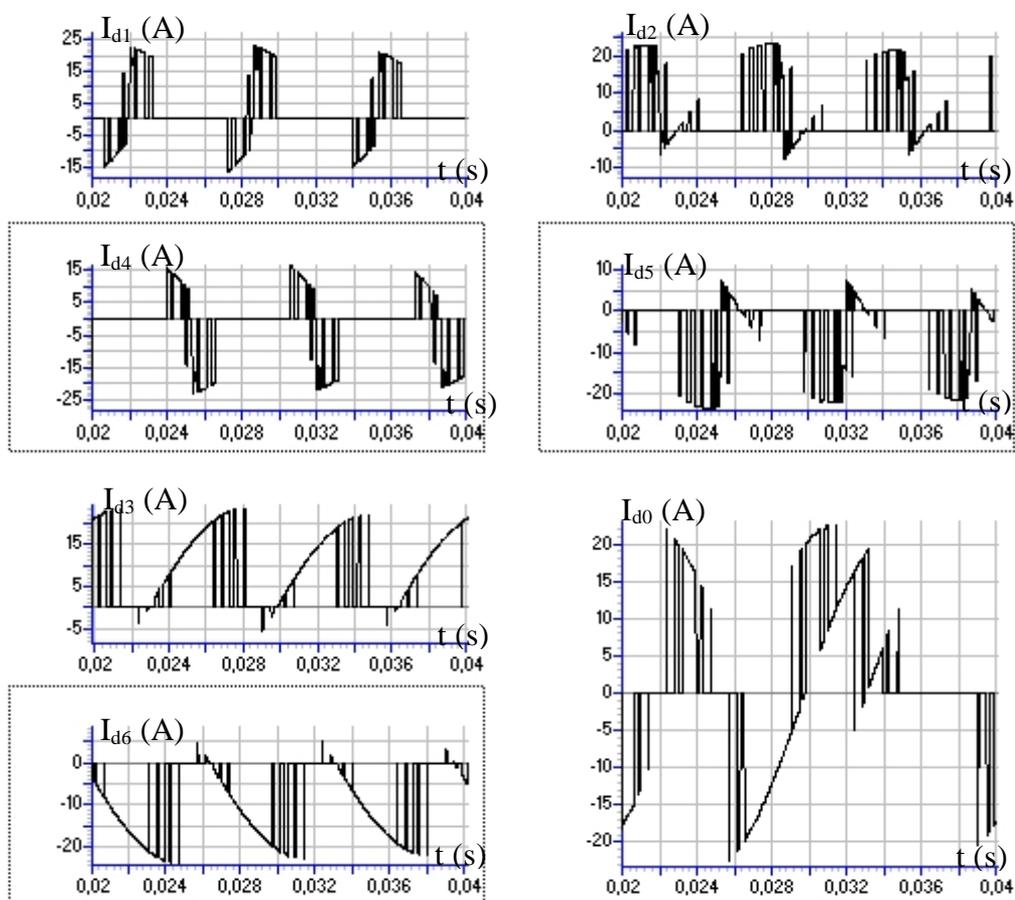


Fig.II.22.g. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

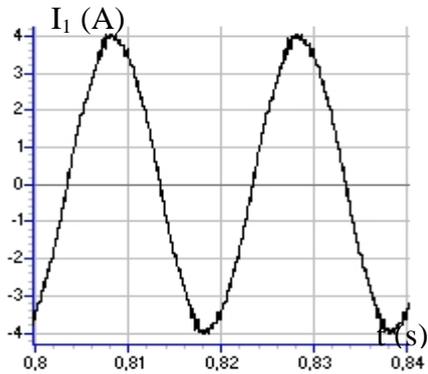
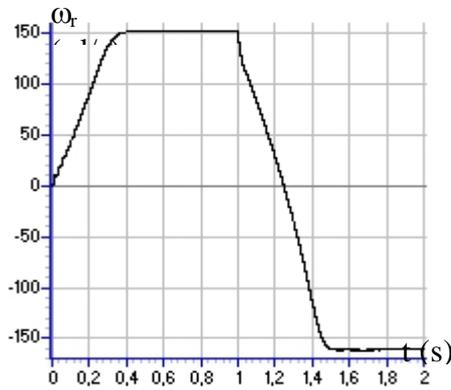


Fig.II.22.h. Vitesse de la machine asynchrone Fig.II.22.i. Courant absorbé par la MAS

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement de toutes les structures de cascades à redresseurs de courant MLI (à deux, trois et à sept niveaux) et l'onduleur de tension NPC à sept niveaux. Nous avons montré en particulier :

- La possibilité de réaliser une cascade alternative-alternative à pont de sortie; un onduleur multiniveaux à structure NPC.
- La possibilité d'utiliser les onduleurs de tension multiniveaux à structure NPC en redresseurs de courant.
- Malgré l'utilisation des condensateurs de capacités assez important (60mF), l'instabilité des sources de tension continue de l'onduleur à sept niveaux reste l'inconvénient majeur de ce convertisseur de puissance.
- Les tensions continues du demi-pont capacitif supérieur de l'onduleur multiniveaux sont pratiquement égales avec celles du demi-pont inférieur.
- L'utilisation des redresseurs de courant multiniveaux à MLI commandés par la stratégie d'hystérésis permet d'avoir un courant coté réseau le plus sinusoïdale possible et un facteur de puissance proche de l'unité. Pour ce type de commande et afin d'éviter une charge continue des capacités ($C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$), on doit asservir la valeur efficace du courant de référence du redresseur entre le régime transitoire et le régime permanent du moteur asynchrone. A cet effet, on étudiera dans le chapitre III; l'asservissement des redresseurs de courant à deux, trois et à sept niveaux.

Chapitre III

Asservissement des redresseurs MLI à deux et multi-niveaux. Application aux cascades à onduleur de tension NPC à sept niveaux

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons examiné plusieurs changeurs de fréquence ayant comme pont de sortie l'onduleur à sept niveaux, et nous avons mis en évidence le problème de déséquilibre et d'instabilité des sources de tension continue (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) de ce convertisseur de puissance. Cette instabilité est due à la dérivée naturelle des tensions aux bornes des condensateurs du pont capacitif d'entrée de l'onduleur multiniveaux. Comme solutions à ce problème, on peut proposer :

- Asservissement des tensions continues : U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}
- Utilisation du pont de clamping à l'entrée de l'onduleur

Dans le cadre de ce chapitre, nous nous proposons d'étudier le cas de la première solution, à savoir; réguler ou asservir les sources de tension continue (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) de l'onduleur multiniveaux, en jouant sur le redresseur à deux et/ou multiniveaux du changeur de fréquence. Pour obtenir du côté réseau un faible taux d'harmoniques des courants et un facteur de puissance le plus proche possible de l'unité, nous avons choisi une commande par hystérésis des courants appelés par l'étage redresseur.

Des études ont été déjà faites sur l'asservissement des redresseurs MLI monophasés et triphasés à deux niveaux [Kulkarny 87][Guillaud 92][Hujeux 92][Rioual 93][plateaux 94][Guillaud 94.2][Berkouk 95][Gheraia 99.4]. Dans ce chapitre, on commencera par présenter l'asservissement de la tension de sortie du redresseur MLI à deux niveaux. Ensuite, on montrera l'extrapolation de la méthodologie utilisée pour ce redresseur à deux niveaux au cas des redresseurs multiniveaux. Ainsi, on présentera un modèle général de la boucle de tension utilisable dans tous les cas. Comme application de cette étude, on analyse les performances des algorithmes d'asservissement utilisés avec les cascades suivantes :

- * Cascade un redresseur MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
- * Cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
- * Cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

- 1- trois redresseurs MLI à deux niveaux en série
- 2- trois redresseurs MLI à deux niveaux imbriqués
- * Cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
- * Cascade un redresseur MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
- * Cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
 - 1- trois redresseurs MLI à trois niveaux en série
 - 2- trois redresseurs MLI à trois niveaux imbriqués
- * Cascade un redresseur MLI à sept niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

Cette étude est faite en respectant bien sur les conditions de commandabilité des redresseurs, ces conditions sont; plus particulièrement les limites des valeurs efficaces de la tension et du courant du réseau. Ces grandeurs sont liées à la caractéristique de réglage de la stratégie utilisé pour la commande du redresseur.

I. Asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à deux niveaux

I.1. Modèle de la boucle de courant et de tension

La partie alternative d'entrée du redresseur triphasé à deux niveaux peut être modéliser pour chaque phase par un circuit RL monophasé comme le montre la figure III.1. La tension V_{resk} est celle de la phase k du réseau triphasé, et V_k la tension liée au bras k du redresseur. Le modèle de commande réduit de ce redresseur triphasé est donné à la figure III.2. Les fonctions N_{rg1} et N_{rg2} sont les fonctions de conversion simples. La boucle de tension impose la valeur efficace I_e des courants de référence du réseau. Pour modéliser cette boucle de tension, on utilise le principe de la conservation de puissance instantanée avec l'hypothèse d'un redresseur sans pertes :

$$\begin{cases} P_e = V_1 \cdot i_{res1} + V_2 \cdot i_{res2} + V_3 \cdot i_{res3} = \sum_{k=1}^3 \left[V_{resk} \cdot i_{resk} - R \cdot i_{resk}^2 - (1/2) \cdot L \cdot \frac{d(i_{resk}^2)}{dt} \right] \\ P_s = U_C \cdot I_{red} = U_C \cdot (i_c + i_{ch}) \end{cases} \quad (III.1)$$

En négligeant la puissance dissipée par effet de joule dans les résistances du réseau, on aboutit à :

$$P = \sum_{k=1}^3 (V_{resk} \cdot i_{resk}) = (1/2) \cdot L \cdot \sum_{k=1}^3 \left(\frac{di_{resk}^2}{dt} \right) + U_C \cdot I_{red} \quad (III.2)$$

En supposant les courants du réseau sinusoidaux et en phase avec leurs tensions correspondantes, on peut écrire alors :

$$P = 3 \cdot V_r \cdot I_e = U_C \cdot I_{red} \quad (III.3)$$

Avec :

$$V_{resk} = V_r \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t - (2 \cdot \pi / 3) \cdot (k - 1))$$

$$I_{resk} = I_e \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t - (2 \cdot \pi / 3) \cdot (k - 1))$$

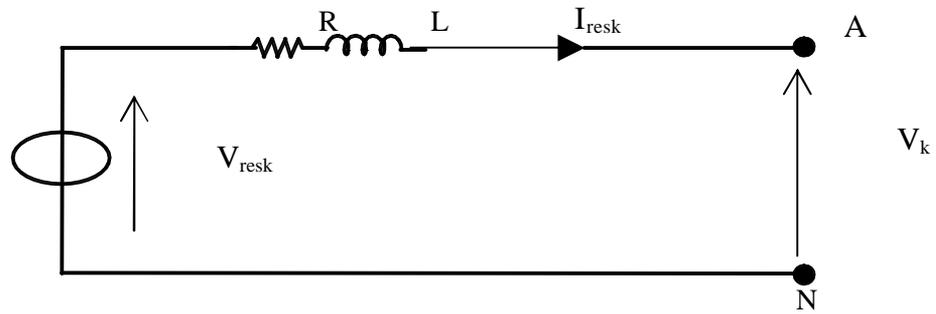


Fig.III.1. Modèle de la boucle de courant du redresseur MLI triphasé à deux niveaux

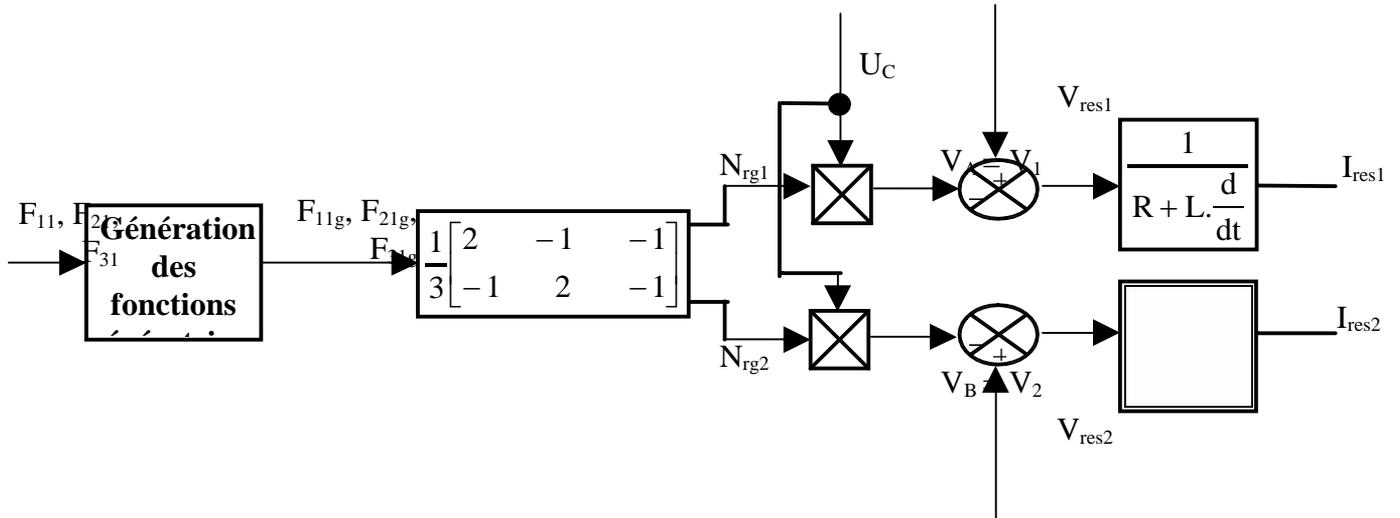


Fig.III.2. Modèle de commande du redresseur triphasé à deux niveaux

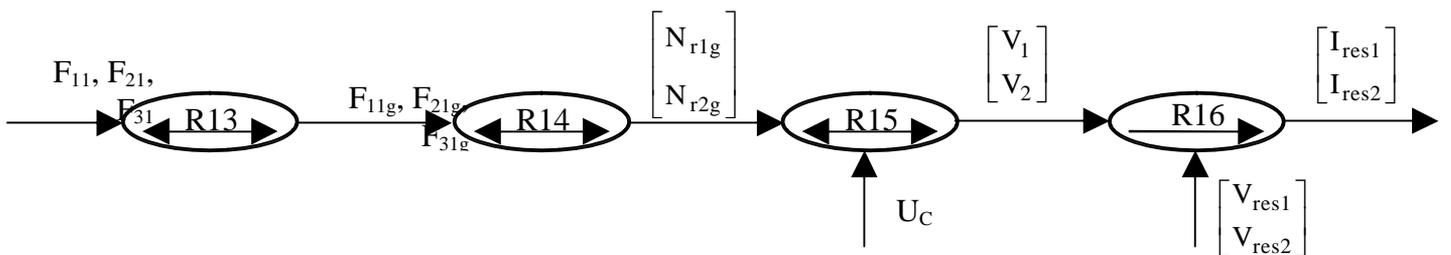


Fig.III.3. Graphe informationnel causal associé au modèle de commande du redresseur triphasé à deux niveaux

Le modèle de la boucle de tension, déduit de la relation (III.3), est présenté à la figure III.4.

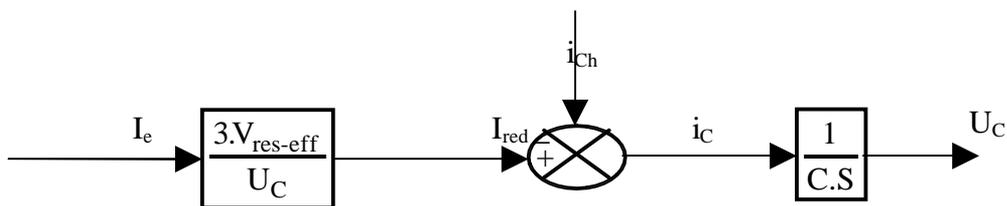


Fig.III.4. Modèle de la boucle de tension du redresseur MLI triphasé à deux niveaux

Le principe général de l'asservissement du redresseur triphasé à deux niveaux est montré à la figure III.5 [Gheraia 99.4].

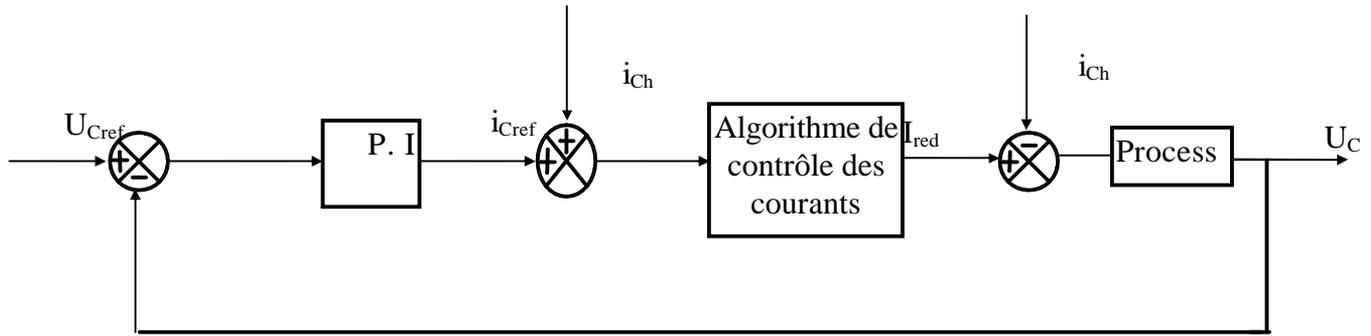


Fig.III.5. Algorithme de contrôle de la tension de sortie du redresseur MLI à deux niveaux

Pour la boucle de courant nous avons utilisé la commande par hystérésis présentée dans le chapitre II. L'algorithme d'asservissement de la tension U_C est présenté à la figure III.5. On calcule les paramètres K_{p_v} et K_{i_v} du régulateur (P.I) de la boucle de tension afin d'avoir un système équivalent en boucle fermée du second ordre avec une pulsation propre ω_v tel que $\omega_v.T_v = 1$ et un amortissement ξ_v unitaire [Gheraia 99][Gheraia 99.4].

I.2. Cascade un redresseur MLI triphasé à deux niveaux - onduleur de tension NPC triphasé à sept niveaux - MAS

On applique l'algorithme d'asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à deux niveaux élaboré précédemment pour commander le redresseur de la cascade : un redresseur MLI triphasé à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS. La structure de cette cascade est donnée au chapitre II (Fig.II.3)[Gheraia 99.4]. Le réseau triphasé a une tension efficace 220V et une fréquence 50Hz. Les paramètres du filtre d'entrée du pont redresseur triphasé à deux niveaux sont : $R=0.25\Omega$, $L=10mH$. La tension de référence de la boucle d'asservissement du redresseur MLI à deux niveaux est définie par :

$$U_{ref} = \begin{cases} 600V & \text{if } t < 1.6s \text{ et } t > 2s \\ 560V & \text{if } t \in [1.6s, 2s] \end{cases}$$

On analyse les performances de cette cascade pour deux cas de valeurs des condensateurs :

- **1^{er} cas** : $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=60mF$

Les figures III.6.* présentent les résultats de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à deux niveaux appliquée à la cascade : un redresseur MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - machine asynchrone triphasée. Le redresseur MLI à deux niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$). Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0, 0.7], Cr=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

La tension de sortie du redresseur MLI à deux niveaux (U_{red}) suit bien sa référence (U_{ref}) imposée par la boucle d'asservissement, et rejette la perturbation du couple de charge

(Fig.III.6.a). Les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) deviennent stables mais non égales après le régime transitoire de la machine asynchrone (Fig. III.6.b,c). Ainsi, l'application du couple de charge provoque l'instabilité des tensions avec la tendance d'inversion de la polarité pour certaines tensions continues (Fig. III.6.b). Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent leurs références I_{refk} (Fig.III.6.d). La figure III.6.f montre l'instabilité et le déséquilibre de la tension de sortie de l'onduleur. La figure III.6.g montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension, et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}$, $I_{d2} \approx -I_{d5}$, $I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs du moteur asynchrone triphasé (courant, couple et vitesse) sont présentées aux figures III.6.h,i,j.

- **Simulation numérique**



Fig.III.6.a. Tension de sortie du redresseur MLI

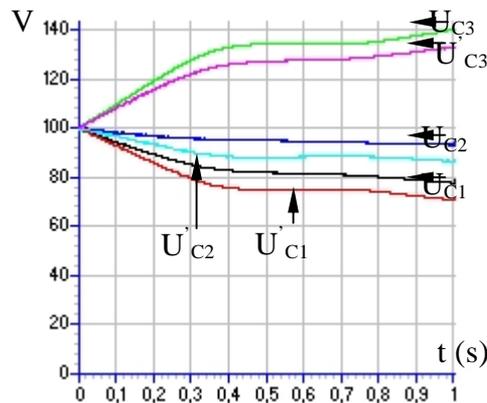


Fig.III.6.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

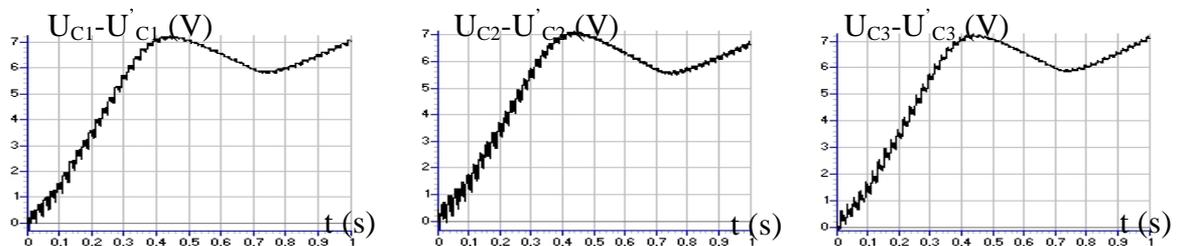


Fig.III.6.c. Différences de tension $U_{C1}-U'_{C1}$, $U_{C2}-U'_{C2}$, $U_{C3}-U'_{C3}$

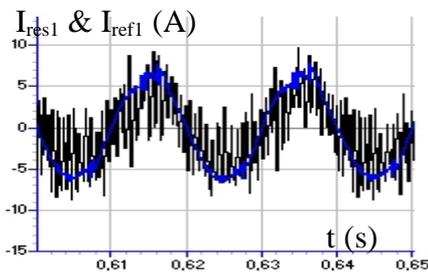


Fig.III.6.d. Courant d'une phase du réseau

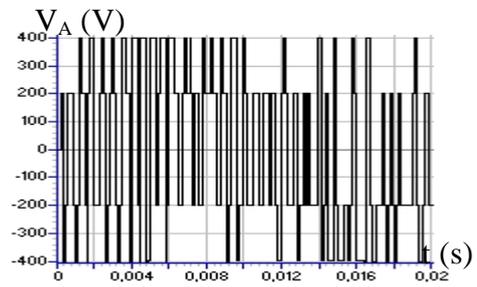


Fig.III.6.e. Tension simple du redresseur MLI

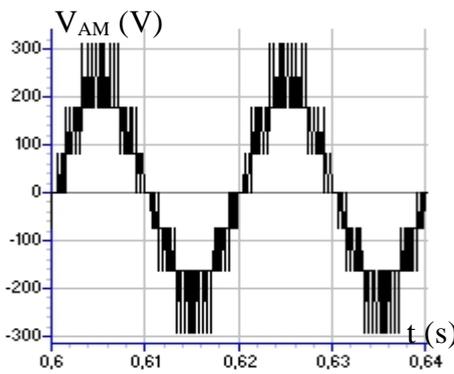


Fig.III.6.f. Tension de sortie de l'onduleur sept niveaux

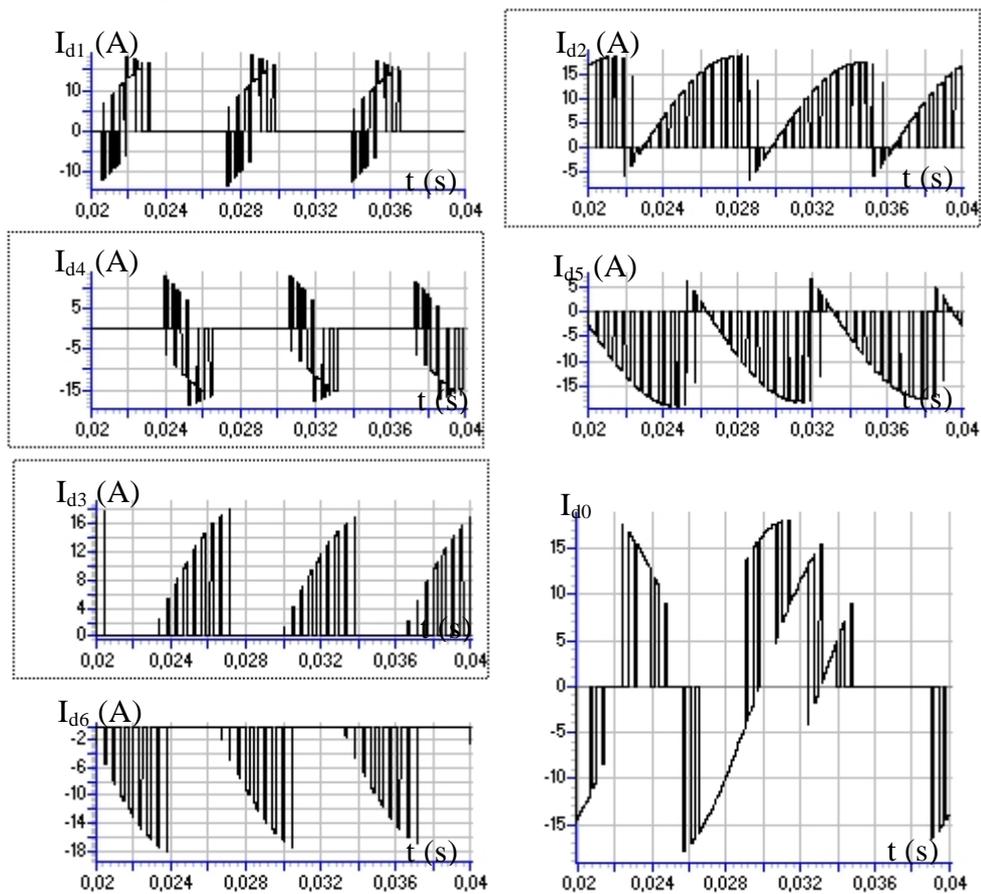
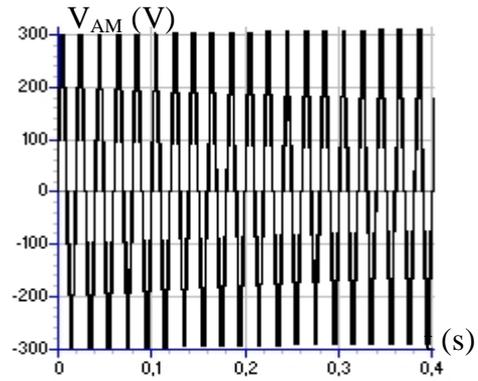


Fig.III.6.g. Courant d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

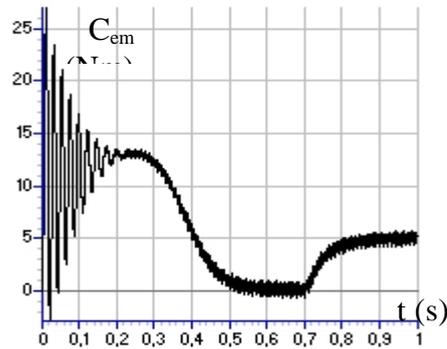


Fig.III.6.h. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

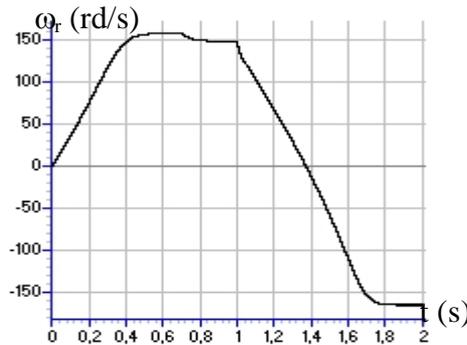
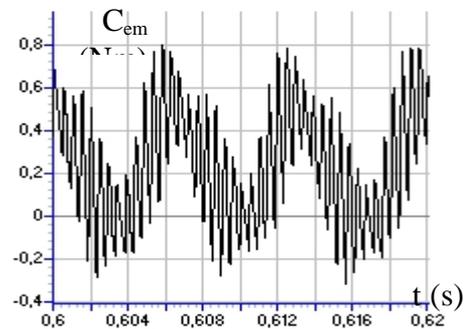


Fig.III.6.i. Vitesse de la machine asynchrone

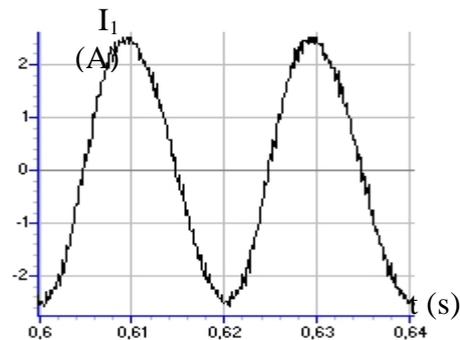


Fig.III.6.j. Courant absorbé par la MAS

• **2^{eme} cas : $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=20mF$**

Les figures III.7.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à deux niveaux appliqué à la cascade : un redresseur MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$) - machine asynchrone triphasée, avec les nouveaux paramètres du pont capacitif et sans couple de charge. Le redresseur MLI à deux niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$). Nous constatons :

- Le bon suivi de la tension redressée sa référence imposée par la boucle d'asservissement (Fig.III.7.a).
- Une instabilité des tensions continues d'entrée de l'onduleur pendant le régime transitoire de la machine asynchrone (Fig.III.7.b,c).
- Un écart entre les tensions continues important pendant le régime permanent avec le risque d'inversion de la polarité pour certaines tensions ($U_{C3} \gg U'_{C3} \gg U_{C2} \gg U'_{C2} \gg U_{C1} \gg U'_{C1}$).
- Une déformation de la tension de sortie de l'onduleur (Fig.III.7.d).
- Les courants absorbés par le réseau sont fortement pollués par les harmoniques (Fig.III.7.e).
- Un démarrage long du moteur asynchrone ($t_d=0.7s$) provoquant un échauffement excessive du bobinage; destructif du stator de la machine (Fig.III.7.f,g).

- Simulation numérique

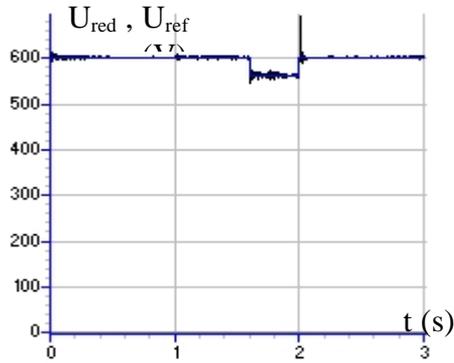


Fig.III.7.a. Tension de sortie du redresseur MLI

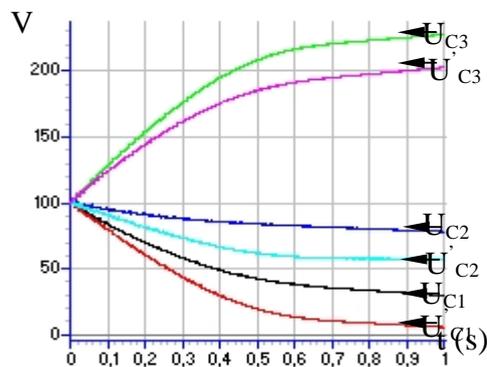


Fig.III.7.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

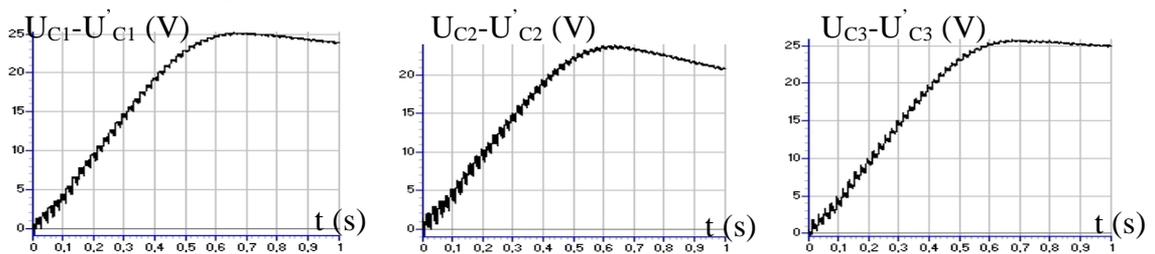


Fig.III.7.c. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$, $U_{C3} - U'_{C3}$

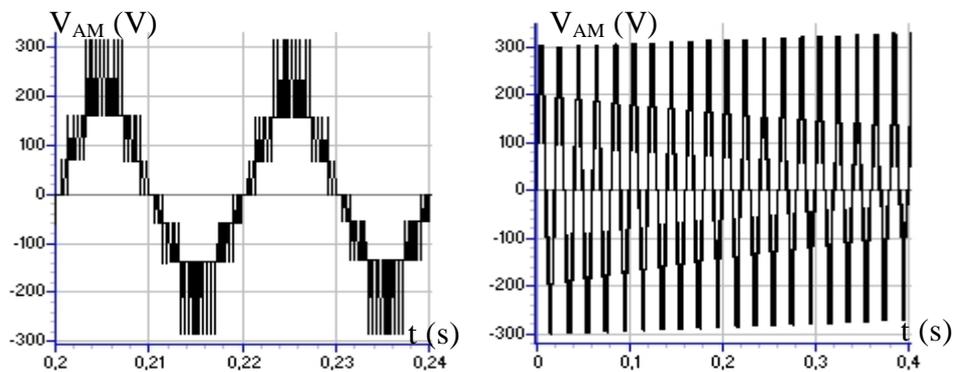


Fig.III.7.d. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

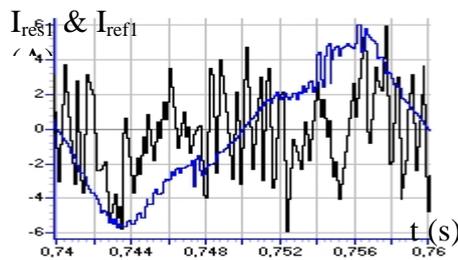


Fig.III.9.e. Courant d'une phase du réseau

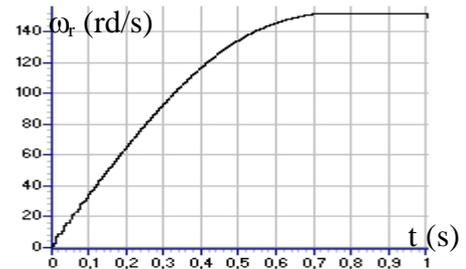
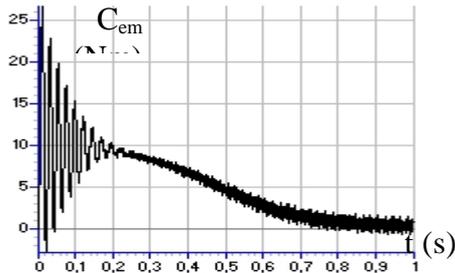


Fig.III.7.f. Couple électromagnétique de la machine asynchro Fig.III.7.g. Vitesse de la MAS à vide

I.3. Cascade deux redresseurs MLI triphasés à deux niveaux - onduleur de tension NPC triphasé à sept niveaux - MAS

On applique le même algorithme d'asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à deux niveaux élaboré précédemment pour commander les redresseurs de la cascade : deux redresseurs MLI triphasés à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS. La structure de cette cascade est donnée au chapitre II (Fig.II.5)[Gheraia 2002.2]. Le réseau triphasé a une tension efficace 220V et une fréquence 50Hz. Les paramètres du filtre d'entrée du pont redresseur triphasé à deux niveaux sont : $R=0.25\Omega$, $L=10\text{mH}$. Le couple de charge est défini par $C_r \{C_r=0 \text{ si } t(s) \in [0 \ 0.7], C_r=5\text{Nm} \text{ si } t(s) > 0.7\}$. Les tensions de référence des boucles d'asservissement des redresseurs MLI à deux niveaux sont définies par :

$$U_{\text{ref}1,2} = \begin{cases} 300\text{V} & \text{if } t < 1.6\text{s} \text{ et } t > 2\text{s} \\ 280\text{V} & \text{if } t \in [1.6\text{s} \ , \ 2\text{s}] \end{cases}$$

On analyse les performances de cette cascade pour deux cas de valeurs des condensateurs :

- **1^{er} cas** : $C_1=C_2= C_3=C_4= C_5= C_6=60\text{mF}$

Les figures III.8* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à deux niveaux appliqué à la cascade : deux redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05\text{A}$).

Les tensions de sortie des deux redresseurs ($U_{\text{red}1}$ et $U_{\text{red}2}$) suivent leurs références ($U_{\text{ref}i}$) imposées par les boucles d'asservissement, et rejettent la perturbation du couple de charge (Fig.III.8.a).

Les tensions continues de l'onduleur à sept niveaux (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) deviennent stables mais non égales après le régime transitoire de la machine asynchrone (Fig. III.8.b). Ainsi, l'application du couple de charge provoque l'instabilité des tensions avec la tendance d'inversion de la polarité pour certaines tensions (Fig. III.8.b). Néanmoins, les tensions du demi-pont capacitif supérieur sont pratiquement égales avec celles du demi-pont inférieur ($U_{C1} = U'_{C1}$, $U_{C2} = U'_{C2}$, $U_{C3} = U'_{C3}$) (Fig. III.8.b,c). Les courants I_{resk} absorbés par le réseau triphasé ne sont pas sinusoïdaux (Fig. III.8.d). La figure III.8.f montre la déformation de l'onde de tension de sortie de l'onduleur. La figure III.8.g montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension, et inversement égales par paires ($I_{d1} \approx -I_{d4}$, $I_{d2} \approx -I_{5}$, $I_{d3} \approx -I_{6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs du moteur asynchrone triphasé (courant, couple et vitesse) sont présentées aux figures III.8.h,i,j.

- **Simulation numérique**

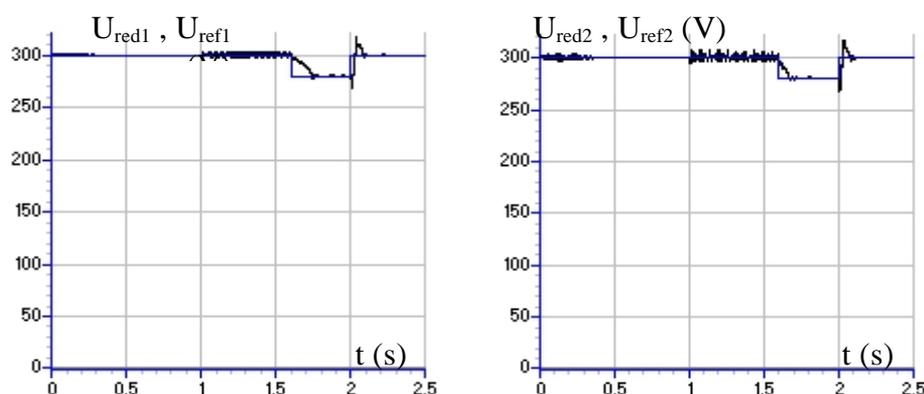


Fig.III.8.a. Tensions de sortie des redresseurs MLI

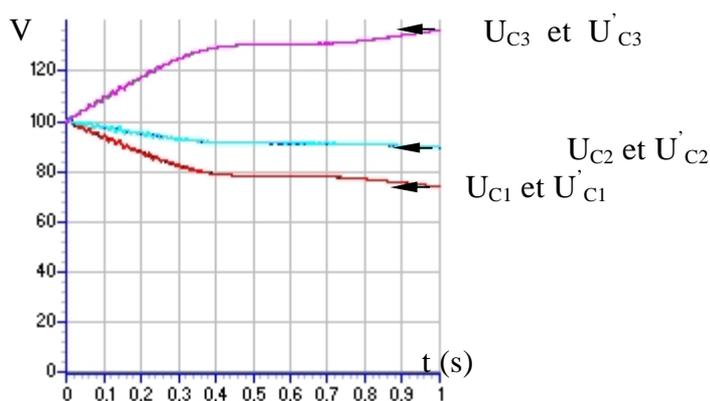


Fig.III.8.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

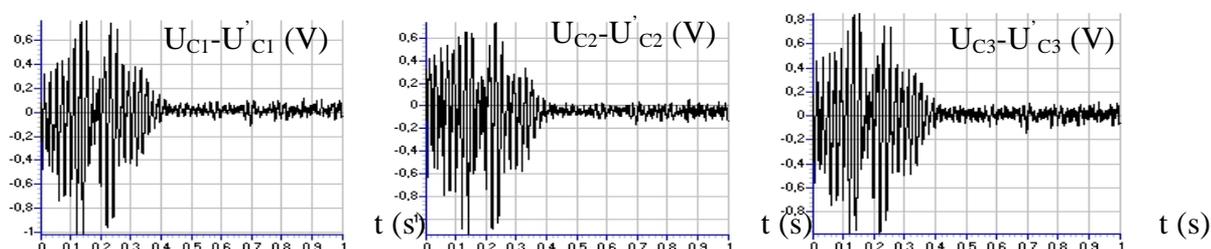


Fig.III.8.c. Différences de tension $U_{C1}-U'_{C1}$, $U_{C2}-U'_{C2}$, $U_{C3}-U'_{C3}$

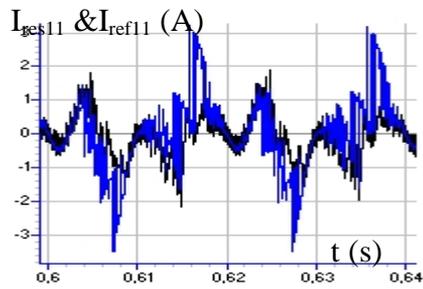


Fig.III.8.d. Courant d'une phase du réseau

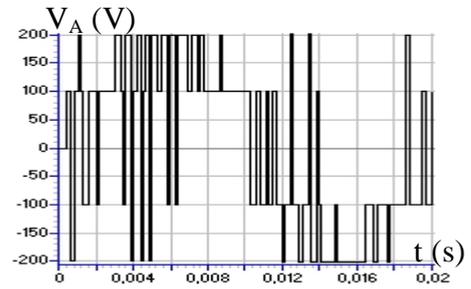


Fig.III.8.e. Tension simple du redresseur MLI

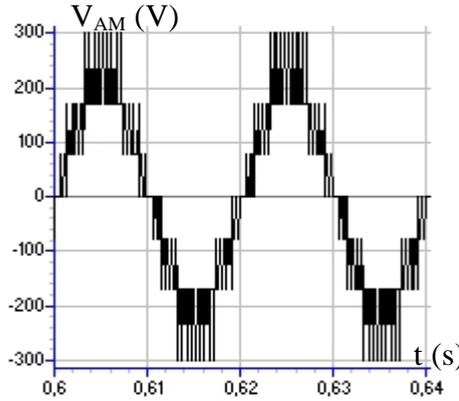


Fig.III.8.f. Tension de sortie de l'onduleur sept niveaux

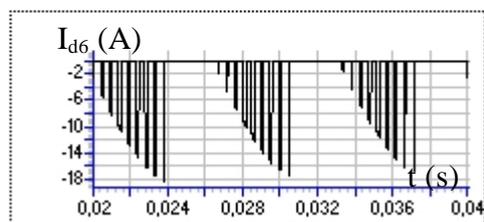
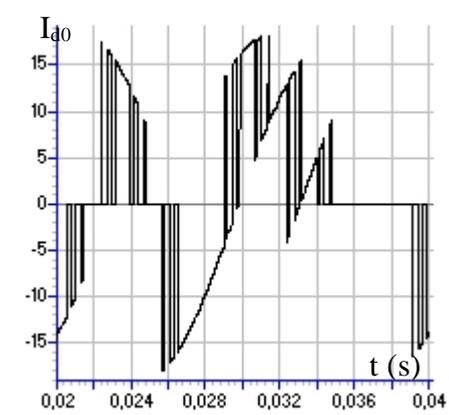
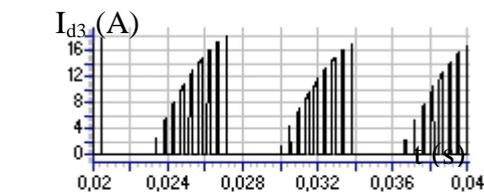
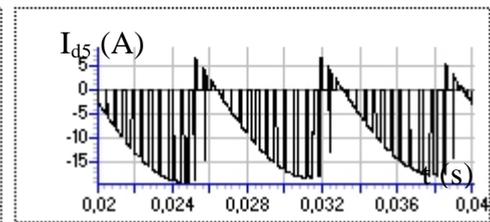
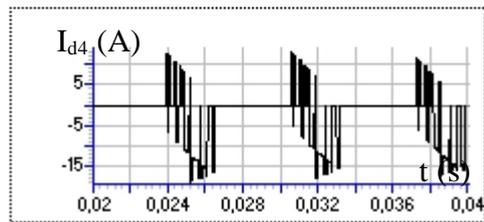
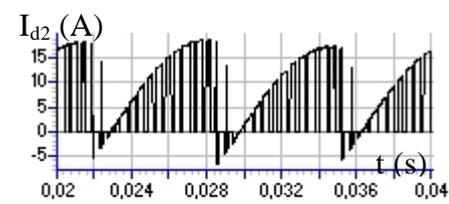
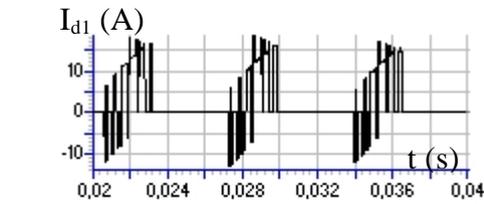
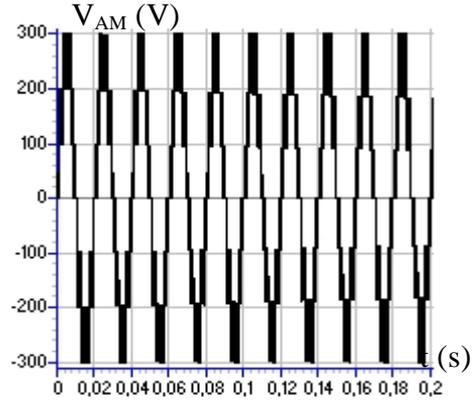


Fig.III.8.g. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

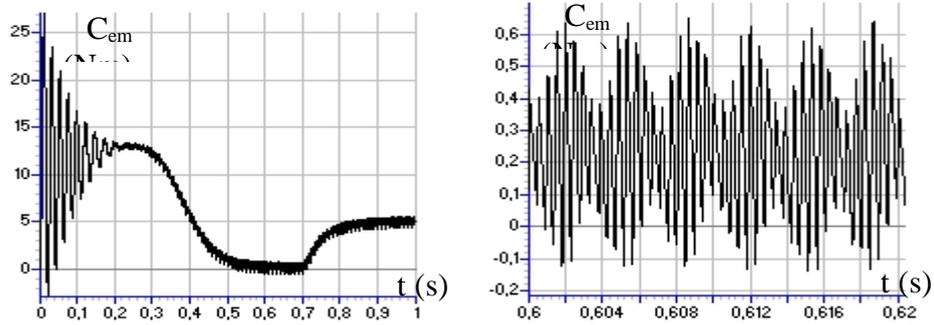


Fig.III.8.h. Couple électromagnétique de la MAS

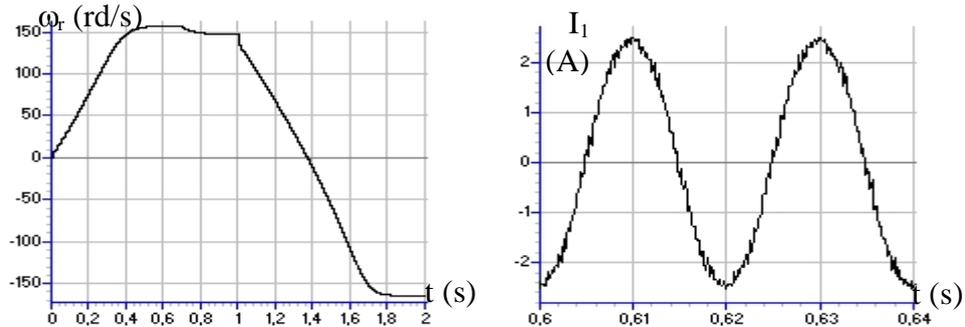


Fig.III.8.i. Vitesse de la machine asynchrone

Fig.III.8.j. Courant absorbé par la MAS

- 2^{ème} cas : $C_1=C_2= C_3=C_4= C_5= C_6=20mF$

Les figures III.9.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à deux niveaux appliqué à la cascade : deux redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - machine asynchrone triphasée, avec les nouveaux paramètres du pont capacitif. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$). Nous constatons :

- Le bon suivi des tensions redressées leur références imposées par les boucles d'asservissement (Fig.III.9.a).
- Une instabilité des tensions continues d'entrée de l'onduleur pendant le régime transitoire de la machine asynchrone (Fig.III.9.b).
- Une instabilité des tensions continues avec la tendance d'inversion de la polarité après l'application du couple de charge (Fig.III.9.b).
- Un écart entre les tensions continues important pendant le régime permanent avec le risque d'inversion de la polarité pour certaines tensions ($U_{C3} \gg U_{C2} \gg U_{C1}$) (Fig.III.9.b).
- Une égalité des tensions du demi-pont capacitif supérieur avec celles du demi-pont inférieur (Fig.III.9.c).
- Une déformation de la tension de sortie de l'onduleur (Fig.III.9.d).
- Les courants absorbés par le réseau sont fortement pollués par les harmoniques (Fig.III.9.e).
- Un démarrage long du moteur asynchrone ($t_d=0.8s$) provoquant un échauffement excessive du bobinage; destructif du stator de la machine (Fig.III.9.f,g).

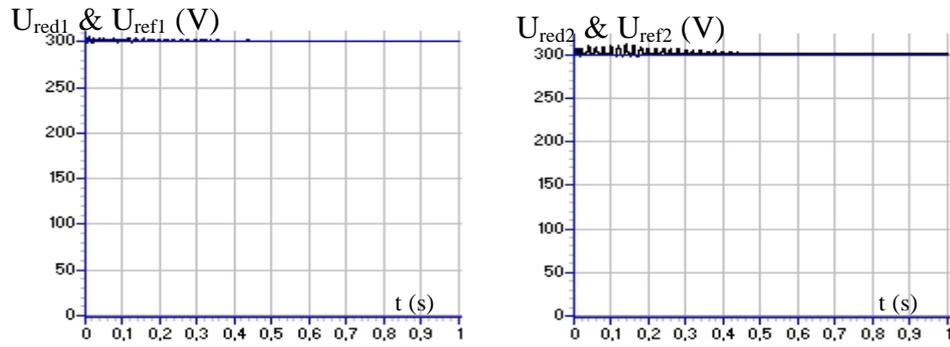


Fig.III.9.a. Tensions de sortie des redresseurs MLI

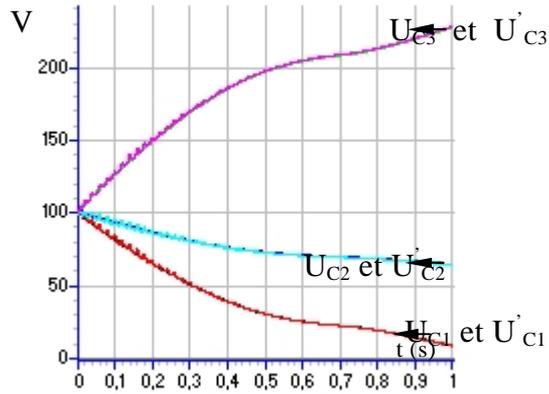


Fig.III.9.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

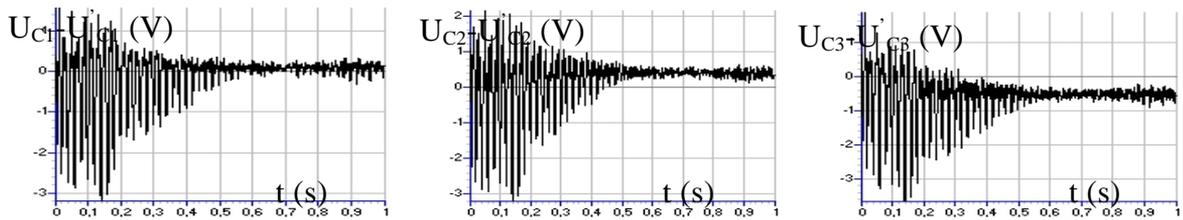


Fig.III.9.c. Différences de tension $U_{C1}-U'_{C1}$, $U_{C2}-U'_{C2}$, $U_{C3}-U'_{C3}$

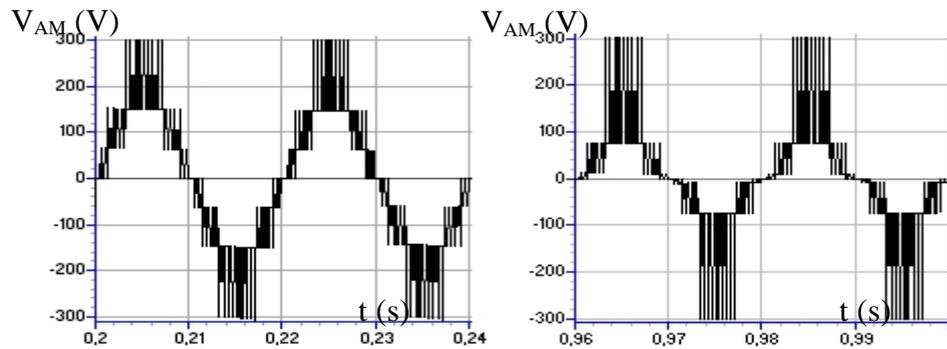


Fig.III.9.d. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

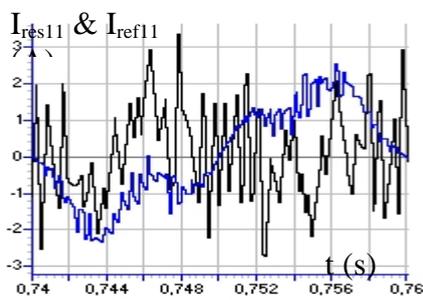


Fig.III.9.e. Courant d'une phase du réseau

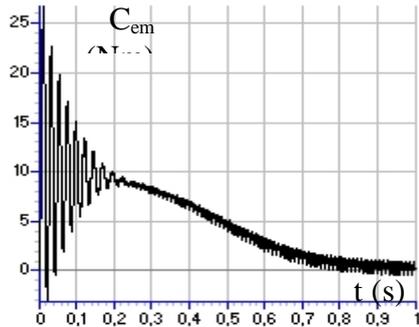


Fig.III.9.f. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

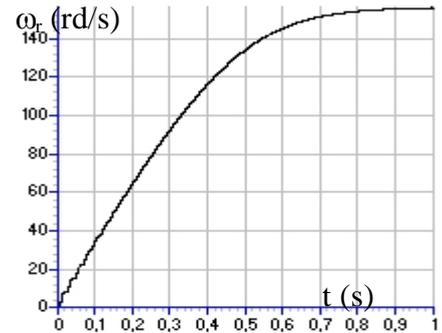


Fig.III.9.g. Vitesse de la MAS à vide

I.4. Cascade trois redresseurs MLI triphasés à deux niveaux - onduleur de tension triphasé à sept niveaux - MAS

I.4.1. Structure série : La structure de cette cascade est présentée au chapitre II (Fig.II.7), on applique l'algorithme d'asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à deux niveaux élaboré pour commander chaque redresseur de la cascade : trois redresseurs MLI triphasés à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS. Le réseau triphasé a une tension efficace 73V et une fréquence 50Hz. Les paramètres du filtre d'entrée du pont redresseur triphasé à deux niveaux sont : $R=0.25\Omega$, $L=10mH$. Le couple de charge est défini par $C_r \{C_r=0 \text{ si } t(s) \in [0 \quad 0.7], C_r=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$. Les tensions de référence des boucles d'asservissement des redresseurs MLI à deux niveaux sont définies par :

$$U_{ref1,2,3} = \begin{cases} 200V & \text{if } t < 1.6s \text{ et } t > 2.4s \\ 190V & \text{if } t \in [1.6s, 2.4s] \end{cases}$$

On analyse les performances de cette cascade pour deux cas de valeurs des condensateurs :

- *1^{er} cas* : $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=60mF$

Les figures III.10.* présentent les résultats de l'asservissement des trois redresseurs MLI triphasés à deux niveaux (mis en série) appliqué à la cascade : trois redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$).

Les tensions de sortie des redresseurs MLI (U_{red1} , U_{red2} et U_{red3}) suivent leur références U_{refi} imposées par les boucles d’asservissement, et rejettent la perturbation du couple de charge (Fig.III.10.a). Les tensions continues d’entrée de l’onduleur à sept niveaux (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) deviennent stables mais non égales après le régime transitoire de la machine asynchrone (Fig. III.10.b). Ainsi, l’application du couple de charge provoque l’instabilité des tensions avec la tendance d’inversion de la polarité pour certaines tensions (Fig. III.10.b). Néanmoins, les tensions du demi-pont capacitif supérieur sont pratiquement égales avec celles du demi-pont inférieur ($U_{C1}=U'_{C1}$, $U_{C2}=U'_{C2}$, $U_{C3}=U'_{C3}$) (Fig. III.10.b,c). Les courants I_{resk} absorbés par le réseau triphasé ne sont pas sinusoïdaux (Fig.III.10.d). La figure III.10.f montre la déformation de l’onde de tension de sortie de l’onduleur. La figure III.10.g montre les courants d’entrée de l’onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension, et inversement égaux par pair ($I_{d1}\approx-I_{d4}$, $I_{d2}\approx-I_{d5}$, $I_{d3}\approx-I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs du moteur asynchrone triphasé (courant, couple et vitesse) sont présentées aux figures III.10.h,i,j.

- **Simulation numérique**

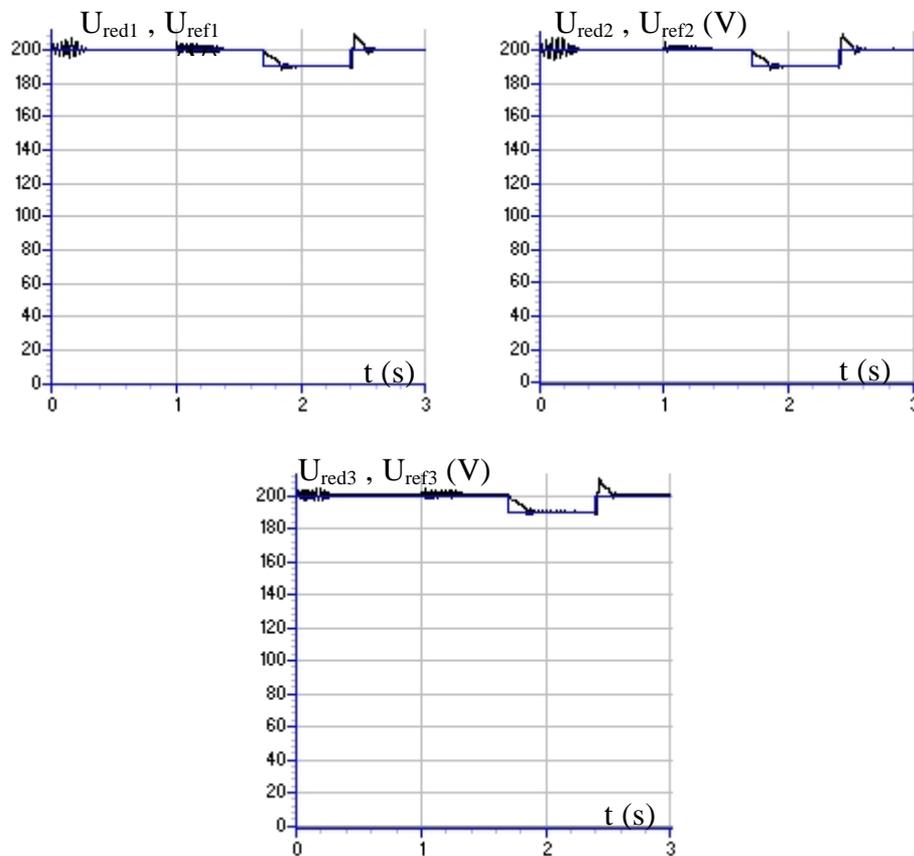


Fig.III.10.a. Tensions de sortie des redresseurs MLI

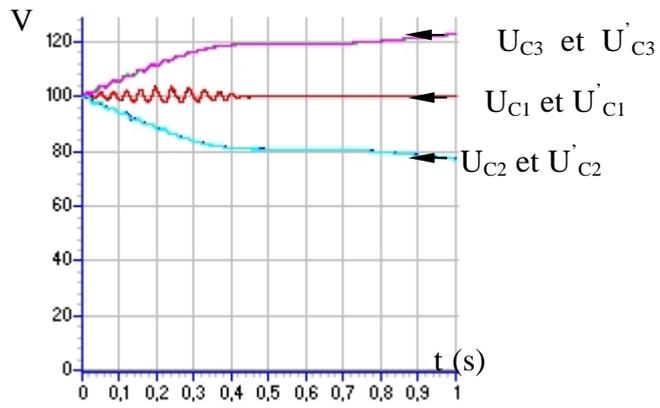


Fig.III.10.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

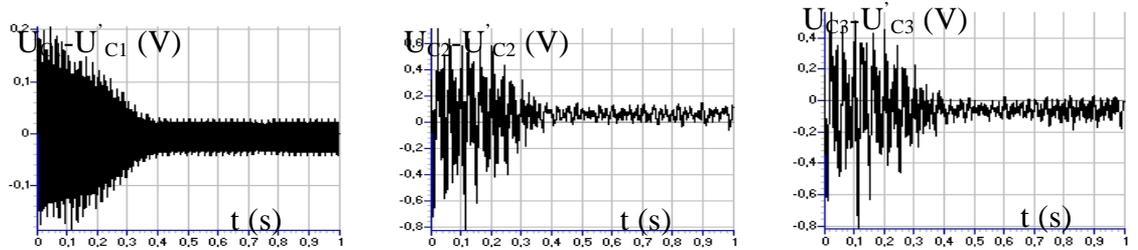


Fig.III.10.c. Différences de tension $U_{C1}-U'_{C1}$, $U_{C2}-U'_{C2}$, $U_{C3}-U'_{C3}$

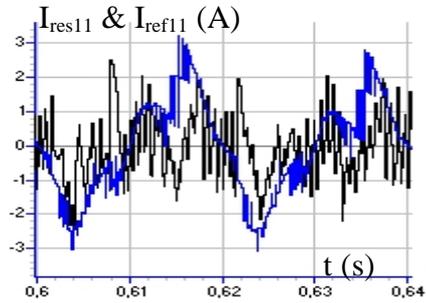


Fig.III.10.d. Courant d'une phase du réseau

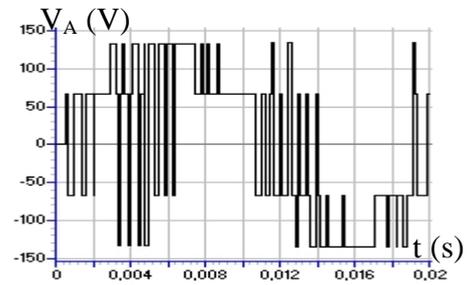


Fig.III.10.e. Tension simple du redresseur MLI

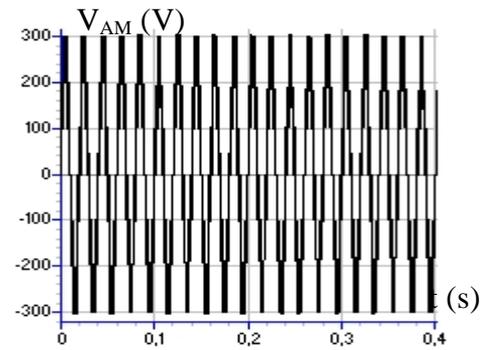
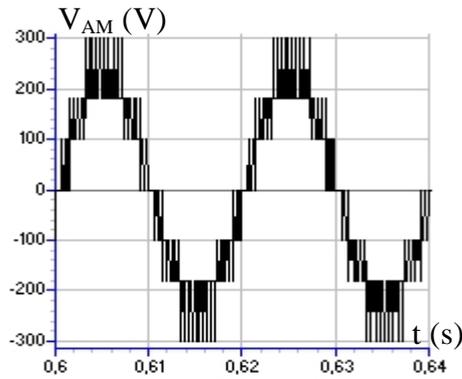


Fig.III.10.f. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

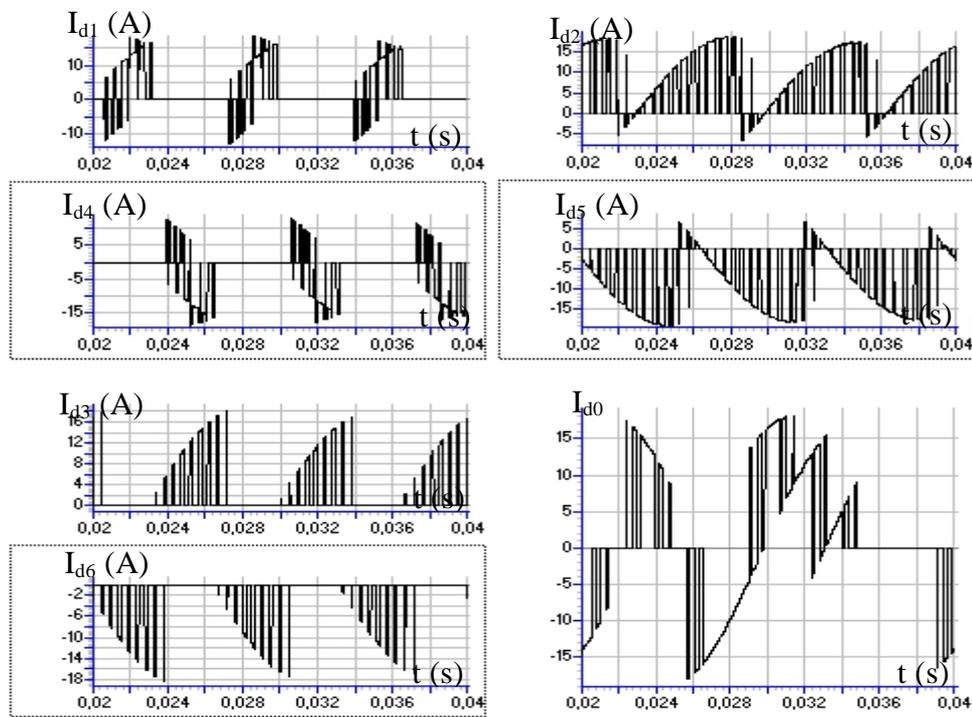


Fig.III.10.g. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

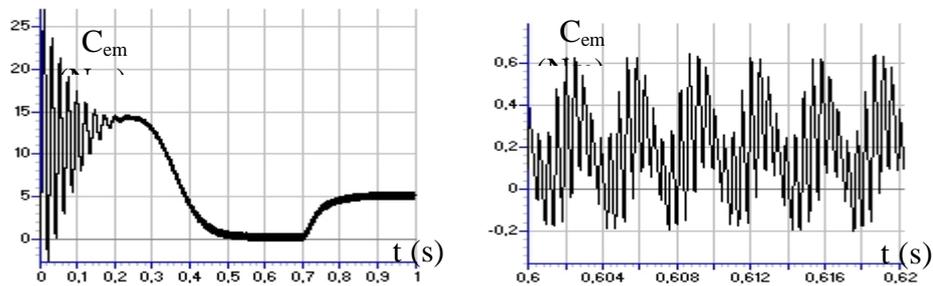


Fig.III.10.h. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

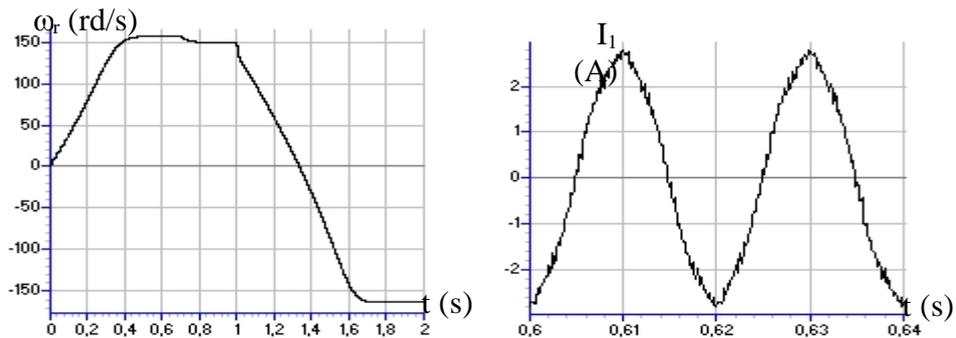


Fig.III.10.i. Vitesse de la machine asynchrone

Fig.III.10.j. Courant absorbé par la MAS

- 2^{eme} cas : $C_1=C_2= C_3=C_4= C_5= C_6=20mF$

Les figures III.11.* présentent les performances de l'asservissement des trois redresseurs MLI triphasé à deux niveaux appliqué à la cascade : trois redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - machine asynchrone triphasée, avec les nouveaux paramètres du filtre capacitif. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$).

Nous constatons :

- Le bon suivi des tensions redressées leur références imposées par les boucles d'asservissement (Fig.III.11.a).
- Une instabilité des tensions continues d'entrée de l'onduleur pendant le régime transitoire de la machine asynchrone (Fig.III.11.b).
- Une instabilité des tensions continues avec la tendance d'inversion de la polarité après l'application du couple de charge (Fig.III.11.b).
- Un écart entre les tensions continues important pendant le régime permanent avec le risque d'inversion de la polarité pour certaines tensions ($U_{C3} \gg U_{C1} \gg U_{C2}$) (Fig.III.11.b).
- Une égalité des tensions du demi-pont capacitif supérieur avec celles du demi-pont inférieur (Fig.III.11.b,c).
- Une déformation de la tension de sortie de l'onduleur (Fig.III.11.d).
- Les courants absorbés par le réseau sont fortement pollués par les harmoniques (Fig.III.11.e).
- Un démarrage long du moteur asynchrone ($t_d=0.55s$) provoquant un échauffement excessive du bobinage; destructif du stator de la machine (Fig.III.11.f,g).

- Simulation numérique

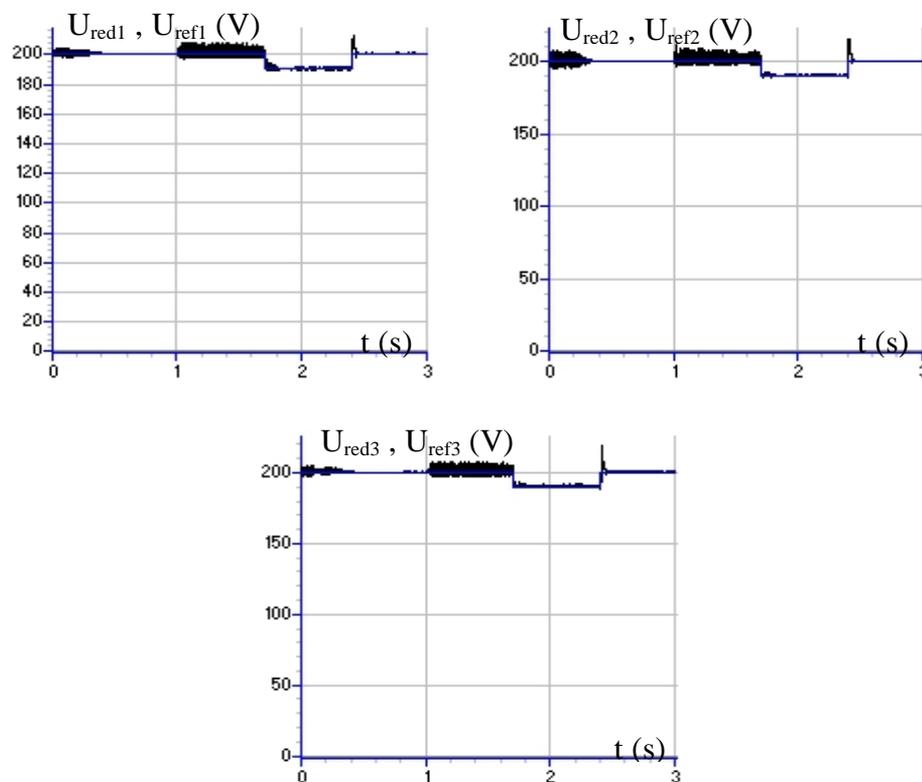


Fig.III.11.a. Tensions de sortie des redresseurs MLI

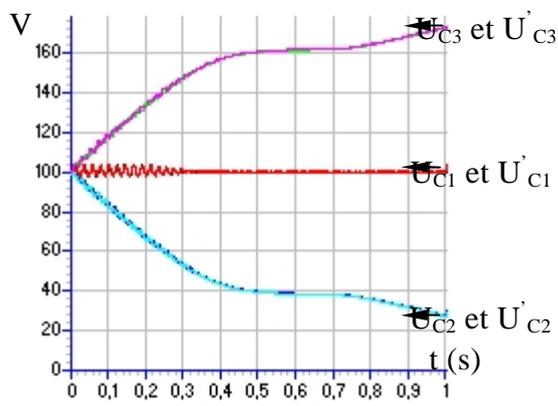


Fig.III.11.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

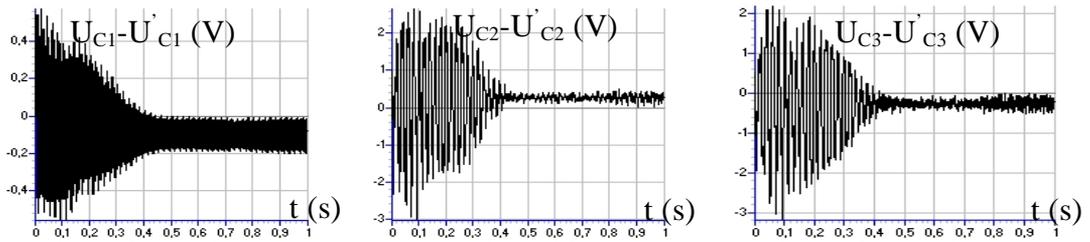


Fig.III.11.c. Différences de tension $U_{C1}-U'_{C1}$, $U_{C2}-U'_{C2}$, $U_{C3}-U'_{C3}$

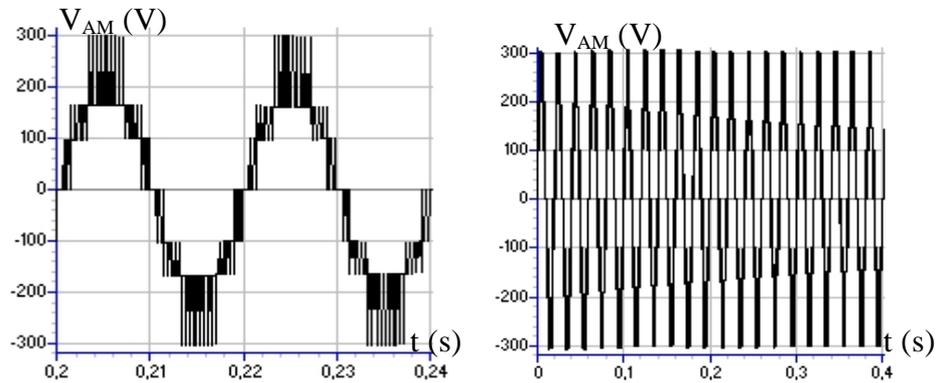


Fig.III.11.d. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

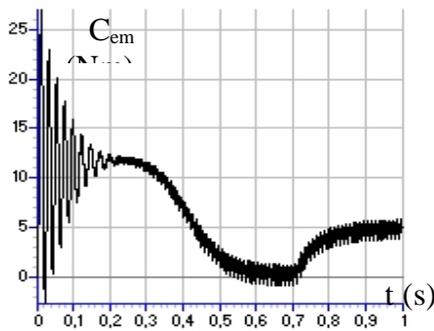


Fig.III.11.e. Couple électromagnétique de la MAS

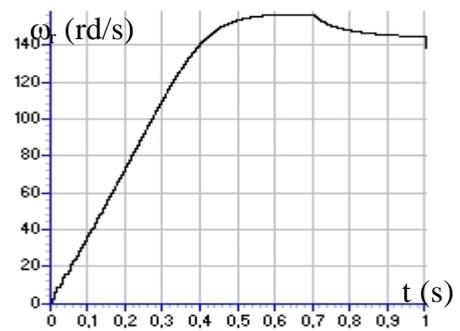


Fig.III.11.f. Vitesse de la machine asynchrone

I.4.2. Structure imbriquée : La structure de cette cascade est présentée au chapitre II (Fig.II.9), on applique le même algorithme d'asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à deux niveaux élaboré précédemment pour commander les trois redresseurs imbriqués de la cascade : trois redresseurs MLI triphasés à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS [Gheraia 2003]. Les réseaux utilisés ont des tensions efficaces resp. 220-147-73V, et une fréquence 50Hz. Les paramètres du filtre d'entrée du pont redresseur triphasé à deux niveaux sont : $R=0.25\Omega$, $L=10mH$. Le couple de charge est défini par $C_r \{C_r=0 \text{ si } t(s) \in [0 \quad 0.7], C_r=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$. Les tensions de référence des boucles d'asservissement des redresseurs MLI à deux niveaux sont définies par :

$$U_{ref1} = \begin{cases} 200V & \text{if } t < 1.6s \text{ et } t > 2.4s \\ 180V & \text{if } t \in [1.6s, 2.4s] \end{cases}$$

$$U_{ref2} = \begin{cases} 400V & \text{if } t < 1.6s \text{ et } t > 2.4s \\ 360V & \text{if } t \in [1.6s, 2.4s] \end{cases}$$

$$U_{ref3} = \begin{cases} 600V & \text{if } t < 1.6s \text{ et } t > 2.4s \\ 560V & \text{if } t \in [1.6s, 2.4s] \end{cases}$$

On analyse les performances de cette cascade pour deux cas de valeurs des condensateurs :

• **1^{er} cas : $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=60mF$**

Les figures III.12.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à deux niveaux appliqué à la cascade : trois redresseurs MLI à deux niveaux (mis en parallèle) - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$)- machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$).

Les tensions de sortie des trois redresseurs MLI (U_{red1} , U_{red2} et U_{red3}) suivent bien leurs références imposées par les boucles d'asservissement, et rejettent la perturbation du couple de charge (Fig.III.12.a). Les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) sont stables et pratiquement égales (Fig.III.12.b,c). Les courants I_{resk} du réseau triphasé ne sont pas sinusoïdaux (Fig.III.12.d). La figure III.12.f montre la stabilité et la symétrie de la tension de sortie de l'onduleur. La figure III.12.g présente les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension, et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}$, $I_{d2} \approx -I_{d5}$, $I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs du moteur asynchrone triphasé (courant, couple et vitesse) sont présentées aux figures III.12.h,i,j.

- Simulation numérique

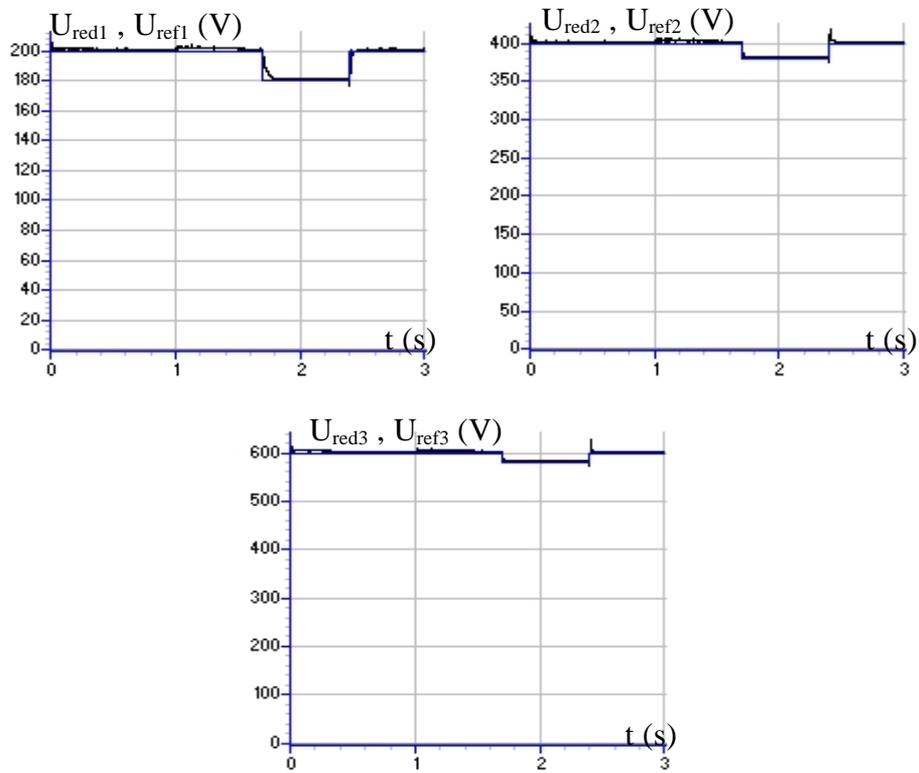


Fig.III.12.a. Tensions de sortie des redresseurs MLI

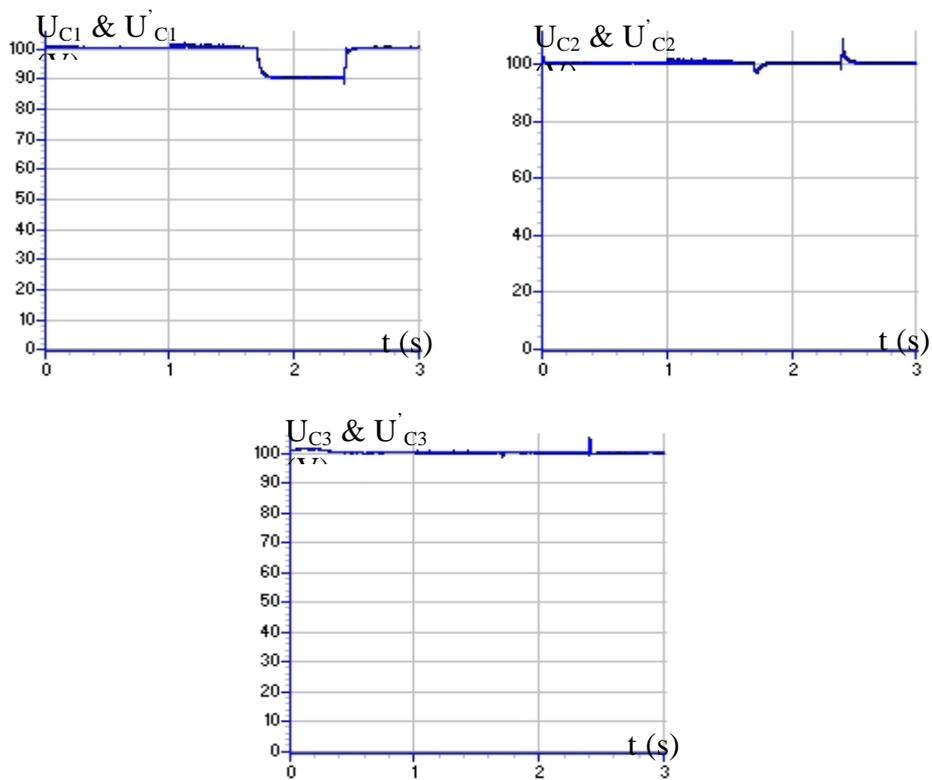


Fig.III.12.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

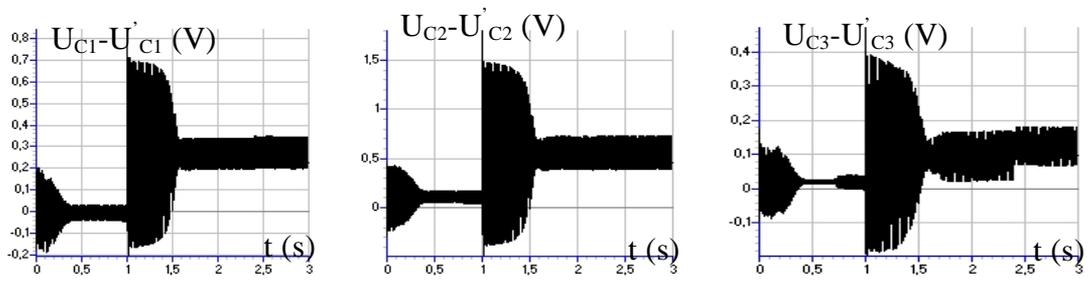


Fig.III.12.c. Différences de tension $U_{C1}-U'_{C1}$, $U_{C2}-U'_{C2}$, $U_{C3}-U'_{C3}$

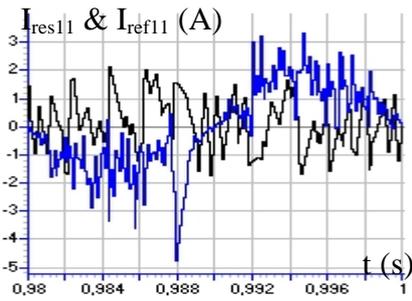


Fig.III.12.d. Courant d'une phase du réseau

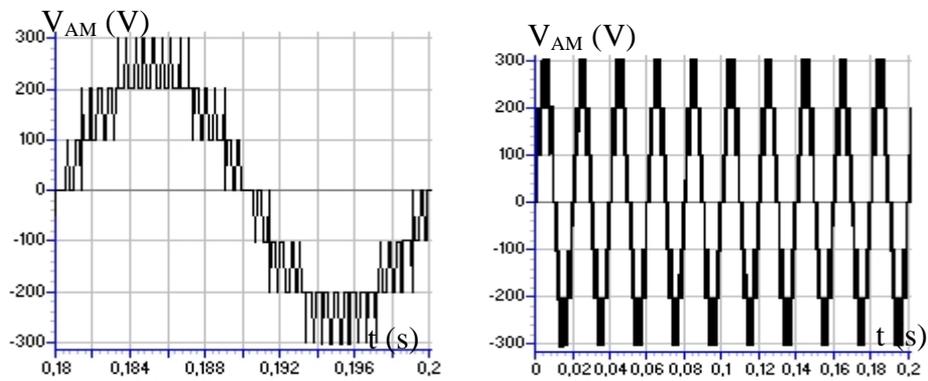
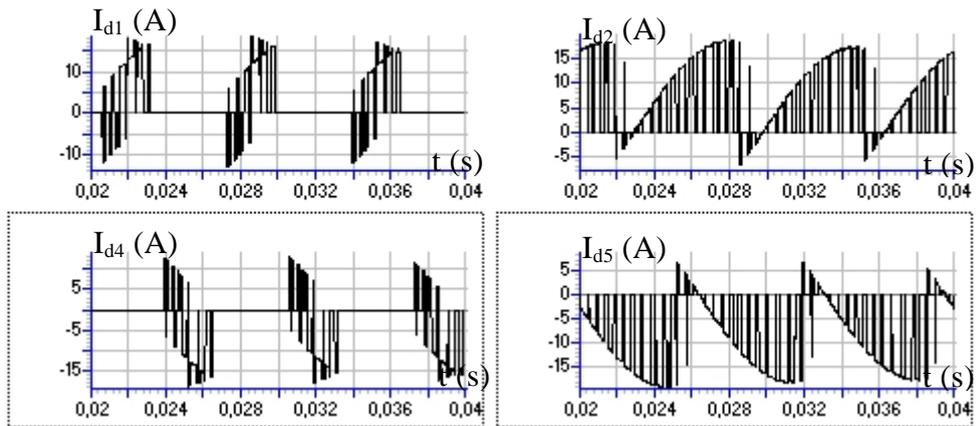


Fig.III.12.f. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux



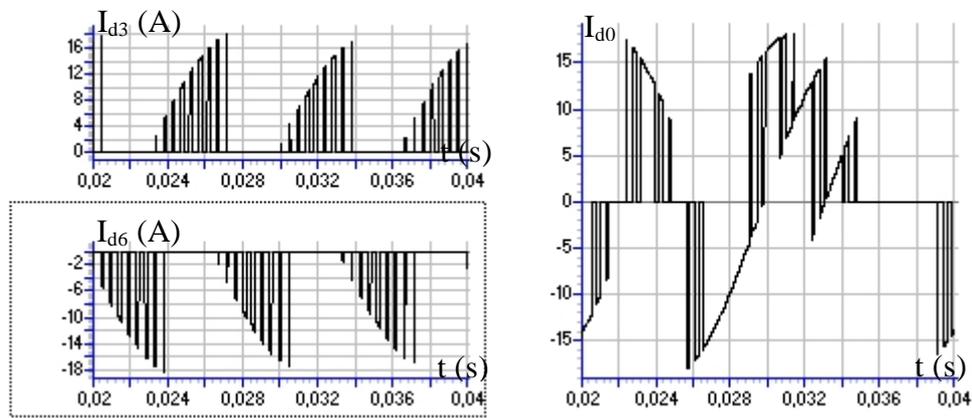


Fig.III.12.g. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

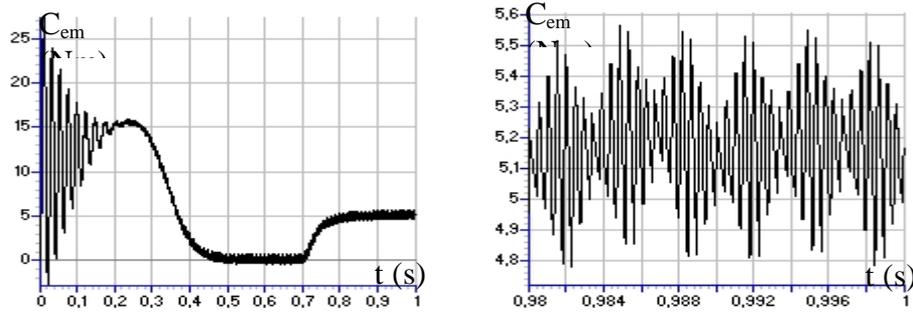


Fig.III.12.h. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

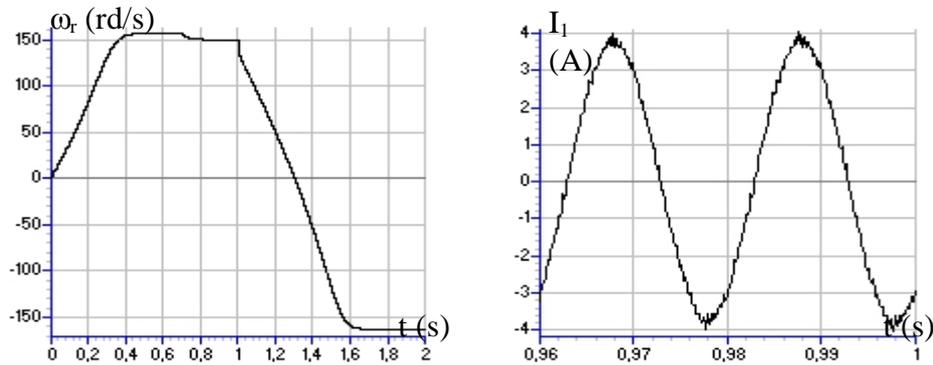


Fig.III.12.i. Vitesse de la machine asynchrone Fig.III.12.j Courant absorbé par la MAS

- 2^{eme} cas : $C_1=C_2= C_3=C_4= C_5= C_6=20mF$

Les figures III.13.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à deux niveaux appliqué à la cascade : trois redresseurs MLI à deux niveaux (mis en parallèle) - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$)- machine asynchrone triphasée, avec les nouveaux paramètres du pont capacitif. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$). Nous constatons :

- Le bon suivie des tensions redressées leurs références imposées par les boucles d'asservissement, et la présence des pics importants de tension lors des régimes transitoires (Fig.III.13.a).

- La stabilité et l'égalité des tensions continues d'entrée de l'onduleur (Fig.III.13.b,c).
- Une tension de sortie de l'onduleur stable et symétrique (Fig.III.13.d).
- Les courants absorbés par le réseau sont fortement pollués par les harmoniques (Fig.III.13.e).
- Simulation numérique

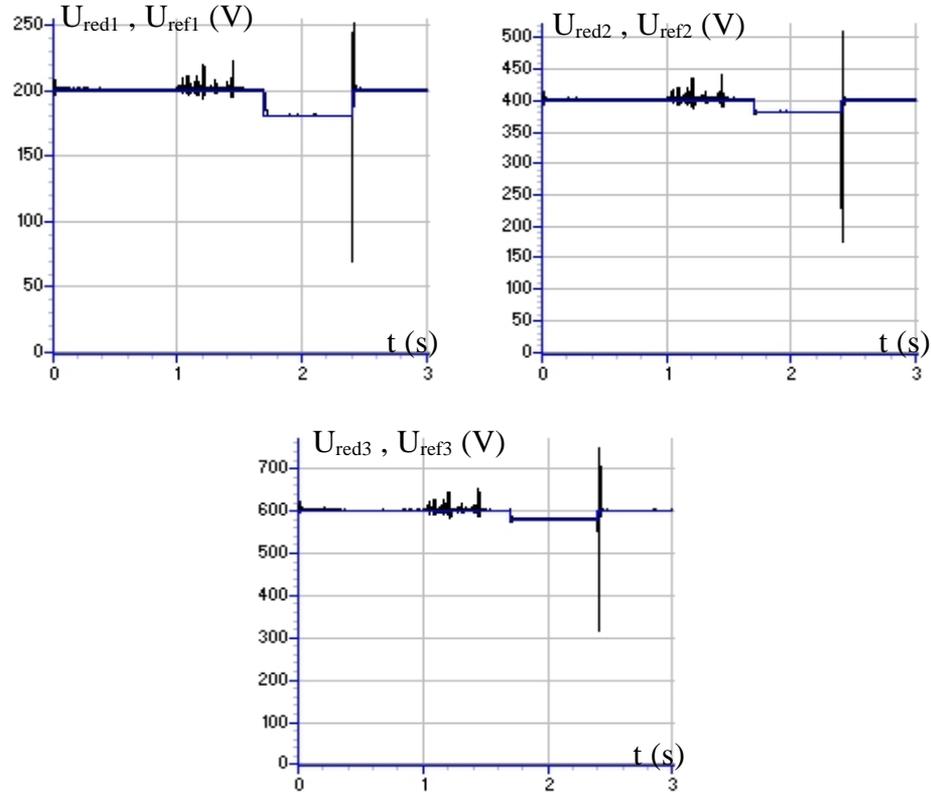
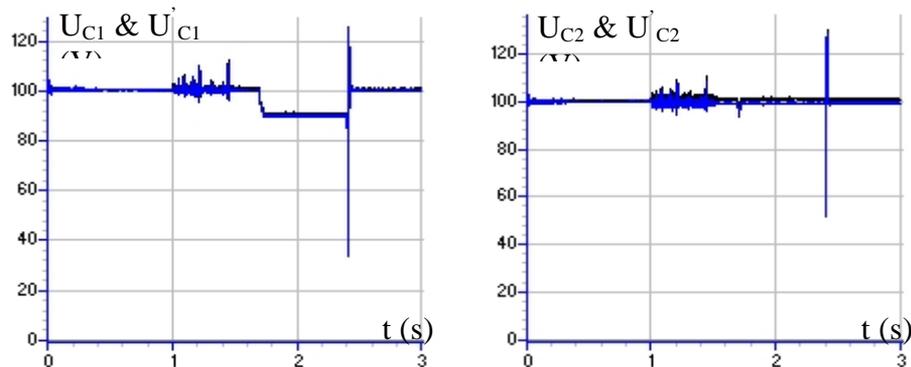


Fig.III.13.a. Tensions de sortie des redresseurs MLI



$U_{C3} \text{ \& \; } U'_{C3}$
(V)

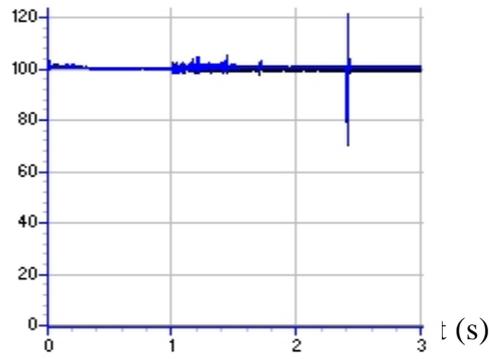


Fig.III.13.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

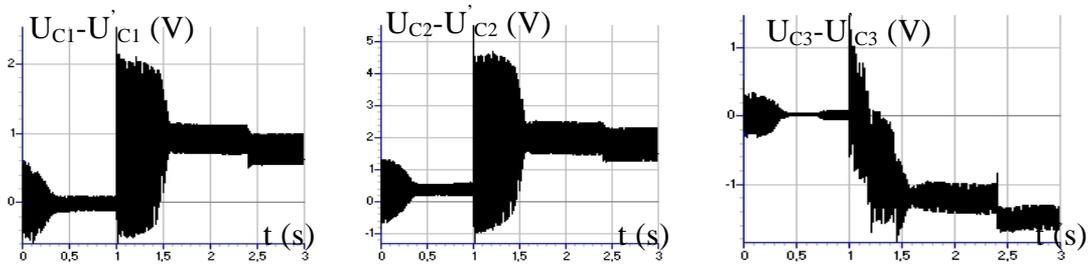


Fig.III.13.c. Différences de tension $U_{C1}-U'_{C1}$, $U_{C2}-U'_{C2}$, $U_{C3}-U'_{C3}$

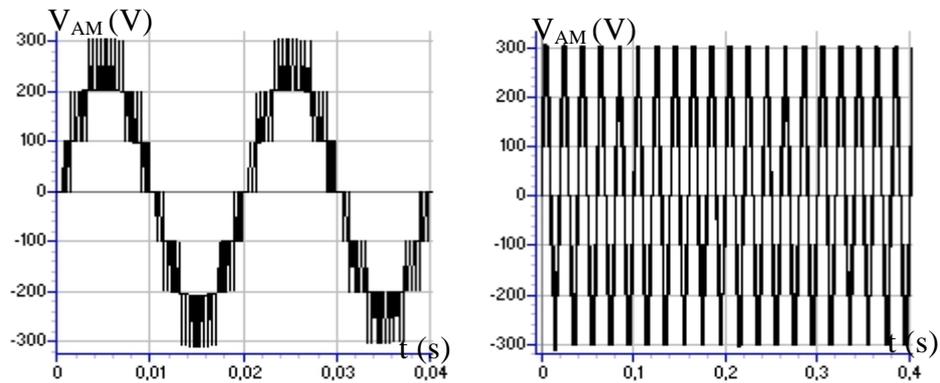


Fig.III.13.d. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

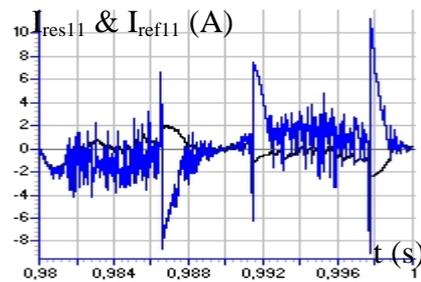


Fig.III.13.e. Courant d'une phase du réseau

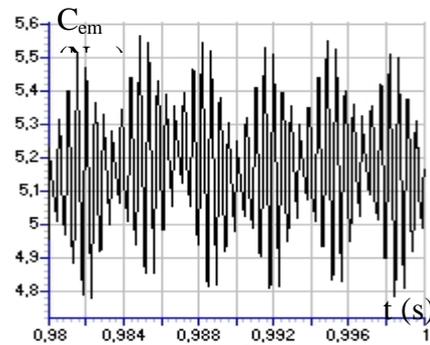
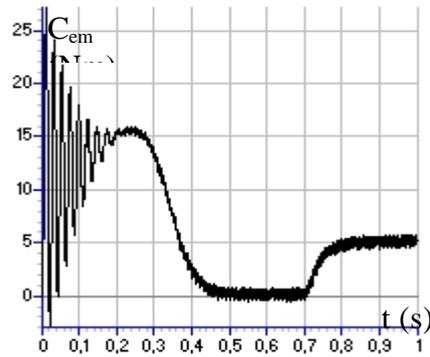


Fig.III.13.f. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

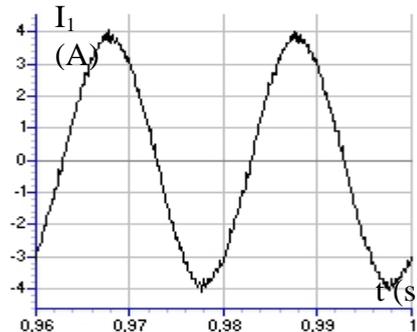
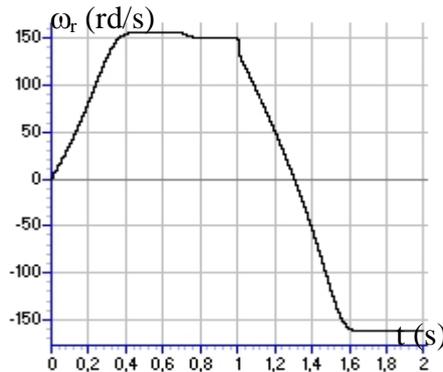


Fig.III.13.g. Vitesse de la machine asynchrone

Fig.III.13.h. Courant absorbé par la MAS

I.5. Cascade six redresseurs à MLI triphasés à deux niveaux - onduleur de tension triphasé à sept niveaux - MAS

On applique le même algorithme d'asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à deux niveaux élaboré pour commander les six redresseurs de la cascade : six redresseurs MLI triphasés à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS. La structure de cette cascade est donnée au chapitre II (Fig.II.11). Les paramètres du filtre d'entrée du pont redresseur triphasé à deux niveaux sont : $R=0.25\Omega$, $L=10\text{mH}$. Les caractéristiques du réseau sont $37\text{V}/50\text{Hz}$. Le couple de charge est défini par $C_r \{C_r=0 \text{ si } t(s) \in [0 \ 0.7], C_r=5\text{Nm} \text{ si } t(s) > 0.7\}$. Les tensions de référence des boucles d'asservissement des redresseurs MLI à deux niveaux sont définies par :

$$U_{\text{ref}1,4} = \begin{cases} 100\text{V} & \text{if } t < 1.6\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 90\text{V} & \text{if } t \in [1.6\text{s} , 2.4\text{s}] \end{cases}$$

$$U_{\text{ref}2,3,5,6} = 100\text{V}$$

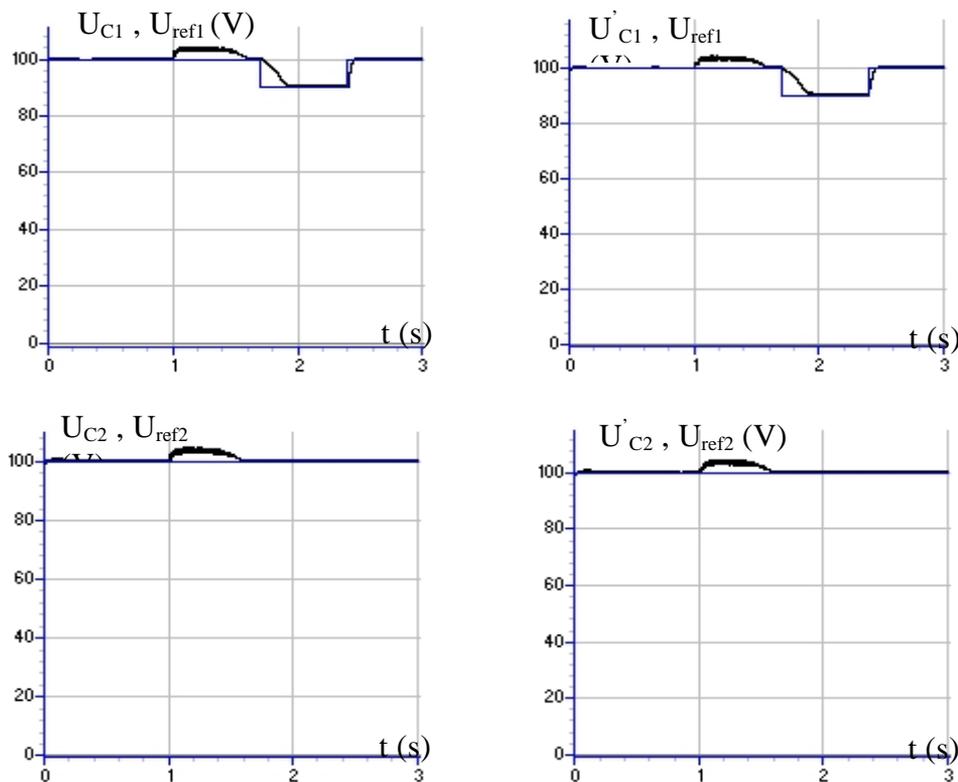
Le choix des condensateurs du pont capacitif d'entrée de l'onduleur est limité par la contrainte de stabilité des tensions continues. On analyse les performances de cette cascade pour deux cas de valeurs des condensateurs :

- *1^{er} cas* : $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=60mF$

Les figures III.14.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à deux niveaux appliqué à la cascade : six redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$).

Les tensions de sortie des redresseurs MLI (U_{red1} , U_{red2} , U_{red3} , U_{red4} , U_{red5} et U_{red6}) suivent leurs références ($U_{refi=1,6}$) imposées par les boucles d'asservissement, et rejettent la perturbation du couple de charge (Fig.III.14.a). A cet effet, les tensions continues d'entrée de l'onduleur (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) sont stables et pratiquement égales. La figure III.14.b montre la stabilité parfaite de la tension de sortie de l'onduleur. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent leurs références proches des sinusoïdes I_{refk} (Fig.III.14.c). La figure III.14.e montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension, et inversement égales par paire ($I_{d1}\approx-I_{d4}$, $I_{d2}\approx-I_{d5}$, $I_{d3}\approx-I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs du moteur asynchrone triphasé (courant, couple et vitesse) sont présentées aux figures III.14.f,g,h.

- *Simulation numérique*



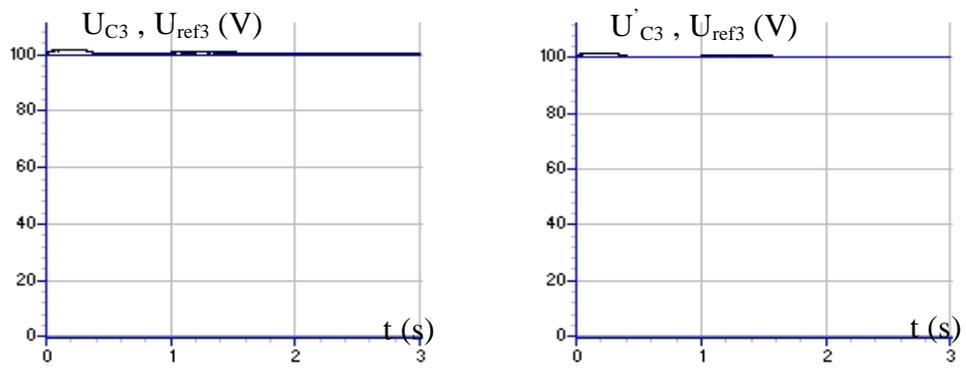


Fig.III.14.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

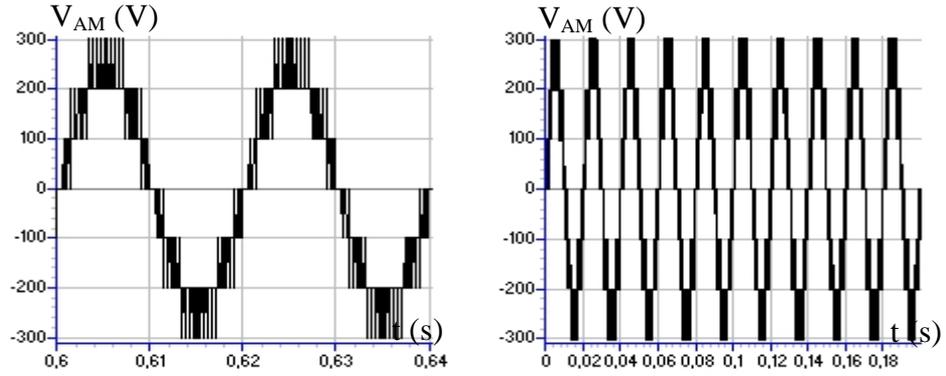


Fig.III.14.b. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

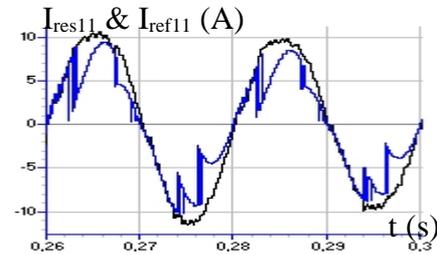


Fig.III.14.c. Courant d'une phase du réseau

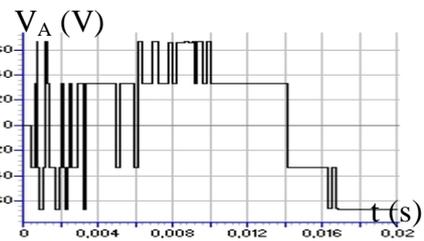
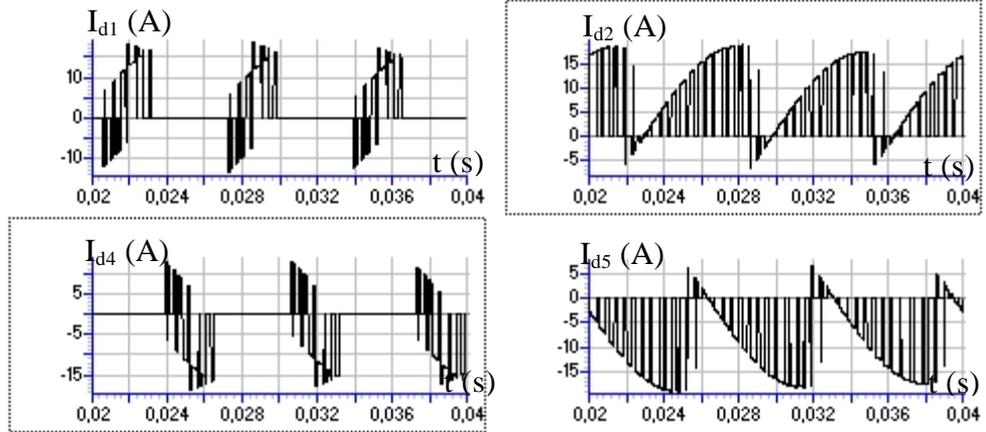


Fig.III.14.d. Tension simple du redresseur MLI



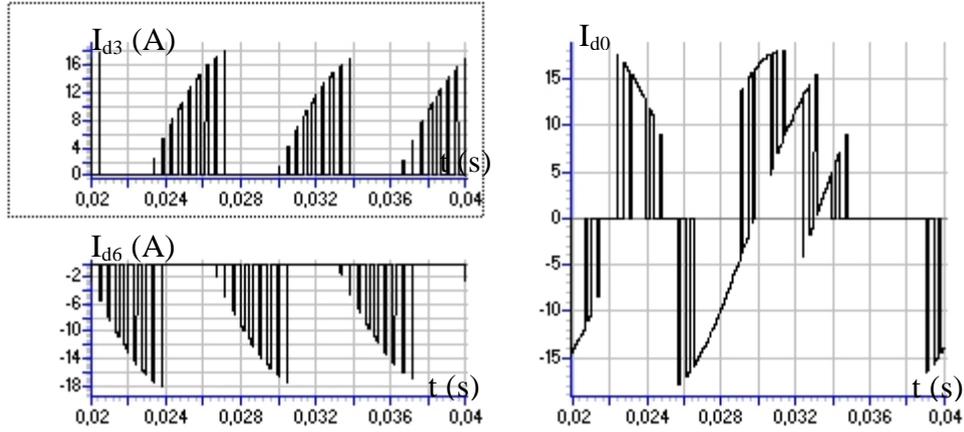


Fig.III.14.e. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

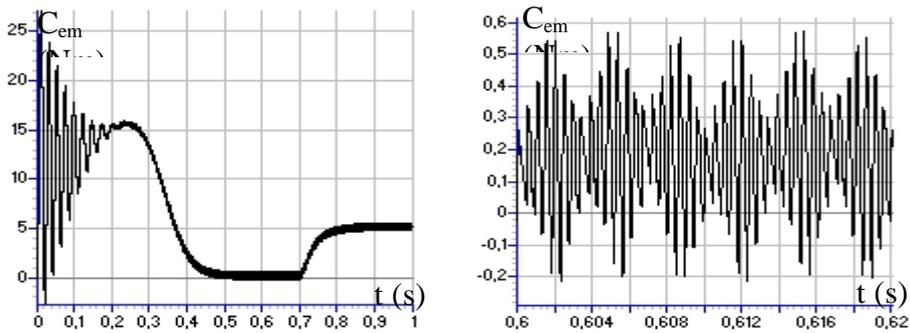


Fig.III.14.f. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

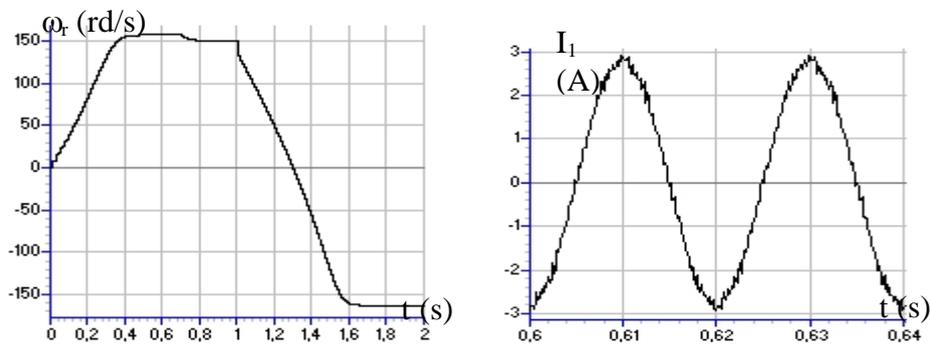


Fig.III.14.g. Vitesse de la machine asynchrone Fig.III.14.h. Courant absorbé par la MAS

- 2^{eme} cas : $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=20mF$

Les figures III.15.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à deux niveaux appliqué à la cascade : six redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - machine asynchrone triphasée, avec les nouveaux paramètres du pont capacitif. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$).

Les tensions de sortie des redresseurs MLI (U_{red1} , U_{red2} , U_{red3} , U_{red4} , U_{red5} et U_{red6}) suivent leurs références ($U_{refi=1,6}$), et rejettent la perturbation du couple de charge (Fig.III.15.a). Ainsi, les tensions

continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) sont stables et égales. La figure III.15.b montre la stabilité de la tension de sortie de l'onduleur. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent leurs références proches des sinusoïdes I_{refk} (Fig.III.15.c). La figure III.15.d montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension, et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}$, $I_{d2} \approx -I_{d5}$, $I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs du moteur asynchrone triphasé (courant, couple et vitesse) sont présentées aux figures III.15.e,f,g.

- Simulation numérique

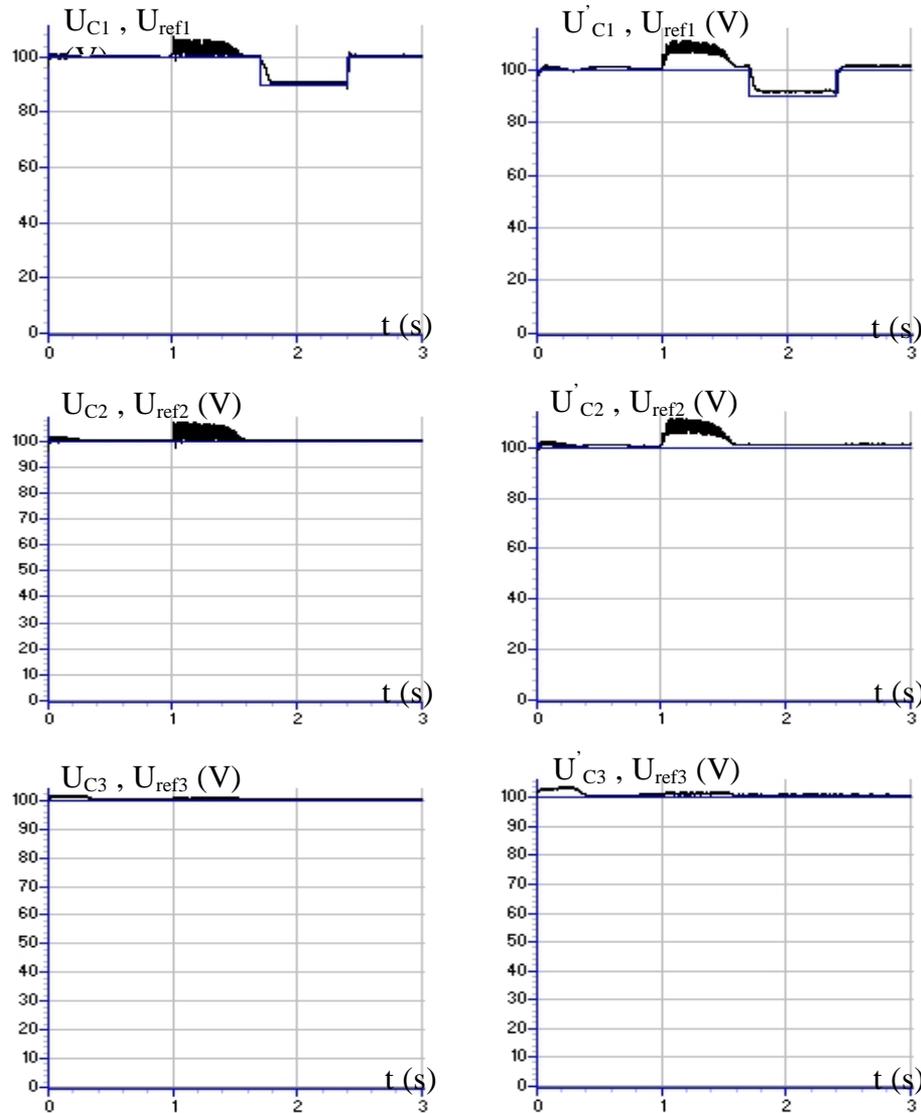


Fig.III.15.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

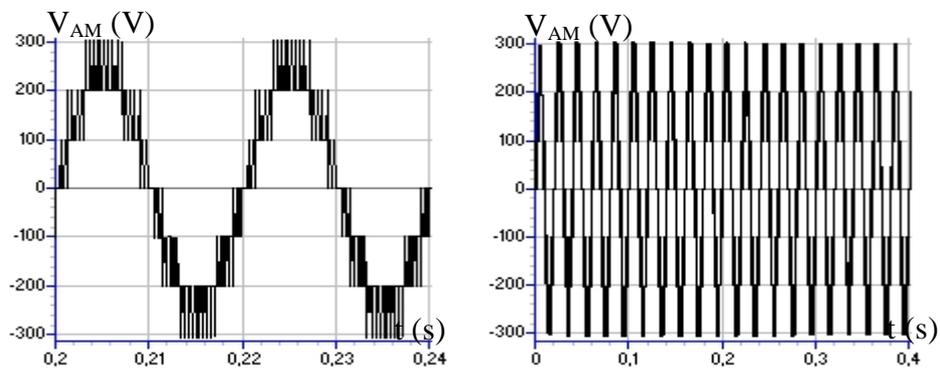


Fig.III.15.b. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux.

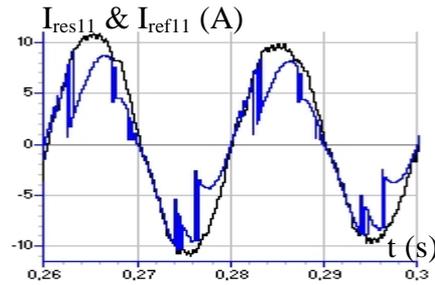


Fig.III.15.c. Courant d'une phase du réseau

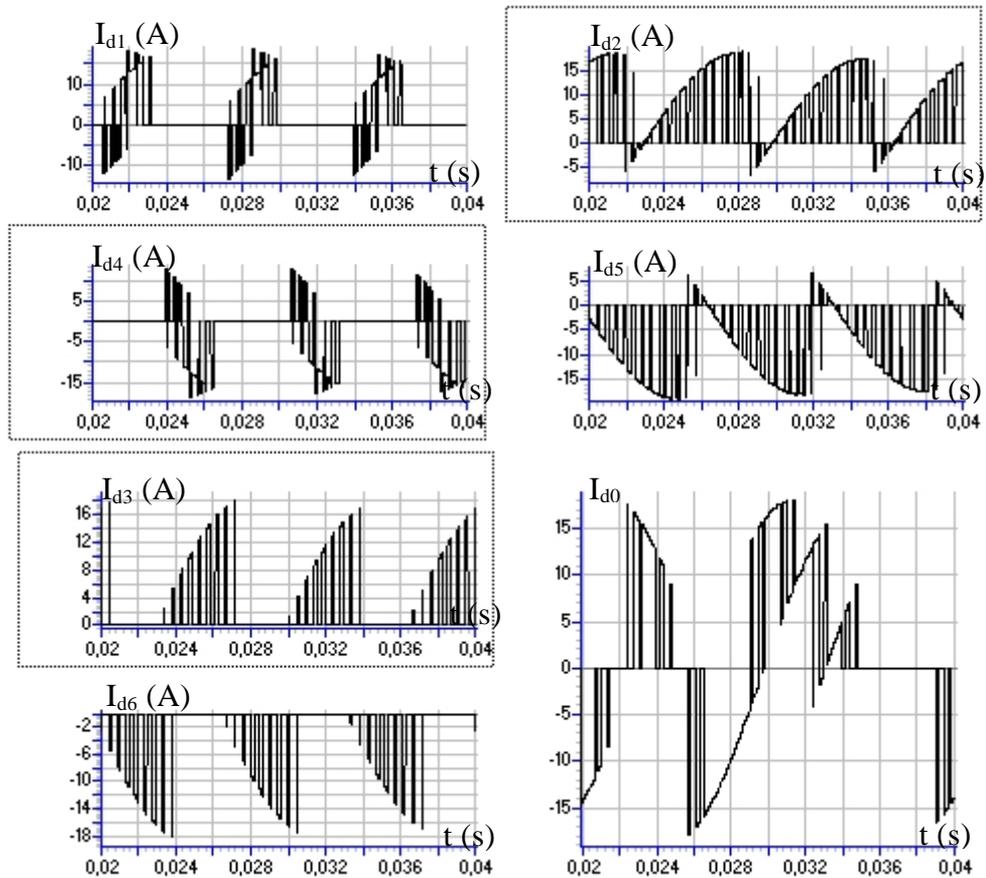


Fig.III.15.d. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

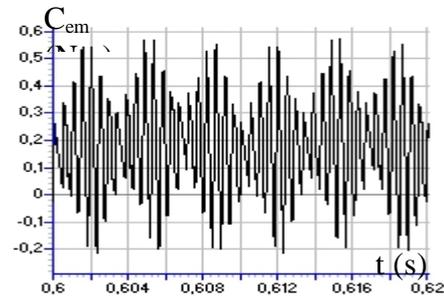
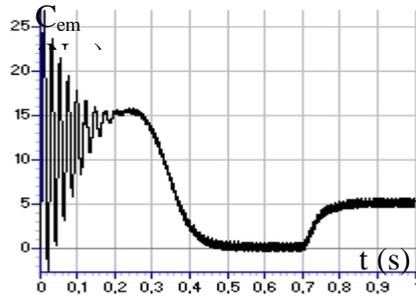


Fig.III.15.e. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

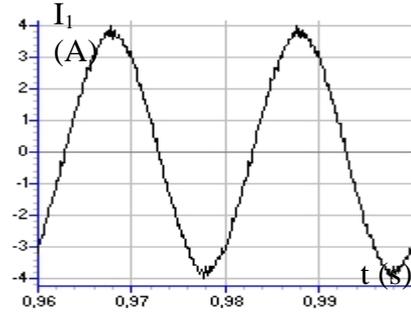
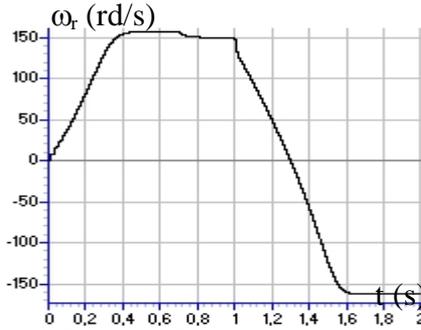


Fig.III.15.f. Vitesse de la machine asynchrone Fig.III.15.g.Courant absorbé par la MAS

II. Asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à trois niveaux

II.1. Modèle de la boucle de courant et de tension

Comme pour le redresseur de courant triphasé à deux niveaux, chaque phase k ($k=1,2$ ou 3) du réseau triphasé alimentant le pont redresseur triphasé à trois niveaux (Fig.III.16) peut être modéliser par un circuit RL monophasé. Le modèle de commande du redresseur triphasé à trois niveaux est donné à la figure III.17 [Berkouk 95]. On note l'analogie existant entre les redresseurs (ou onduleur) à deux niveaux et trois niveaux. Comme pour les redresseurs à deux niveaux, la boucle de tension impose toujours la valeur efficace du courant de référence du réseau. En utilisant la conservation de la puissance et en négligeant les pertes joules dans la résistance R du filtre d'entrée, on peut écrire :

$$\begin{cases} P_e = V_1 \cdot i_{res1} + V_2 \cdot i_{res2} + V_3 \cdot i_{res3} = \sum_{k=1}^3 \left[V_{resk} \cdot i_{resk} - (1/2) \cdot L \cdot \frac{d(i_{resk}^2)}{dt} \right] \\ P_s = U_{C1} \cdot (i_{c1} + i_{ch1}) + U_{C2} \cdot (i_{c2} + i_{ch2}) \end{cases} \quad (III.4)$$

On supposera dans la suite que $U_{C1}=U_{C2}=U_C$, et $C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=C$. Définissons les grandeurs i_C , i_{Ch} et U_C ($(U_C)_{moy}$) comme suit :

$$i_C = \frac{i_{C1} + i_{C2}}{2}, \quad i_{Ch} = \frac{i_{Ch1} + i_{Ch2}}{2}, \quad U_C = (U_C)_{moy} = \frac{U_{C1} + U_{C2}}{2} \quad \text{et} \quad I_{red} = i_C + i_{Ch}$$

La relation (III.4) permet alors d'écrire :

$$P = \sum_{k=1}^3 \left[V_{resk} \cdot i_{resk} = 2 \cdot U_C \cdot (i_C + i_{Ch}) + \sum_{k=1}^3 (1/2) \cdot L \cdot \frac{d(i_{resk}^2)}{dt} \right] \quad (III.5)$$

En supposant les systèmes de tension et de courant du réseau triphasé sinusoïdaux et équilibrés, la relation (III.5) devient :

$$P = 3 \cdot V_r \cdot I_e = 2 \cdot U_C \cdot (i_C + i_{Ch}) \quad (III.6)$$

Le modèle de la boucle de tension du redresseur triphasé à trois niveaux déduit de cette relation est représenté par la figure III.19. L'algorithme d'asservissement du redresseur triphasé à trois niveaux présenté dans ce chapitre permet d'asservir la valeur moyenne U_C des tensions continues U_{C1} et U_{C2} [Berkouk 95][Berkouk 95.1].

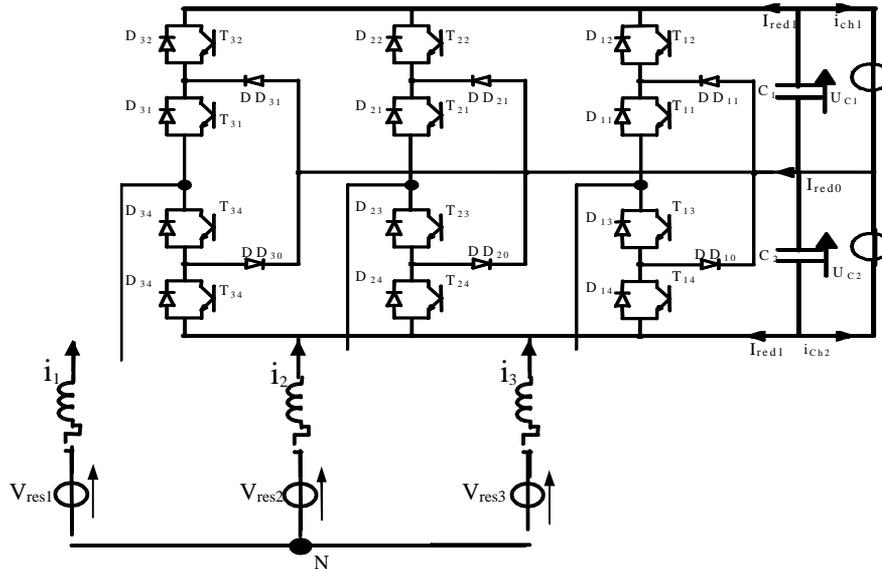


Fig.III.16. redresseur MLI à trois niveaux

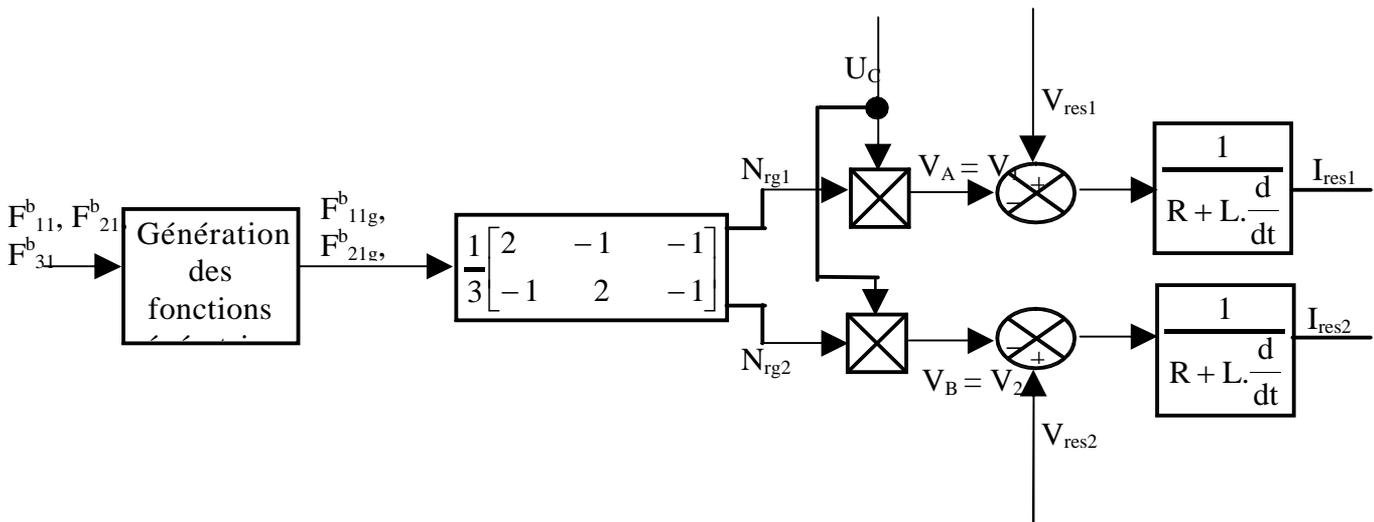


Fig.III.17. Modèle de commande du redresseur triphasé à trois niveaux

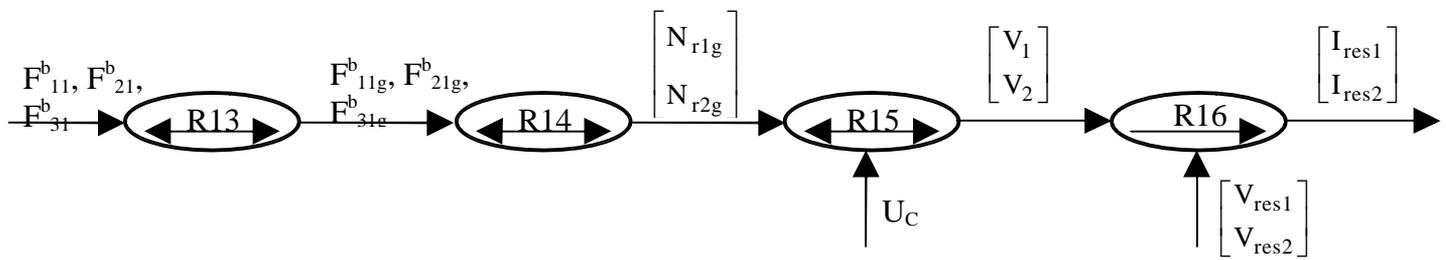


Fig.III.18. Graphe informationnel causal associé au modèle de commande du redresseur triphasé à trois niveaux

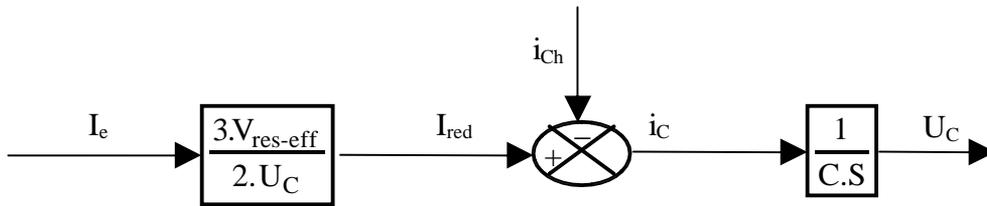


Fig.III.19. Modèle de la boucle de tension du redresseur triphasé à trois niveaux

II.2. Cascade un redresseur MLI triphasé à trois niveaux - onduleur de tension triphasé à sept niveaux - MAS

La structure de cette cascade est donnée au chapitre II (Fig.II.14), on applique l'algorithme d'asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à trois niveaux élaboré pour commander le redresseur de la cascade : un redresseur MLI triphasé à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS. Pour la boucle de courant, nous avons choisi la commande par hystérésis [Berkouk 95][Rahman 97]. Les paramètres du filtre d'entrée du pont redresseur triphasé à deux niveaux sont : $R=0.25\Omega$, $L=10\text{mH}$. Les caractéristiques du réseau sont $220\text{V}/50\text{Hz}$. La tension de référence de la boucle d'asservissement du redresseur MLI à trois niveaux est définie par :

$$U_{\text{ref}} = \begin{cases} 300\text{V} & \text{if } t < 1.6\text{s} \text{ et } t > 2\text{s} \\ 280\text{V} & \text{if } t \in [1.6\text{s}, 2\text{s}] \end{cases}$$

Le choix des condensateurs du filtre capacitif d'entrée de l'onduleur multiniveaux est limité par la contrainte de stabilité des tensions continues. On analyse les performances de cette cascade pour deux cas de valeurs des condensateurs :

- *1^{er} cas* : $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=60\text{mF}$

Les figures III.20.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à trois niveaux appliqué à la cascade : un redresseur MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - machine asynchrone triphasée. Le redresseur MLI à trois niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.001\text{A}$). Le couple de charge est défini par C_r $\{C_r=0 \text{ si } t(\text{s}) \in [0, 0.7], C_r=5\text{Nm} \text{ si } t(\text{s}) > 0.7\}$.

La tension de sortie moyenne du redresseur MLI à trois niveaux U_{Cmoy} ($U_{Cmoy} = \frac{U_{C1} + U_{C2} + U_{C3} + U'_{C1} + U'_{C2} + U'_{C3}}{2}$) suit bien sa référence (U_{ref}) imposée par la boucle d'asservissement, et rejette la perturbation de couple de charge (Fig.III.20.a). Les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) deviennent stables après le régime transitoire, et égales par paire (Fig. III.20.b,c). La figure III.20.d montre la déformation de l'onde de tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent bien leurs références I_{refk} (Fig.III.20.e). La figure III.20.g montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension, et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}$, $I_{d2} \approx -I_{d5}$, $I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs du moteur asynchrone triphasé (courant, couple et vitesse) sont présentées aux figures III.20.h,i,j.

- Simulation numérique

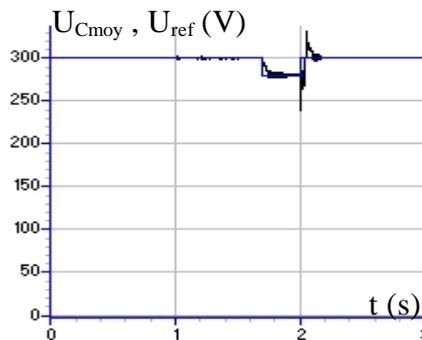


Fig.III.20.a. Tension moyenne du filtre capacitif de l'onduleur et sa référence

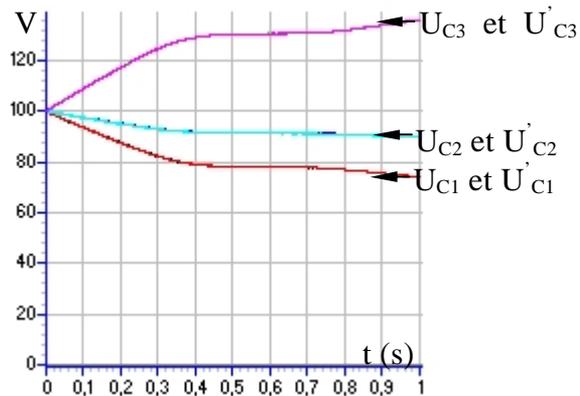


Fig.III.20.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

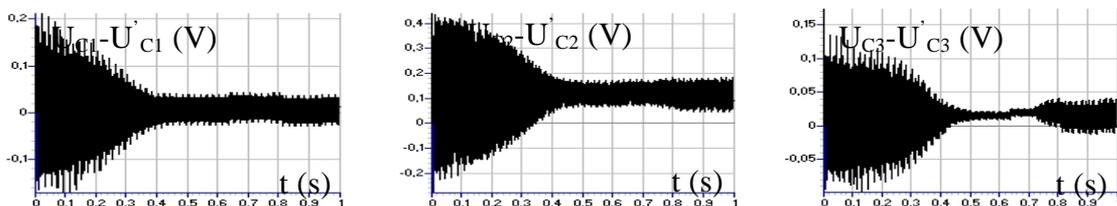


Fig.III.20.c. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$, $U_{C3} - U'_{C3}$

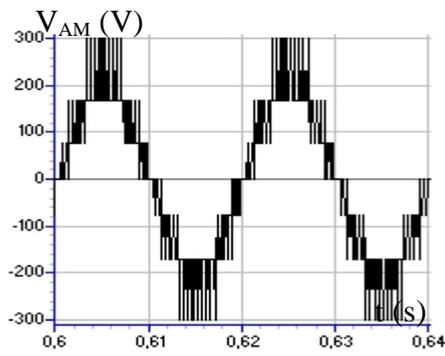


Fig.III.20.d. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

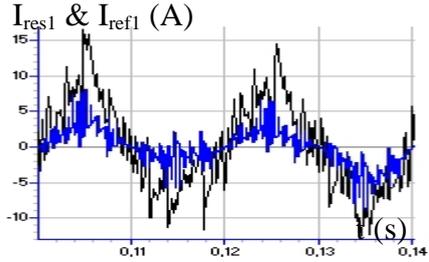
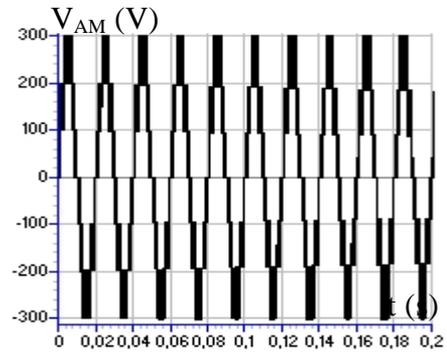


Fig.III.20.e. Courant d'une phase du réseau redresseur MLI

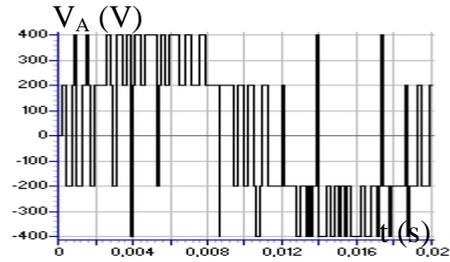


Fig.III.20.f. Tension simple du redresseur MLI

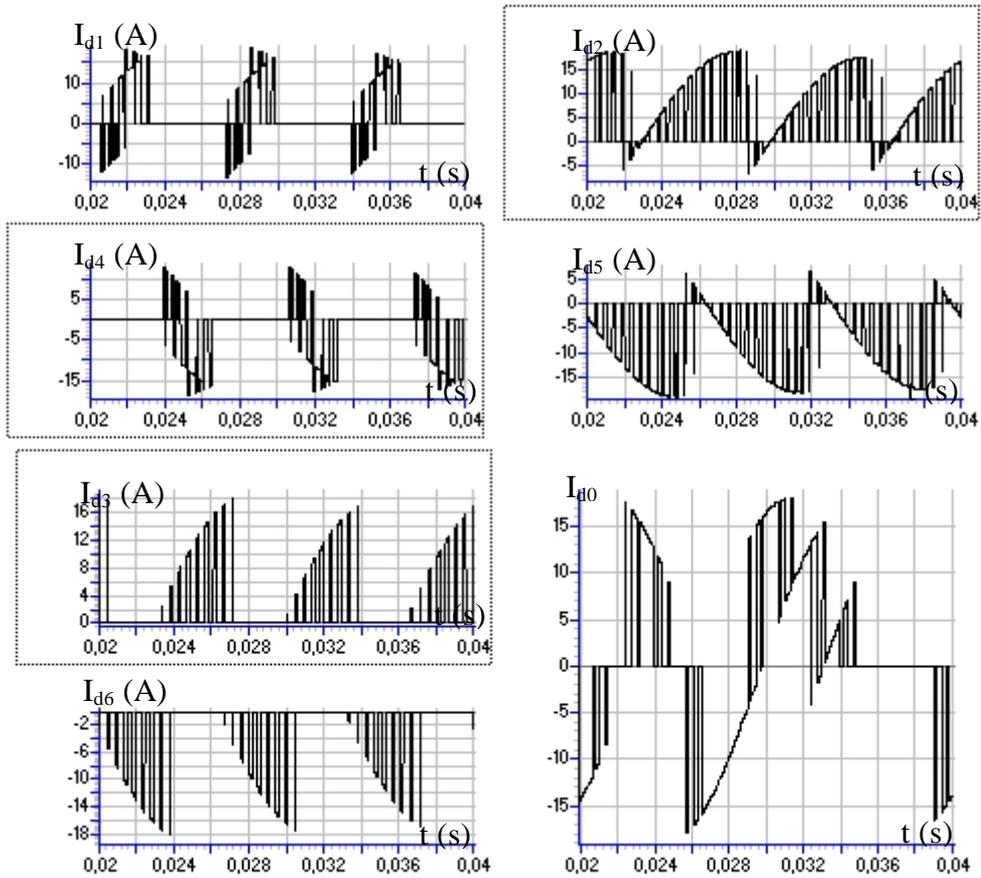


Fig.III.20.g. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

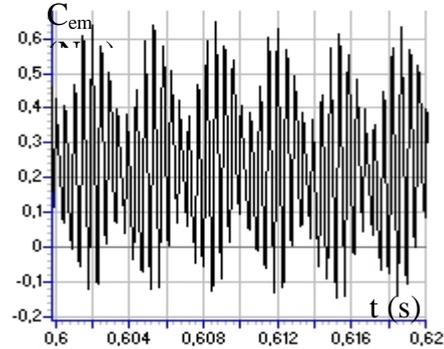
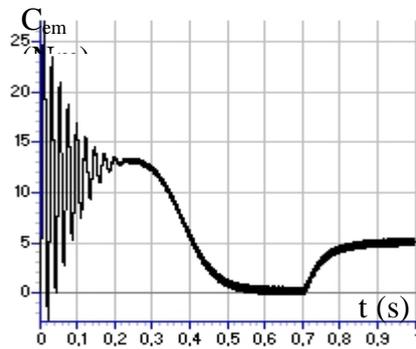


Fig.III.20.h. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

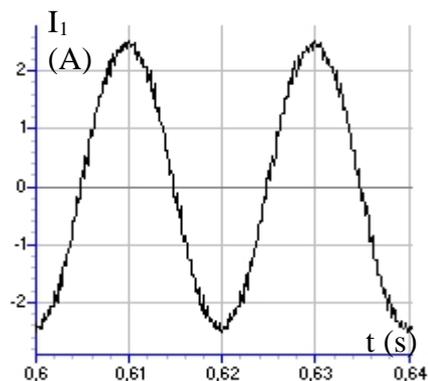
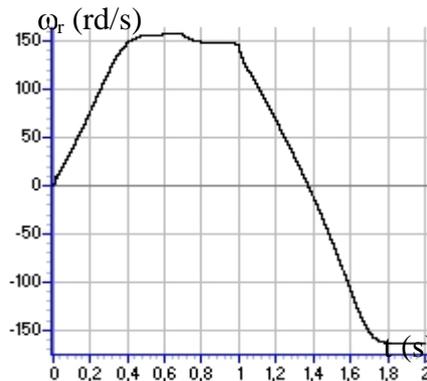


Fig.III.20.i. Vitesse de la machine asynchrone

Fig.III.20.j. Courant absorbé par la MAS

- 2^{eme} cas : $C_1=C_2= C_3=C_4= C_5= C_6=20mF$

Les figures III.21.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à trois niveaux appliqué à la cascade : un redresseur MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$) - machine asynchrone triphasée, avec les nouveaux paramètres du pont capacitif et sans couple de charge. Le redresseur MLI à trois niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$). Nous constatons :

- Le bon suivi de la tension moyenne redressée sa référence imposée par la boucle d'asservissement (Fig.III.21.a).
- Les tensions continues d'entrée de l'onduleur deviennent stables après le régime transitoire de la machine asynchrone (Fig.III.21.b).
- Une instabilité des tensions continues avec la tendance d'inversion de la polarité après l'application du couple de charge (Fig.III.21.b).
- Un écart entre les tensions continues très important pendant le régime permanent avec le risque d'inversion de la polarité pour certaines tensions ($U_{C3} \gg U_{C2} \gg U_{C1}$) (Fig.III.21.b).
- Une égalité des tensions continues du demi-pont capacitif supérieur avec celles du demi-pont inférieur (Fig.III.21.c).
- Une déformation de la tension de sortie de l'onduleur (Fig.III.21.d).
- Les courants absorbés par le réseau sont fortement pollués par les harmoniques.

- Un démarrage long du moteur asynchrone ($t_d=0.55s$) provoquant un échauffement excessive du bobinage; destructif du stator de la machine (Fig.III.21.e.f).

- Simulation numérique

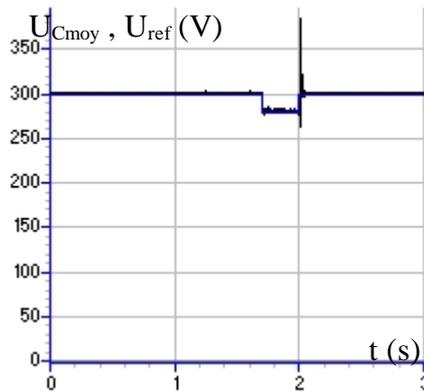


Fig.III.21.a. Tension de sortie moyenne du redresseur MLI à trois niveaux

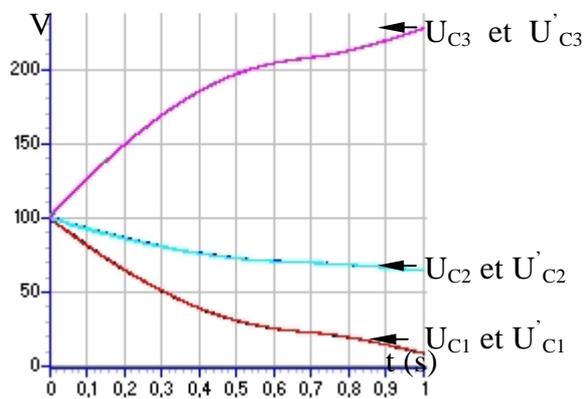


Fig.III.21.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

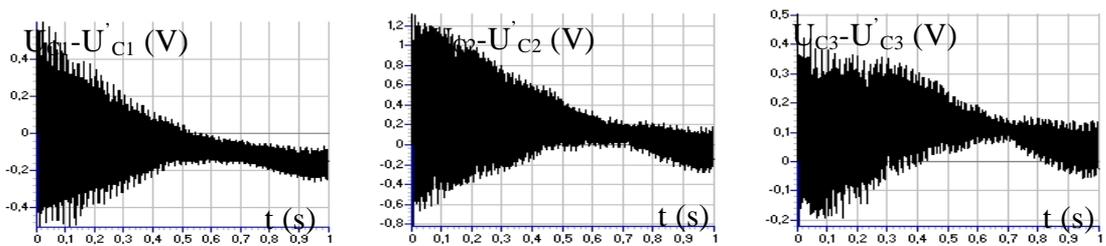


Fig.III.21.c. Différences de tension $U_{C1}-U'_{C1}$, $U_{C2}-U'_{C2}$, $U_{C3}-U'_{C3}$

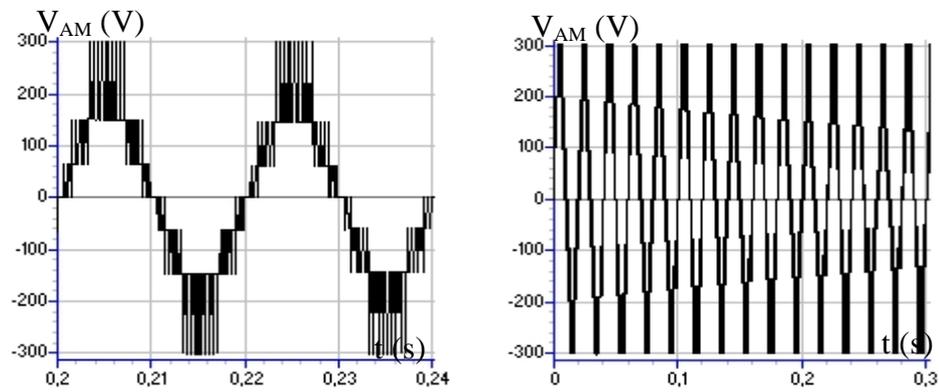


Fig.III.21.d. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

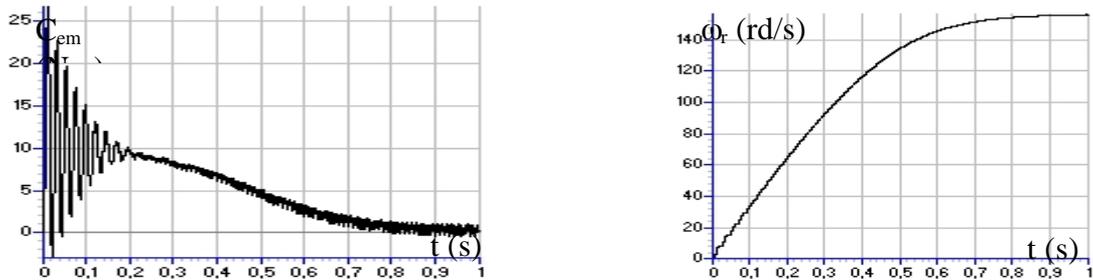


Fig.III.21.e. Couple électromagnétique de la machine asynchrone à vide Fig.III.21.f. Vitesse de la MAS à vide

II.3. Cascade trois redresseurs MLI triphasés à trois niveaux - onduleur de tension triphasé à sept niveaux - MAS

II.3.1. Structure série : La structure de cette cascade est donnée au chapitre II (Fig.II.16), on applique le même algorithme d'asservissement du redresseur de courant MLI triphasé à trois niveaux élaboré précédemment pour commander les trois redresseurs de la cascade : trois redresseurs MLI triphasé à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS. Les paramètres du filtre d'entrée du pont redresseur triphasé à trois niveaux sont : $R=0.25\Omega$, $L=10\text{mH}$. Les caractéristiques du réseau sont $73\text{V}/50\text{Hz}$. Le couple de charge est défini par $C_r \{C_r=0 \text{ si } t(s) \in [0 \quad 0.7], C_r=5\text{Nm} \text{ si } t(s) > 0.7\}$. Les tensions de référence des boucles d'asservissement des redresseurs MLI à trois niveaux sont définies par :

$$U_{\text{ref}1,2,3} = \begin{cases} 100\text{V} & \text{if } t < 1.6\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 90\text{V} & \text{if } t \in [1.6\text{s} , 2.4\text{s}] \end{cases}$$

On analyse les performances de cette cascade pour deux cas de valeurs des condensateurs :

- 1^{er} cas : $C_1=C_2= C_3=C_4= C_5= C_6=60\text{mF}$

Les figures III.22.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à trois niveaux appliqué à la cascade : trois redresseurs MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à trois niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.001\text{A}$).

Les tensions de sortie moyennes des redresseurs MLI à trois niveaux $\{U_{Cmoy1} (U_{Cmoy1} = \frac{U_{C2} + U_{C3}}{2}), U_{Cmoy2} (U_{Cmoy2} = \frac{U_{C1} + U_{C1'}}{2}), U_{Cmoy3} (U_{Cmoy3} = \frac{U_{C2'} + U_{C3'}}{2})\}$ suivent bien leur références ($U_{refi(i=1,2,3)}$), et rejettent la perturbation du couple de charge (Fig.III.22.a). Les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux ($U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}, U_{C1'}, U_{C2'}, U_{C3'}$) deviennent stables après le régime transitoire et égales par paire ($U_{C1}=U_{C1'}, U_{C2}=U_{C2'}, U_{C3}=U_{C3'}$)(Fig. III.22.b,c). La figure III.22.d montre la déformation de l'onde de tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent leurs références I_{refk} (Fig.III.22.e). La figure III.22.g présente les courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux. La figure III.22.h montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants ($I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}, I_{d4}, I_{d5}, I_{d6}$) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension est inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}, I_{d2} \approx -I_{d5}, I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs du moteur asynchrone triphasé (courant, couple et vitesse) sont présentées aux figures III.22.i,j,k.

- **Simulation numérique**

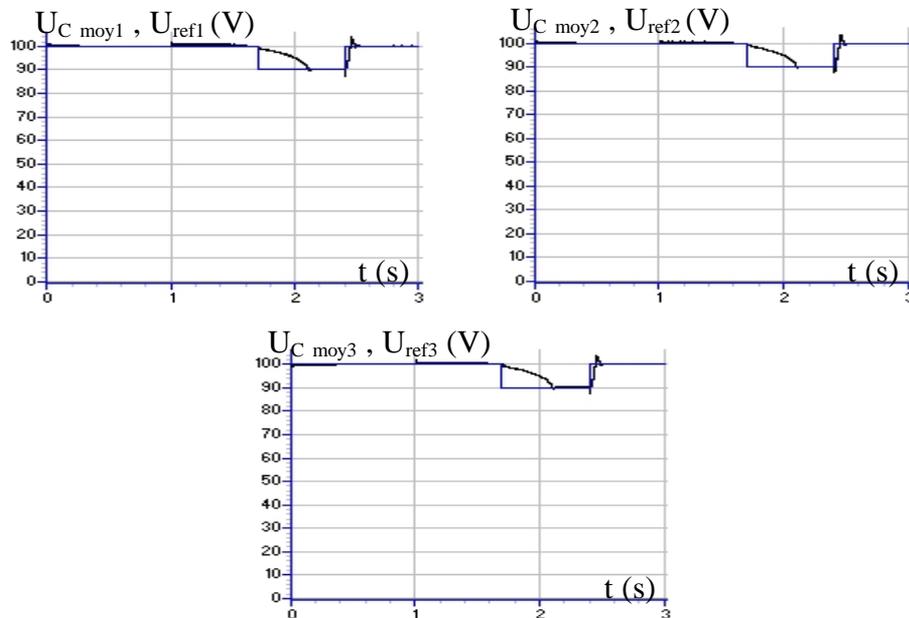


Fig.III.22.a. Tensions de sortie moyennes des redresseurs MLI à trois niveaux

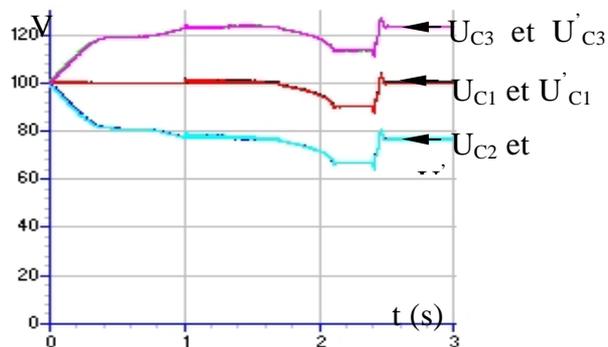


Fig.III.22.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

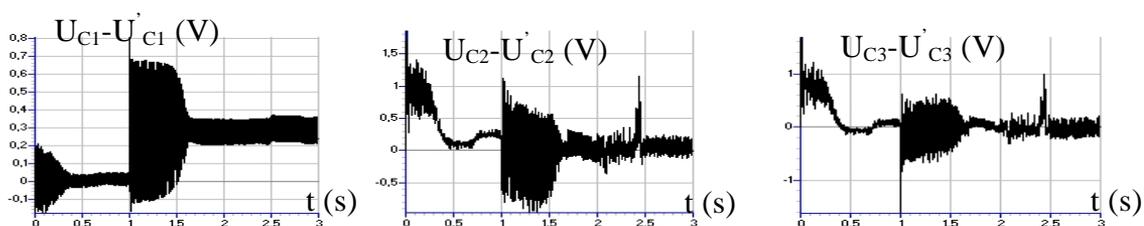
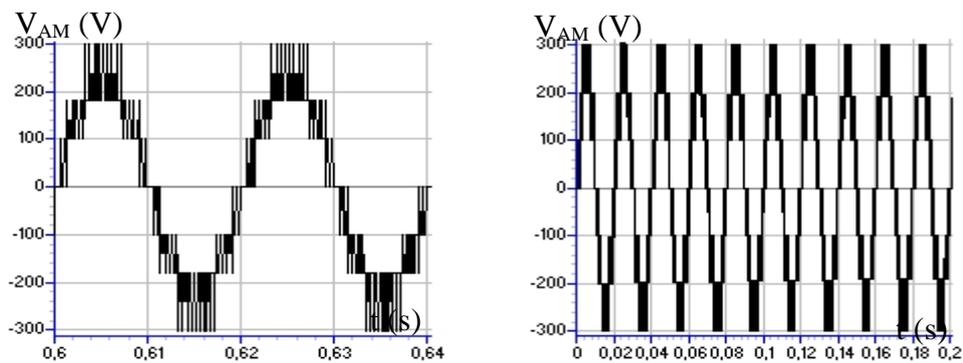
Fig.III.22.c. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$, $U_{C3} - U'_{C3}$ 

Fig.III.22.d. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

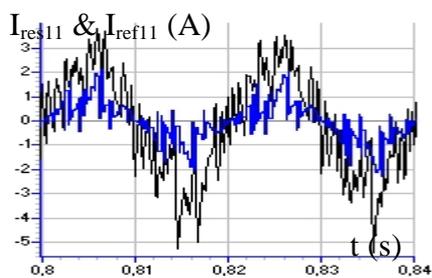


Fig.III.22.e. Courant d'une phase du réseau

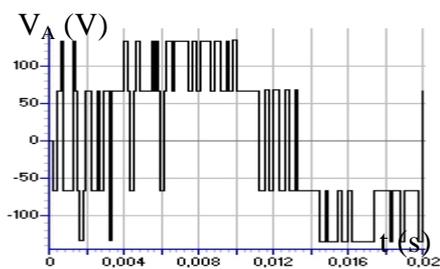


Fig.III.22.f. Tension simple du redresseur MLI

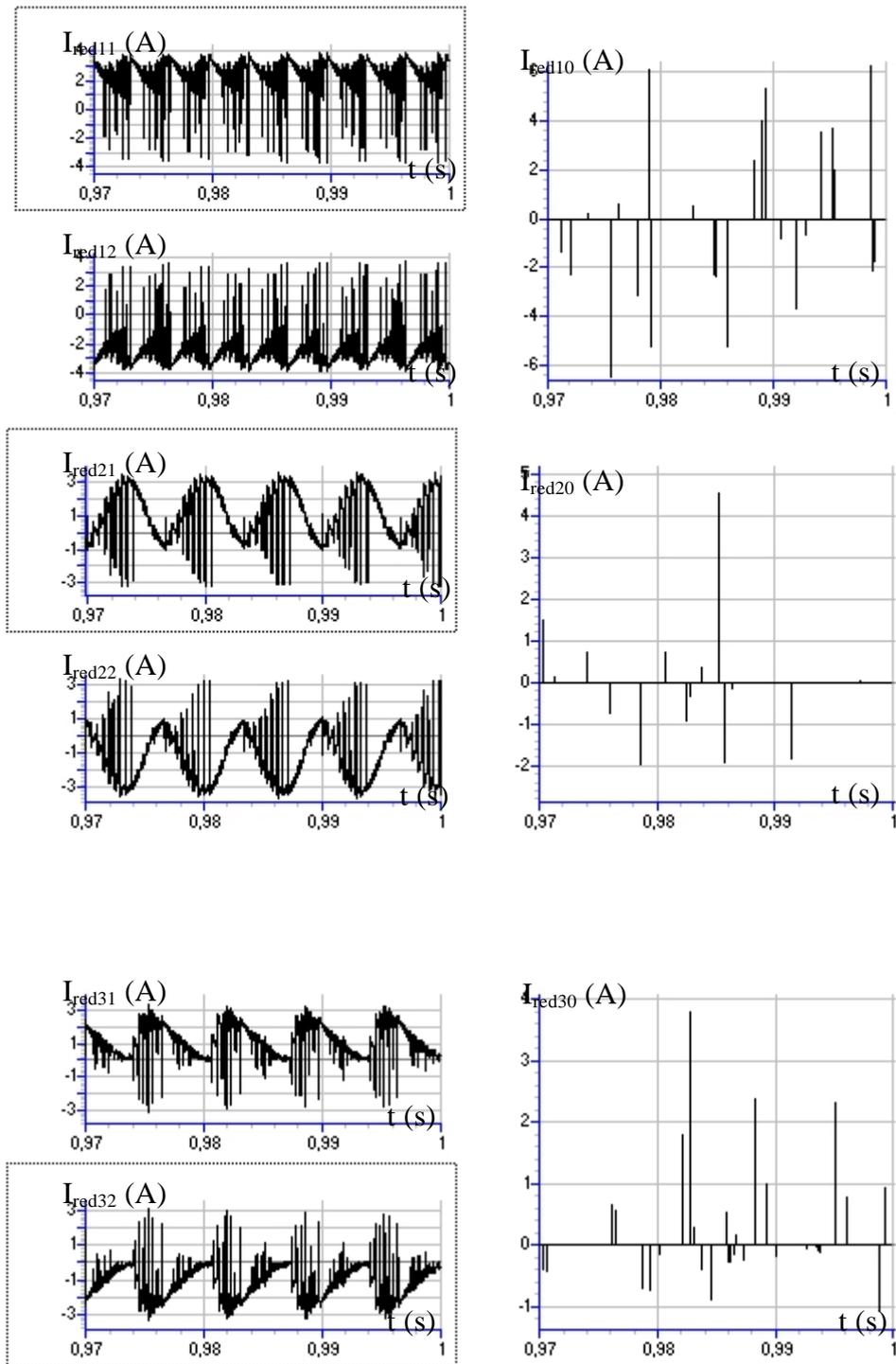


Fig.III.22.g. Courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux

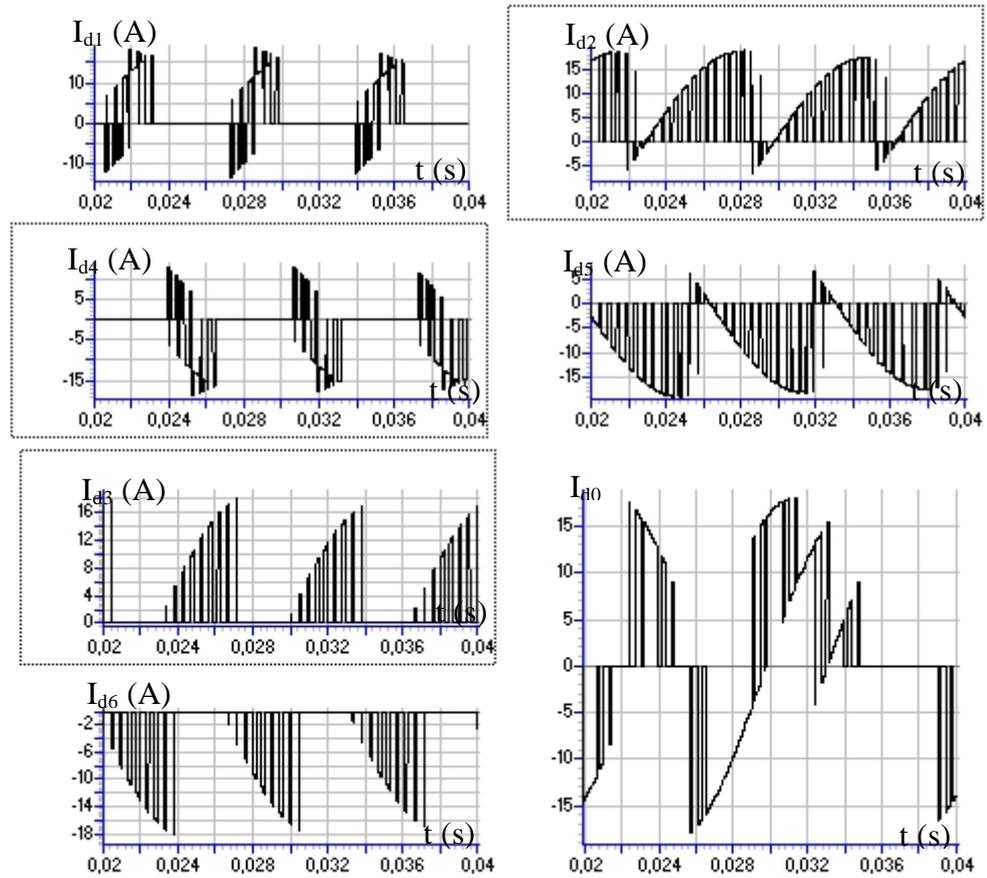


Fig.III.22.h. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

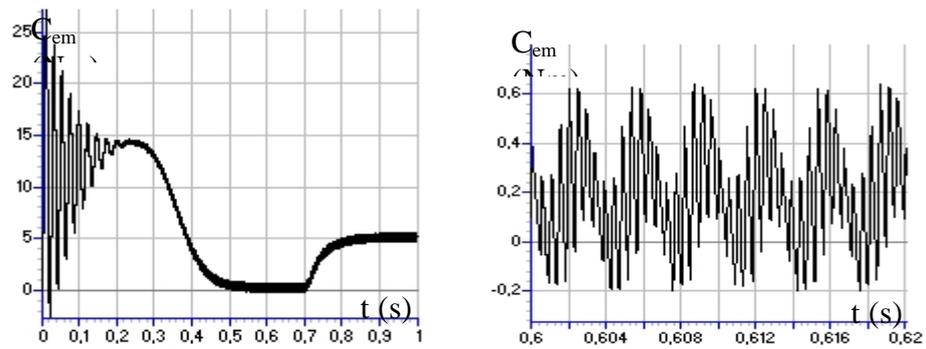


Fig.III.22.i. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

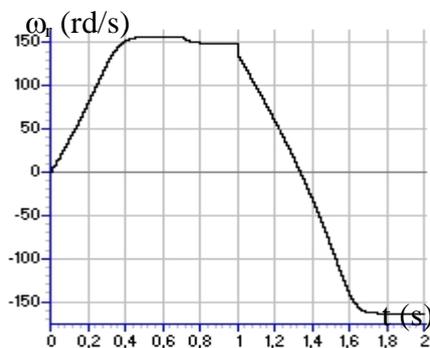


Fig.III.22.j. Vitesse de la machine asynchrone

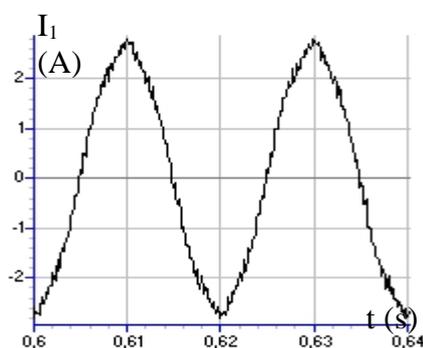


Fig.III.22.k. Courant absorbé par la MAS

• 2^{ème} cas : $C_1=C_2= C_3=C_4= C_5= C_6=20mF$

Les figures III.23.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à trois niveaux appliqué à la cascade : trois redresseurs MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - machine asynchrone triphasée, avec les nouveaux paramètres du pont capacitif. Les redresseurs MLI à trois niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.05A$). Nous constatons :

- Le bon suivi des tensions moyennes redressées leur références imposées par les boucles d'asservissement (Fig.III.23.a).
- Les tensions continues d'entrée de l'onduleur deviennent stables après le régime transitoire de la machine asynchrone (Fig.III.23.b).
- Une instabilité des tensions continues avec la tendance d'inversion de la polarité après l'application du couple de charge (Fig.III.23.b).
- Un écart entre les tensions continues important pendant le régime permanent avec le risque d'inversion de la polarité pour certaines tensions ($U_{C3} \gg U_{C1} \gg U_{C2}$) (Fig.III.23.b).
- Une égalité des tensions continues du demi-pont capacitif supérieur avec celles du demi-pont inférieur (Fig.III.23.c) .
- Une déformation de la tension de sortie de l'onduleur (Fig.III.23.d).
- Les courants absorbés par le réseau sont fortement pollués par les harmoniques.
- Un démarrage long du moteur asynchrone ($t_d=0.55s$) provoquant un échauffement excessive du bobinage; destructif du stator de la machine (Fig.III.23.e.f).

- Simulation numérique

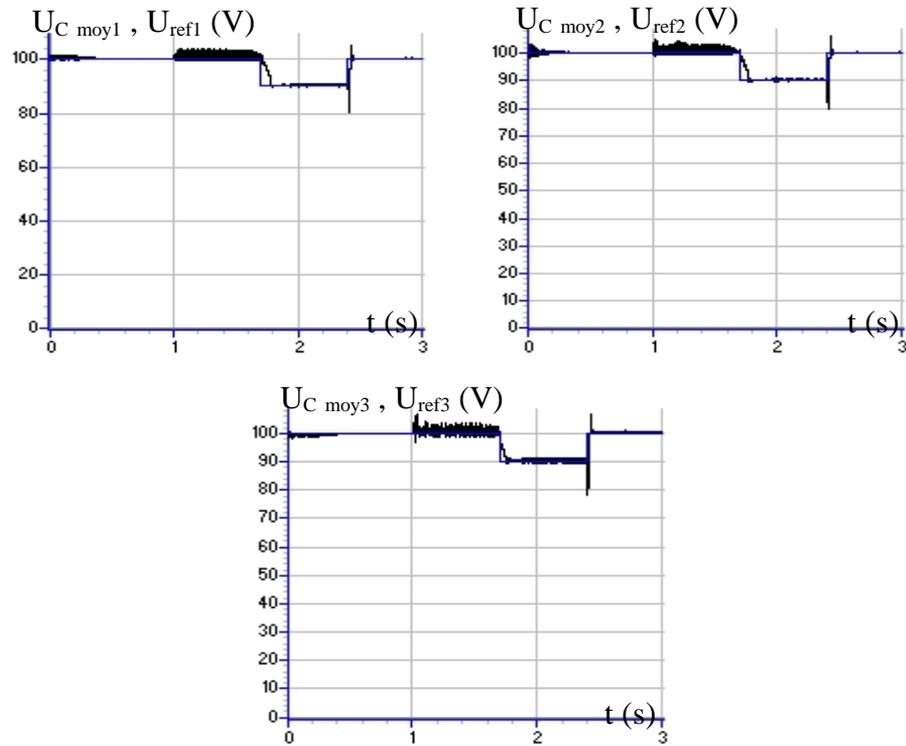


Fig.III.23.a. Tensions de sortie moyennes des redresseurs MLI à trois niveaux

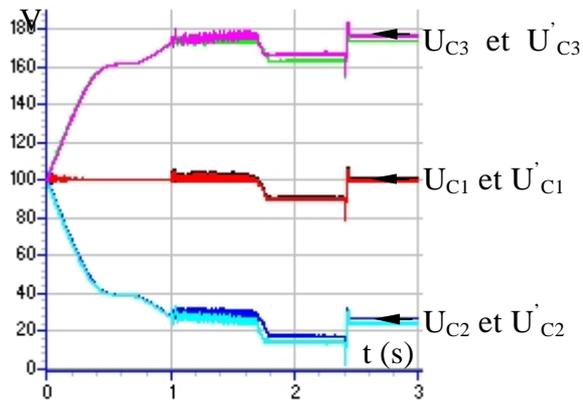


Fig.III.23.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

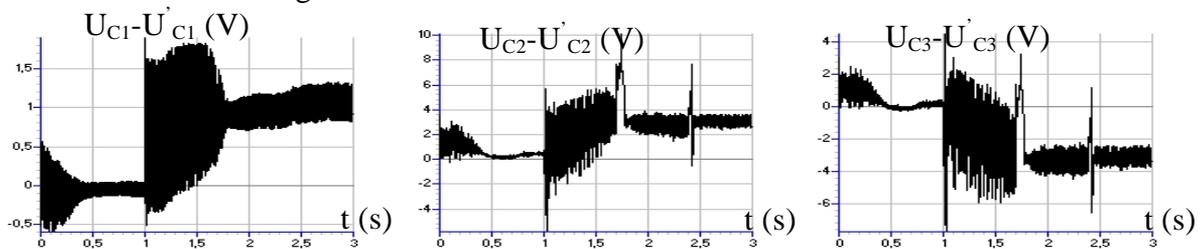


Fig.III.23.c. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$, $U_{C3} - U'_{C3}$

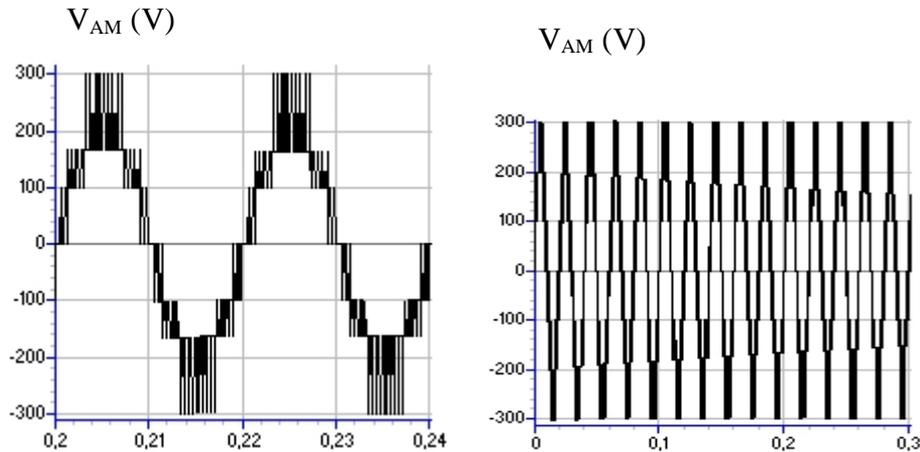


Fig.III.23.d. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

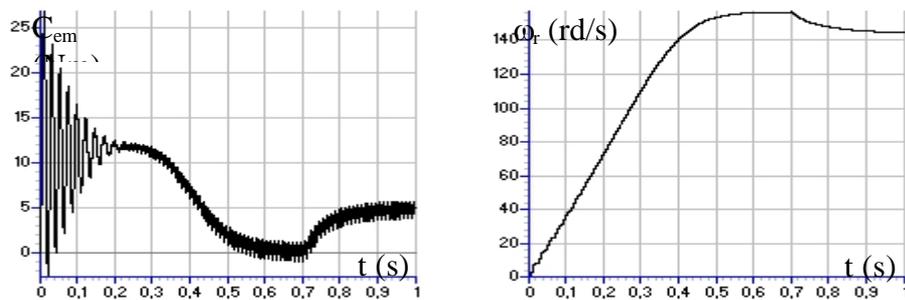


Fig.III.23.e. Couple électromagnétique de la MAS

Fig.III.23.f. Vitesse de la machine asynchrone

II.3.2. Structure imbriquée : La structure de cette cascade est donnée au chapitre II (Fig.II.18), on applique le même algorithme d'asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à trois niveaux élaboré pour commander les trois redresseurs de la cascade : trois redresseurs MLI triphasés à trois niveaux (mis en parallèle) - onduleur NPC à sept niveaux - MAS. Les paramètres du filtre d'entrée du pont redresseur triphasé à trois niveaux sont : $R=0.25\Omega$, $L=10\text{mH}$. Les caractéristiques du réseau sont resp. 220-147-73V/50Hz. Le couple de charge est défini par $C_r \{C_r=0 \text{ si } t(s) \in [0 \text{ } 0.7], C_r=5\text{Nm si } t(s) > 0.7\}$. Les tensions de référence des boucles d'asservissement des redresseurs MLI à trois niveaux sont définies par :

$$U_{\text{ref1}} = \begin{cases} 100\text{V} & \text{if } t < 1.6\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 90\text{V} & \text{if } t \in [1.6\text{s} , 2.4\text{s}] \end{cases}$$

$$U_{\text{ref2}} = \begin{cases} 200\text{V} & \text{if } t < 1.6\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 190\text{V} & \text{if } t \in [1.6\text{s} , 2.4\text{s}] \end{cases}$$

$$U_{\text{ref3}} = \begin{cases} 300\text{V} & \text{if } t < 1.6\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 290\text{V} & \text{if } t \in [1.6\text{s} , 2.4\text{s}] \end{cases}$$

On analyse les performances de cette cascade pour deux cas de valeurs des condensateurs :

- *1^{er} cas* : $C_1=C_2= C_3=C_4= C_5= C_6=60\text{mF}$

Les figures III.24.* présentent les performances de l'asservissement des trois redresseurs MLI triphasés à trois niveaux (imbriqués) appliqué à la cascade : trois redresseurs MLI à trois niveaux –

onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) – machine à induction triphasée. Les redresseurs MLI à trois niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.001A$).

Les tensions de sortie moyennes des redresseurs MLI à trois niveaux $\{U_{Cmoy1} (U_{Cmoy1}=\frac{U_{C1}+U'_{C1}}{2}),$

$U_{Cmoy2} (U_{Cmoy2}=\frac{U_{C1}+U_{C2}+U'_{C1}+U'_{C2}}{2}), U_{Cmoy3} (U_{Cmoy3}=\frac{U_{C1}+U_{C2}+U_{C3}+U'_{C1}+U'_{C2}+U'_{C3}}{2})\}$ suivent leurs références

($U_{ref(i=1,2,3)}$), et rejettent la perturbation du couple de charge (Fig.III.24.a). Les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux ($U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}, U'_{C1}, U'_{C2}, U'_{C3}$) sont stables et pratiquement égales (Fig. III.24.b,c). La figure III.24.d montre la stabilité de la tension de sortie de l'onduleur. Les courants I_{resk} du réseau triphasé ne sont pas sinusoïdaux (Fig.III.24.e). La figure III.24.g présente les courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux. La figure III.24.h montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants ($I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}, I_{d4}, I_{d5}, I_{d6}$) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension est inversement égales par paire ($I_{d1}\approx-I_{d4}, I_{d2}\approx-I_{d5}, I_{d3}\approx-I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs du moteur asynchrone triphasé (courant, couple et vitesse) sont présentées aux figures III.24.i,j,k.

- **Simulation numérique**

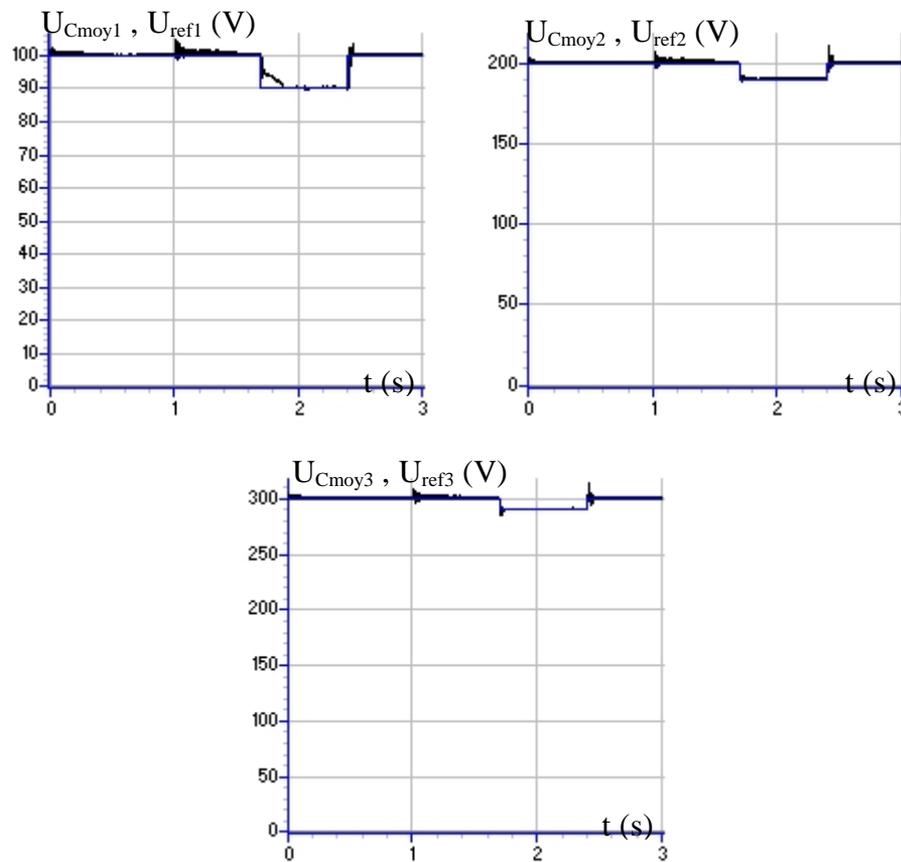


Fig.III.24.a. Tensions de sortie moyennes des redresseurs MLI à trois niveaux

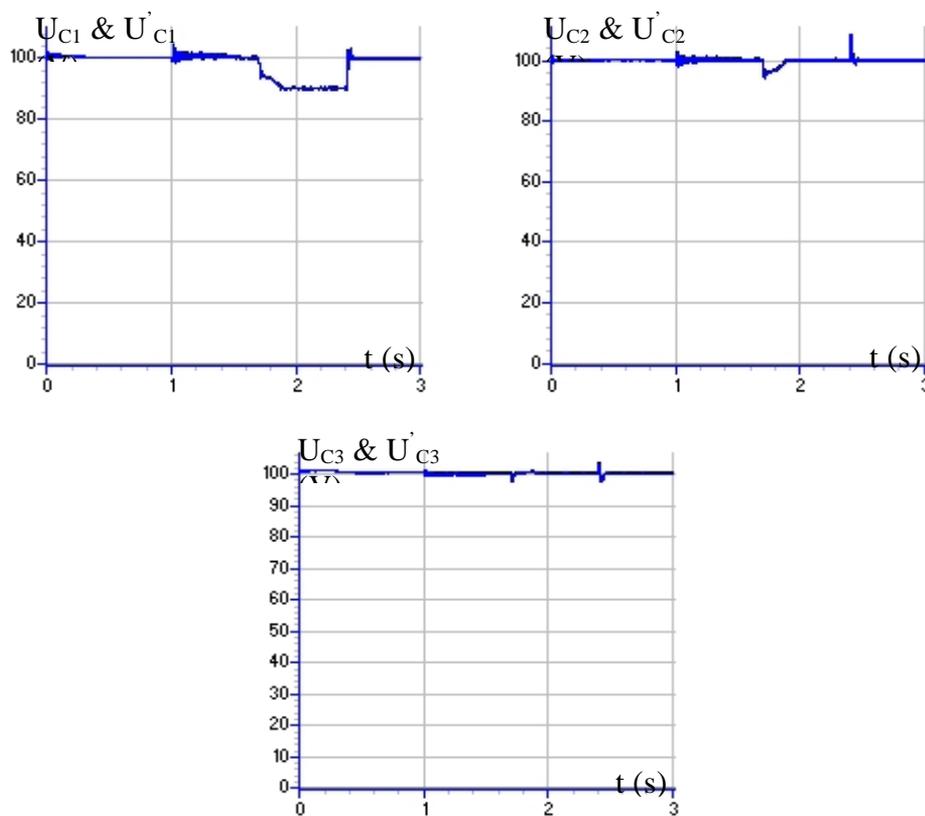


Fig.III.24.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

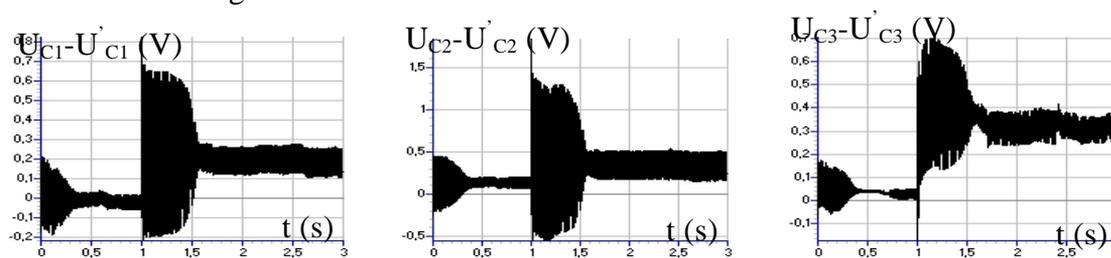
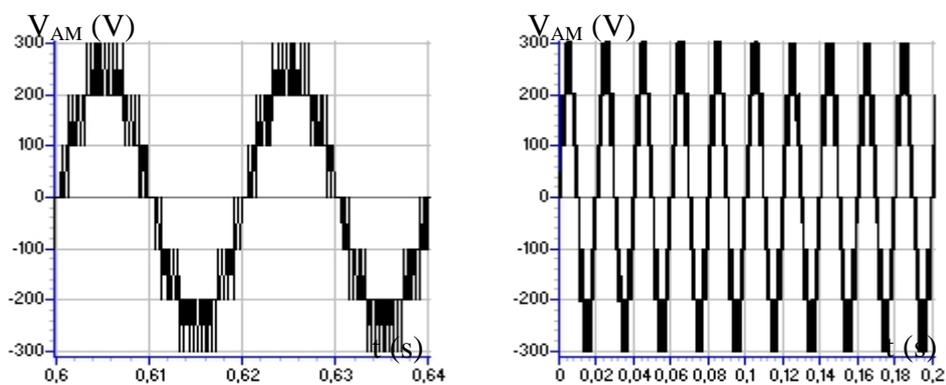
Fig.III.24.c. Différences de tension $U_{C1}-U'_{C1}$, $U_{C2}-U'_{C2}$, $U_{C3}-U'_{C3}$ 

Fig.III.24.d. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

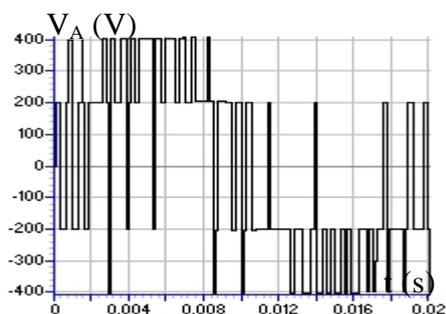
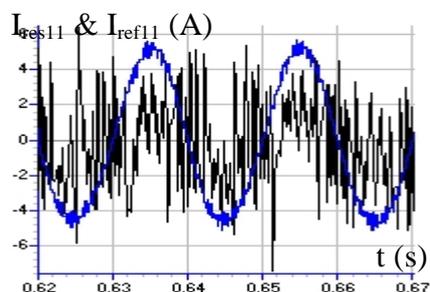


Fig.III.24.e. Courant d'une phase du réseau

Fig.III.24.f. Tension simple du redresseur

MLI

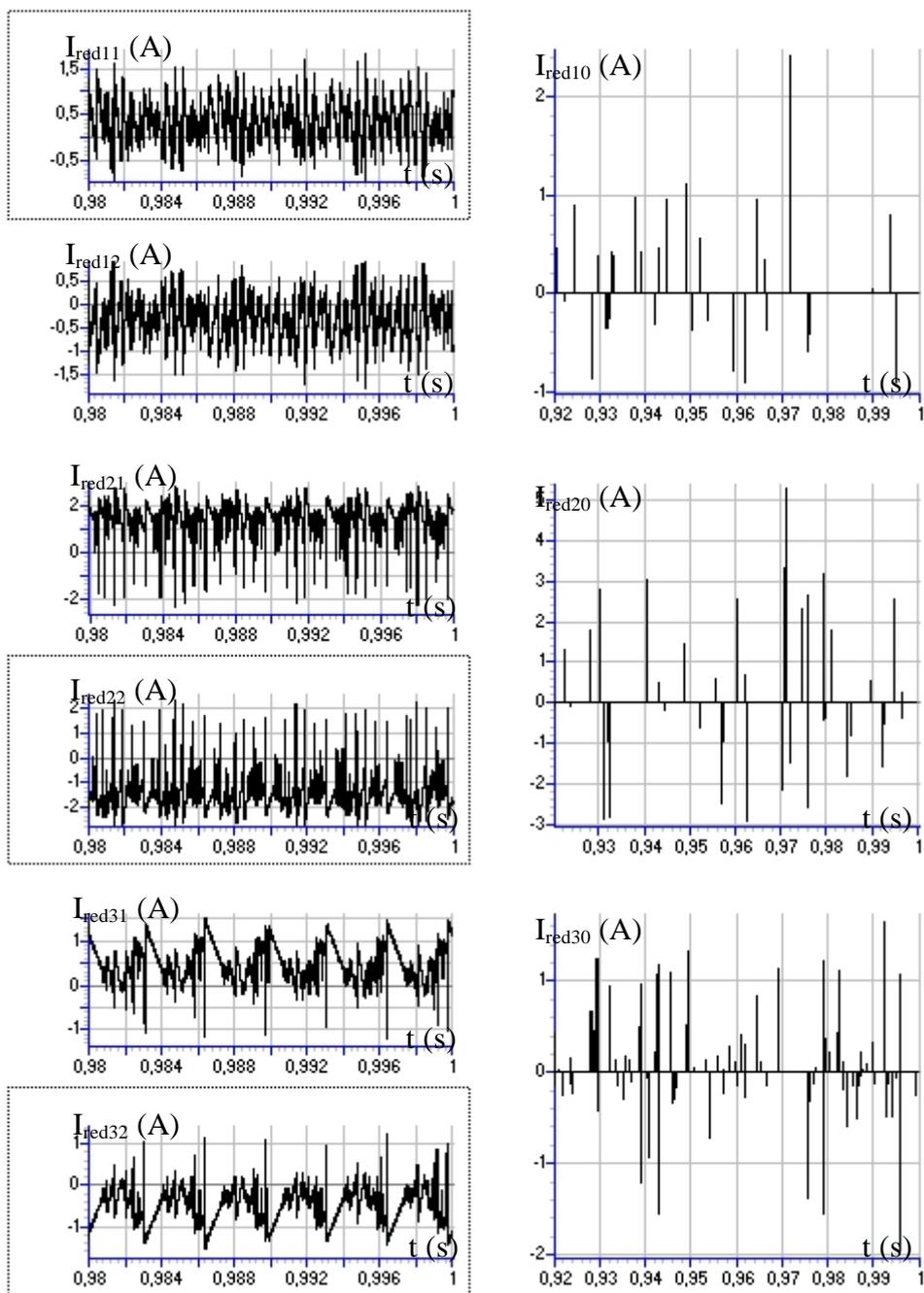


Fig.III.24.g. Courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux

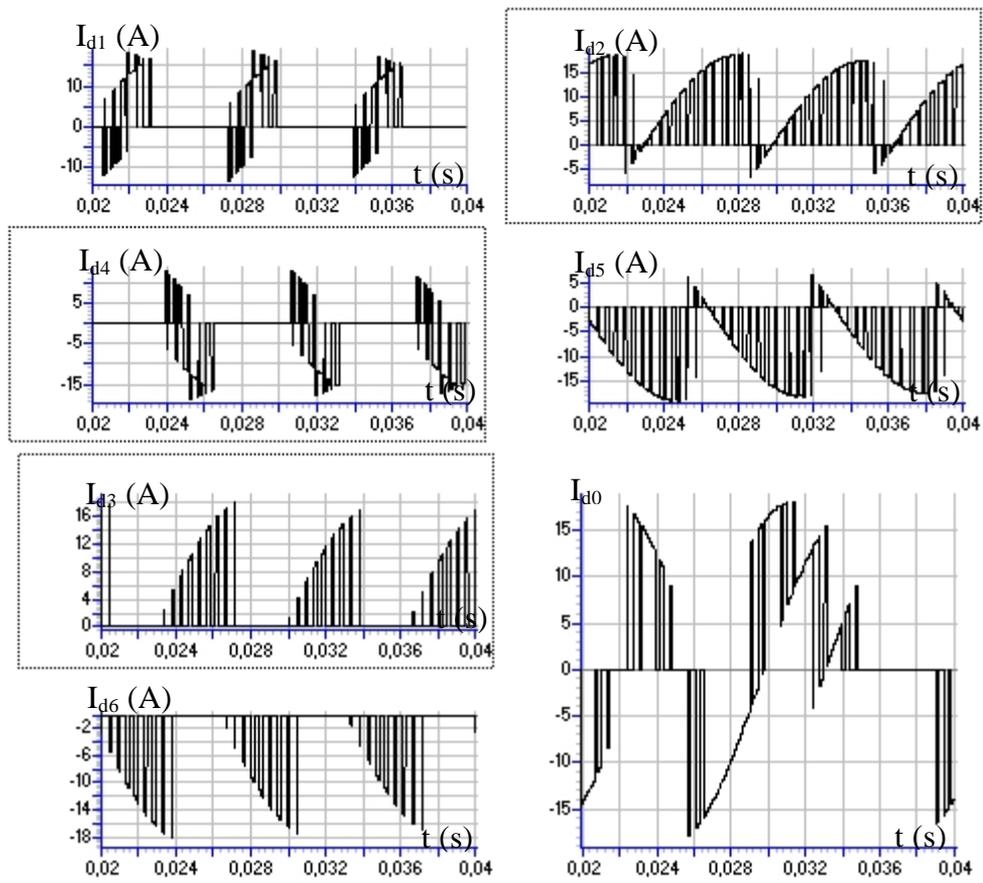


Fig.III.24.h. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

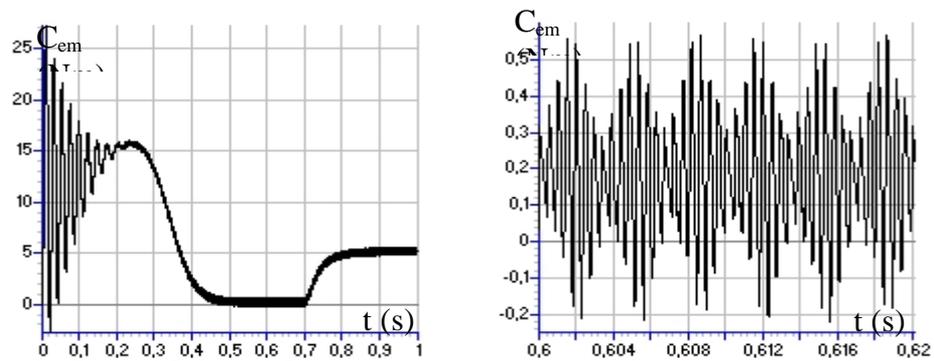


Fig.III.24.i. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

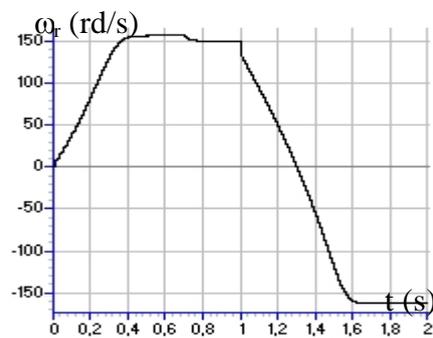


Fig.III.24.j. Vitesse de la machine asynchrone

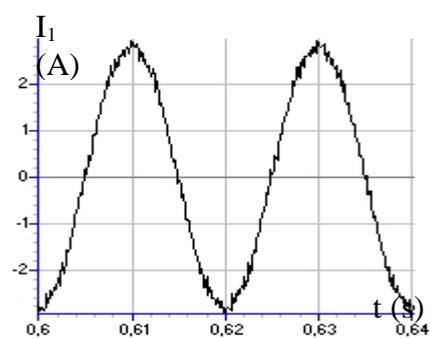


Fig.III.24.k. Courant absorbé par la MAS

• *2^{ème} cas* : $C_1=C_2= C_3=C_4= C_5= C_6=20mF$

Les figures III.25.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à trois niveaux appliqué à la cascade : trois redresseurs MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - machine asynchrone triphasée, avec les nouveaux paramètres du pont capacitif. Les redresseurs MLI à trois niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.05A$). Nous constatons :

- Le suivi des tensions moyennes redressées leurs références imposées par les boucles d'asservissement (Fig.III.25.a).
- Une stabilité avec égalité de partage des tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux (Fig.III.25.b). Néanmoins, la tension U'_{C3} présente une erreur statique de l'ordre 5%.
- Une égalité des tensions continues du demi-pont capacitif supérieur avec celles du demi-pont inférieur (Fig.III.25.c).
- La tension de sortie de l'onduleur est pratiquement stable et uniforme (Fig.III.25.d). Néanmoins, cette tension est non symétrique pendant la phase d'inégalité des tensions U_{C3} et U'_{C3} .
- les courants absorbés par le réseau sont fortement pollués par les harmoniques (Fig.III.25.e).

• Simulation numérique

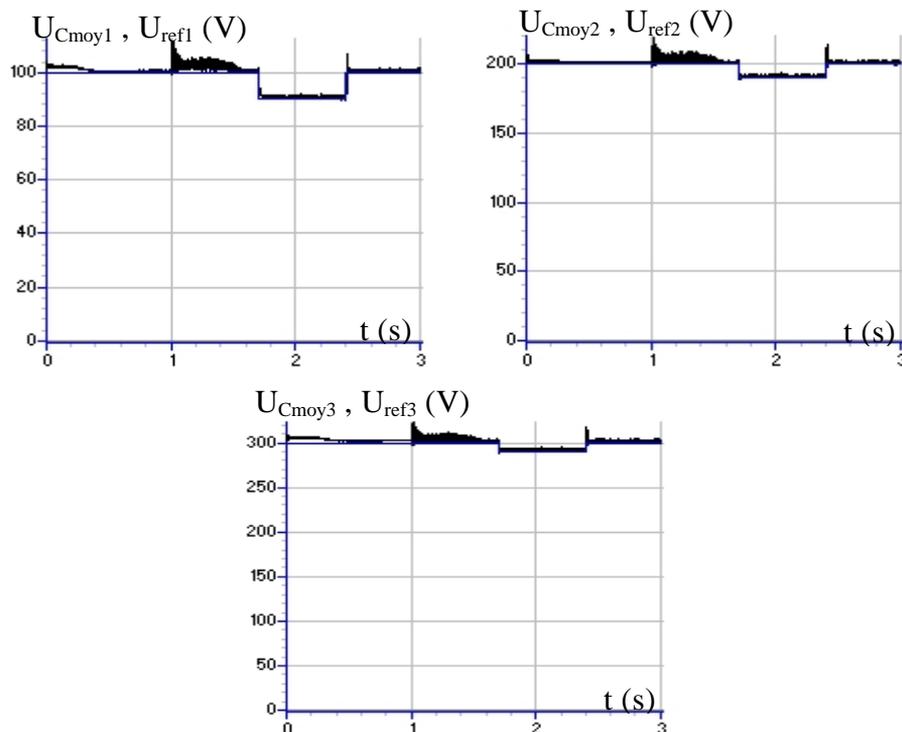


Fig.III.25.a. Tensions de sortie moyennes des redresseurs MLI à trois niveaux

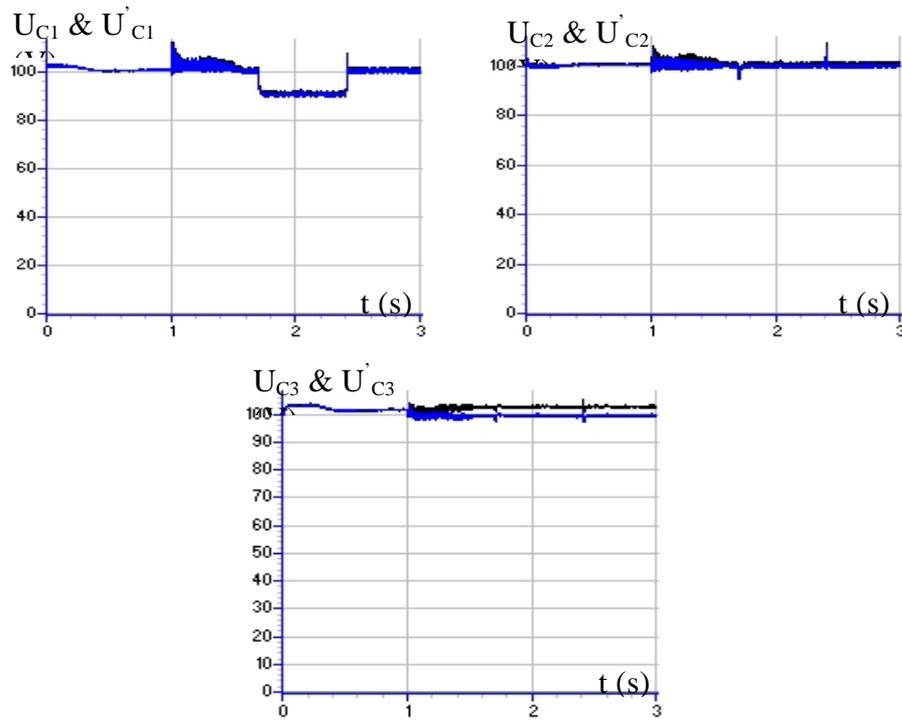


Fig.III.25.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

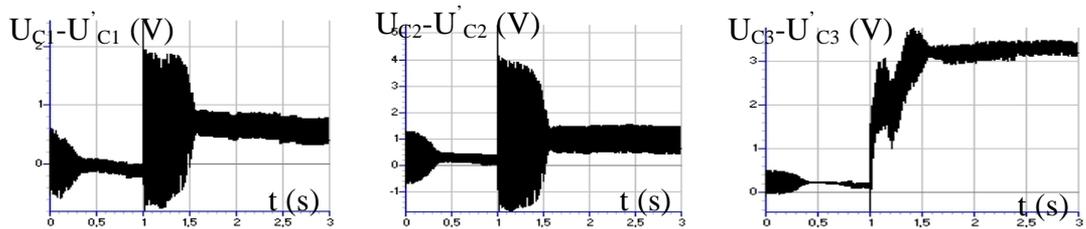


Fig.III.25.c. Différences de tension $U_{C1}-U'_{C1}$, $U_{C2}-U'_{C2}$, $U_{C3}-U'_{C3}$

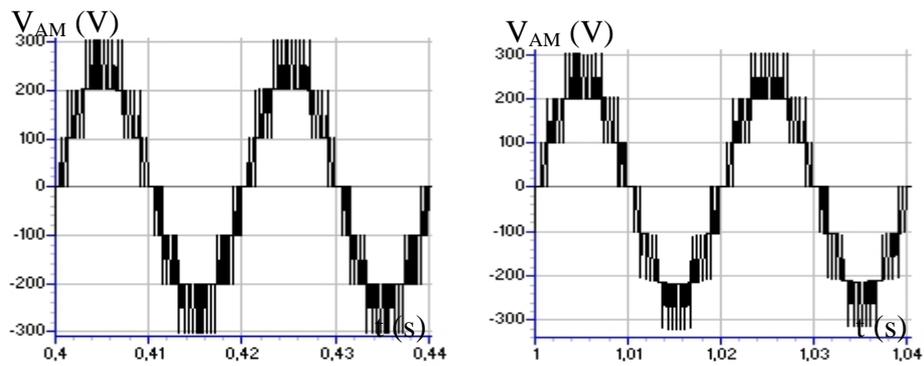


Fig.III.25.d. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

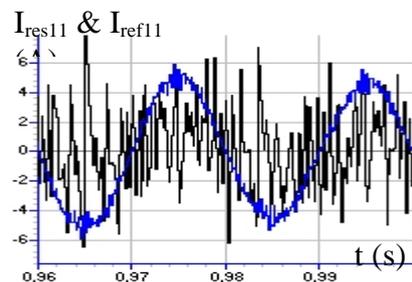


Fig.III.25.e. Courant d'une phase du réseau

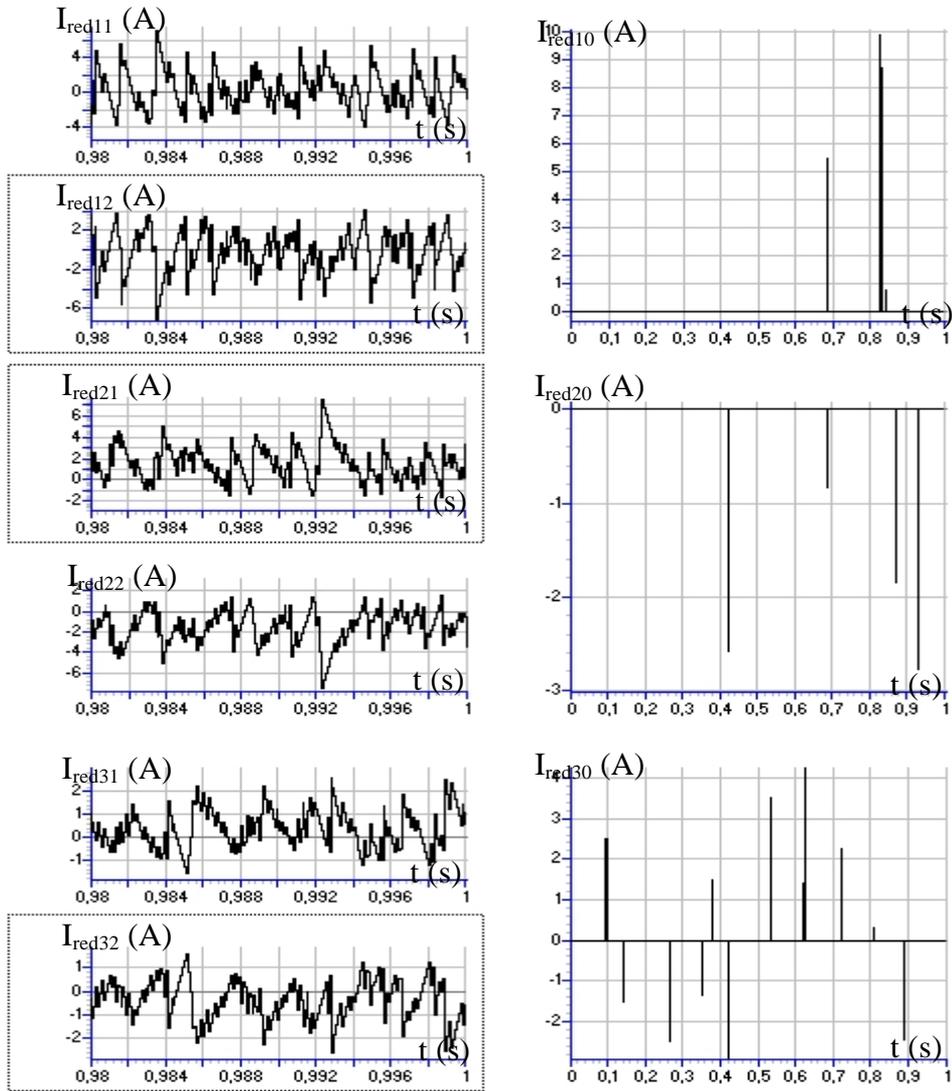
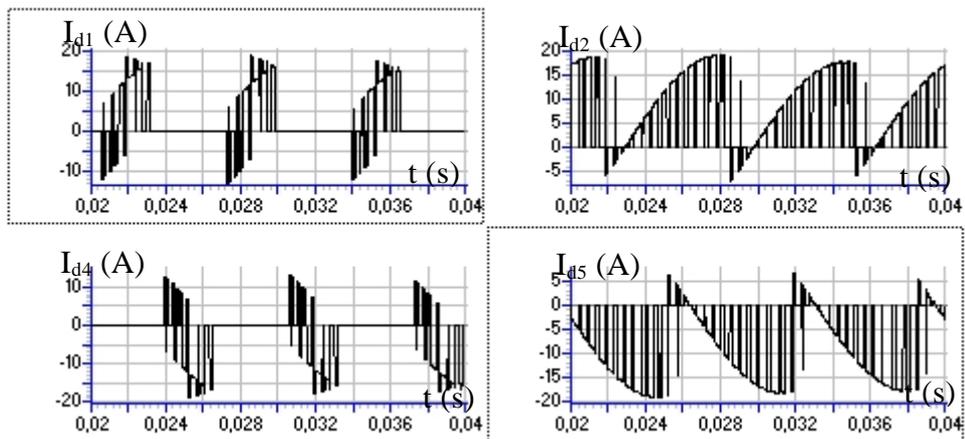


Fig.III.25.e. Courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux



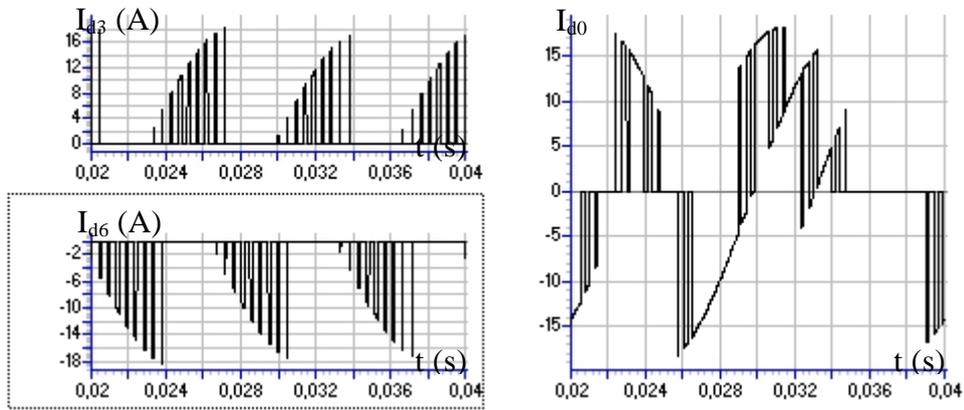


Fig.III.25.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

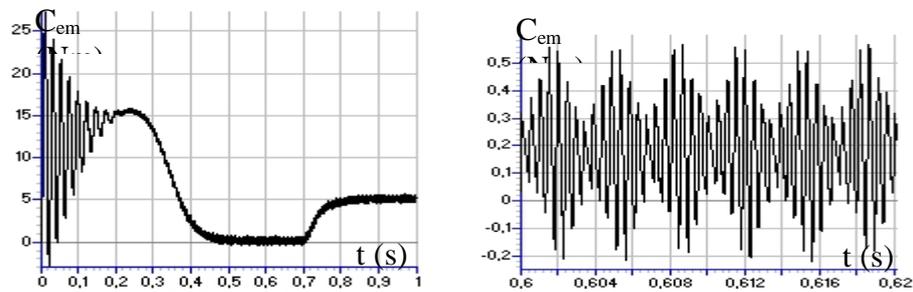


Fig.III.25.g. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

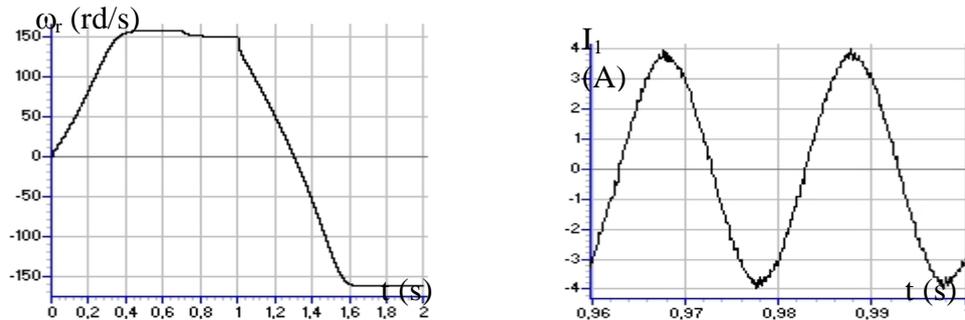


Fig.III.25.h. Vitesse de la machine asynchrone

Fig.III.25.i. Courant absorbé par la MAS

III. Asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à sept niveaux

III.1. Modèle de la boucle de courant et de tension

Comme pour le redresseur de courant triphasé à deux et trois niveaux, le modèle de commande du redresseur triphasé à sept niveaux est donné à la figure III.27. La boucle de tension impose toujours la valeur efficace du courant de référence du réseau. En utilisant la conservation de la puissance et en négligeant les pertes joules dans la résistance R du filtre d'entrée, on peut écrire :

$$\begin{cases} P_e = V_1 \cdot i_{res1} + V_2 \cdot i_{res2} + V_3 \cdot i_{res3} = \sum_{k=1}^3 \left[V_{resk} \cdot i_{resk} - (1/2) \cdot L \cdot \frac{d(i_{resk}^2)}{dt} \right] \\ P_s = U_{C1} \cdot (i_{c1} + i_{ch1}) + U_{C2} \cdot (i_{c2} + i_{ch2}) + U_{C3} \cdot (i_{c3} + i_{ch3}) + \\ U_{C4} \cdot (i_{c4} + i_{ch4}) + U_{C5} \cdot (i_{c5} + i_{ch5}) + U_{C6} \cdot (i_{c6} + i_{ch6}) \end{cases} \quad (III.7)$$

On supposera dans la suite que :

$$U_{C1}=U_{C2}=U_{C3}=U'_{C1}=U'_{C2}=U'_{C3}=U_C \text{ et } C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=C.$$

Définissons les grandeurs i_c , i_{ch} et U_C ($(U_C)_{\text{moy}}$) comme suit :

$$i_c = \frac{i_{C1} + i_{C2} + i_{C3} + i_{C4} + i_{C5} + i_{C6}}{6}, \quad i_{ch} = \frac{i_{Ch1} + i_{Ch2} + i_{Ch3} + i_{Ch4} + i_{Ch5} + i_{Ch6}}{6}$$

$$U_C = (U_C)_{\text{moy}} = \frac{U_{C1} + U_{C2} + U_{C3} + U'_{C1} + U'_{C2} + U'_{C3}}{6} \text{ et } I_{\text{red}} = i_c + i_{ch}.$$

La relation (III.7) permet alors d'écrire :

$$P = \sum_{k=1}^3 \left[V_{\text{res}k} \cdot i_{\text{res}k} = 6 \cdot U_C \cdot (i_c + i_{ch}) + \sum_{k=1}^3 (1/2) \cdot L \cdot \frac{d(i_{\text{res}k}^2)}{dt} \right] \quad (\text{III.8})$$

En supposant les systèmes de tension et de courant du réseau triphasé sinusoïdaux et équilibrés, la relation (III.8) devient :

$$P = 3 \cdot V_r \cdot I_e = 6 \cdot U_C \cdot (i_c + i_{ch}) \quad (\text{III.9})$$

Le modèle de la boucle de tension du redresseur triphasé à sept niveaux déduit de cette relation est représenté par la figure III.29. L'algorithme d'asservissement du redresseur triphasé à sept niveaux présenté dans ce chapitre; permet d'asservir la valeur moyenne U_C de toutes les tensions continues d'entrée de l'onduleur (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}).

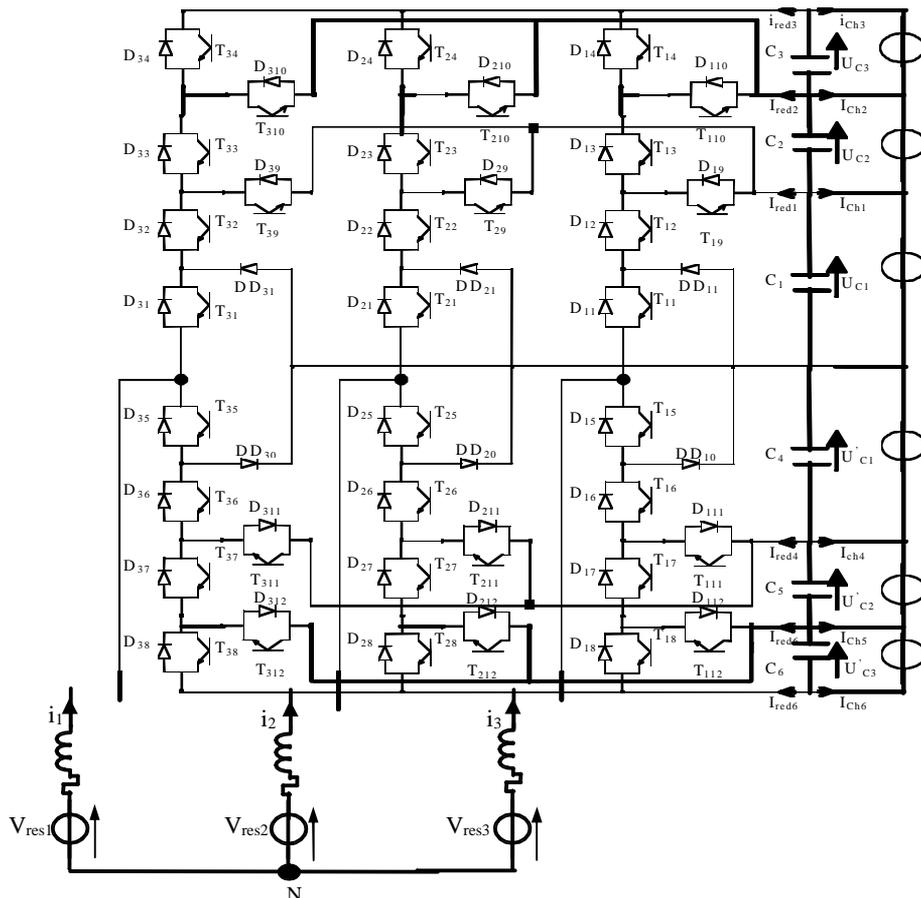


Fig.III.26. redresseur MLI à sept niveaux

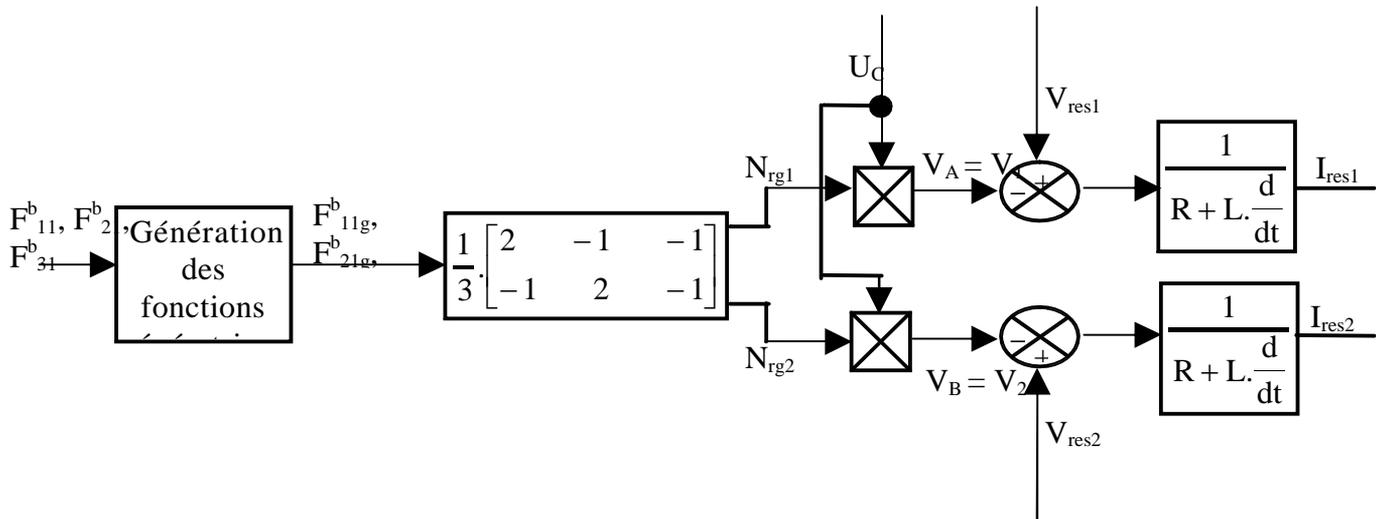


Fig.III.27. Modèle de commande du redresseur triphasé à sept niveaux

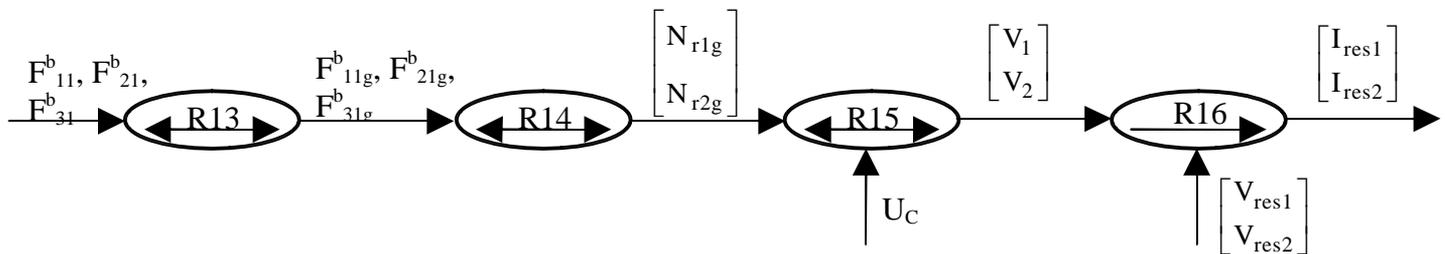


Fig.III.28. Graphe informationnel causal associé au modèle de commande du redresseur triphasé à sept niveaux

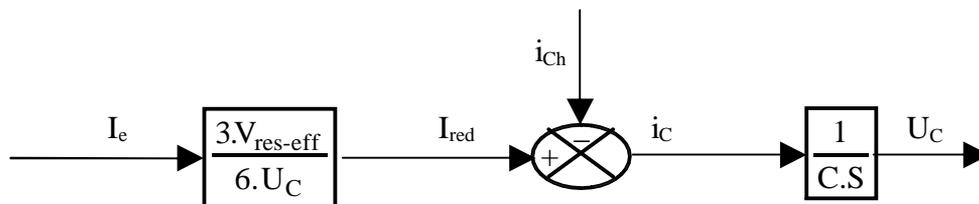


Fig.III.29. Modèle de la boucle de tension du redresseur triphasé à sept niveaux

III.2. Cascade un redresseur MLI triphasé à sept niveaux - onduleur de tension triphasé à sept niveaux - MAS

La structure de cette cascade est donnée au chapitre II (Fig.II.21), on applique l'algorithme d'asservissement du redresseur de courant à MLI triphasé à sept niveaux élaboré pour commander le redresseur de la cascade : un redresseur MLI triphasé à sept niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS. Les paramètres du filtre d'entrée du pont redresseur triphasé à sept niveaux sont : $R=0.25\Omega$, $L=10mH$, et les caractéristiques du réseau sont 220/50Hz. Le couple de charge est défini par $Cr \{ Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0 \ 0.7], Cr=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7 \}$. La tension de référence de la boucle d'asservissement du redresseur MLI à sept niveaux est définie par :

$$U_{ref} = \begin{cases} 100V & \text{if } t < 1.6s \text{ et } t > 2s \\ 90V & \text{if } t \in [1.6s, 2s] \end{cases}$$

On analyse les performances de cette cascade pour deux cas de valeurs des condensateurs :

- **1^{er} cas** : $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=60mF$

Les figures III.30.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à sept niveaux appliqué à la cascade : un redresseur MLI à sept niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$) - machine asynchrone triphasée. Le redresseur MLI à sept niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.01A$).

La tension de sortie moyenne du redresseur MLI à sept niveaux $\{U_{C_{moy}} (U_{C_{moy}} = \frac{U_{C1} + U_{C2} + U_{C3} + U'_{C1} + U'_{C2} + U'_{C3}}{6})\}$ suit bien sa référence (U_{ref}), et rejette la perturbation du couple de charge (Fig.III.30.a). Les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) deviennent stables après le régime transitoire de la machine asynchrone; mais non égales. Néanmoins, les tensions du demi-pont capacitif supérieur sont égales avec celles du demi-pont inférieur (Fig. III.30.b,c). La figure III.30.d montre la tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux. Cette tension devient stable mais non symétrique après le régime transitoire. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent leurs références sinusoïdaux I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.III.30.e). La figure III.30.g présente les courants de sortie du redresseur MLI à sept niveaux (I_{red1} , I_{red2} , I_{red3} , I_{red4} , I_{red5} , I_{red6} , I_{red0}). Ces courants sont inversement égaux par paire ($I_{red1} \approx -I_{red4}$, $I_{red2} \approx -I_{red5}$, $I_{red3} \approx -I_{red6}$), et la valeur moyenne du courant I_{red0} est pratiquement nulle. La figure III.30.h montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension de sortie de l'onduleur, et sont inversement égaux par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}$, $I_{d2} \approx -I_{d5}$, $I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs du moteur asynchrone triphasé (couple, vitesse, courant) sont présentées aux figures III.30.i,j,k.

- **Simulation numérique**

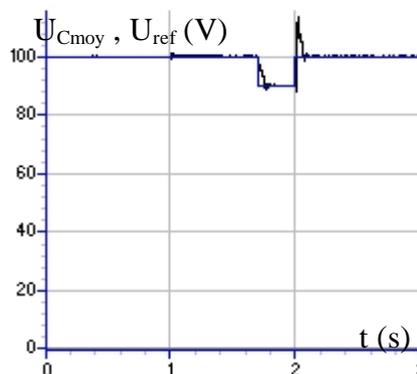


Fig.III.30.a. Tension moyenne du filtre capacitif d'entrée de l'onduleur

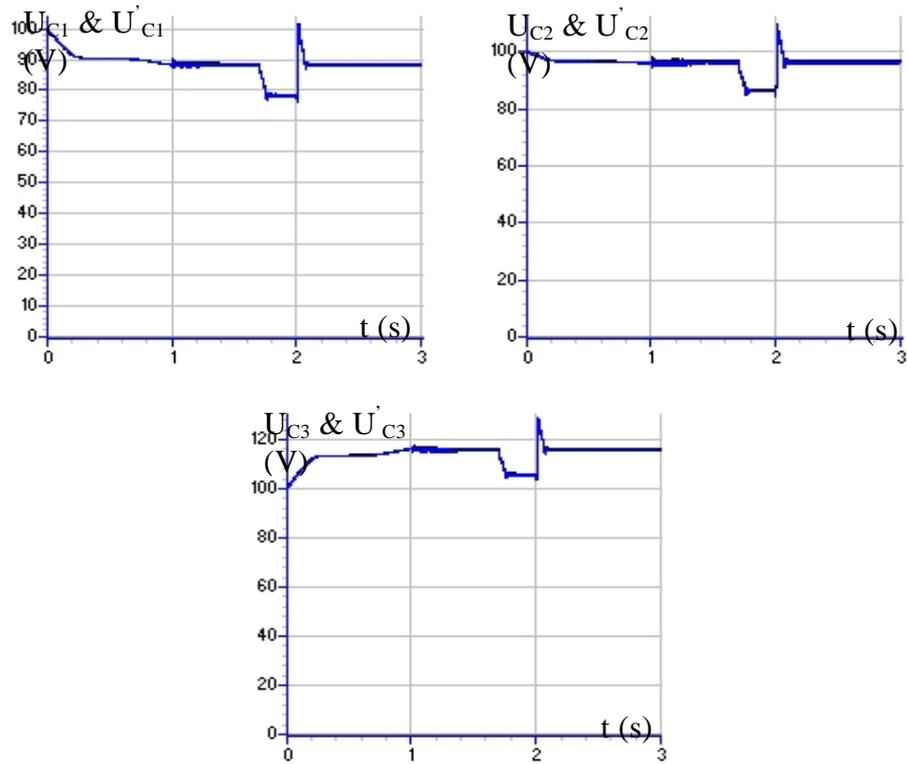


Fig.III.30.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

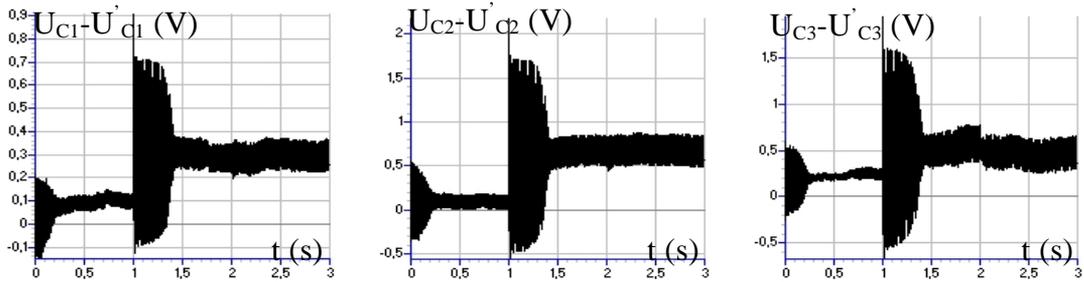


Fig.III.30.c. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$, $U_{C3} - U'_{C3}$

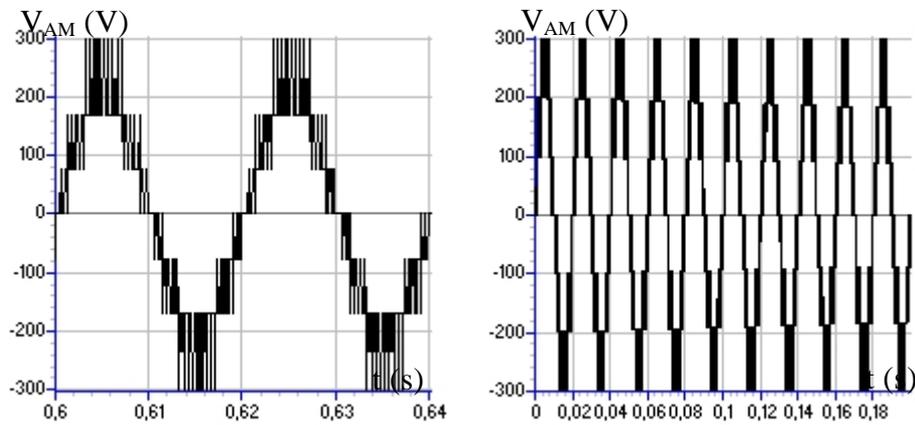


Fig.III.30.d. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

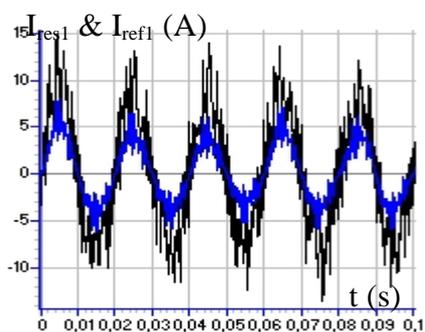


Fig.III.30.e. Courant d'une phase du réseau MLI

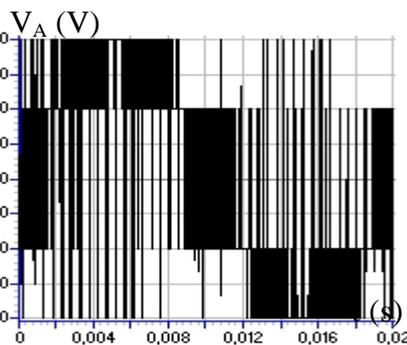


Fig.III.30.f. Tension simple du redresseur

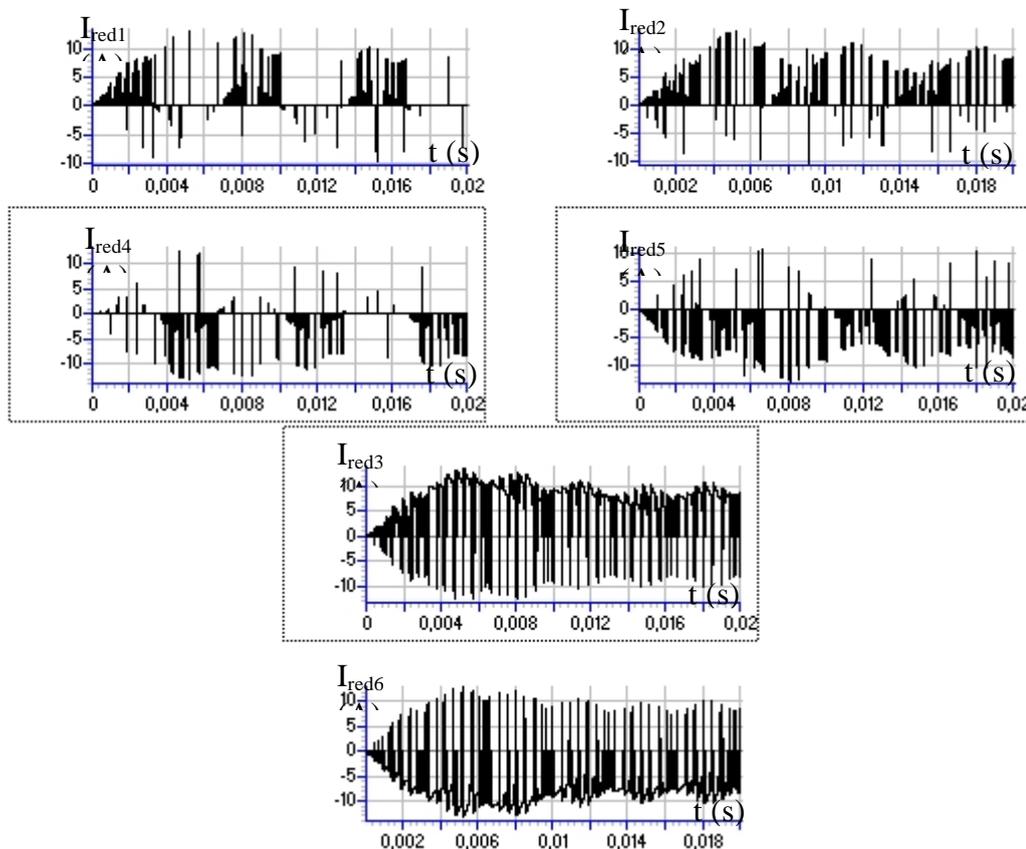
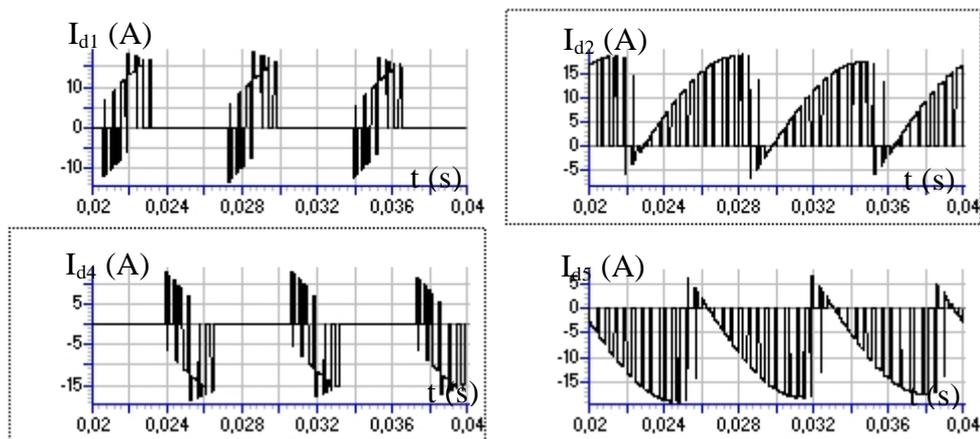


Fig.III.30.g. Courants de sortie du redresseur MLI à sept niveaux



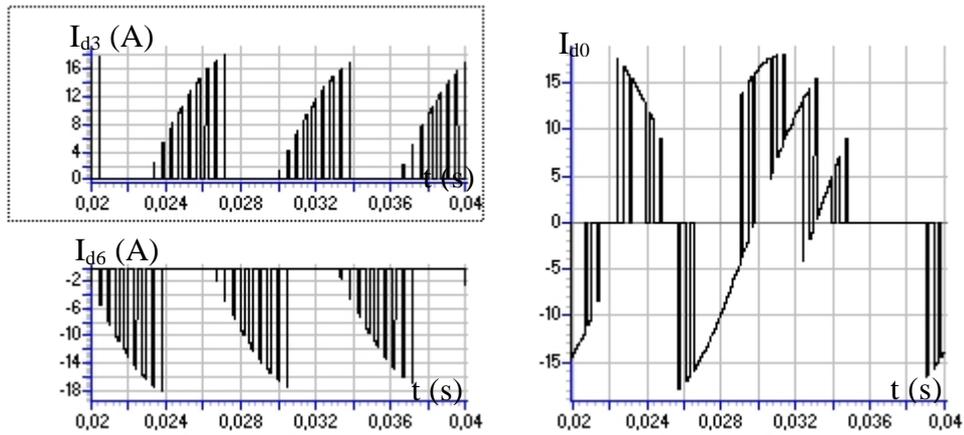


Fig.III.30.h. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

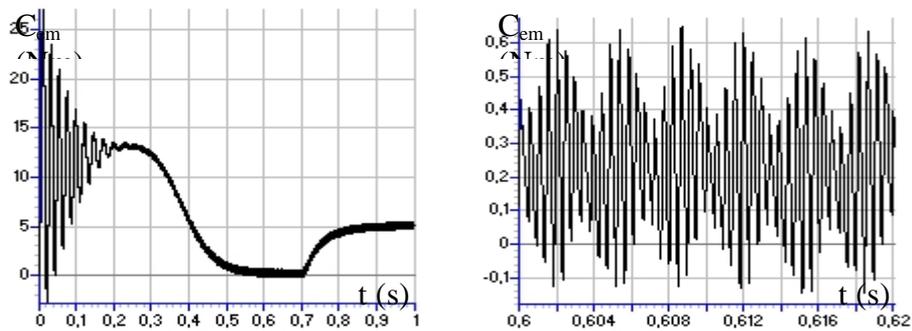


Fig.III.30.i. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

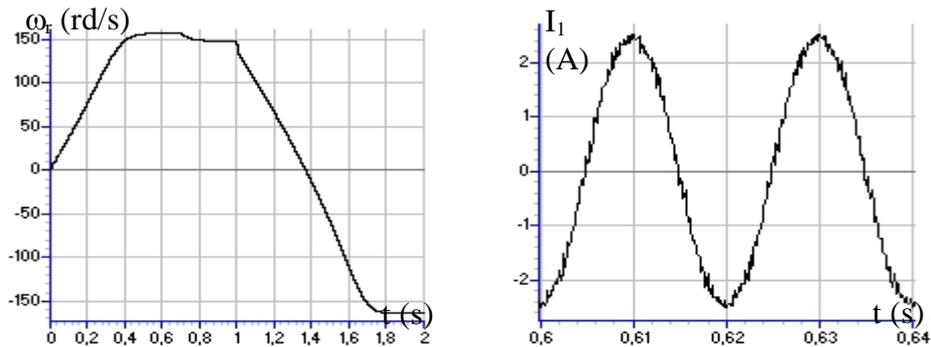


Fig.III.30.j. Vitesse de la machine asynchrone Fig.III.30.k. Courant absorbé par la MAS

- 2^{eme} cas : $C_1=C_2= C_3=C_4= C_5= C_6=20mF$

Les figures III.31.* présentent les performances de l'asservissement du redresseur MLI triphasé à sept niveaux appliqué à la cascade : un redresseur MLI à sept niveaux - onduleur NPC à sept niveaux commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$) - machine asynchrone triphasée, avec les nouveaux paramètres du pont capacitif. Le redresseur MLI à sept niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.01A$). Nous constatons :

- Le bon suivi de la tension moyenne redressée sa référence imposée par la boucle d'asservissement (Fig.III.31.a).
- Une stabilité des tensions continues d'entrée de l'onduleur après le régime transitoire de la machine asynchrone avec un partage non égal (Fig.III.31.b).

- Un écart entre les tensions continues important pendant le régime permanent avec le risque d'inversion de la polarité pour certaines tensions ($U_{C3} \gg U_{C2} \gg U_{C1}$) (Fig.III.31.b).
- Une égalité des tensions du demi-pont capacitif supérieur de l'onduleur avec celles du demi-pont inférieur (Fig.III.31.c).
- Une déformation de la tension de sortie de l'onduleur (Fig.III.31.d).
- Un démarrage long du moteur asynchrone ($t_d=0.8s$) provoquant un échauffement excessive du bobinage; destructif du stator de la machine (Fig.III.31.e,f).

● Simulation numérique

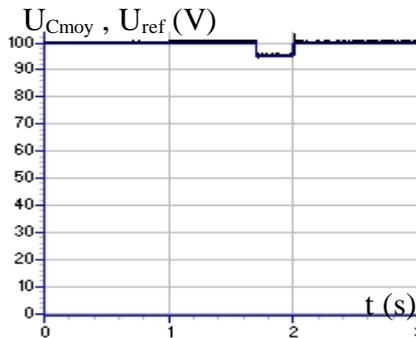


Fig.III.31.a. Tension de sortie moyenne du redresseur MLI à sept niveaux

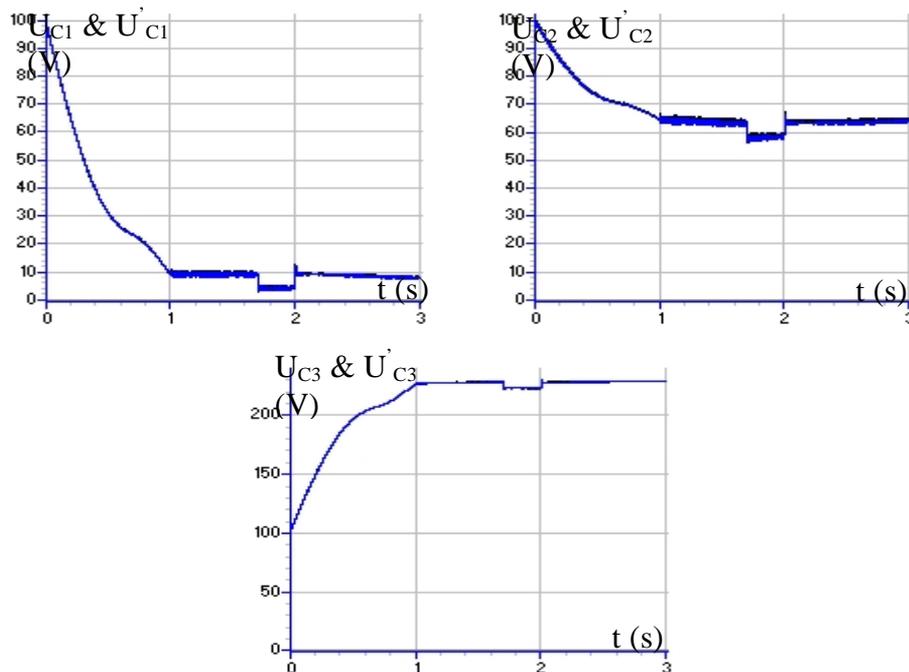


Fig.III.31.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

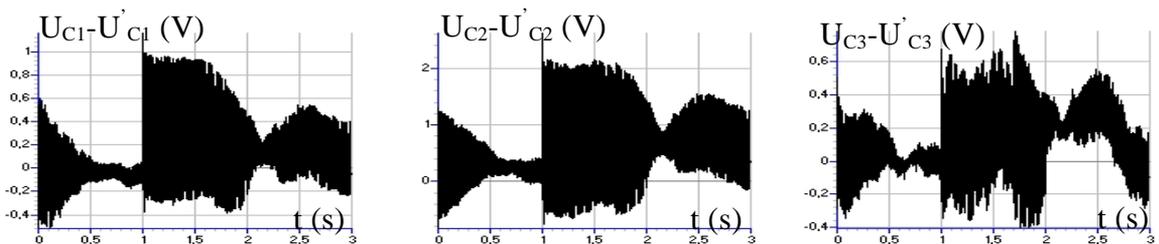


Fig.III.31.c. Différences de tension $U_{C1}-U'_{C1}$, $U_{C2}-U'_{C2}$, $U_{C3}-U'_{C3}$

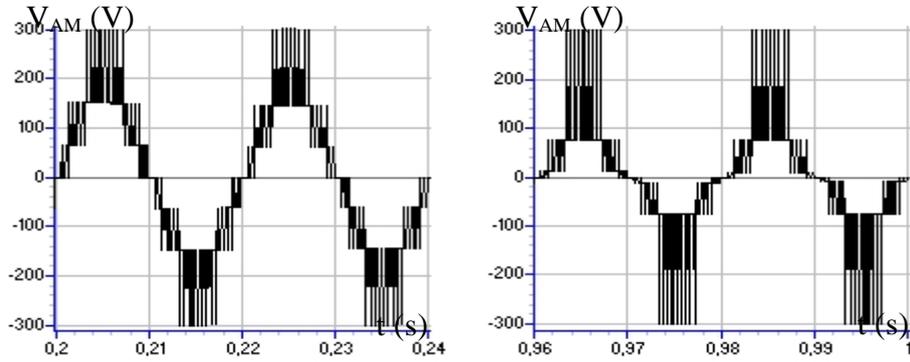


Fig.III.31.d. Tension de sortie de l'onduleur à sept niveaux

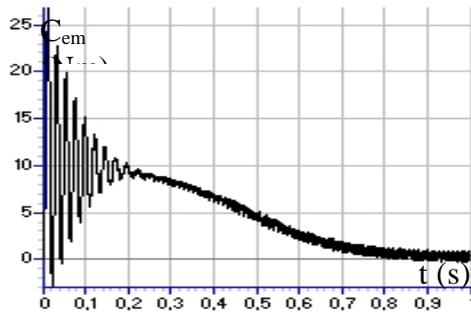


Fig.III.31.e. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

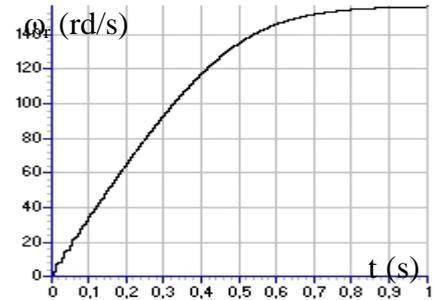


Fig.III.31.f. Vitesse de la MAS à vide

IV. Conclusion

On a étudié dans ce chapitre les algorithmes d'asservissement des redresseurs de courant à MLI triphasés à deux, trois et à sept niveaux. On a particulièrement montré :

- l'analogie des modèles de commande des redresseurs triphasés multiniveaux avec les redresseurs triphasés à deux niveaux. Cette analogie est possible grâce à l'utilisation, pour les redresseurs multiniveaux des fonctions de connexion des demi-bras F_{ks}^b .
- L'isomorphisme du modèle de la boucle de tension des redresseurs multiniveaux (trois et à sept niveaux) avec celui des redresseurs MLI à deux niveaux est rendu possible grâce à l'asservissement de la tension moyenne U_C des tensions aux bornes des condensateurs du pont capacitif. Ainsi, on arrive à modéliser le redresseur à sept niveaux par un redresseur à deux niveaux équivalent, et les grandeurs équivalentes sont définies comme suit :

$$U_C = \frac{U_{C1} + U_{C2} + U_{C3} + U'_{C1} + U'_{C2} + U'_{C3}}{6}$$

$$i_C = \frac{i_{C1} + i_{C2} + i_{C3} + i_{C4} + i_{C5} + i_{C6}}{6} , i_{Ch} = \frac{i_{Ch1} + i_{Ch2} + i_{Ch3} + i_{Ch4} + i_{Ch5} + i_{Ch6}}{6}$$

La figure III.32 présente le modèle général de la boucle de tension d'un redresseur multiniveaux. b désigne le nombre de niveaux du redresseur.

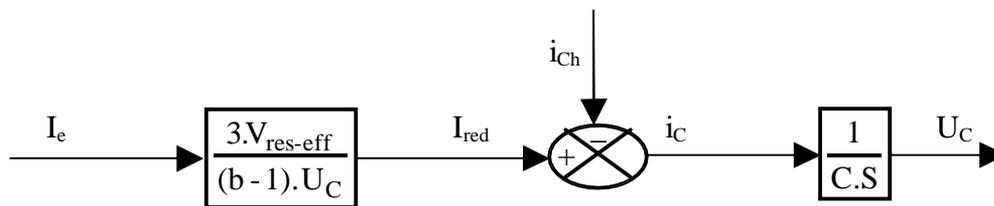


Fig.III.32. Modèle général de la boucle de tension d'un redresseur triphasé multiniveaux

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent :

- Les algorithmes d'asservissement élaborés pour les différents redresseurs MLI (à deux, trois et à sept niveaux), permis la stabilité des tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) après les régimes transitoires de la machine asynchrone triphasée.
- L'asservissement séparé des tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) avec le cas de la cascade à six redresseurs MLI, permet d'avoir la stabilité parfaite avec l'égalité de partage des tensions.
- L'efficacité de l'asservissement d'un nombre $(N-1)/2$ (N : nombre de niveaux) de redresseurs MLI à deux ou trois niveaux imbriqués, au lieu de l'asservissement d'un nombre équivalent ou plus de redresseurs associés en série.
- Avec cette asservissement, on peut aussi régler les tensions continues (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}), pour une stratégie de commande donnée de l'onduleur à sept niveaux, afin d'avoir le meilleur taux d'harmoniques de la tension de sortie de cet onduleur. Cette propriété est intéressante pour les asservissements des machines asynchrones triphasées.
- L'asservissement des tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux permet d'avoir un faible écart entre les tensions symétriques par rapport au point milieu de l'onduleur M $\{(U_{C1}, U'_{C1}), (U_{C2}, U'_{C2}), (U_{C3}, U'_{C3})\}$, uniquement pendant les régimes transitoires. En régime établi, la différence est pratiquement nulle.

Malgré les avantages offerts par les algorithmes d'asservissement proposés pour résoudre le problème d'instabilité des sources de tension continue de l'onduleur à sept niveaux, cet outil présente les inconvénients suivants :

- La nécessité d'utiliser des condensateurs de capacités assez importantes ($C_{i=1,6} \geq 20\text{mF}$) du pont capacitif d'entrée l'onduleur à sept niveaux.
- L'instabilité des tensions continues avec la tendance d'inversion de la polarité pour certaines tensions suite à la perturbation du couple de charge. Cette inversion de la polarité est à l'origine de la destruction rapide des composants semi-conducteurs.
- Les courants absorbés par le réseau sont fortement pollués par les harmoniques.

Chapitre IV

Equilibrage des sources de tension continue de l'onduleur à sept niveaux utilisant le pont de clamping

Introduction

Le maintien des tensions continues d'entrées des onduleurs multiniveaux stables et égales est fondamental afin d'obtenir les performances requises de ces convertisseurs de puissance. Ainsi, la stabilité des sources de tension continue obtenue par l'application des algorithmes d'asservissement appropriés aux redresseurs MLI (à deux ou multiniveaux) est suffisante pour certaines structures de cascade, qui permis un partage égal des tensions sur tous les niveaux de l'onduleur multiniveaux. Néanmoins, pour d'autres cascades cette propriété est perdue, et ce malgré l'utilisation des condensateurs de capacités importantes (20mF et 60mF). Pour remédier à ce problème le pont de clamping peut être utilisé [Gheraia 2002.2].

Afin d'étudier le comportement du pont de clamping, nous proposons dans ce chapitre d'examiner en boucle ouverte les performances des différentes structures de cascade proposées au chapitre II, en introduisant le pont de clamping. Ainsi, on montre l'influence des paramètres du pont de clamping sur la stabilité des tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux.

I. Description du pont de clamping

Le pont de clamping est un mécanisme de contrôle de la charge rapide et continue des condensateurs. Il est constitué par un ensemble de cellules de commutation associées en série (Fig.IV.1)[Gheraia 2002.2]. La commutation forcée du transistor (T_i) mis en série avec la résistance R_C , permet de balancer l'état du condensateur : charge \Leftrightarrow **décharge**. Ainsi, ce mécanisme permet de contrôler uniquement les dépassements de la tension aux bornes du condensateur par rapport à une tension de référence U_{PC} (tension de limitation de charge).

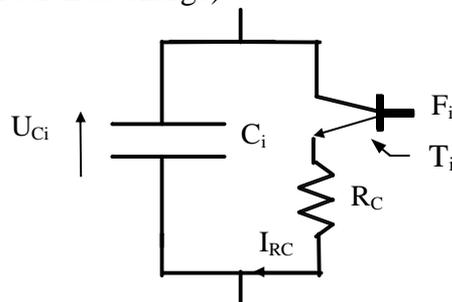


Fig.IV.1. Le principe d'un pont de clamping

Afin de contrôler le condensateur, nous proposons un algorithme de commande du transistor comme suit [Gheraia 2002.2] :

$$\begin{cases} (U_{Ci} - U_{pci}) = \varepsilon_i \\ \text{Si } \varepsilon_i > 0 \quad \text{Alors} \\ F_i = 1 \Rightarrow I_{RC} = F_i \cdot \frac{U_{Ci}}{R_C} \\ \text{Sinon} \\ F_i = 0 \Rightarrow I_{RC} = 0 \end{cases}$$

Avec :

U_{pci} : la tension de limitation de charge du condensateur

II. Cascades redresseurs de courant à MLI triphasés à deux niveaux - pont de clamping - onduleur triphasé à sept niveaux

II.1. Cascade un redresseur MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

La structure de cette cascade est présentée dans la figure IV.2.

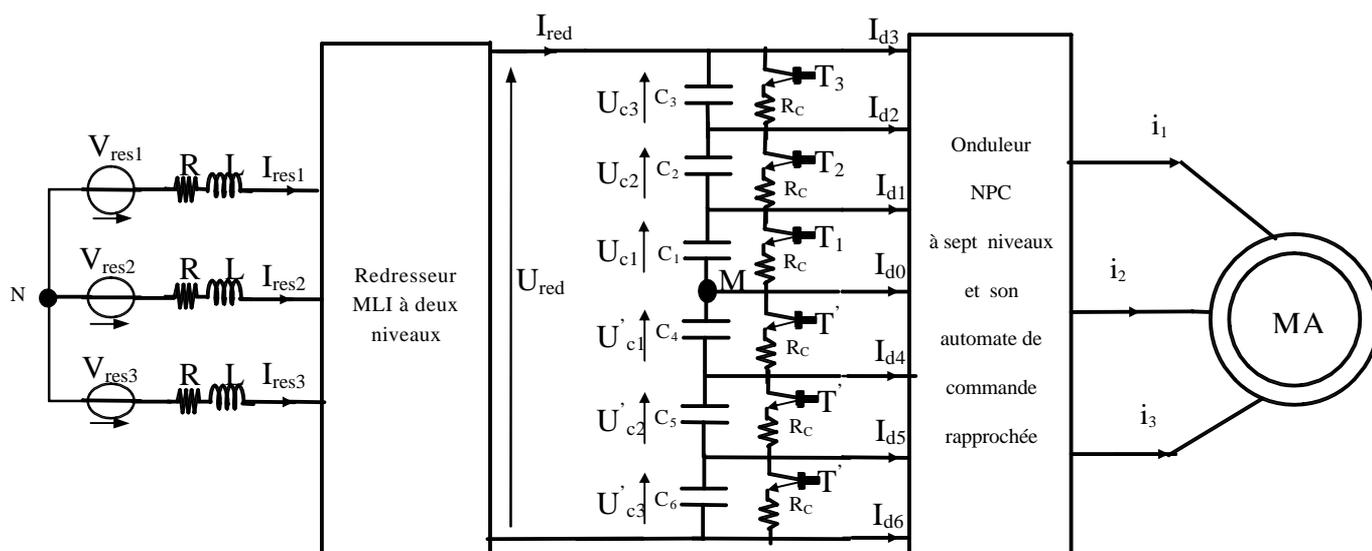


Fig.IV.2. cascade un redresseur MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

$$(V_{\text{res-eff}}=220\text{V}, R=0.25\Omega, L=10\text{ mH}, C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10\text{mF}, R_C=25\Omega)$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{PC1,4} = U_{PC} = \begin{cases} 100\text{V} & \text{if } t < 1.6\text{s} \quad \text{et} \quad t > 2.4\text{s} \\ 90\text{V} & \text{if } t \in [1.6\text{s}, 2.4\text{s}] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6): $U_{PC2,3,5,6} = 100\text{V} = C^{\text{te}}$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0 \quad 0.7], Cr=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

Les figures IV.3.* présentent les performances de la cascade un redresseur MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux alimentant une machine asynchrone triphasée. Le redresseur MLI à deux niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.05A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$).

La figure IV.3.a présente la tension de sortie du redresseur MLI à deux niveaux (U_{red}). Cette tension devient constante et égale à la tension totale du pont de clamping, après les régimes transitoires de la MAS (démarrage, changement du sens de rotation). Ces régimes transitoires montrent la forte interaction entre la machine et son alimentation. Les tensions continues ($U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}, U'_{C1}, U'_{C2}, U'_{C3}$) suivent leurs références imposées par les différentes cellules du pont de clamping, et rejettent la perturbation du couple de charge (Cr). Néanmoins, ces tensions présentent un retard dû à la structure du pont de clamping qui impose une constante de temps importante ($\tau=R_C.C$)(Fig.IV.3.b). A cet effet, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant le régime transitoire (Fig.IV.3.d). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.IV.3.d), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent bien leurs références sinusoïdaux I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.IV.3.e). La figure IV.3.f présente le courant de sortie du redresseur MLI à deux niveaux I_{red} . La figure IV.3.g montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants ($I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}, I_{d4}, I_{d5}, I_{d6}$) ont pratiquement des fréquence trois fois celle de la tension, et inversement égaux par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}, I_{d2} \approx -I_{d5}, I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées à la figure IV.3.h .

- Simulation numérique

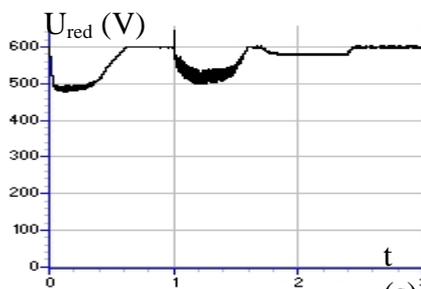


Fig.IV.3.a. Tension de sortie du redresseur MLI

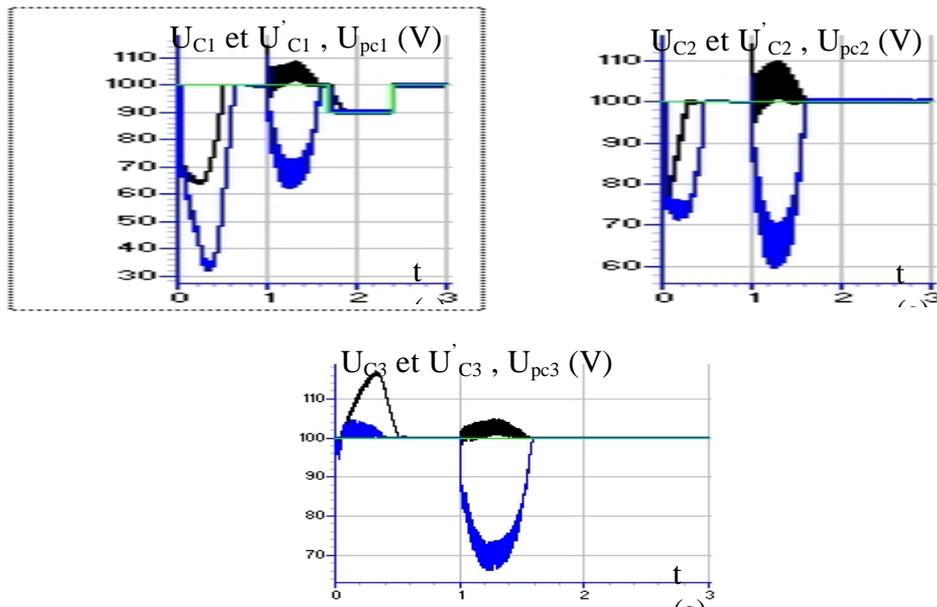


Fig.IV.3.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

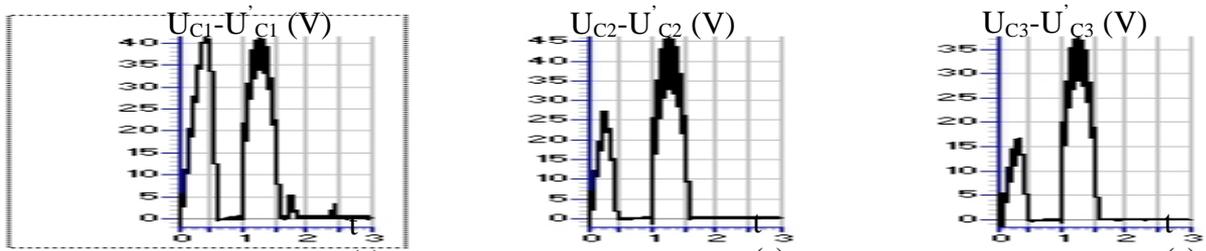


Fig.IV.3.c. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$ et $U_{C3} - U'_{C3}$

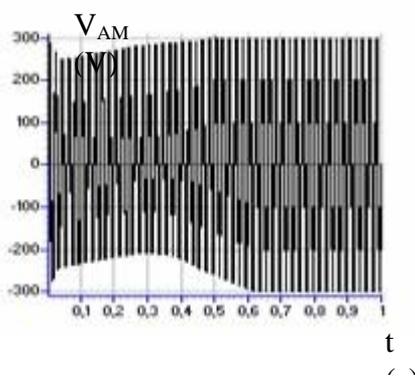


Fig.IV.3.d. Tension de sortie de l'onduleur

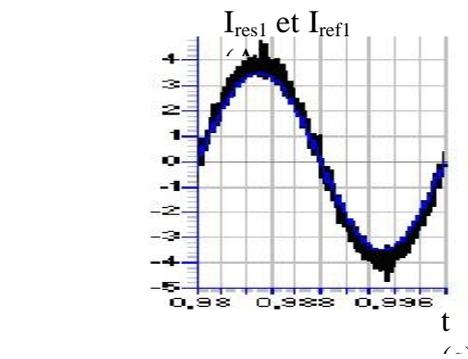
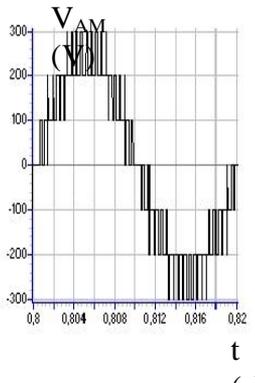


Fig.IV.3.e. Courant du réseau et sa référence

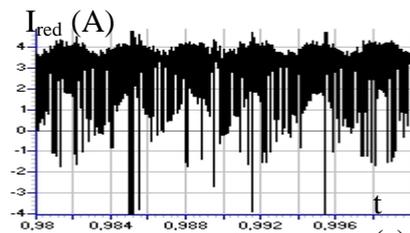


Fig.IV.3.f. Courant de sortie du redresseur MLI

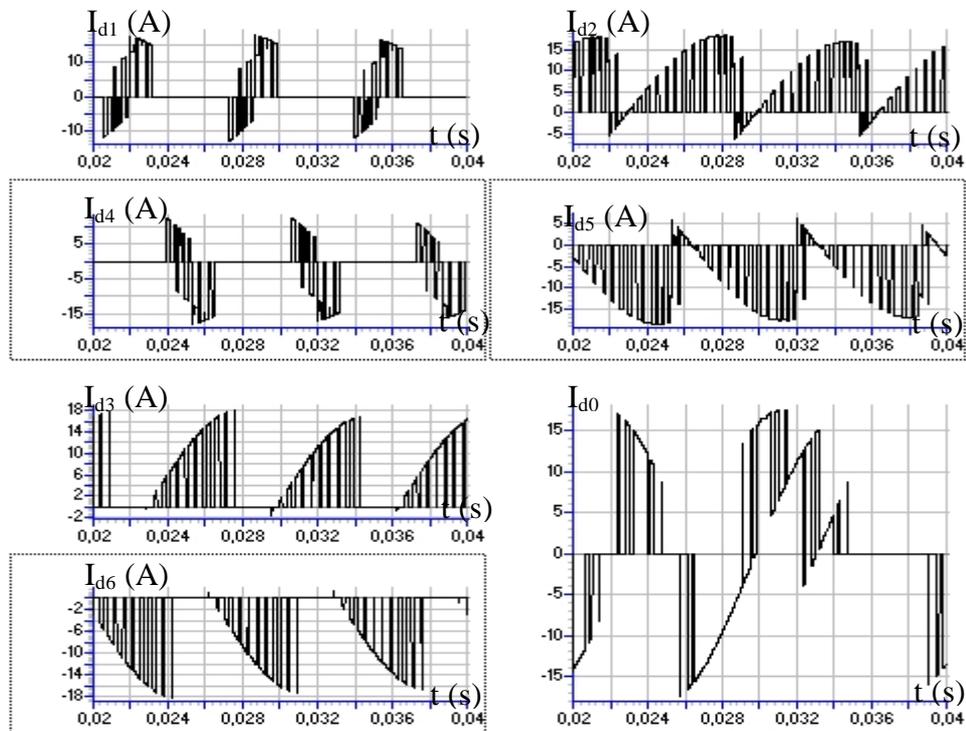


Fig.IV.3.g. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

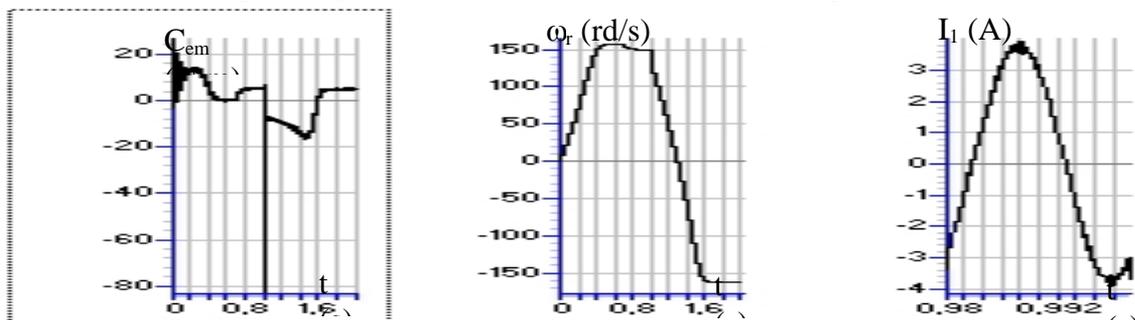


Fig.IV.3.h. Couple, vitesse et courant d'une phase absorbé par la machine asynchrone

II.2. Cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

La structure de cette cascade est présentée dans la figure IV.4.

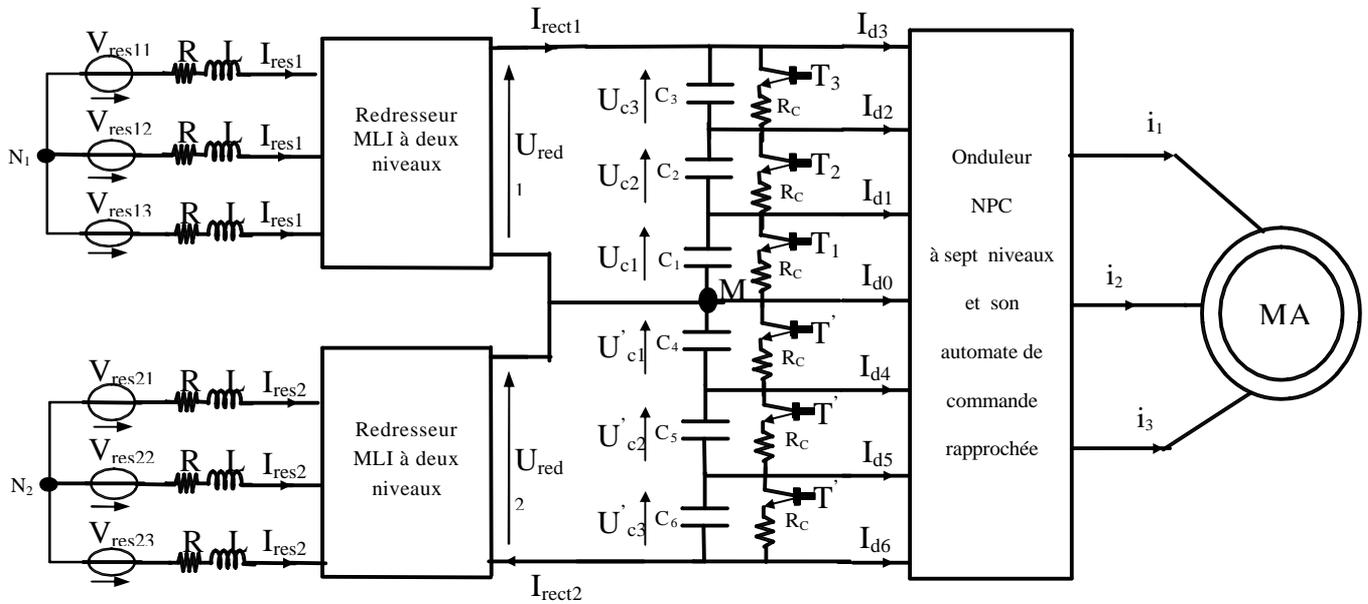


Fig.IV.4. cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

$$(V_{res-eff}=110V, R=0.25\Omega, L=10\text{ mH}, C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10mF, R_C=25\Omega)$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{PC1,4} = U_{PC} = \begin{cases} 100V & \text{if } t < 1.6s \text{ et } t > 2.4s \\ 90\text{ V} & \text{if } t \in [1.6s, 2.4s] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6): $U_{PC2,3,5,6} = 100V = C^{te}$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0, 0.7], Cr=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

Les figures IV.5.* présentent les résultats de performance de la cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux alimentant une machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$).

La figure IV.5.a présente les tensions de sortie des redresseurs MLI à deux niveaux (U_{red1}, U_{red2}). Ces tensions deviennent constantes et égales aux tensions imposées par le pont de clamping, après les régimes transitoires de la MAS (démarrage, changement du sens de rotation). Ces régimes transitoires montrent la forte interaction entre la machine et son alimentation. Les tensions continues ($U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}, U'_{c1}, U'_{c2}, U'_{c3}$) suivent leurs références imposées par les différentes cellules du pont de clamping, et rejettent la perturbation du couple de charge (Cr). Néanmoins, ces tensions présentent un retard de la réponse généré par la structure du pont de clamping qui impose une constante de temps importante ($\tau=R_C.C$)(Fig.IV.5.b)[Gheraia 2002.2]. A cet effet, l'onduleur à sept

niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant le régime transitoire (Fig.IV.5.d). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.IV.5.d), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent bien leurs références sinusoïdaux I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.IV.5.e). La figure IV.5.f présente les courants de sortie des redresseurs MLI à deux niveaux (I_{red1} , I_{red2}). La figure IV.5.g montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension est inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}$, $I_{d2} \approx -I_{d5}$, $I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées à la figure IV.5.h.

• Simulation numérique

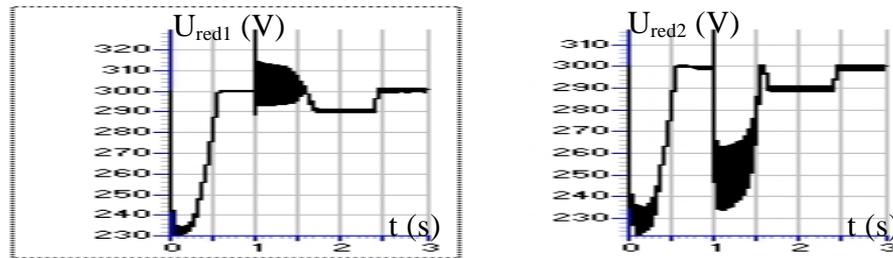


Fig.IV.5.a. Tensions de sortie des redresseurs MLI

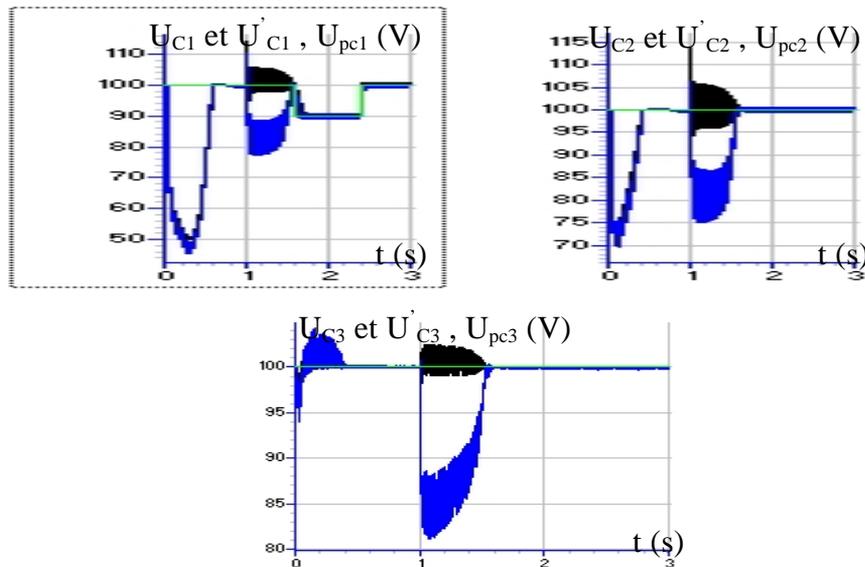


Fig.IV.5.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

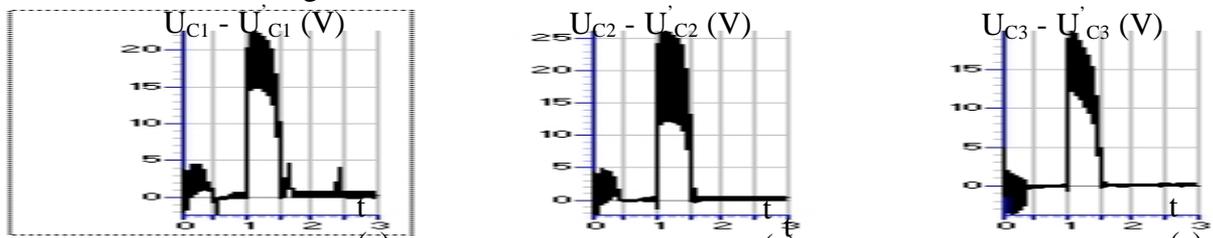


Fig.IV.5.c. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$ et $U_{C3} - U'_{C3}$

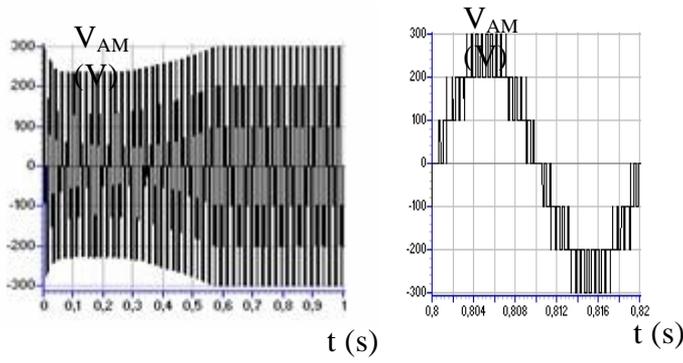


Fig.IV.5.d. Tension de sortie de l'onduleur et sa référence

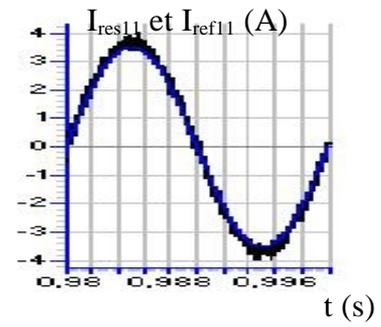


Fig.IV.5.e. Courant du réseau et sa référence

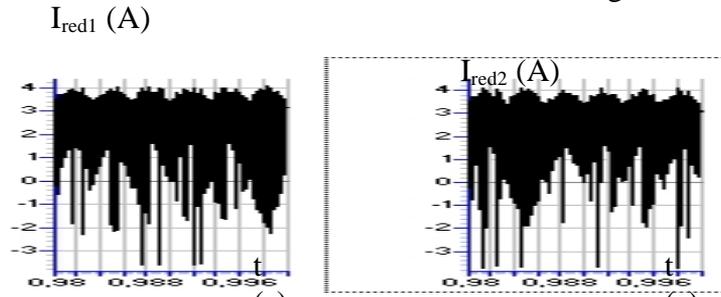


Fig.IV.5.f. Courants de sortie des redresseurs MLI

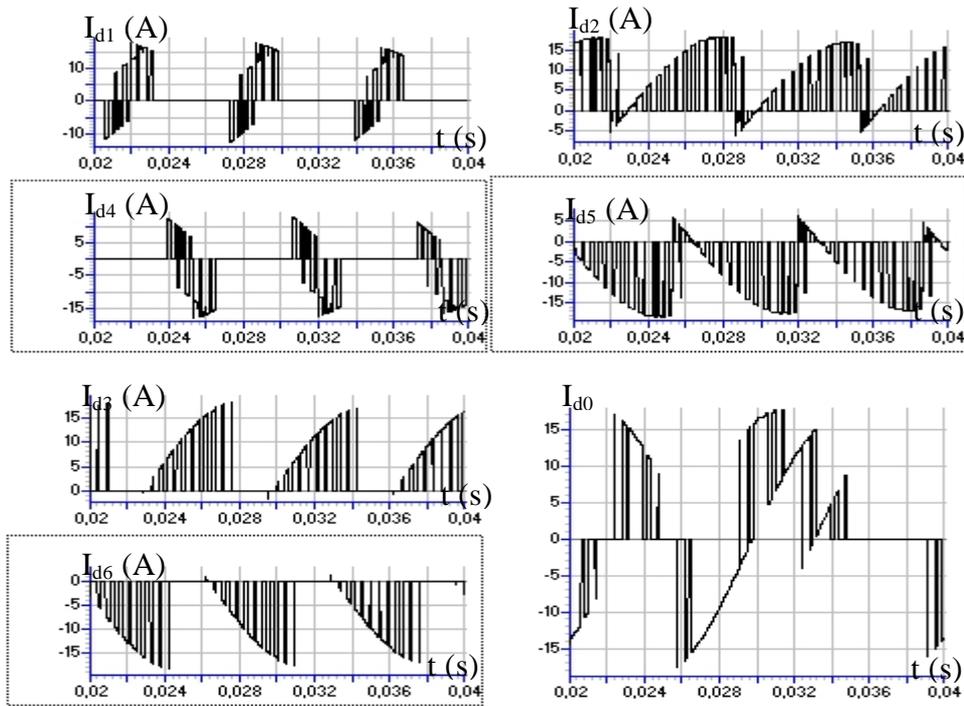


Fig.IV.5.g. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

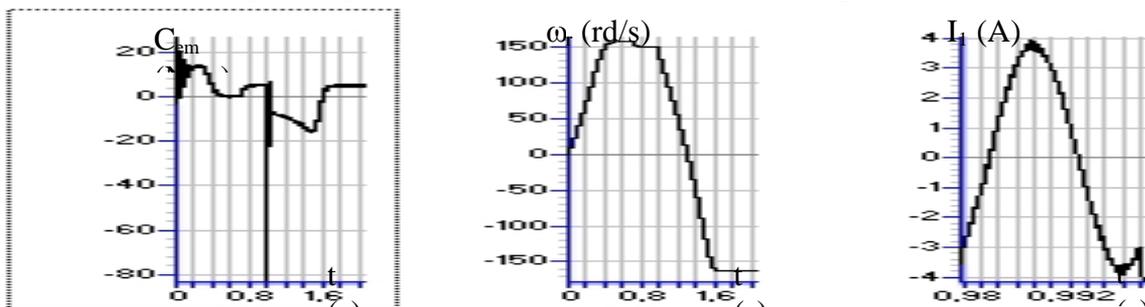


Fig.IV.5.h. Couple, vitesse et courant d'une phase absorbé par la machine asynchrone

II.3. Cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

II.3.1. Structure série : Cette cascade est présentée dans la figure IV.6.

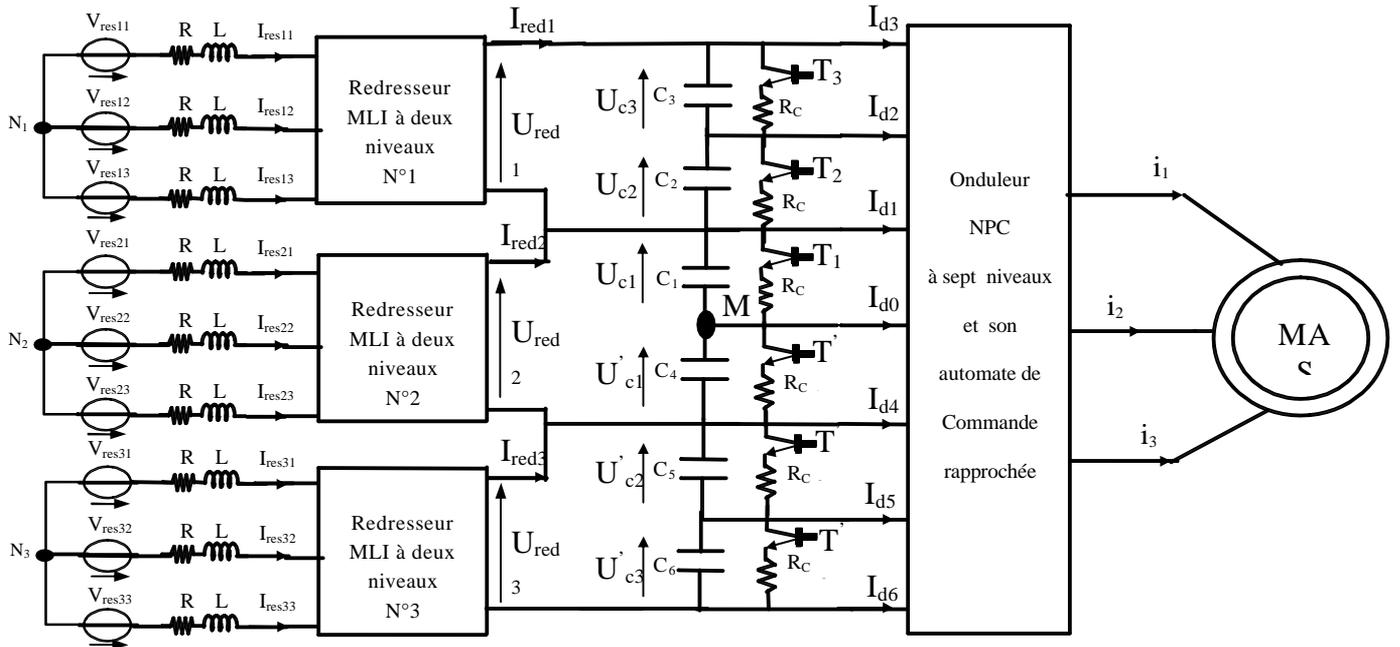


Fig.IV.6. cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS ($V_{res-ef}=(220/3)V$, $R=0.25\Omega$, $L=10\text{ mH}$, $C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10\text{mF}$, $R_C=25\Omega$)

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{PC1,4} = U_{PC} = \begin{cases} 100V & \text{if } t < 1.7s \text{ et } t > 2.4s \\ 90 V & \text{if } t \in [1.7s , 2.4s] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6): $U_{PC2,3,5,6} = 100V = C^{te}$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0 \quad 0.7]; Cr=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

Les figures IV.7.* présentent les résultats de performance de la cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux alimentant une machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$).

La figure IV.7.a présente les tensions de sortie des redresseurs MLI à deux niveaux (U_{red1} , U_{red2} , U_{red3}). Ces tensions deviennent constantes et égales aux tensions imposées par le pont de clamping, après les régimes transitoires de la MAS (démarrage, changement du sens de rotation). Ces régimes transitoires montrent la forte interaction entre la machine et son alimentation.

Les tensions continues (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) suivent leurs références imposées par les différentes cellules du pont de clamping, et rejettent la perturbation du couple de charge (C_r). Néanmoins, ces tensions continues présentent un retard de la réponse généré par la structure du pont de clamping qui impose une constante de temps importante ($\tau=R_C.C$)(Fig.IV.7.b). A cet effet, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant le régime transitoire (Fig.IV.7.d). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.IV.7.d), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent leurs références sinusoïdaux I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.IV.7.e). La figure IV.7.f présente les courants de sortie des trois redresseurs MLI à deux niveaux (I_{red1} , I_{red2} , I_{red3}). La figure IV.7.g montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension est inversement égales par paire ($I_{d1}\sim-I_{d4}$, $I_{d2}\sim-I_{d5}$, $I_{d3}\sim-I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées à la figure IV.7.h.

- **Simulation numérique**

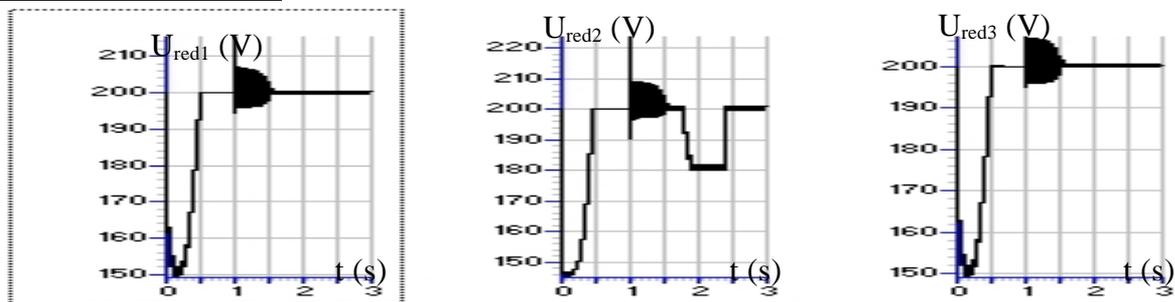


Fig.IV.7.a. Tensions de sortie des redresseurs MLI

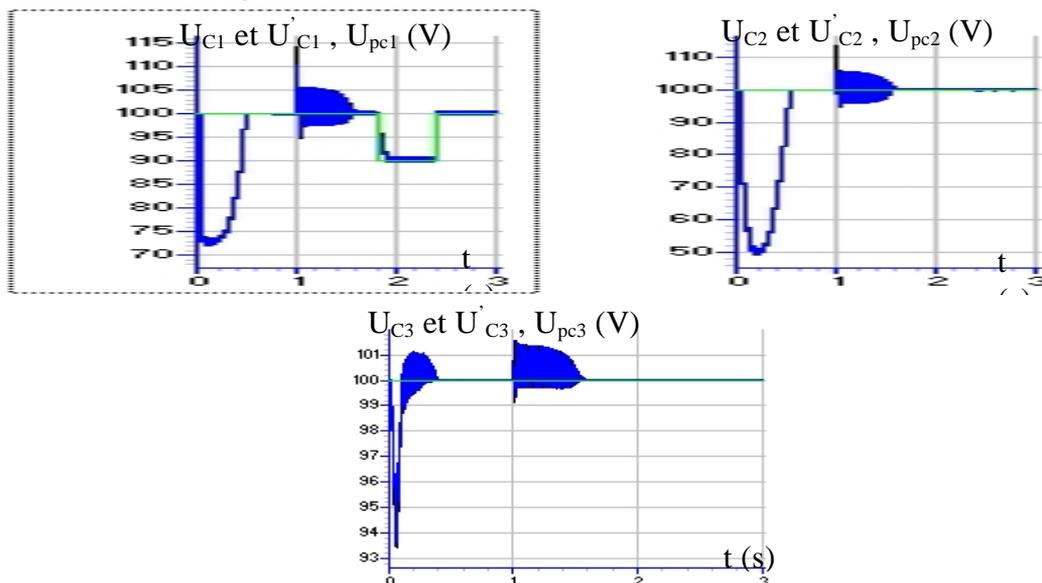


Fig.IV.7.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

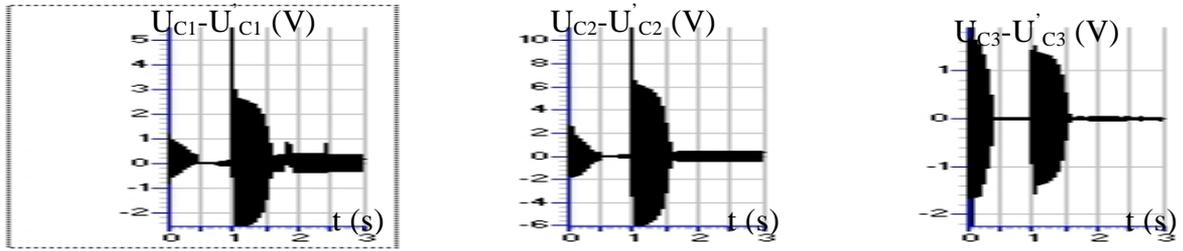


Fig.IV.7.c. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$ et $U_{C3} - U'_{C3}$

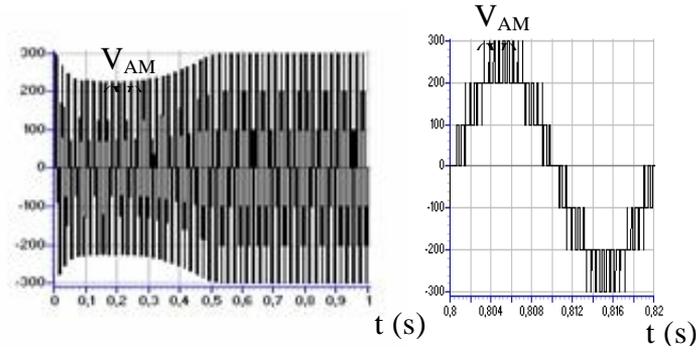


Fig.IV.7.d. Tension de sortie de l'onduleur et sa référence

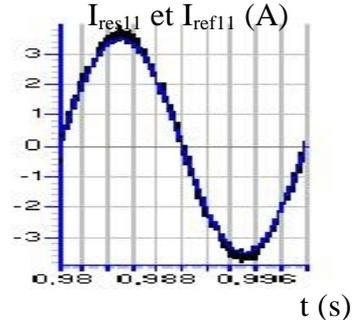


Fig.IV.7.e. Courant du réseau et sa référence

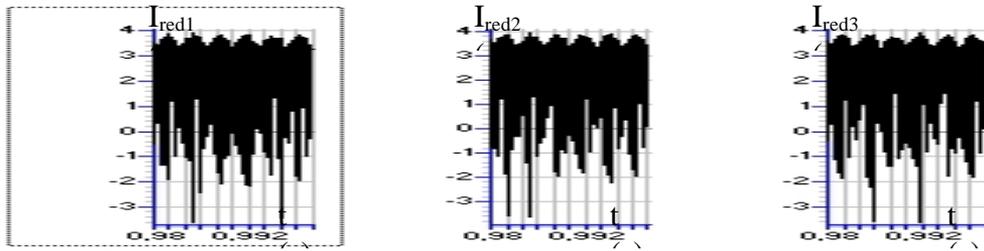


Fig.IV.7.f. Courants de sortie des redresseurs MLI

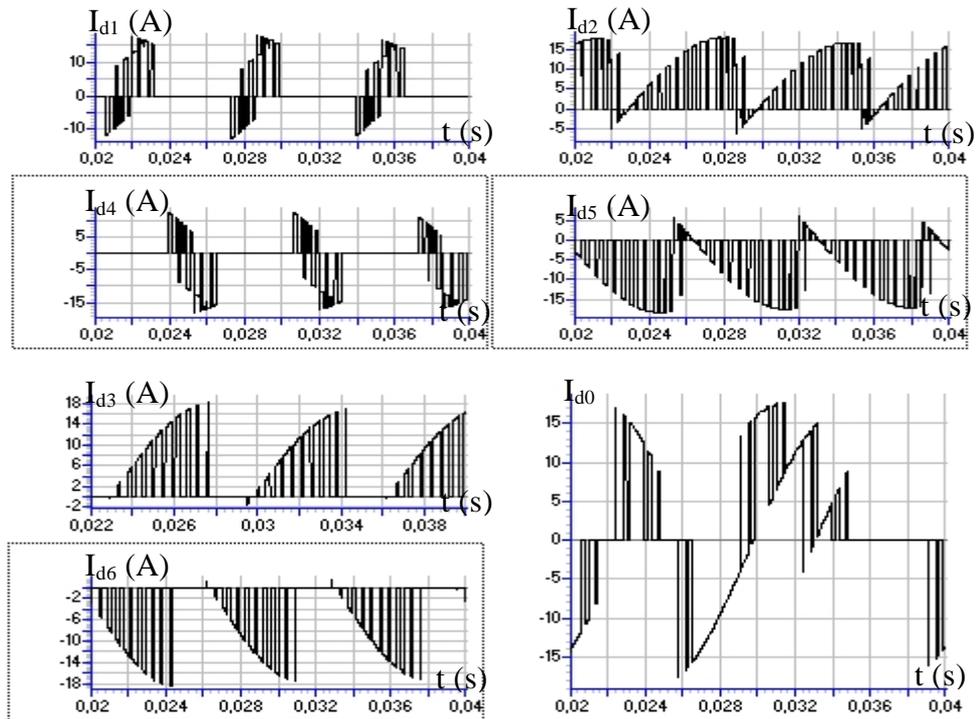


Fig.IV.7.g. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

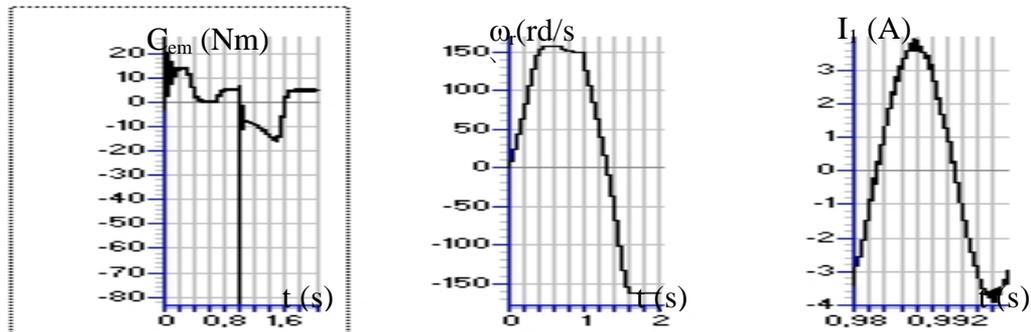


Fig.IV.7.h. Couple, vitesse et courant d'une phase absorbé par la machine asynchrone

II.3.2. Structure imbriquée : La cascade correspondante à cette structure est présentée dans la figure IV.8 [Annexe II].

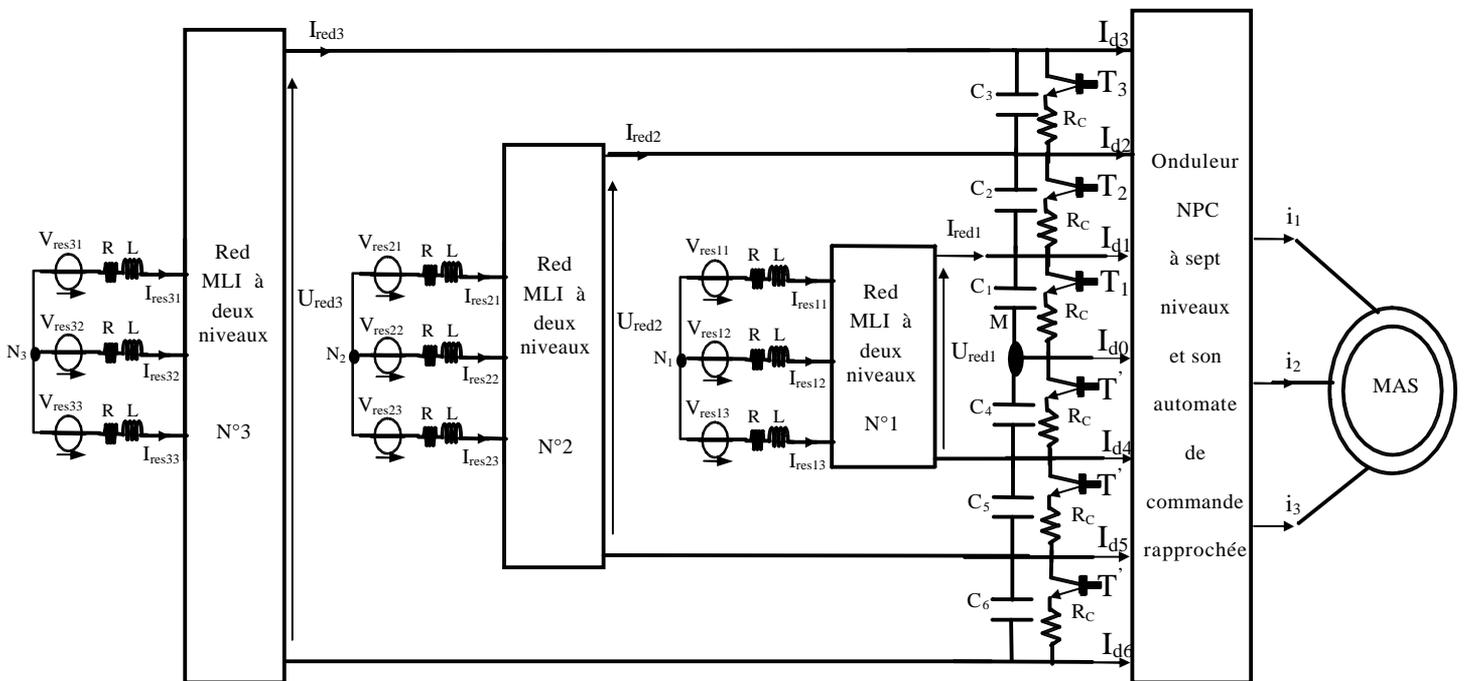


Fig.IV.8. cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux-MAS ($V_{res1-eff}=(220/3)V$, $V_{res2-eff}=(220*2/3)V$, $V_{res3-eff}=220V$, $R=0.25\Omega$, $L=10\text{ mH}$, $C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10\text{mF}$, $R_C=5\Omega$)

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{PC1,4} = U_{PC} = \begin{cases} 100V & \text{if } t < 1.7s \text{ et } t > 2.4s \\ 90 V & \text{if } t \in [1.7s, 2.4s] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6): $U_{PC2,3,5,6}= 100V = C^{te}$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0, 0.7]; Cr=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

Les figures IV.9.* présentent les résultats de performance de la cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux (structure imbriquée) - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux alimentant une machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.05A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$).

La figure IV.9.a présente les tensions de sortie des redresseurs MLI à deux niveaux (U_{red1} , U_{red2} , U_{red3}). Ces tensions sont constantes et égales aux tensions imposées par le pont de clamping. Les tensions continues (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) suivent leurs références imposées par les différentes cellules du pont de clamping, et rejettent la perturbation du couple de charge (Cr)(Fig.IV.9.b). Ainsi, on note l'amortissement considérable des régimes transitoires sur le comportement de toutes les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux (Fig.IV.9.b). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.IV.9.d), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent bien leurs références sinusoïdaux I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.IV.9.e). La figure IV.9.f présente les courants de sortie des trois redresseurs MLI à deux niveaux (I_{red1} , I_{red2} , I_{red3}). La figure IV.9.g montre les courants d'entrée de l'onduleur sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension est inversement égales par paire ($I_{d1}\approx-I_{d4}$, $I_{d2}\approx-I_{d5}$, $I_{d3}\approx-I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées aux figures IV.9.h,i.

- Simulation numérique

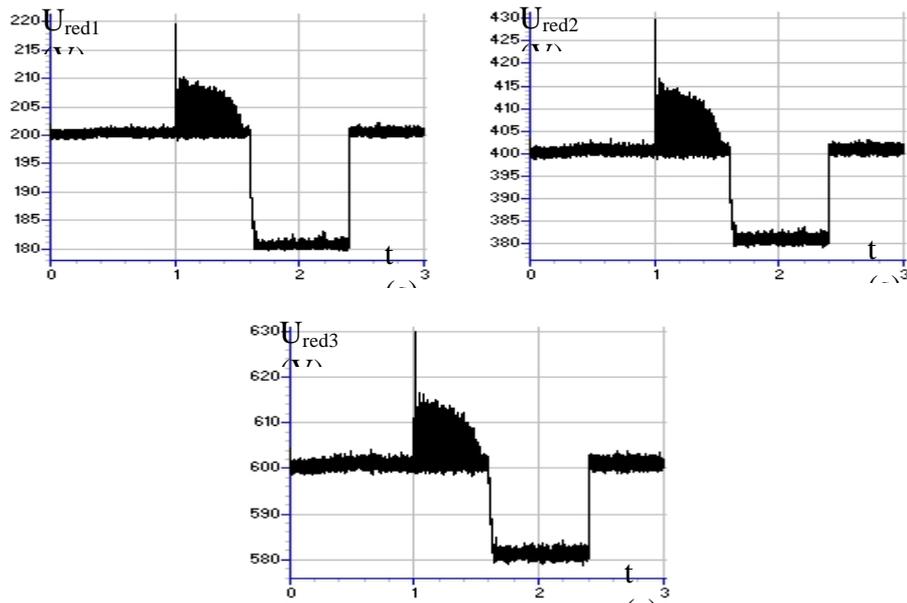


Fig.IV.9.a. Tensions de sortie des redresseurs MLI

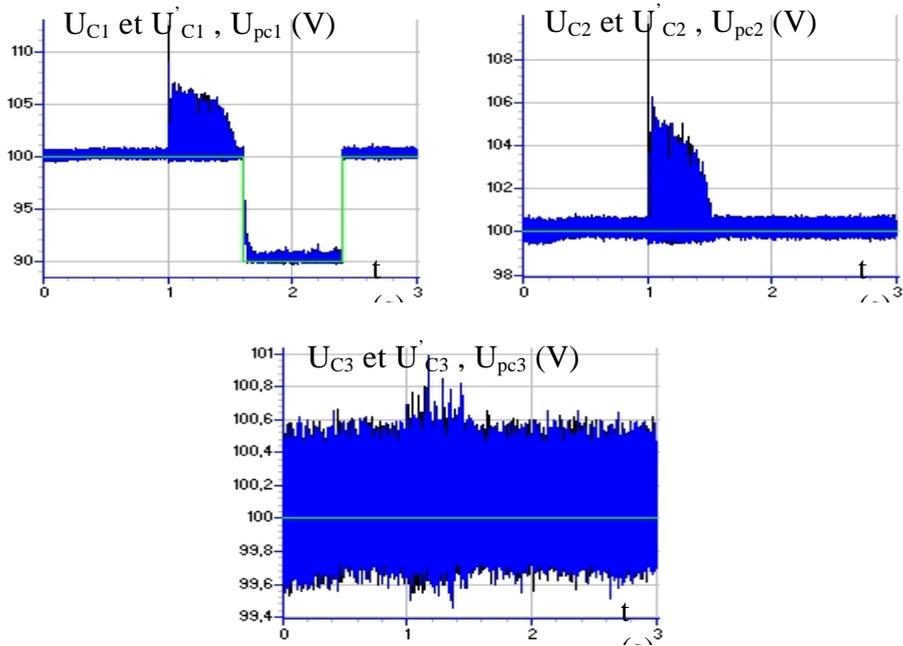


Fig.IV.9.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

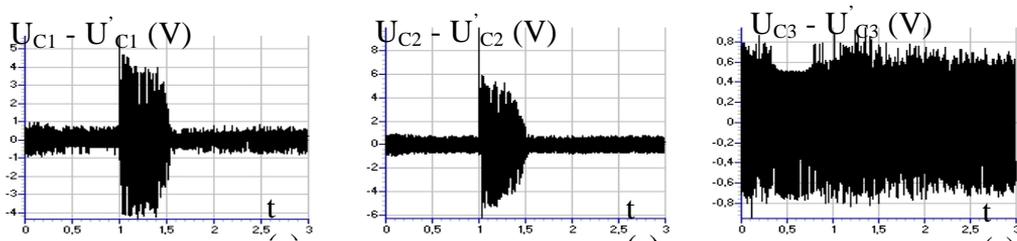


Fig.IV.9.c. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$ et $U_{C3} - U'_{C3}$

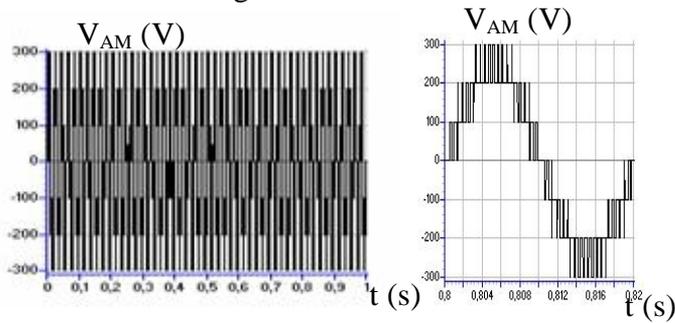


Fig.IV.9.d. Tension de sortie de l'onduleur

sa référence

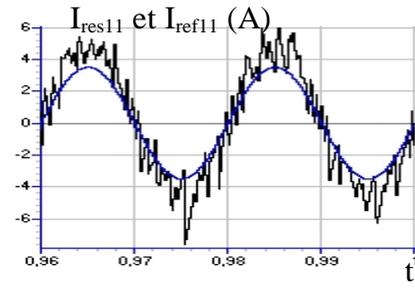
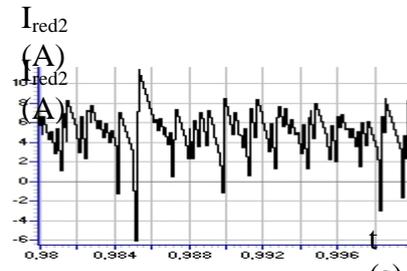
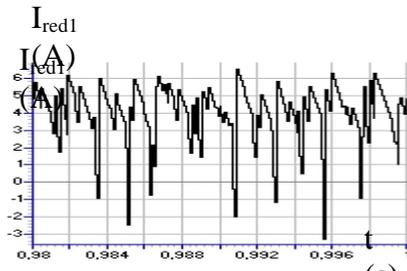


Fig.IV.9.e. Courant du réseau et



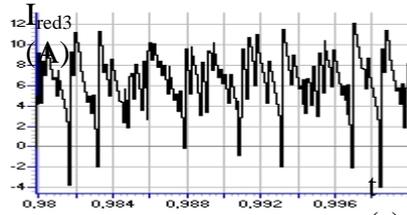


Fig.IV.9.f. Courants de sortie des redresseurs MLI

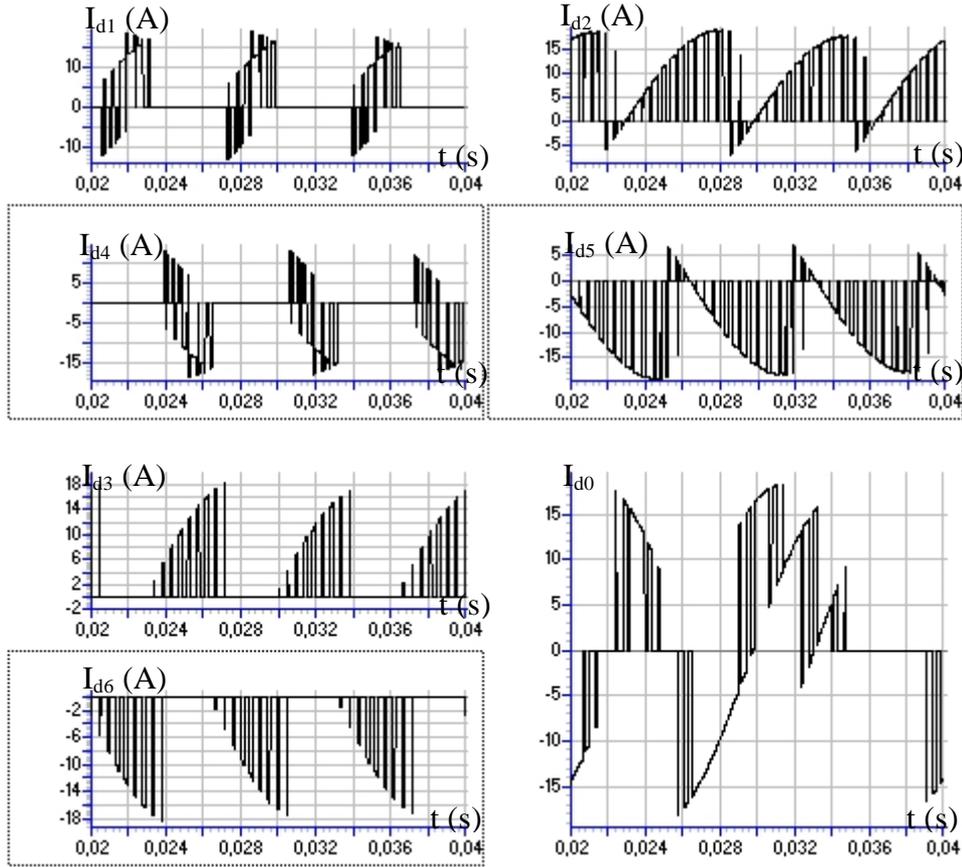


Fig.IV.9.g. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

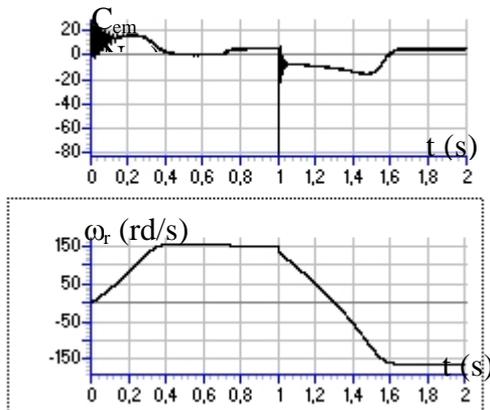


Fig.IV.9.h. Couple et vitesse de la machine asynchrone

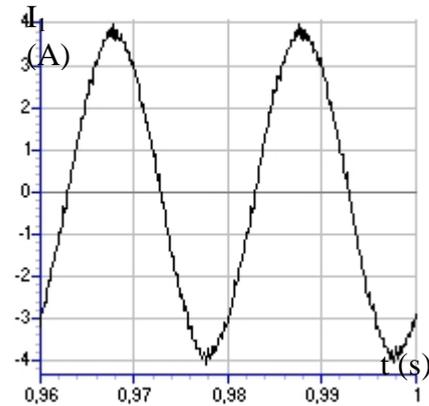


Fig.IV.9.i. Courant absorbé par la MAS

II.4. Cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

La structure de cette cascade est présentée dans la figure IV.10

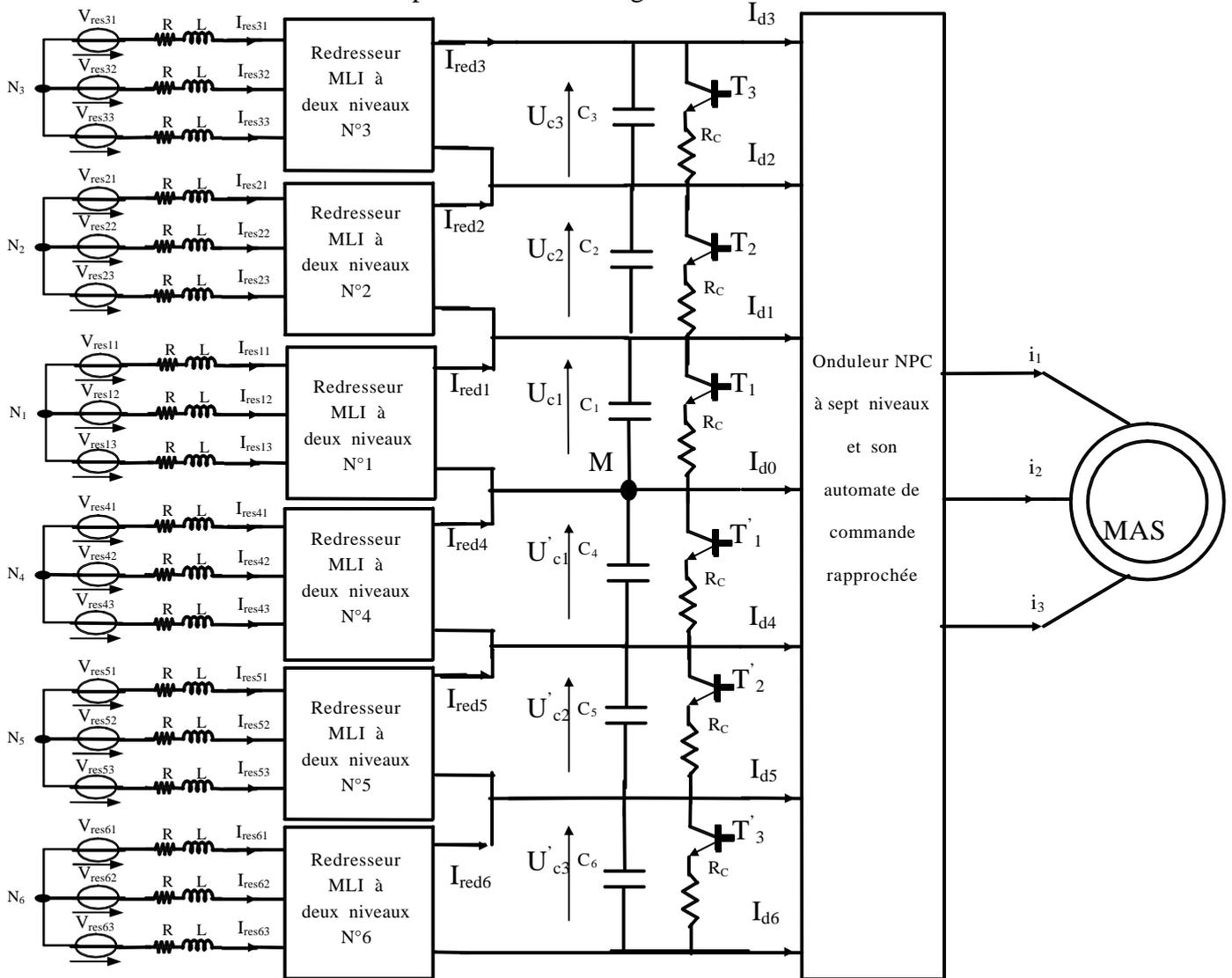


Fig.IV.10. cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

$$(V_{\text{res-ef}}=(220/6)V, R=0.25\Omega, L=10 \text{ mH} , C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10\text{mF}, R_c=25\Omega)$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{\text{PC1,4}} = U_{\text{PC}} = \begin{cases} 100\text{V} & \text{if } t < 1.7\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 90 \text{ V} & \text{if } t \in [1.7\text{s} , 2.4\text{s}] \end{cases}$$

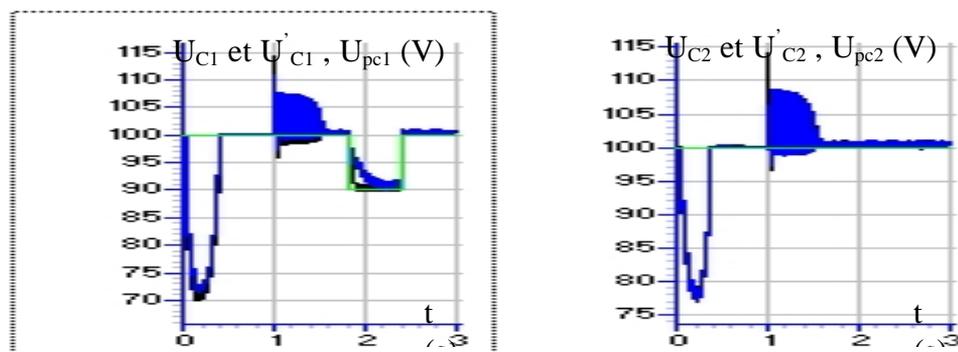
- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6): $U_{\text{PC2,3,5,6}}=100\text{V} = C^{\text{te}}$

Le couple de charge est défini par $C_r \{C_r=0 \text{ si } t(\text{s}) \in [0 \quad 0.7]; C_r=5\text{Nm} \text{ si } t(\text{s}) > 0.7\}$.

Les figures IV.10.* présentent les résultats de performance de la cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux alimentant une machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$).

La figure IV.10.a présente les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}). Ces tensions suivent leurs références imposées par les différentes cellules du pont de clamping, et rejettent la perturbation du couple de charge (C_r). Mis à part les tensions: U_{C3} et U'_{C3} ; qui sont pratiquement constantes, toutes les tensions continus présentent un retard de la réponse généré par la structure du pont de clamping, qui impose une constante de temps importante ($\tau=R_C.C$)(Fig.IV.10.a). Ces régimes transitoires montrent la forte interaction entre la machine asynchrone et son alimentation. Ainsi, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant les régimes transitoires (Fig.IV.10.c). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.IV.10.c), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent bien leurs références sinusoïdaux I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.IV.10.d). La figure IV.10.e présente les courants de sortie des six redresseurs MLI à deux niveaux (I_{red1} , I_{red2} , I_{red3} , I_{red4} , I_{red5} , I_{red6}). La figure IV.10.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension est inversement égales par paire ($I_{d1}\approx-I_{d4}$, $I_{d2}\approx-I_{d5}$, $I_{d3}\approx-I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées aux figures IV.10.g,h.

- Simulation numérique



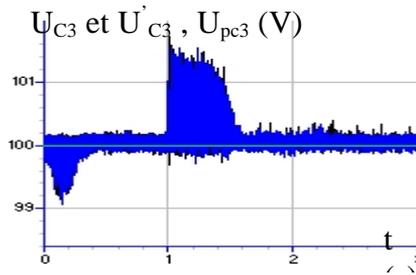


Fig.IV.10.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

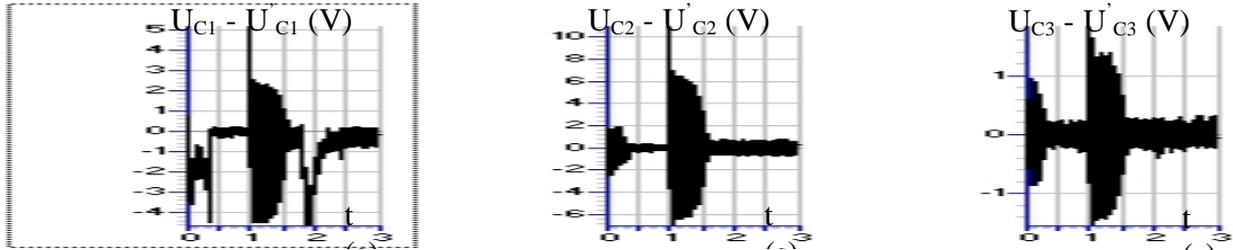


Fig.IV.10.b. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$ et $U_{C3} - U'_{C3}$

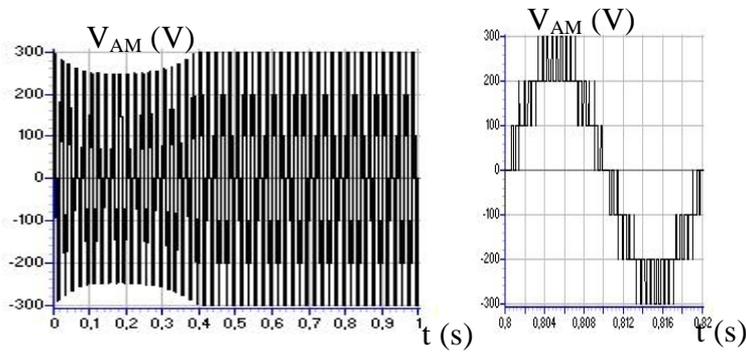


Fig.IV.10.c. Tension de sortie de l'onduleur et sa référence

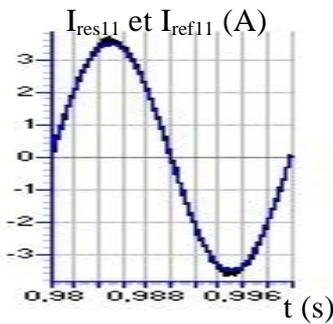


Fig.IV.10.d. Courant du réseau

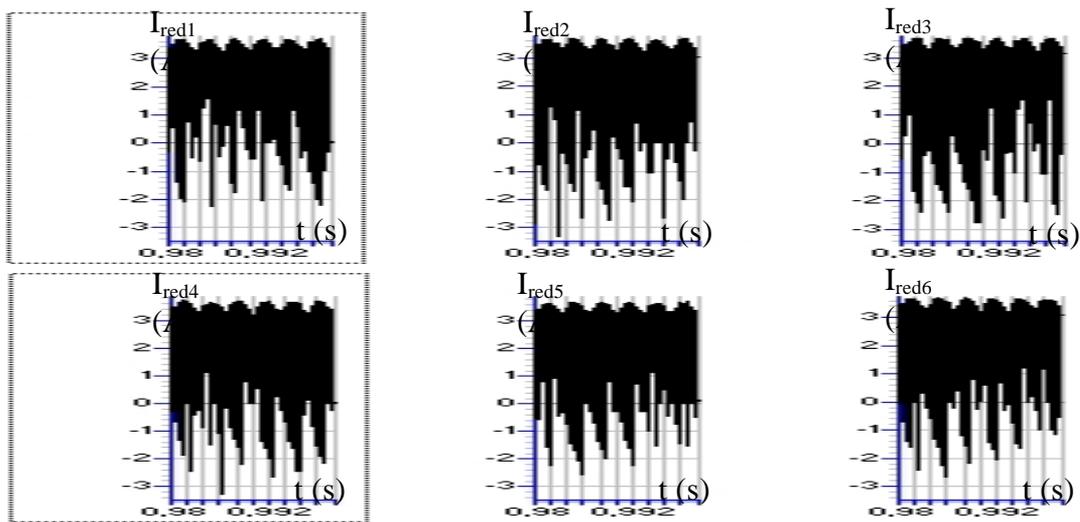


Fig.IV.10.e. Courants de sortie des redresseurs MLI

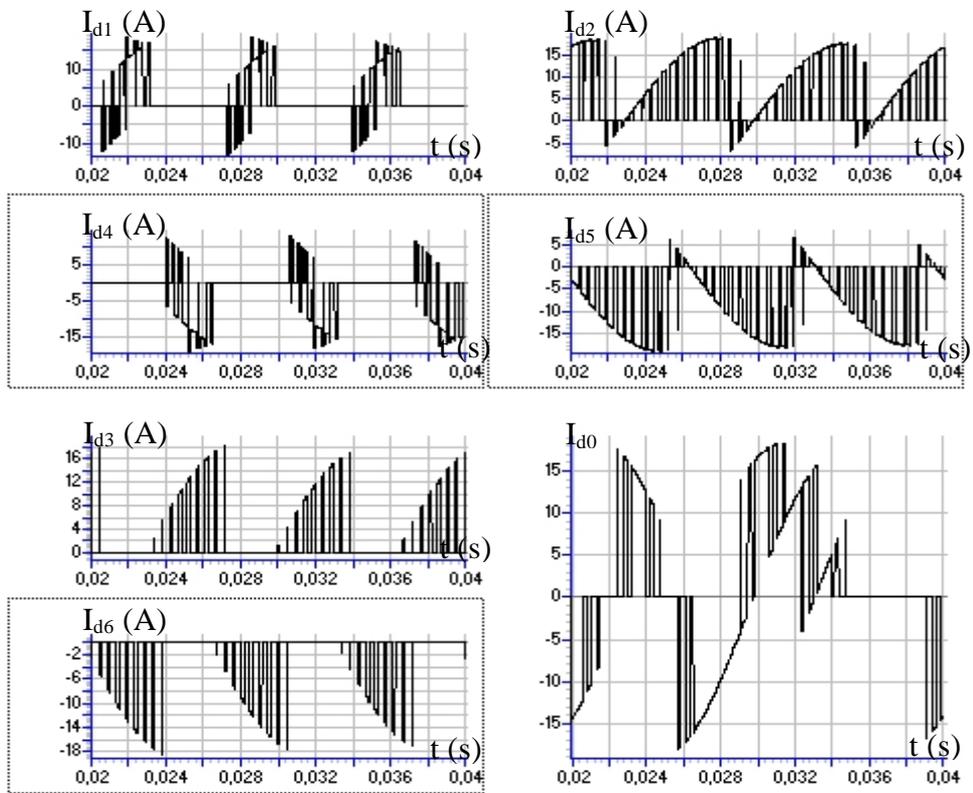


Fig.IV.10.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

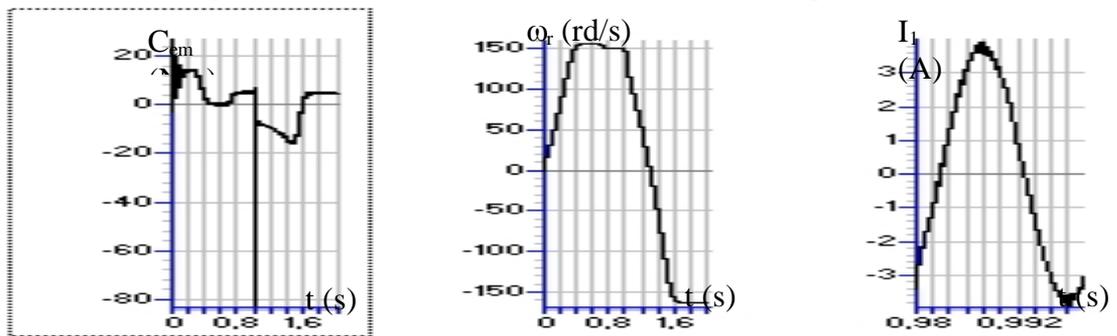


Fig.IV.10.g. Couple, vitesse et le courant d'une phase absorbé par la machine asynchrone

III. Cascades redresseurs de courant à MLI triphasés à trois niveaux - pont de clamping - onduleur triphasé à sept niveaux

On étudiera dans cette partie en boucle ouverte; les cascades multiniveaux constituées par un redresseur de courant triphasé à trois niveaux, le pont de clamping et l'onduleur triphasé à sept niveaux. Ces cascade sont appliquées à la conduite de la machines asynchrone triphasée.

III.1. Cascade un redresseur MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux -MAS

La structure de cette cascade est données à la figure IV.11.

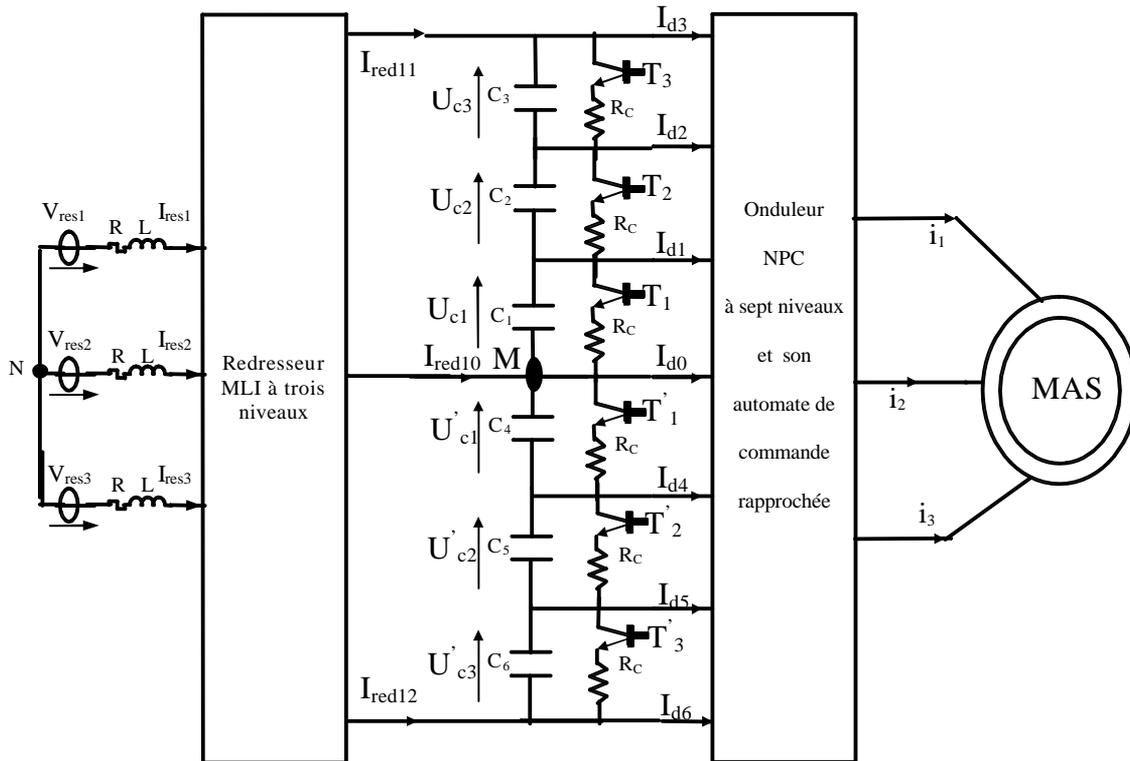


Fig.IV.11. cascade un redresseur MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

$$(V_{\text{res-eff}}=220\text{V}, R=0.25\Omega, L=10\text{ mH}, C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10\text{mF}, R_c=25\Omega)$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{\text{PC1,4}} = U_{\text{PC}} = \begin{cases} 100\text{V} & \text{if } t < 1.7\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 90\text{ V} & \text{if } t \in [1.7\text{s}, 2.4\text{s}] \end{cases}$$

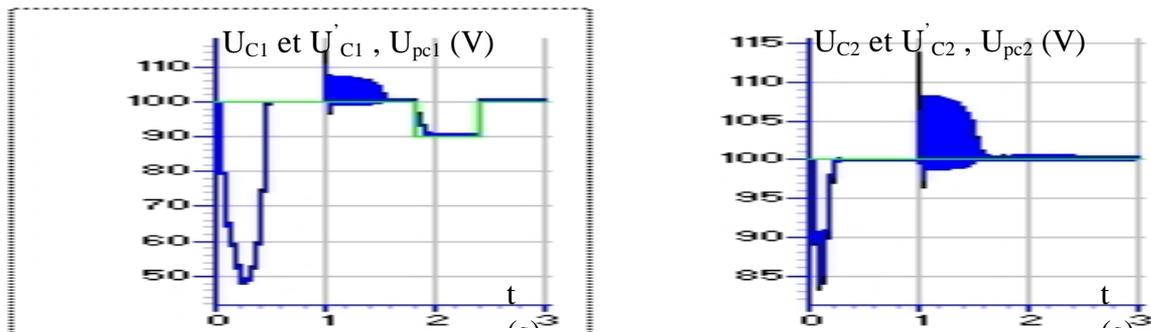
- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6): $U_{\text{PC2,3,5,6}}=100\text{V} = C^{\text{te}}$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(\text{s}) \in [0, 0.7], Cr=5\text{Nm} \text{ si } t(\text{s}) > 0.7\}$.

Les figures IV.12.* présentent les résultats de performance de la cascade un redresseur MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux alimentant une machine asynchrone triphasée. Le redresseur MLI à trois niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.001A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$).

La figure IV.12.a présente les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}). Ces tensions suivent leurs références imposées par les différentes cellules du pont de clamping, et rejettent la perturbation du couple de charge (Cr). Mis à part les tensions : U_{C3} et U'_{C3} ; qui sont pratiquement constantes, toutes les tensions continues présentent un retard de la réponse généré par la structure du pont de clamping qui impose une constante de temps importante ($\tau=R_C.C$)(Fig.IV.12.a). Ces régimes transitoires montrent la forte interaction entre la machine et son alimentation. Ainsi, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant le régime transitoire (Fig.IV.12.c). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.IV.12.c), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent bien leurs références sinusoïdaux I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.IV.12.d). La figure IV.12.e présente les courants de sortie du redresseur MLI à trois niveaux (I_{red11} , I_{red12} , I_{red10}). La figure IV.12.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension est inversement égales par paire ($I_{d1}\approx-I_{d4}$, $I_{d2}\approx-I_{d5}$, $I_{d3}\approx-I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées à la figure IV.12.g.

- **Simulation numérique**



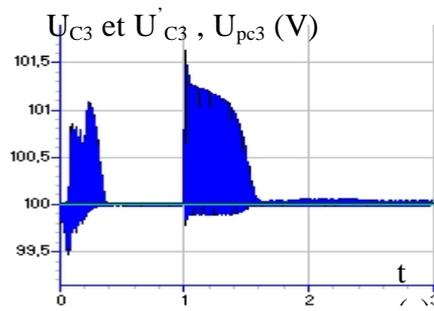
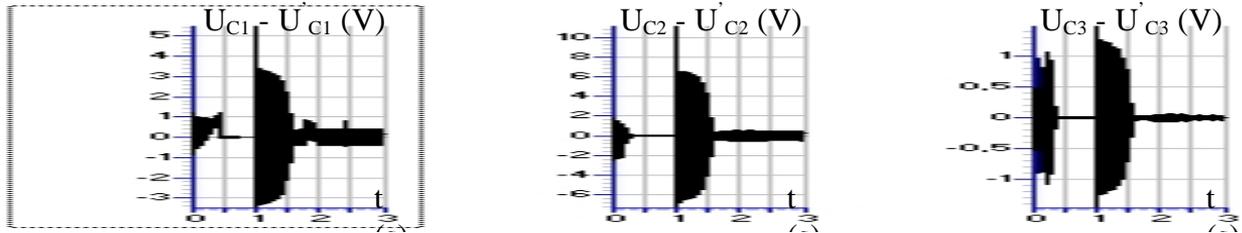


Fig.IV.12.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur



.IV.12.b. Différences entre les tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$ et $U_{C3} - U'_{C3}$

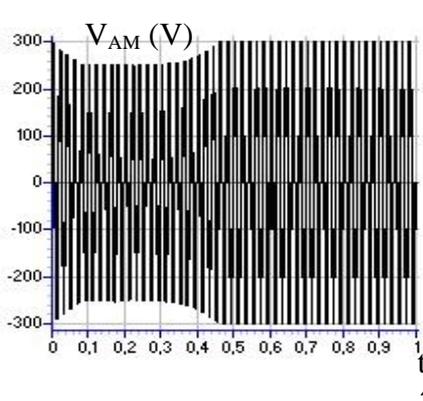


Fig.IV.12.c. Tension de sortie de l'onduleur

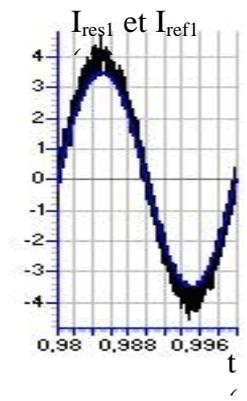
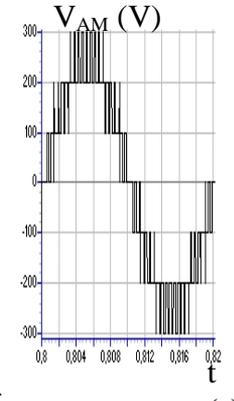


Fig.IV.12.d. Courant du réseau et sa référence

et sa référence

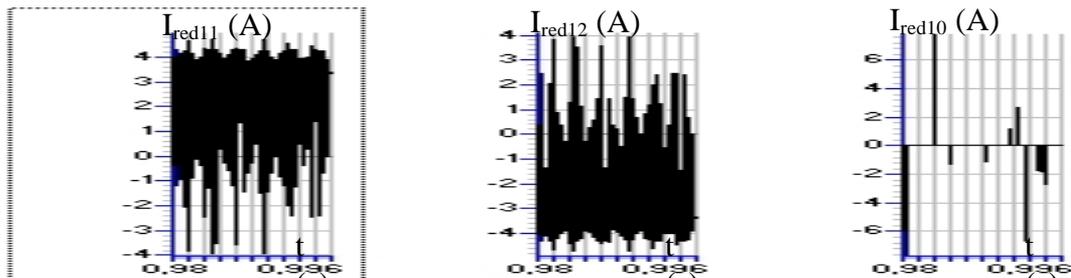
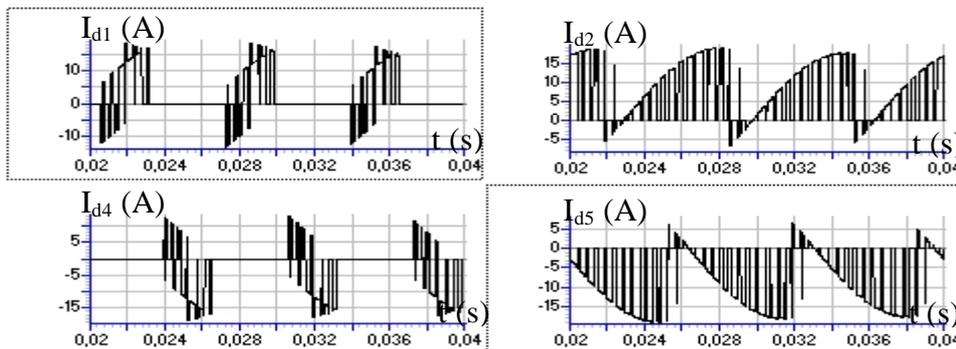


Fig.IV.12.e. Courants de sortie du redresseur MLI à trois niveaux



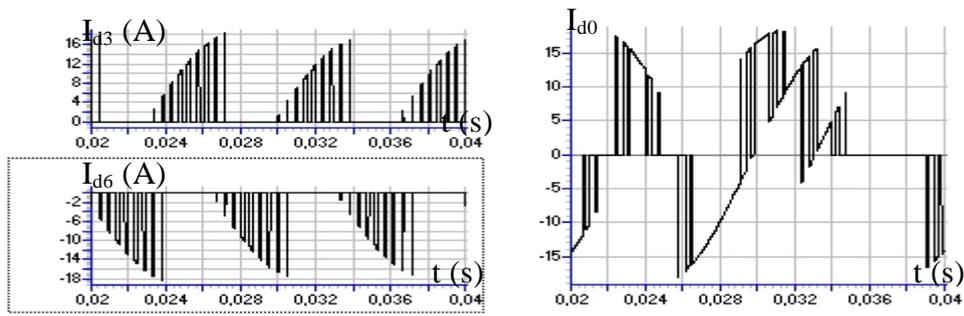


Fig.IV.12.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

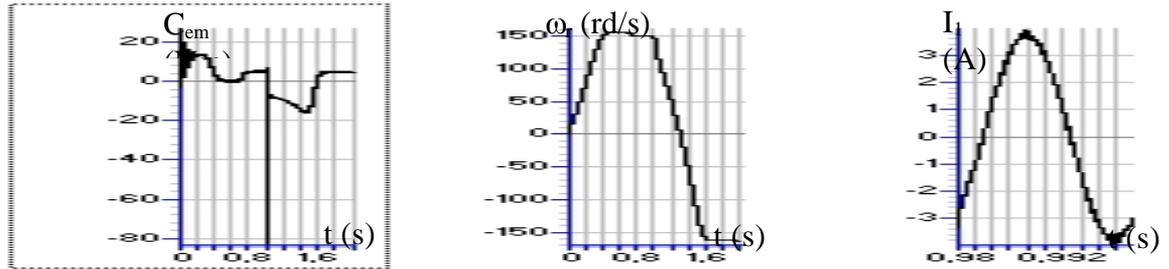


Fig.IV.12.g. Couple, vitesse et le courant d'une phase absorbé par la machine asynchrone

III.2. Cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

III.2.1. Structure série : La cascade correspondante à cette structure est donnée par la figure IV.13.

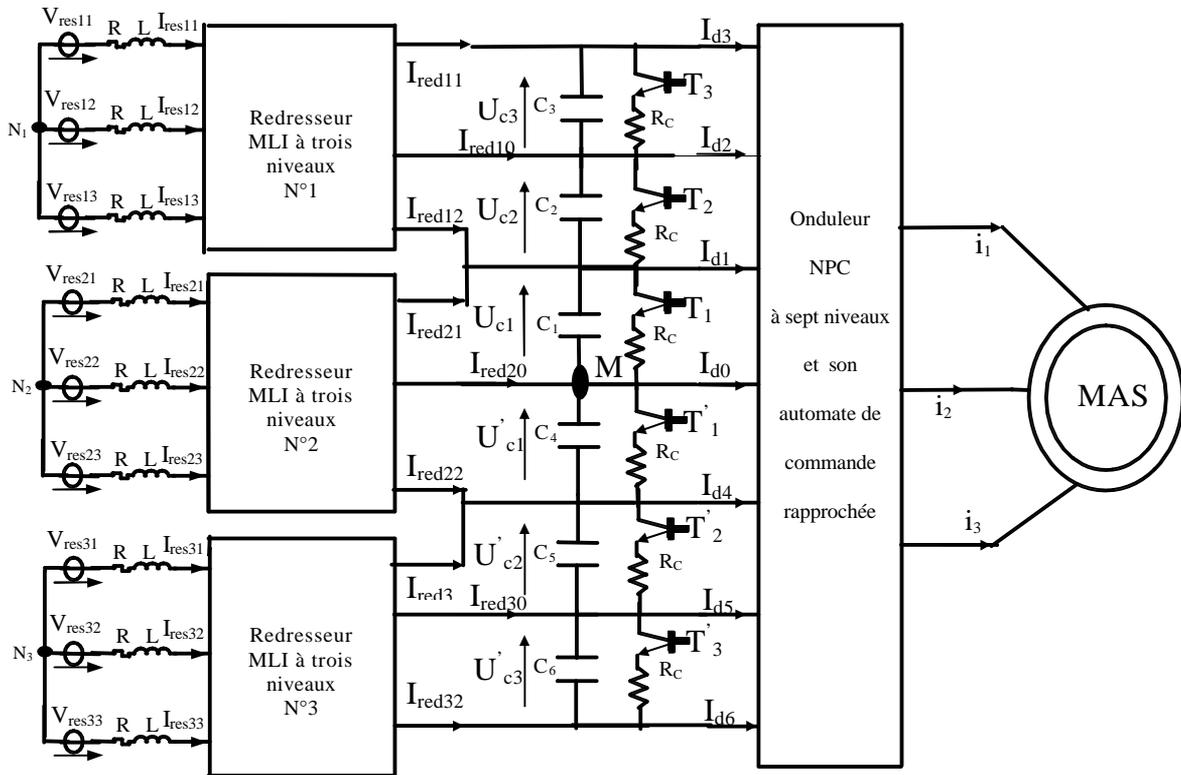


Fig.IV.13. cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

$$(V_{\text{res-eff}}=(220/3)V, R=0.25\Omega, L=10\text{ mH}, C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=10\text{mF}, R_C=25\Omega)$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{PC1,4} = U_{PC} = \begin{cases} 100V & \text{if } t < 1.7s \quad \text{et} \quad t > 2.4s \\ 90V & \text{if } t \in [1.7s, 2.4s] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6): $U_{PC2,3,5,6} = 100V = C^{te}$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0, 0.7], Cr=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

Les figures IV.14.* présentent les résultats de performance de la cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux alimentant une machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à trois niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.001A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$).

La figure IV.14.a présente les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux ($U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}, U'_{C1}, U'_{C2}, U'_{C3}$). Ces tensions suivent leurs références imposées par les différentes cellules du pont de clamping, et rejettent la perturbation du couple de charge (Cr). Mis à part les tensions : U_{C3}, U'_{C3} ; qui sont pratiquement constantes, toutes les tensions continues présentent un retard de la réponse générée particulièrement par la structure du pont de clamping qui impose une constante de temps importante ($\tau=R_C.C$)(Fig.IV.14.a). Ces régimes transitoires montrent la forte interaction entre la machine et son alimentation. A cet effet, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant le régime transitoire (Fig.IV.14.c). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.IV.14.c), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent bien leurs références sinusoïdaux I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.IV.14.d). La figure IV.14.e présente les courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux. La figure IV.14.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants ($I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}, I_{d4}, I_{d5}, I_{d6}$) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension est inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}, I_{d2} \approx -I_{d5}, I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées à la figure IV.14.g.

- Simulation numérique

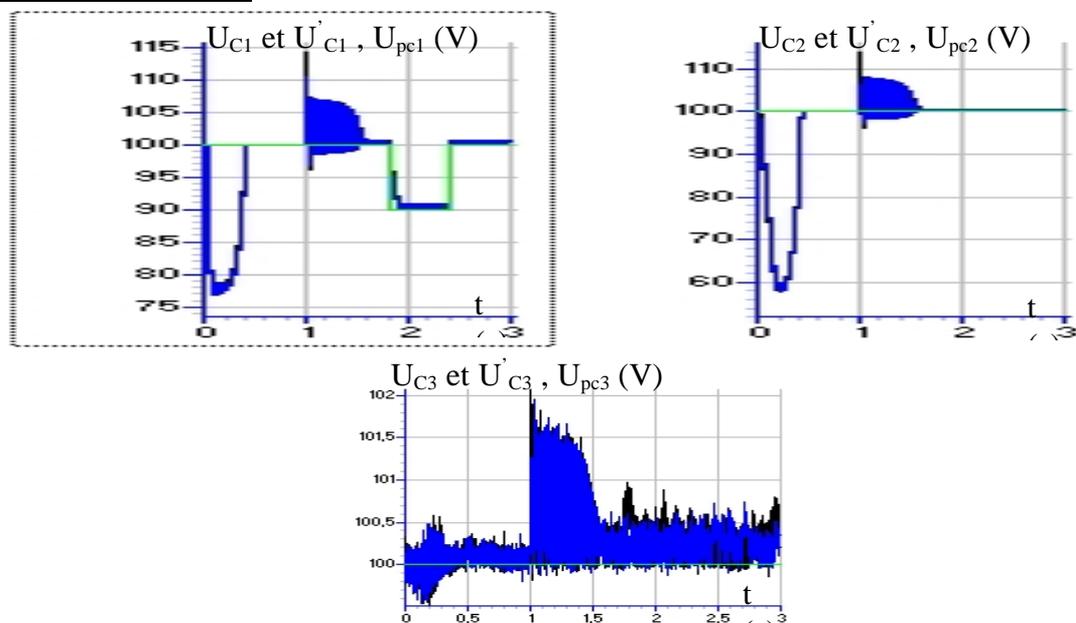


Fig.IV.14.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

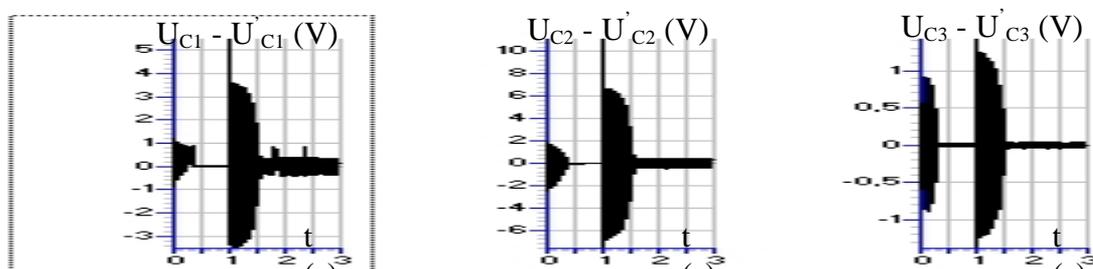


Fig.IV.14.b. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$ et $U_{C3} - U'_{C3}$

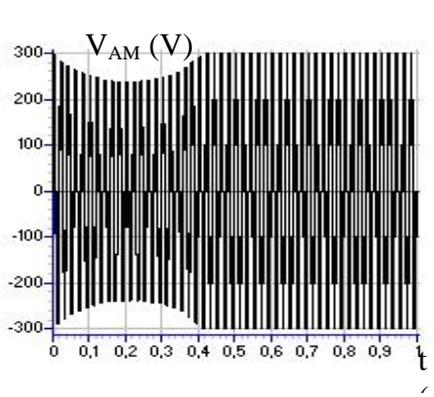


Fig.IV.14.c. Tension de sortie de l'onduleur

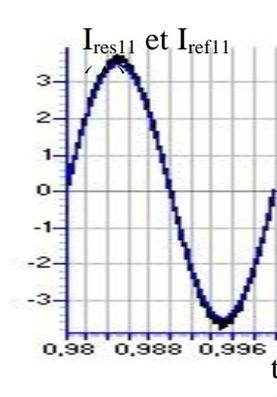
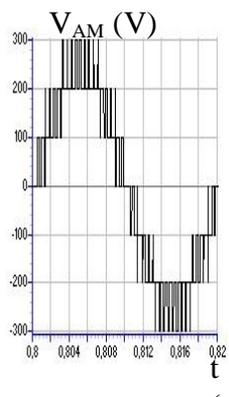
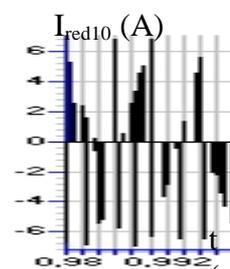
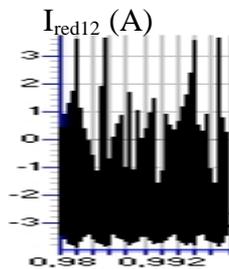
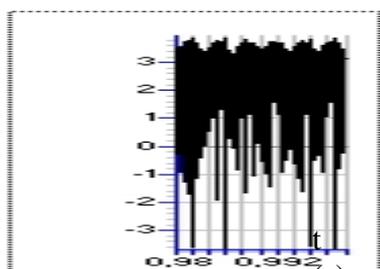


Fig.IV.14.d. Courant du réseau et sa référence

référence I_{red11} (A)



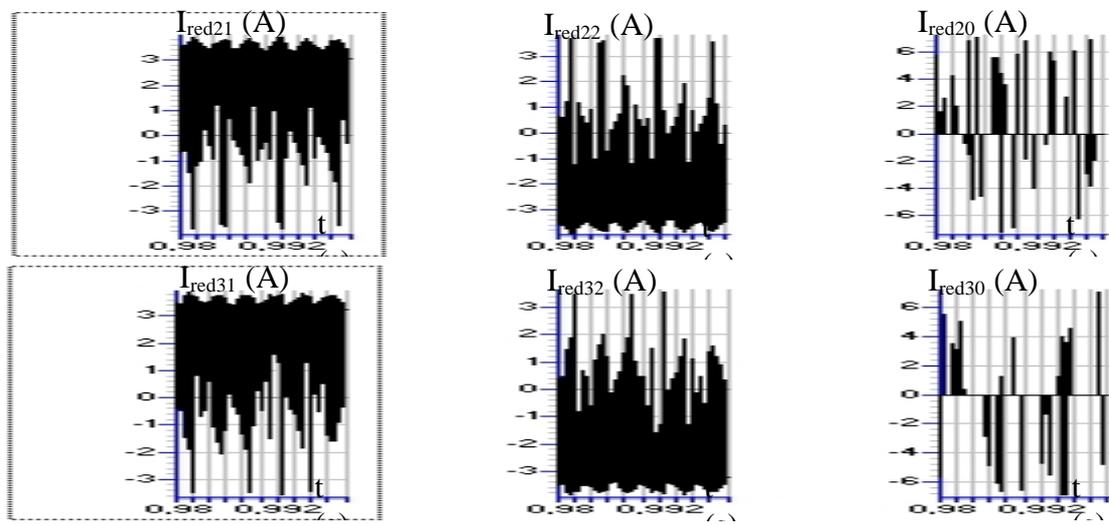


Fig.IV.14.e. Courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux

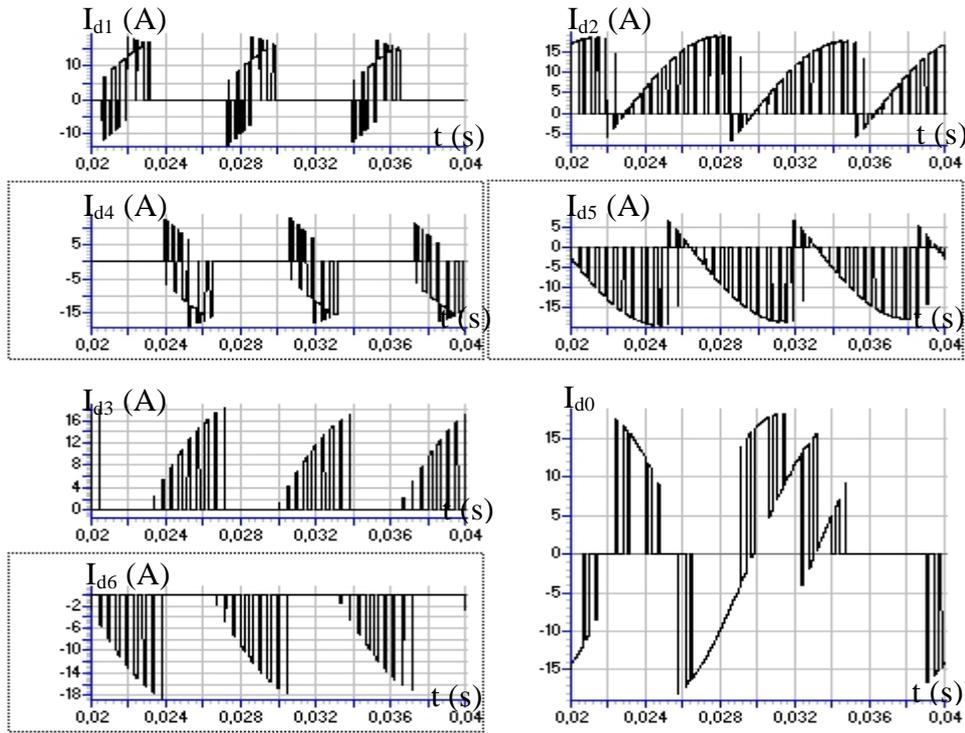


Fig.IV.14.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

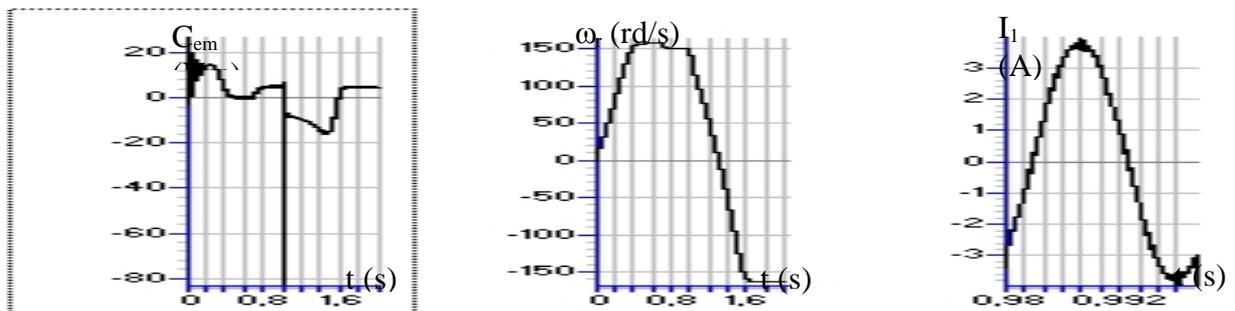


Fig.IV.14.g. Couple, vitesse et courant d'une phase absorbé par la machine asynchrone

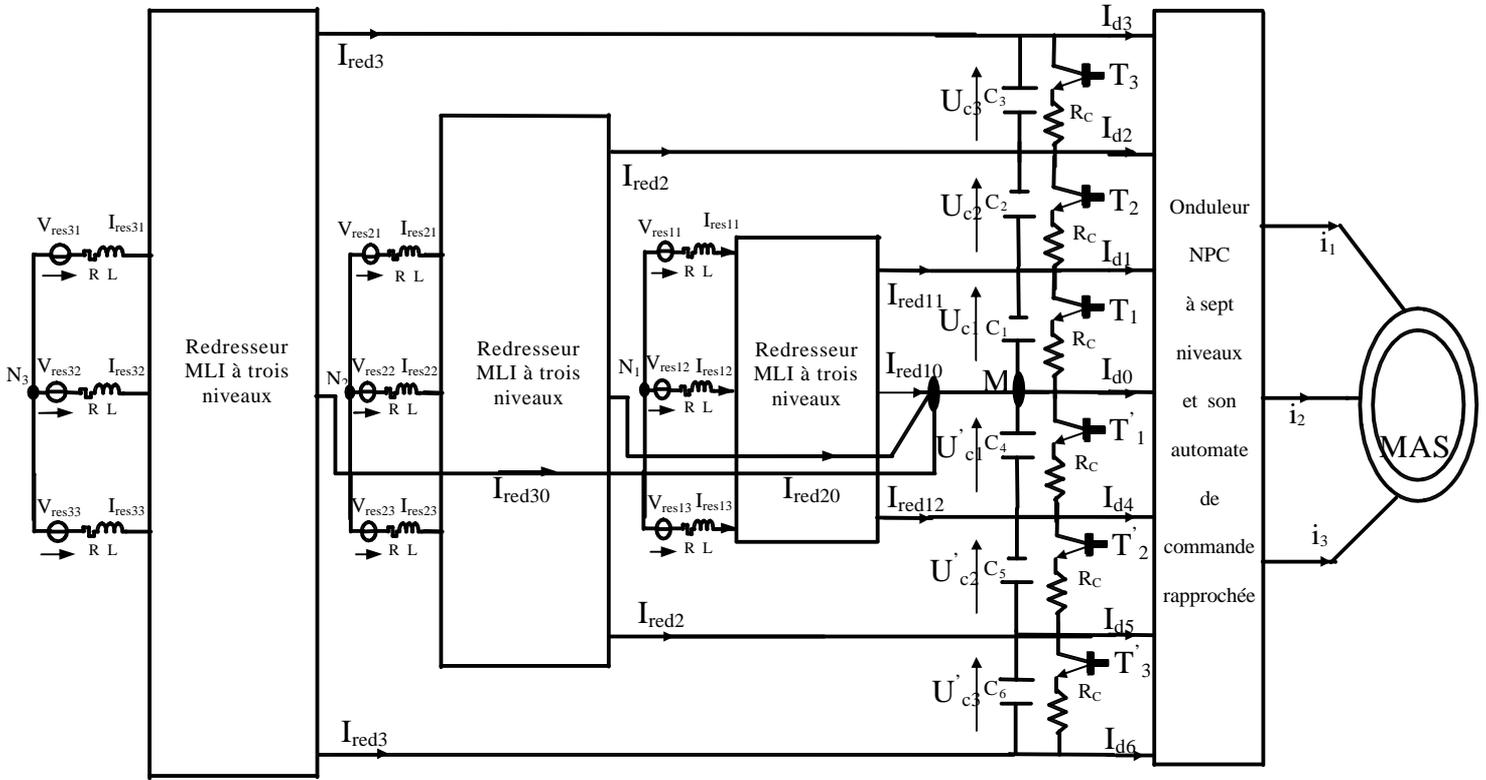


Fig.IV.15. cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS ($V_{res1-ef}=(220/3)V$, $V_{res2-ef}=(220*2/3)V$, $V_{res3-ef}=220V$, $R=0.25\Omega$, $L=10\text{ mH}$, $C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10\text{mF}$, $R_c=5\Omega$)

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{PC1,4} = U_{PC} = \begin{cases} 100V & \text{if } t < 1.6s \text{ et } t > 2.4s \\ 90V & \text{if } t \in [1.6s, 2.4s] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6): $U_{PC2,3,5,6} = 100V = C^{te}$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0, 0.7]; Cr=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

Les figures IV.16.* présentent les résultats de performance de la cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux alimentant une machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à trois niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$).

La figure IV.16.a présente les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux ($U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}, U'_{C1}, U'_{C2}, U'_{C3}$). Ces tensions continues suivent leurs références imposées par les différentes

cellules du pont de clamping, et rejettent la perturbation du couple de charge (C_r) (Fig.IV.16.a). Ainsi, on note l'absence des régimes transitoires sur le comportement des tensions continues (Fig.IV.16.a). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.IV.16.c), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent bien leurs références sinusoïdaux I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.IV.16.d). La figure IV.16.e présente les courants de sortie des trois redresseurs MLI à trois niveaux. La figure IV.16.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension est inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}$, $I_{d2} \approx -I_{d5}$, $I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées aux figures IV.16.g,h.

• **Simulation numérique**

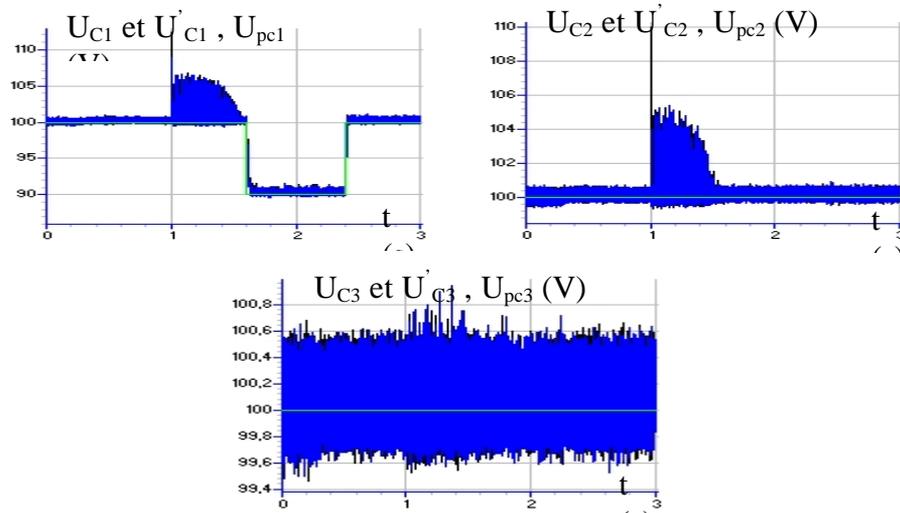


Fig.IV.16.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

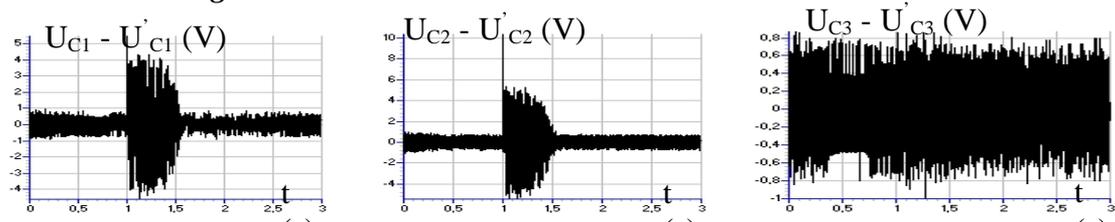


Fig.IV.16.b. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$ et $U_{C3} - U'_{C3}$

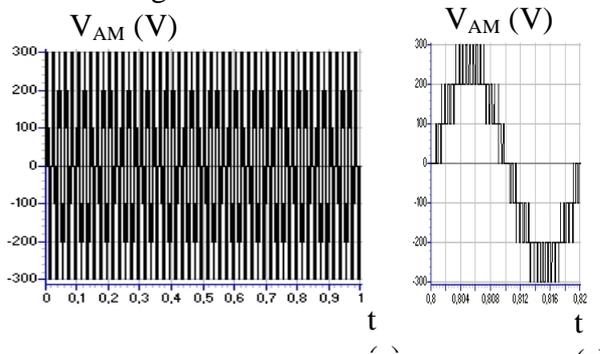


Fig.IV.16.c. Tension de sortie de l'onduleur

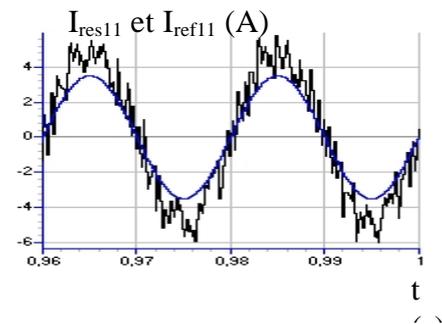


Fig.IV.16.d. Courant du réseau et sa référence

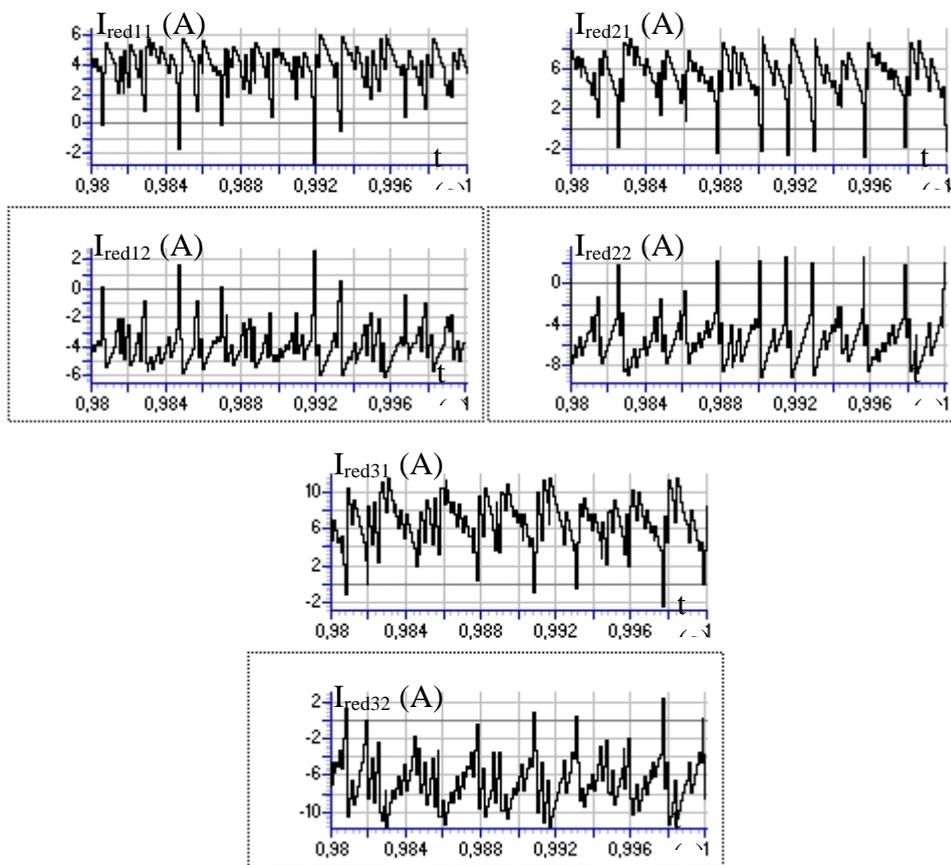


Fig.IV.16.e. Courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux

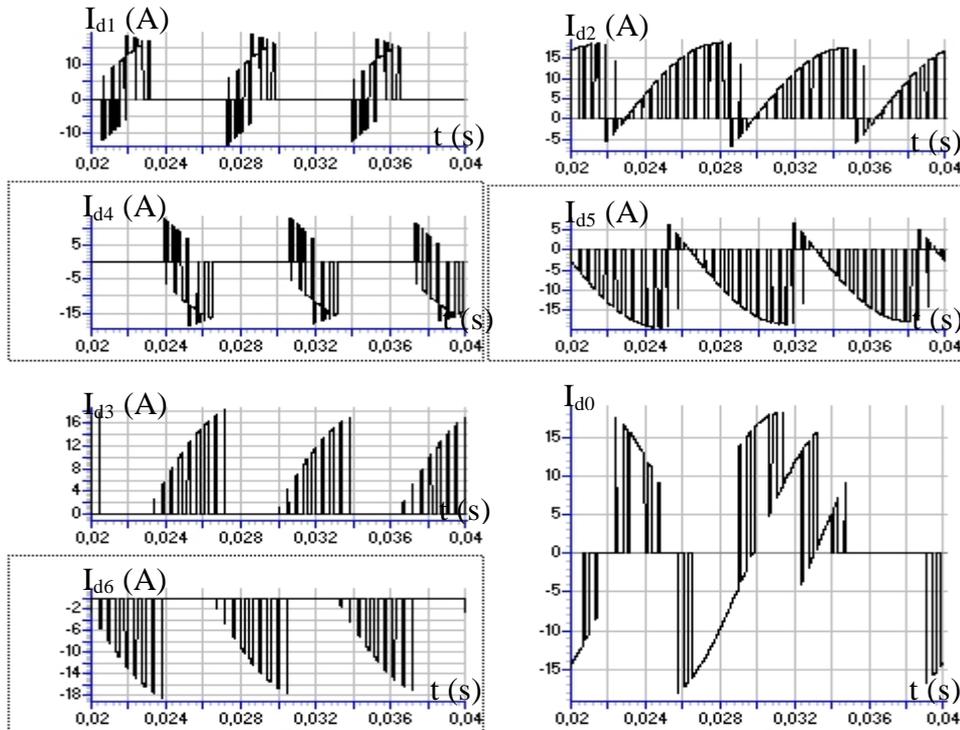


Fig.IV.16.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

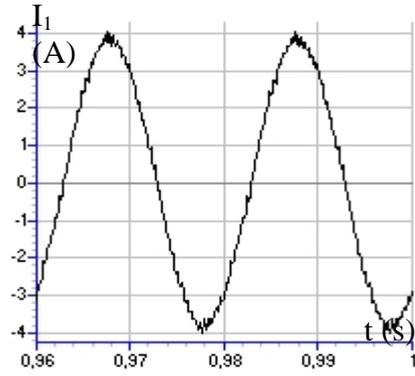
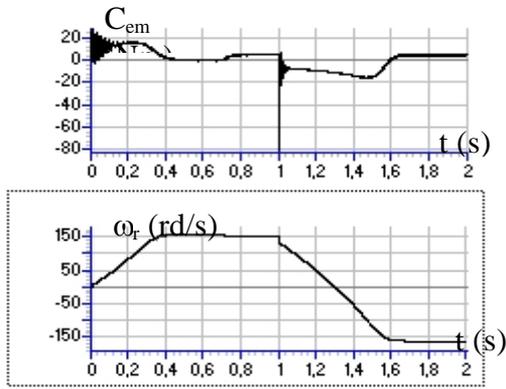


Fig.IV.16.g. Couple et vitesse de la machine asynchrone Fig.IV.16.h. Courant absorbé par la MAS

IV. Cascade redresseur de courant à MLI triphasé à sept niveaux - pont de clamping - onduleur triphasé à sept niveaux

IV.1. Cascade un redresseur MLI à sept niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

La structure de la cascade est donnée par la figure IV.17.

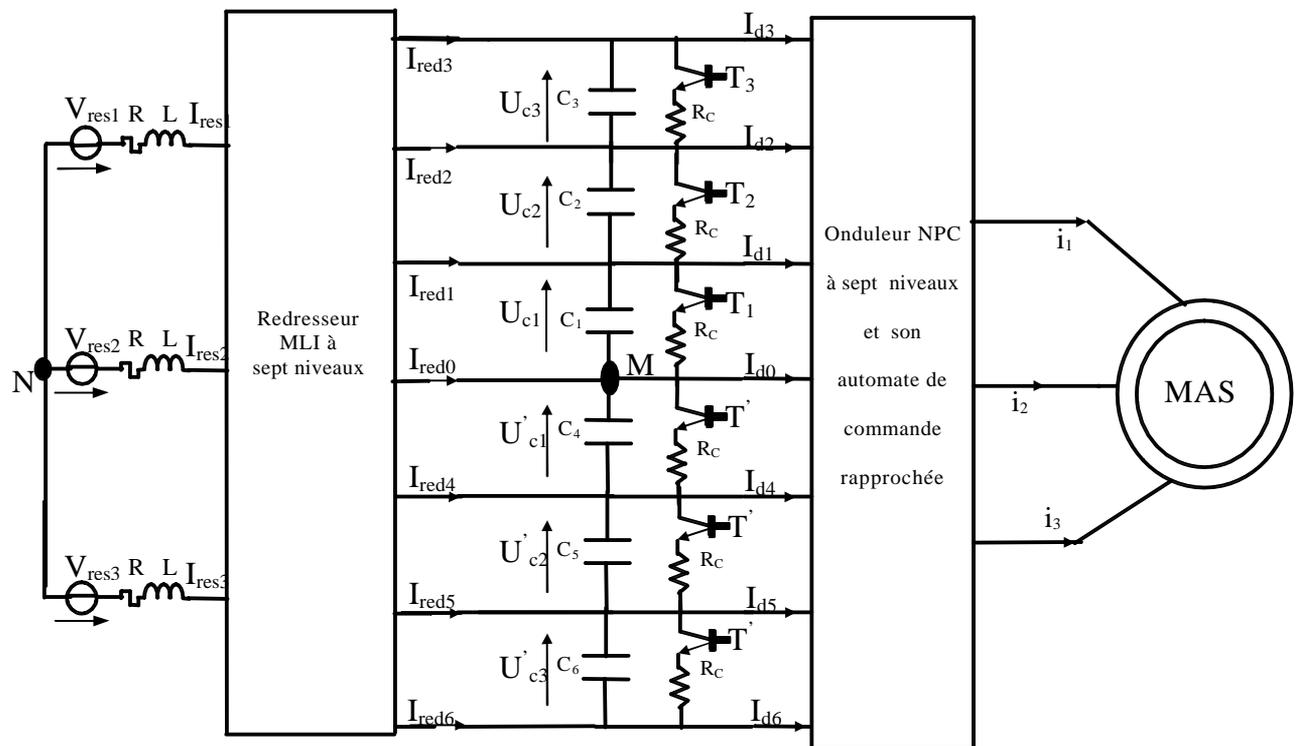


Fig.IV.17. cascade redresseur MLI à sept niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

($V_{res-eff}=220V$, $R=0.25\Omega$, $L=10\text{ mH}$, $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=10\text{mF}$, $R_C=25\Omega$)

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{PC1,4} = U_{PC} = \begin{cases} 100V & \text{if } t < 1.7s \quad \text{et} \quad t > 2.4s \\ 90V & \text{if } t \in [1.7s, 2.4s] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6): $U_{PC2,3,5,6} = 100V = C^{te}$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0, 0.7], Cr=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

Les figures IV.18.* présentent les résultats de performance de la cascade un redresseur MLI à sept niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux alimentant une machine asynchrone triphasée. Le redresseur MLI à sept niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.01A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$).

La figure IV.18.a présente les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux ($U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}, U'_{C1}, U'_{C2}, U'_{C3}$). Ces tensions suivent leurs références imposées par les différentes cellules du pont de clamping, et rejettent la perturbation du couple de charge (Cr). Mis à part les tensions : U_{C3} et U'_{C3} ; qui sont pratiquement constantes, toutes les tensions continues présentent un retard de la réponse généré par la structure du pont de clamping qui impose une constante de temps importante ($\tau=R_C.C$)(Fig.IV.18.a). Ces régimes transitoires montrent la forte interaction entre la machine et son alimentation. A cet effet, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant le régime transitoire (Fig.IV.18.c). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.IV.18.c), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent bien leurs références sinusoïdaux I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.IV.18.d). La figure IV.18.e présente les courants de sortie du redresseur MLI à sept niveaux ($I_{red1}, I_{red2}, I_{red3}, I_{red4}, I_{red5}, I_{red6}, I_{red0}$). Ces courants sont inversement égaux par pair à savoir ($I_{red1} \approx -I_{red4}, I_{red2} \approx -I_{red5}, I_{red3} \approx -I_{red6}$), et la valeur moyenne du courant I_{red0} est pratiquement nulle. La figure IV.18.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants ($I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}, I_{d4}, I_{d5}, I_{d6}$) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension de sortie de l'onduleur, et sont inversement égaux par pair ($I_{d1} \approx -I_{d4}, I_{d2} \approx -I_{d5}, I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées à la figure IV.18.g.

• Simulation numérique

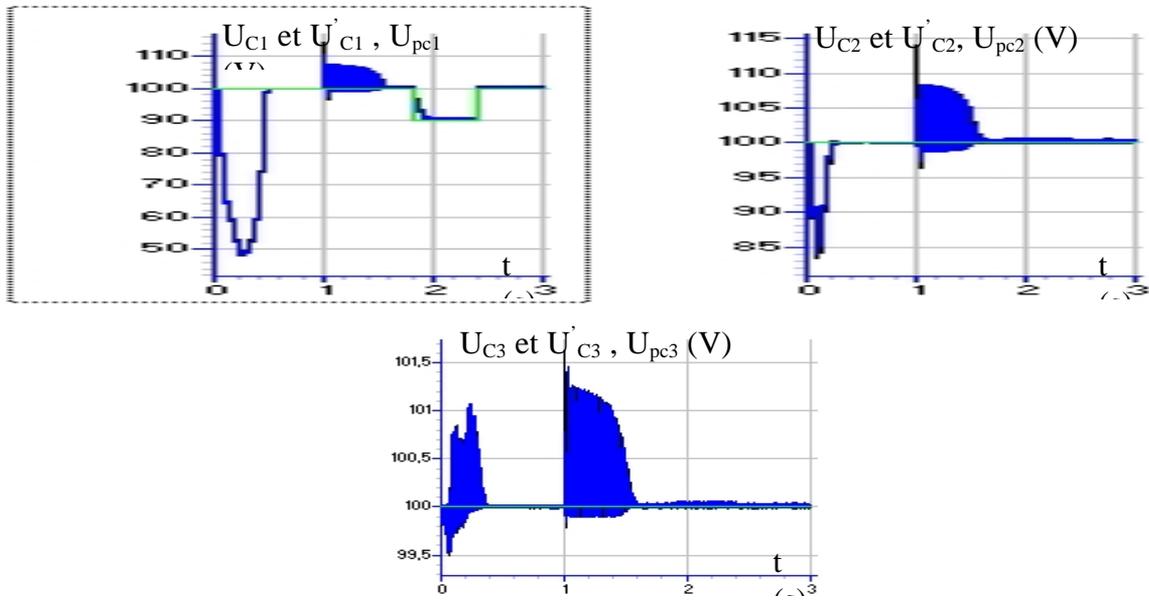


Fig.IV.18.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

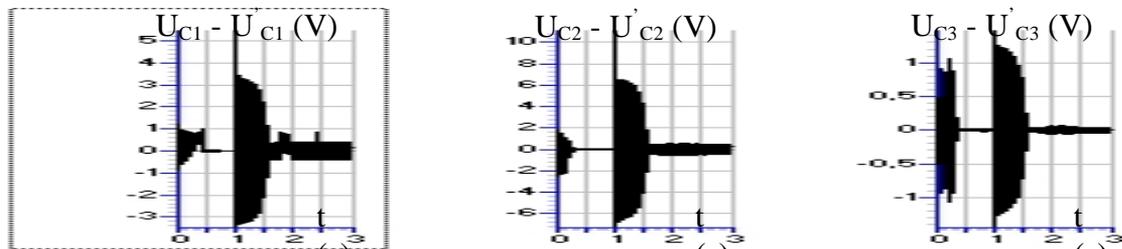


Fig.IV.18.b. Différences de tension $U_{C1} - U'_{C1}$, $U_{C2} - U'_{C2}$ et $U_{C3} - U'_{C3}$

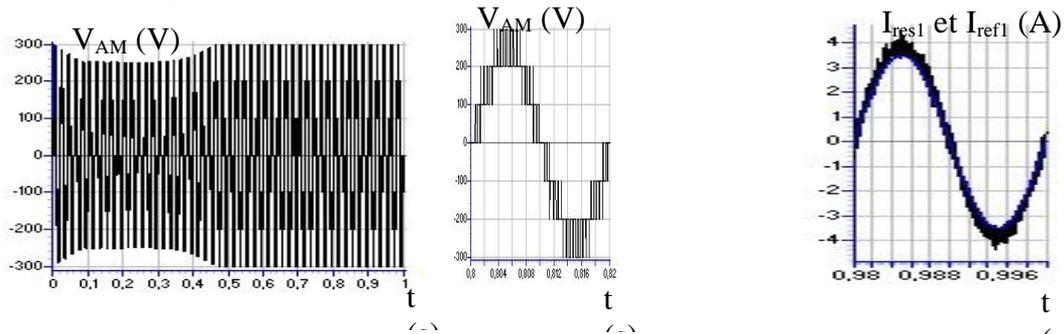
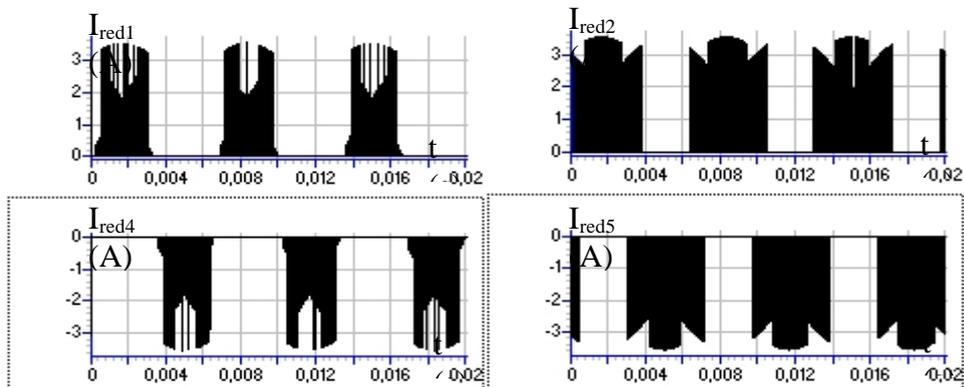


Fig.IV.18.c. Tension de sortie de l'onduleur

Fig.IV.18.d. Courant du réseau et sa référence



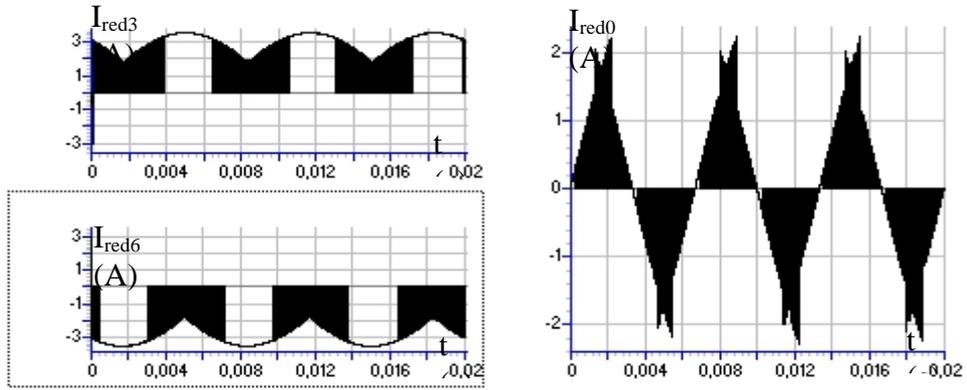


Fig.IV.18.e. Courants de sortie du redresseur à sept niveaux

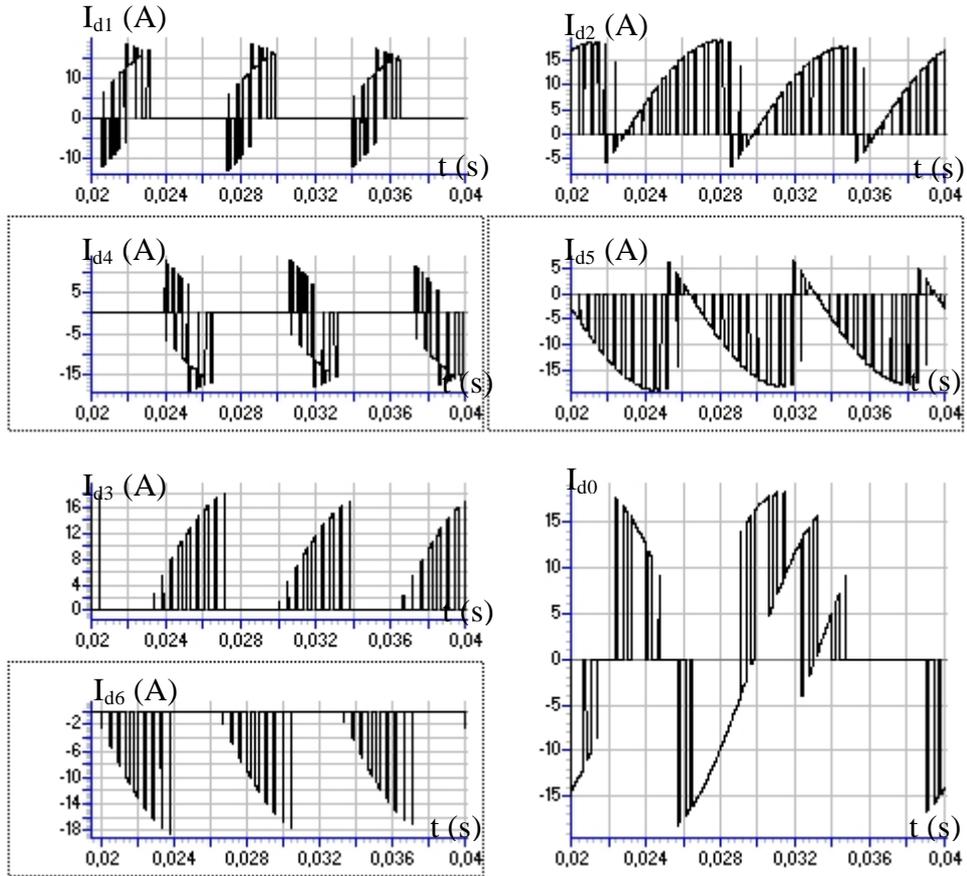


Fig.IV.18.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

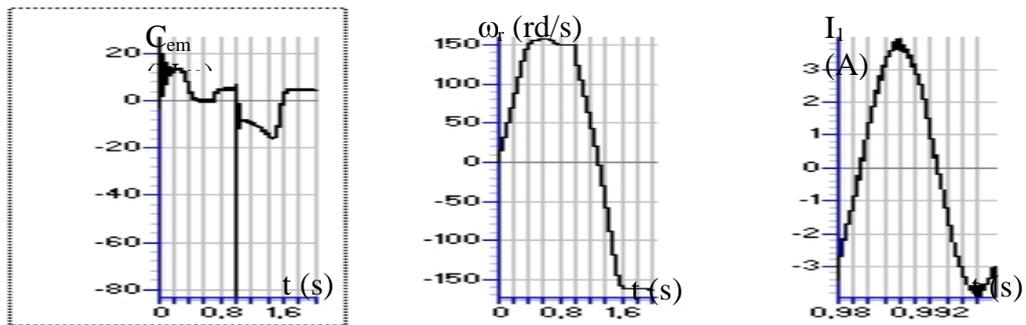


Fig.IV.18.g. Couple, vitesse et courant d'une phase absorbé par la machine asynchrone

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné en boucle ouverte le comportement de toutes les structures de cascade constituées de redresseurs à MLI (à deux, trois et à sept niveaux), le pont de clamping et l'onduleur à sept niveaux. Ces cascades sont appliquées à la conduite de la machine asynchrone triphasée. A travers cette étude, nous avons montré la possibilité d'avoir des tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux stables, et égales pour l'ensemble des cascades étudiées avec des capacités réduites (10mF). Ainsi, on note :

1- Pour le cas des cascades à un seul redresseur MLI et à structure série des redresseurs à deux où trois niveaux, on note :

- Les tensions continues (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) suivent leurs références après des régimes transitoires dû à la forte interaction de la machine asynchrone avec son alimentation.
- La structure du pont de clamping génère un retard au niveau de la réponse des tensions continues ($\tau=R_C.C$), et qui présente une constante de temps supplémentaire de l'ensemble : onduleur - machine.
- Tension de sortie de l'onduleur stable et sinusoïdale après les régimes transitoires.
- Le rejet parfait de la perturbation du couple de charge (C_r).
- Les courants du réseau sont sinusoïdaux, avec un facteur de puissance proche de l'unité.

2- Pour le cas des structures de cascade à redresseurs MLI (à deux où trois niveaux) mis en parallèle (imbriqué), on note :

■ Pour une résistance du pont de clamping; $R_C=25\Omega$ [**Annexe II**]:

- La non commandabilité de l'onduleur à sept niveaux; suite à l'augmentation infinie des tensions continues.

■ Pour une résistance faible; $R_C=5\Omega$:

- Les tensions continues sont stables et égales aux tensions imposées par les différentes cellules du pont de clamping.
- Tension de sortie de l'onduleur stable et sinusoïdale.
- Les courants du réseau sont sinusoïdaux, avec un facteur de puissance proche de l'unité.
- Pertes joules supplémentaire importantes ($P_j > 1kW$).

Asservissement et équilibrage des sources de tension continue de l'onduleur NPC à sept niveaux

Introduction

Les onduleurs multiniveaux constituent l'élément principal des changeurs de fréquence destinés pour les applications industrielles de haute tension et/ou forte puissance. Ces changeurs de fréquence nécessitent une alimentation de l'onduleur à travers des convertisseurs AC/DC tels que les redresseurs de courant à MLI. Notre étude menée sur le comportement de l'alimentation de l'onduleur à sept niveaux par les différents redresseurs MLI (à deux ou multiniveaux) a montré le problème d'instabilité des tensions continues [Gheraia 99.4]. Ainsi, l'application des algorithmes d'asservissement élaborés montre leur efficacité uniquement pour certaines structures de cascade, et pour des condensateurs de capacité importante. L'introduction du pont de clamping dans les différentes structures de cascade proposées en boucle ouverte [Gheraia 2002.2], a montré la possibilité d'avoir la stabilité et l'égalité de partage des tensions continues pour l'ensemble des cascades avec des condensateurs de capacité réduite ($C_{i=1,6}=10\text{mF}$). Néanmoins, la réponse des tensions capacitives présente une constante de temps supplémentaire propre à la structure du pont de clamping, ce qui pose une nouvelle contrainte dans le processus de stabilisation des sources de tension continue de l'onduleur à sept niveaux. Afin d'élargir le champ de stabilité avec l'égalité de partage des tensions continues sur tous les niveaux de l'onduleur multiniveaux, en utilisant des condensateurs de capacité réduite, nous proposons l'application des algorithmes d'asservissement des redresseurs MLI élaborés avec l'équilibrage des tensions continues par le pont de clamping. A cet effet, nous avons examiné dans ce chapitre le comportement de l'ensemble des structures de cascade proposées au chapitre II, en introduisant le pont de clamping avec l'application de l'asservissement des redresseurs MLI (à deux, trois et à sept niveaux).

I. Cascades redresseurs de courant à MLI triphasés à deux niveaux - pont de clamping - onduleur triphasé à sept niveaux

On étudiera dans cette partie en boucle fermée; toutes les cascades constituées d'un redresseur de courant triphasé à deux niveaux, le pont de clamping et l'onduleur triphasé à sept niveaux. Ces cascades sont appliquées à la conduite de la machine asynchrone triphasée.

La structure de cette cascade est présentée dans la figure V.1.

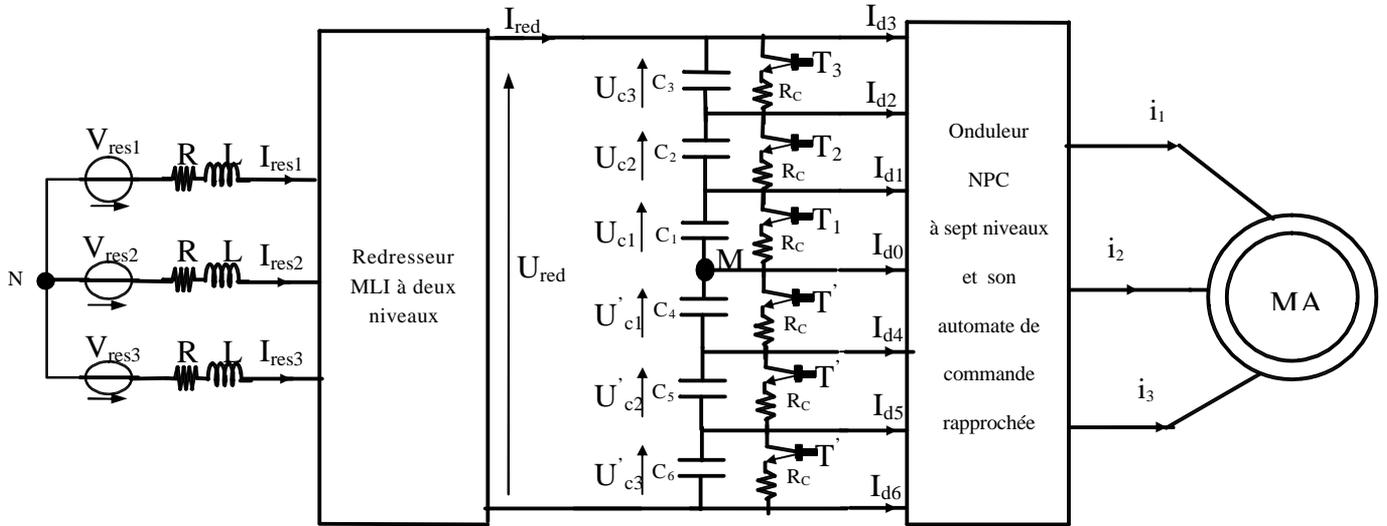


Fig.V.1. cascade un redresseur MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

$$(V_{\text{res-eff}}=220\text{V}, R=0.25\Omega, L=10 \text{ mH}, C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10\text{mF}, R_c=25\Omega)$$

La tension de référence de la boucle d'asservissement du redresseur MLI à deux niveaux est définie par :

$$U_{\text{ref}} = \begin{cases} 600\text{V} & \text{if } t < 1.6\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 560\text{V} & \text{if } t \in [1.6\text{s}, 2.4\text{s}] \end{cases}$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{\text{PC1,4}} = U_{\text{PC}} = \begin{cases} 100\text{V} & \text{if } t < 1.6\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 90 \text{ V} & \text{if } t \in [1.6\text{s}, 2.4\text{s}] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6): $U_{\text{PC2,3,5,6}} = 100\text{V} = C^{\text{te}}$

Le couple de charge est défini par $Cr \{ Cr=0 \text{ si } t(\text{s}) \in [0, 0.7]; Cr=5\text{Nm} \text{ si } t(\text{s}) > 0.7 \}$.

Les figures V.2.* présentent les résultats de performance de la cascade un redresseur MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux ; en boucle fermée de la tension de sortie du redresseur MLI. Cette cascade est appliquée à la conduite de la machine asynchrone triphasée. Le redresseur MLI à deux niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05\text{A}$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$).

La figure V.2.a présente la tension de sortie du redresseur MLI à deux niveaux (U_{red}). Cette tension suit sa référence imposée par la boucle d'asservissement, et rejette la perturbation du couple de charge. Néanmoins, cette tension présente des pics importants pendant le régime d'inversion du sens de

rotation de la MAS, et le changement de référence de la commande. Les tensions continues (U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C2} , U'_{C3}) deviennent stables et égales après un régime transitoire qui se manifeste par des pics de tension importants, et un retard généré par la structure du pont de clamping ($\tau=R_C \cdot C$) (Fig. V.2.b). Ces régimes transitoires montrent la forte interaction entre la machine asynchrone et son alimentation en cascade : redresseur MLI - pont de clamping - onduleur. A cet effet, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant le régime transitoire (Fig.V.2.c). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.V.2.c), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent leurs références I_{refk} (Fig.V.2.d). La figure V.2.e présente le courant de sortie du redresseur MLI à deux niveaux I_{red} . La figure V.2.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}$, $I_{d2} \approx -I_{d5}$, $I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées aux figures V.2.g,h,i .

- Simulation numérique

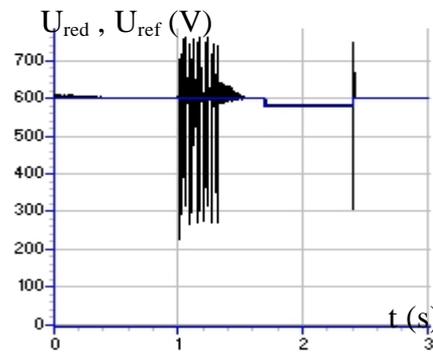
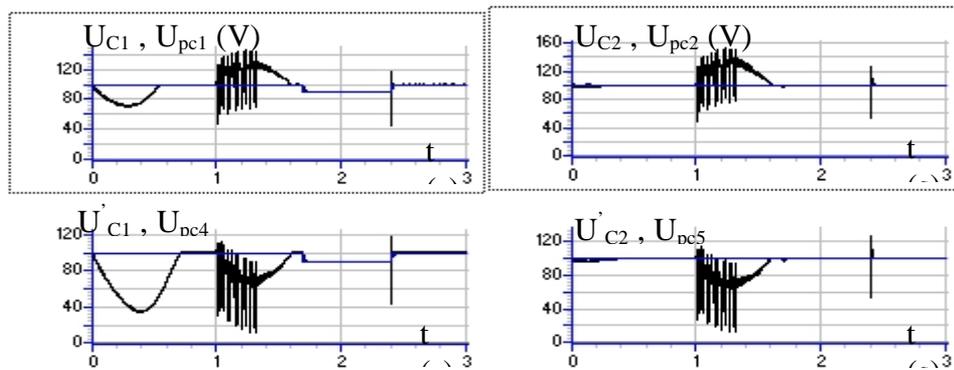


Fig.V.2.a. Tension de sortie du redresseur MLI



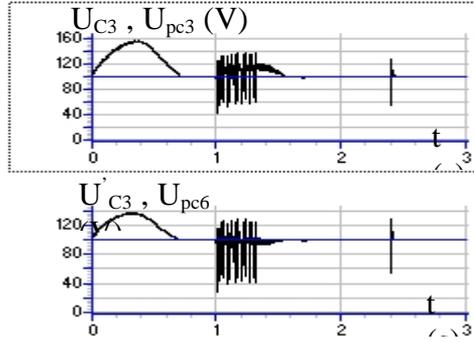


Fig.V.2.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

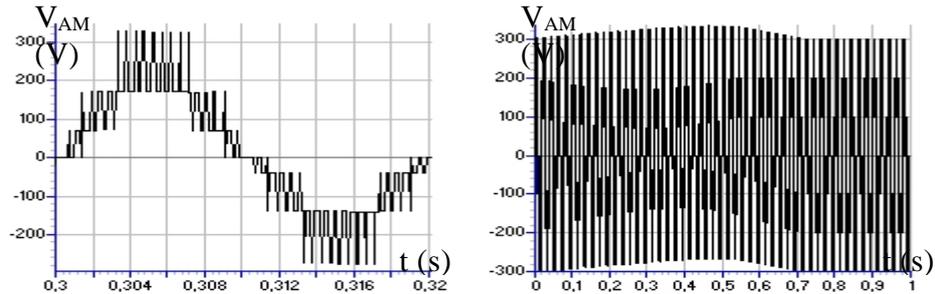


Fig.V.2.c. Tension de sortie de l'onduleur

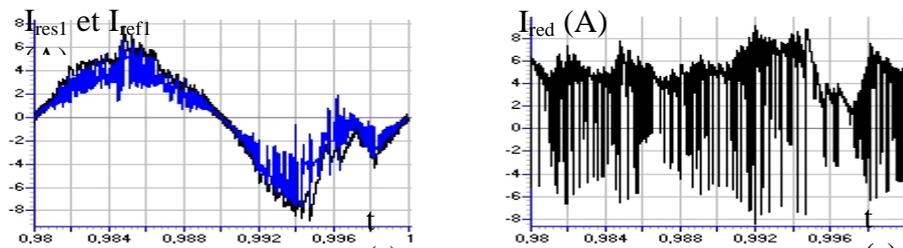


Fig.V.2.d. Courant du réseau et sa référence

Fig.V.2.e. Courant de sortie du redresseur MLI

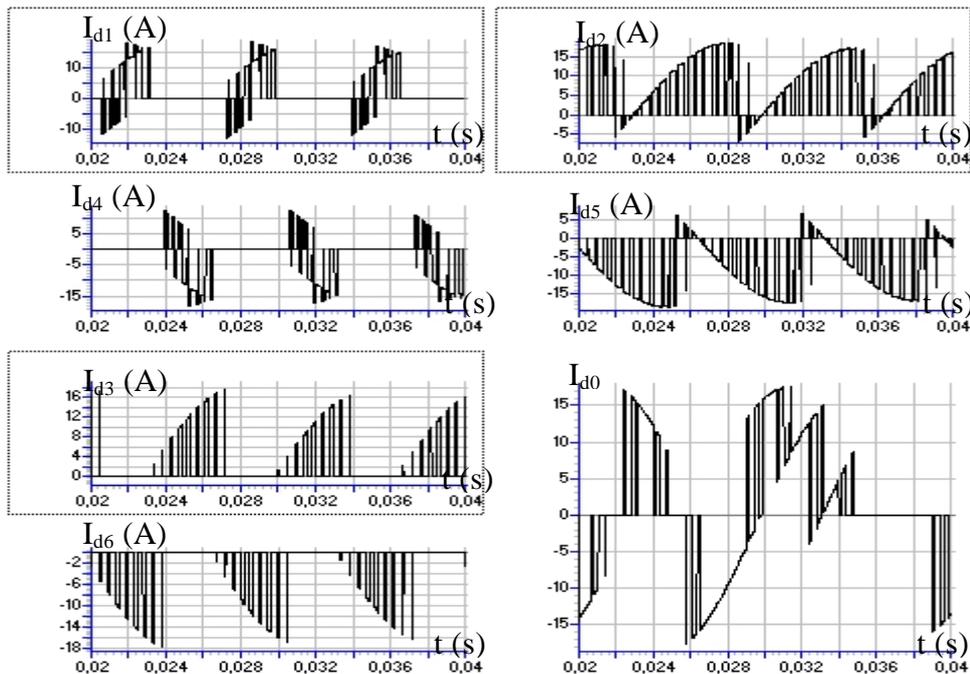


Fig.V.2.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

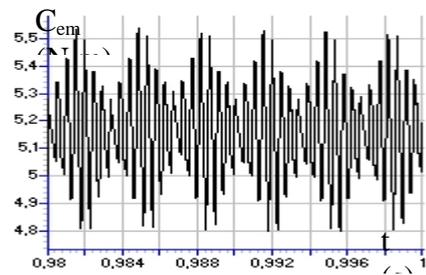
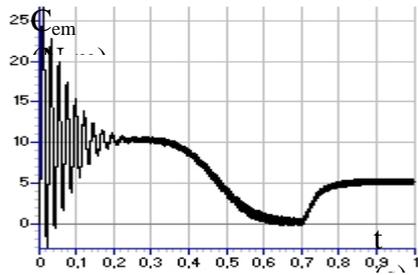


Fig.V.2.g. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

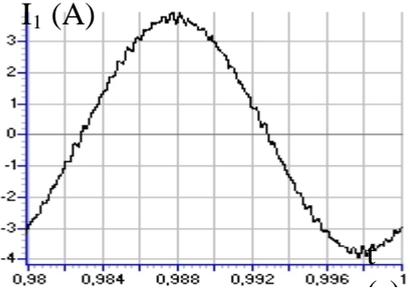


Fig.V.2.h. Vitesse de la machine asynchrone

Fig.V.2.i. Courant d'une phase de la MAS

I.2. Cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

La structure de cette cascade est présentée dans la figure V.3.

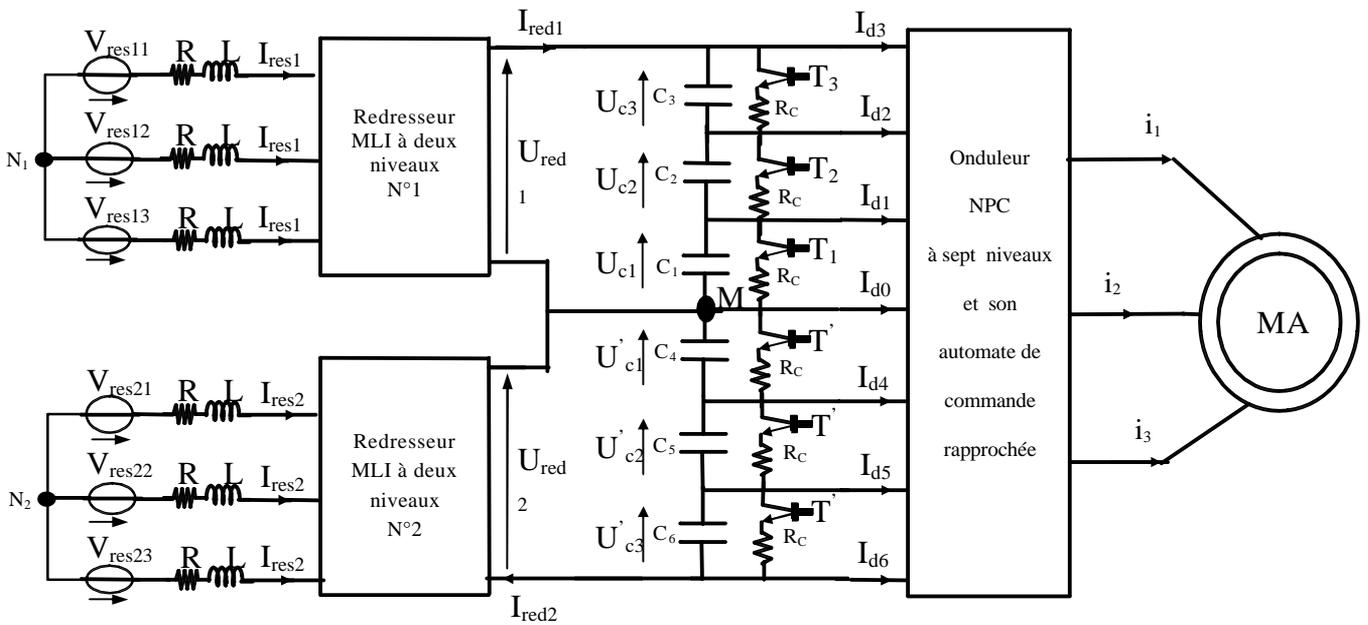


Fig.V.3. cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

$$(V_{res-eff}=110V, R=0.25\Omega, L=10\text{ mH}, C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10mF, R_c =25\Omega)$$

Les tensions de référence des deux boucles d'asservissement des redresseurs MLI à deux niveaux sont définies par :

$$U_{\text{ref}1,2} = \begin{cases} 300\text{V} & \text{if } t < 1.7\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 290\text{V} & \text{if } t \in [1.7\text{s}, 2.4\text{s}] \end{cases}$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{\text{PC}1,4} = U_{\text{PC}} = \begin{cases} 100\text{V} & \text{if } t < 1.7\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 90\text{V} & \text{if } t \in [1.7\text{s}, 2.4\text{s}] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6):

$$U_{\text{PC}2,3,5,6} = 100\text{V} = C^{\text{te}}$$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0, 0.7]; Cr=5\text{Nm} \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

Les figures V.4.* présentent les résultats de performance de la cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux ; en boucle fermée de la tension de sortie de chaque redresseur MLI. Cette cascade est appliquée à la conduite de la machine asynchrone triphasée. Les deux redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.05\text{A}$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$).

La figure V.4.a présente les tensions de sortie des redresseurs MLI à deux niveaux ($U_{\text{red}1}, U_{\text{red}2}$). Ces tensions suivent leurs références imposées par les boucles d'asservissement, et rejettent la perturbation du couple de charge. Néanmoins, ces deux tensions présentent des pics importants pendant les régimes transitoires (démarrage et inversion du sens de rotation de la MAS, changement des consignes de commande des boucles de régulation). Les tensions continues ($U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}, U'_{C1}, U'_{C2}, U'_{C3}$) deviennent stables et égales après un régime transitoire qui se manifeste par des pics de tension importants, et un retard généré par la structure du pont de clamping ($\tau=R_C.C$) (Fig. V.4.b). Ces régimes transitoires montrent la forte interaction entre la machine asynchrone et son alimentation en cascade : redresseurs MLI - pont de clamping - onduleur. A cet effet, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant le régime transitoire (Fig.V.4.c). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.V.4.c), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants $I_{\text{res}k}$ du réseau triphasé suivent leurs références $I_{\text{ref}k}$ (Fig.V.4.d). La figure V.4.e présente les courants de sortie des redresseurs MLI à deux niveaux ($I_{\text{red}1}, I_{\text{red}2}$). La figure V.4.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants ($I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}, I_{d4}, I_{d5}, I_{d6}$) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}, I_{d2} \approx -I_{d5}, I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées aux figures V.4.g,h,i.

- Simulation numérique

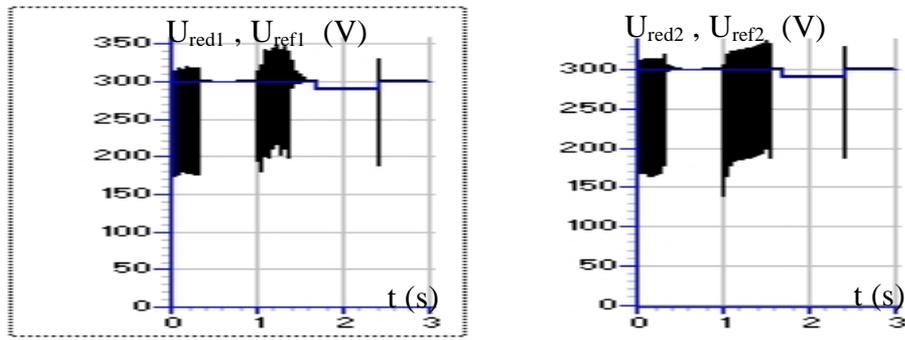


Fig.V.4.a. Tensions de sortie des redresseurs MLI

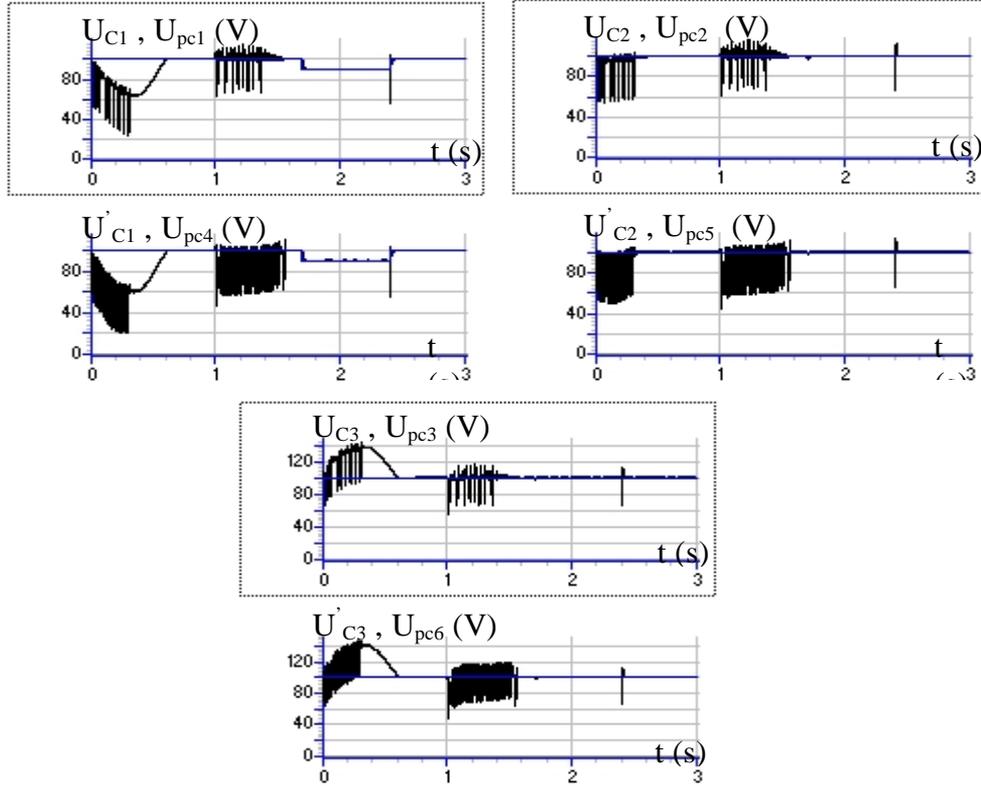


Fig.V.4.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

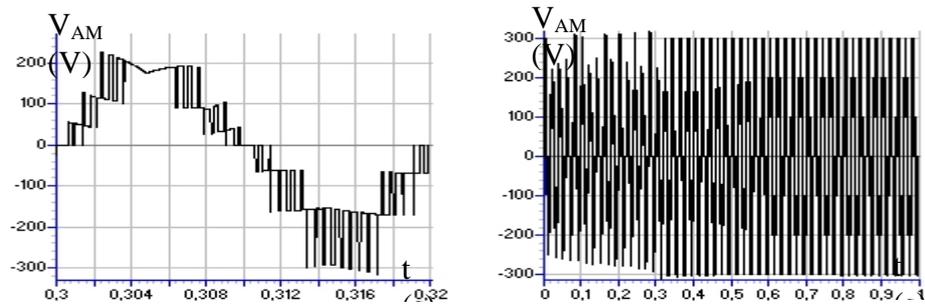


Fig.V.4.c. Tension de sortie de l'onduleur

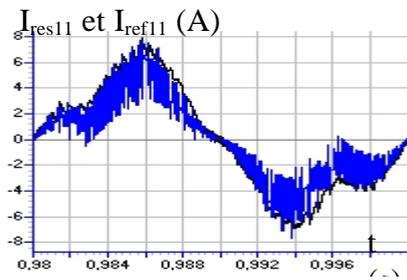


Fig.V.4.d.Courant du réseau et sa référence

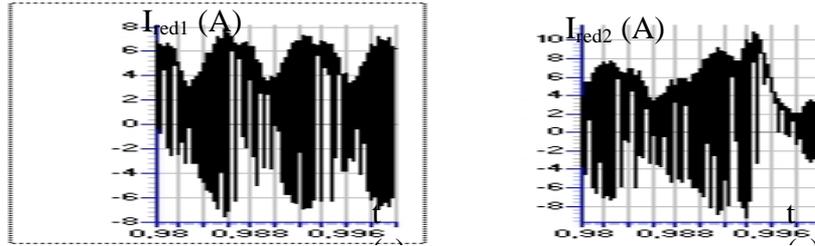


Fig.V.4.e. Courants de sortie des redresseurs MLI

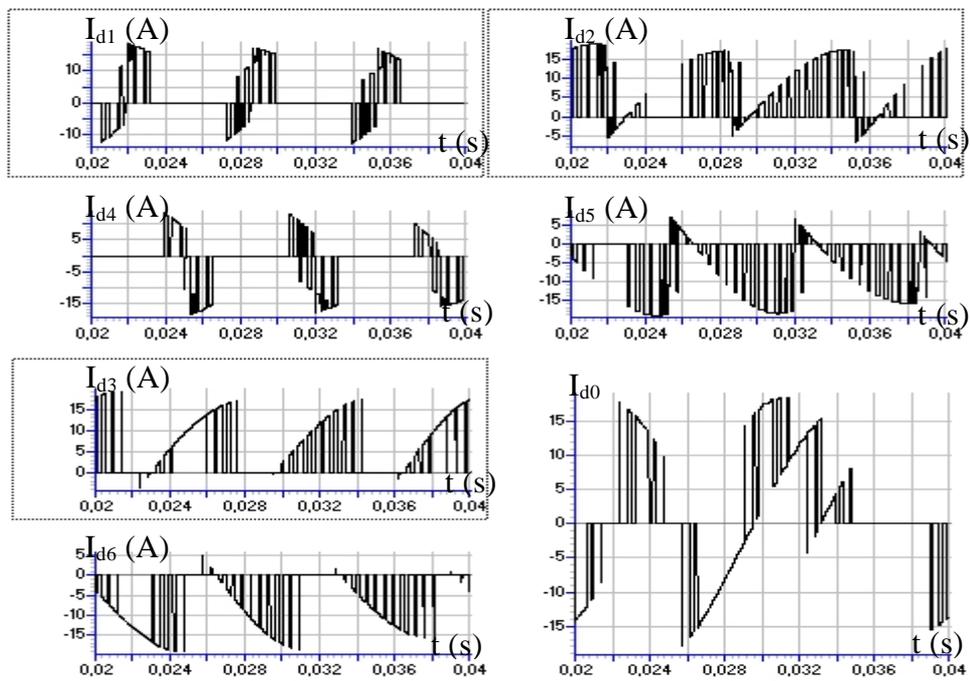


Fig.V.4.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

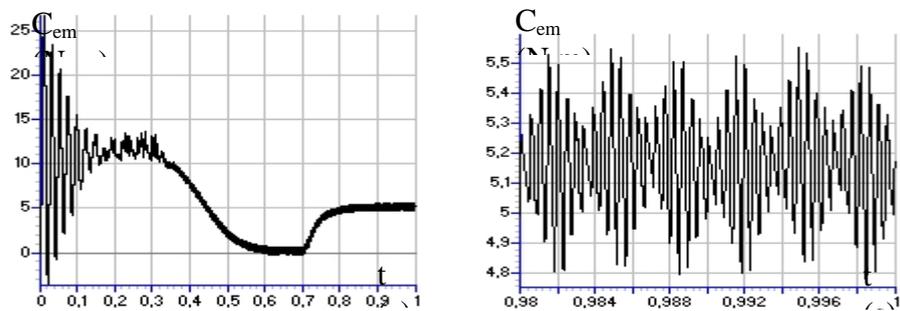


Fig.V.4.g. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

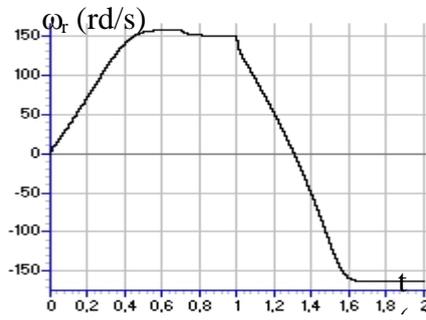


Fig.V.4.h. Vitesse de la machine asynchrone

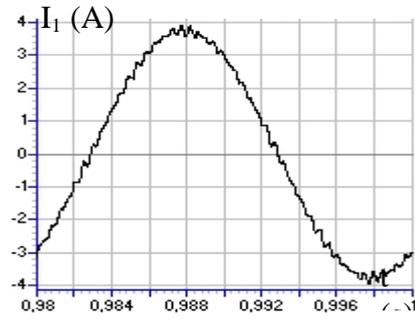


Fig.V.4.i. Courant d'une phase de la MAS

I.3. Cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

I.3.1. Structure série : Cette cascade est présentée dans la figure V.5.

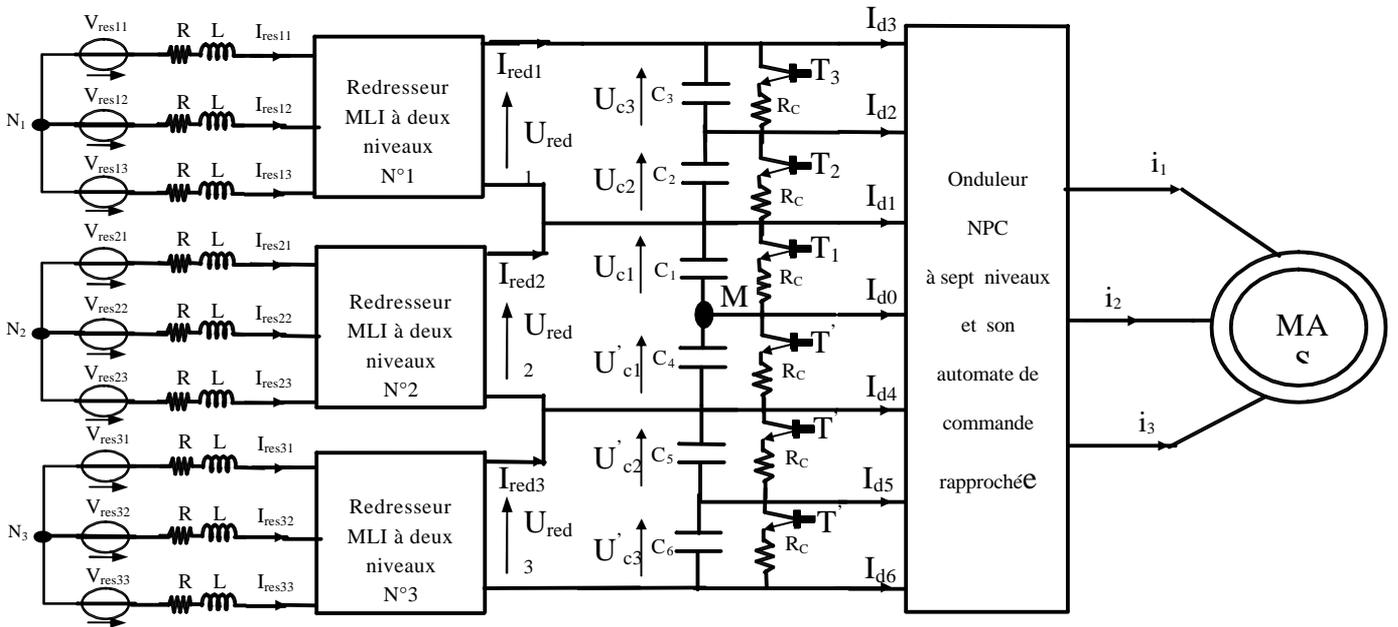


Fig.V.5. cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS ($V_{res-eff}=(220/3)V$, $R=0.25\Omega$, $L=10\text{ mH}$, $C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10\text{mF}$, $R_c =25\Omega$)

Les tensions de référence des boucles d'asservissement des redresseurs MLI à deux niveaux sont définies par :

$$U_{ref1,3} = 200\text{ V}$$

$$U_{ref2} = \begin{cases} 200\text{V} & \text{if } t < 1.7\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 180\text{V} & \text{if } t \in [1.7\text{s} , 2.4\text{s}] \end{cases}$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{PC1,4} = U_{PC} = \begin{cases} 100V & \text{if } t < 1.7s \quad \text{et} \quad t > 2.4s \\ 90V & \text{if } t \in [1.7s, 2.4s] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6):

$$U_{PC2,3,5,6} = 100V = C^{te}$$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0, 0.7]; Cr=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

Les figures V.6.* présentent les résultats de performance de la cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux ; en boucle fermée de la tension de sortie de chaque redresseur MLI. Cette cascade est appliquée à la conduite de la machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.05A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$).

La figure V.6.a présente les tensions de sortie des redresseurs MLI à deux niveaux ($U_{red1}, U_{red2}, U_{red3}$). Ces tensions suivent leurs références imposées par les boucles d'asservissement, et rejettent la perturbation. Néanmoins, ces tensions continues sont sensibles aux régimes transitoires (démarrage et inversion du sens de rotation de la MAS, changement des consignes de commande des boucles d'asservissement). Les tensions continues ($U_{C2}, U_{C3}, U'_{C2}, U'_{C3}$) deviennent stables et égales après un régime transitoire qui se manifeste par des pics de tension importants, et un retard généré par la structure du pont de clamping ($\tau=R_C.C$) (Fig. V.6.b). Ces régimes transitoires montrent la forte interaction entre la machine asynchrone et son alimentation en cascade : redresseurs MLI - pont de clamping - onduleur. Ainsi, on note le suivi parfait (sans retard) des deux tensions : U_{C1} et U'_{C1} ; leur références imposées par le pont de clamping. Néanmoins, ces tensions présentent des pics de tension allant jusqu'à $10\% \cdot U_{ref}$; pendant le régime transitoire (Fig. V.6.b). A cet effet, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant le régime transitoire (Fig.V.6.c). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.V.6.c), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent leurs références I_{refk} (Fig.V.6.d). La figure V.6.e présente les courants de sortie des redresseurs MLI à deux niveaux ($I_{red1}, I_{red2}, I_{red3}$). La figure V.6.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants ($I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}, I_{d4}, I_{d5}, I_{d6}$) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}, I_{d2} \approx -I_{d5}, I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées aux figures V.6.g,h,i.

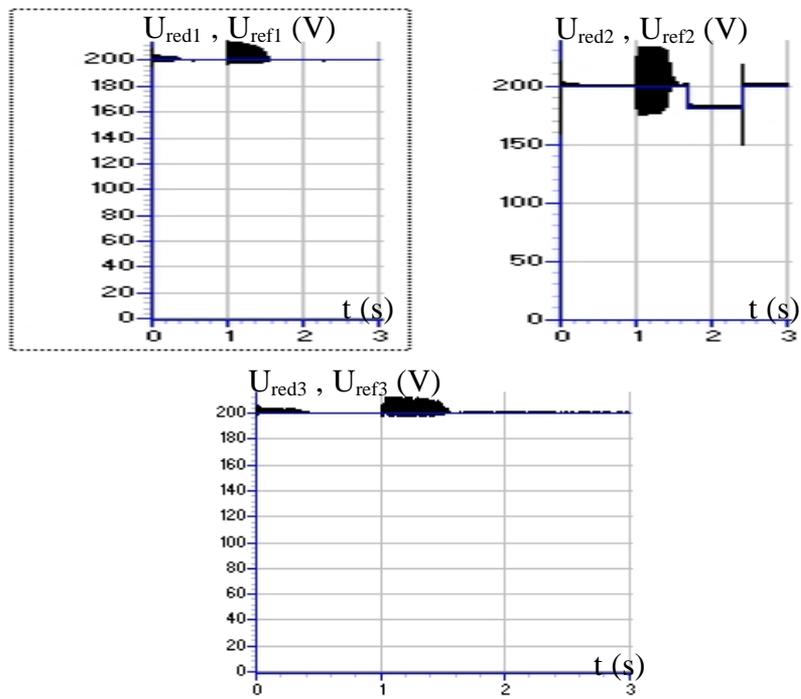


Fig.V.6.a. Tensions de sortie des redresseurs MLI

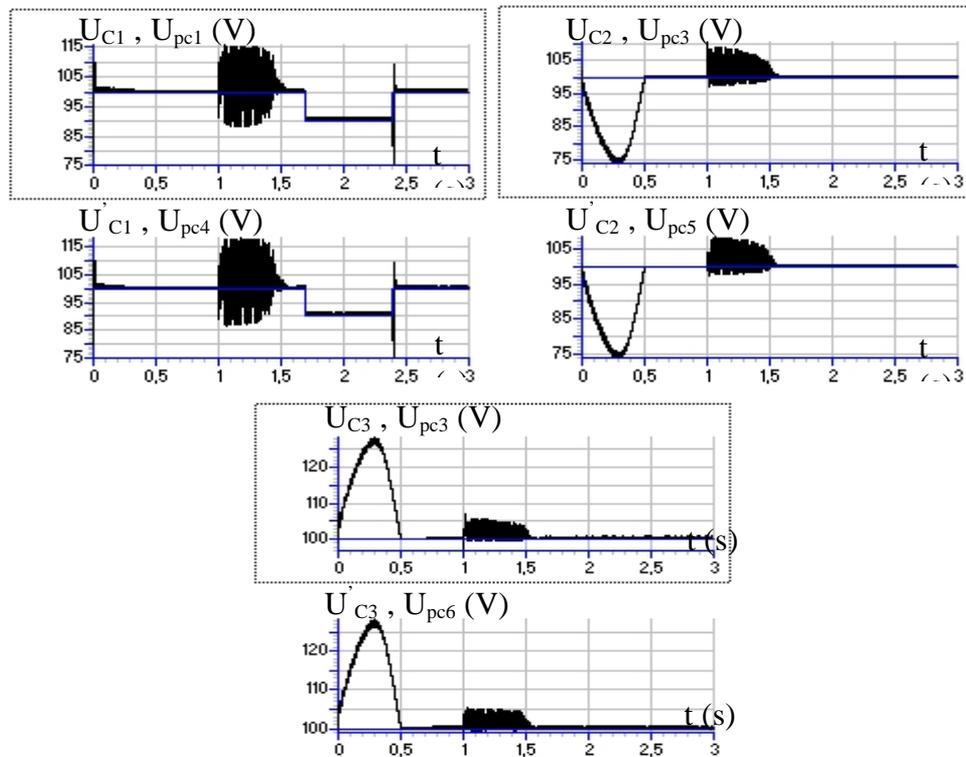


Fig.V.6.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

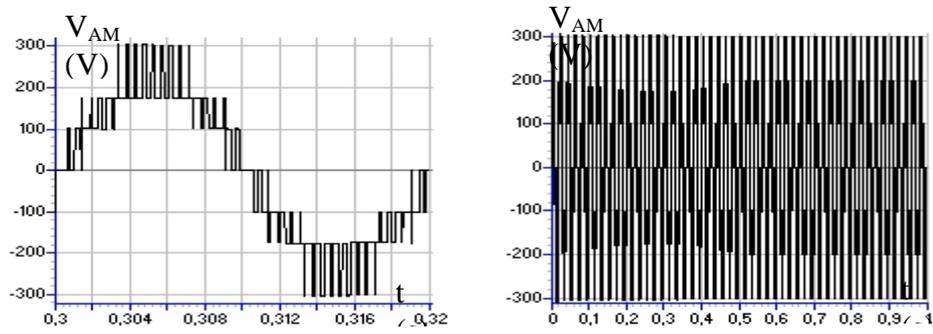


Fig.V.6.c. Tension de sortie de l'onduleur

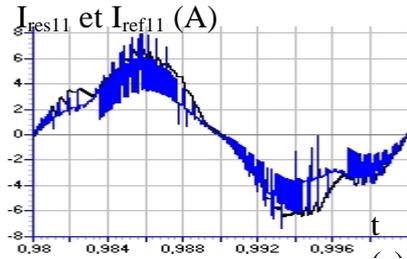


Fig.V.6.d. Courant du réseau et sa référence

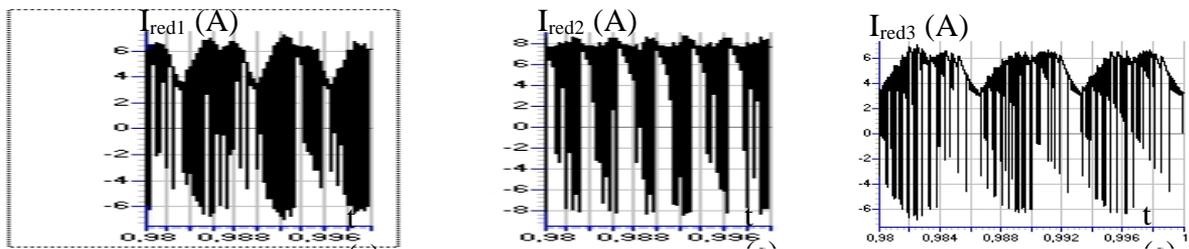


Fig.V.6.e. Courants de sortie des redresseurs MLI

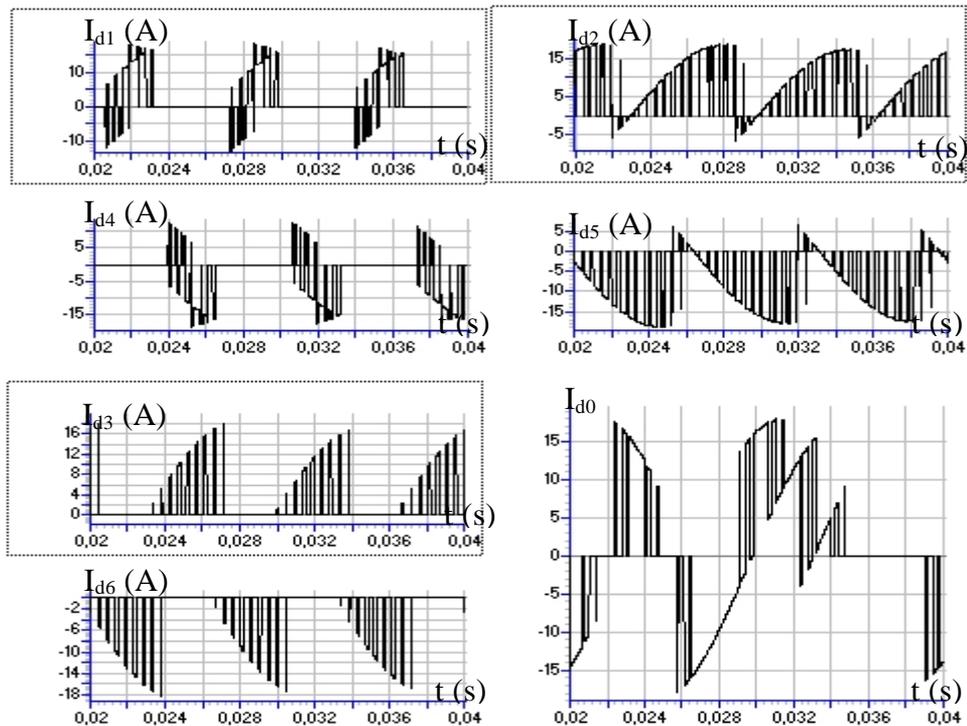


Fig.V.6.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

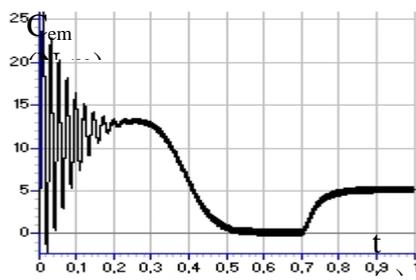


Fig.V.6.g. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

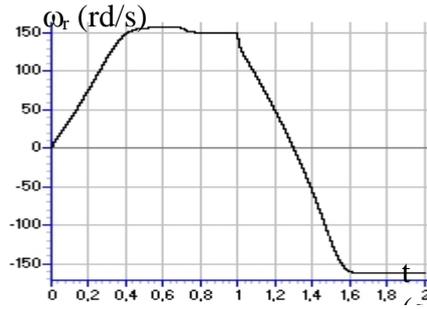
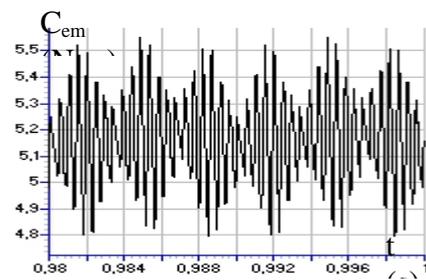


Fig.V.6.h. Vitesse de la machine asynchrone

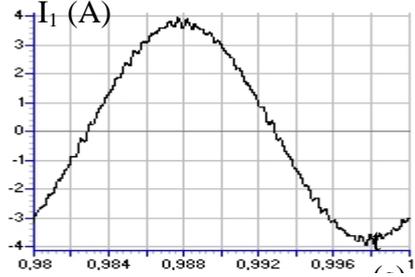


Fig.V.6.i. Courant d'une phase de la MAS

I.3.2. Structure imbriquée : La cascade correspondante à cette structure est présentée dans la figure V.7.

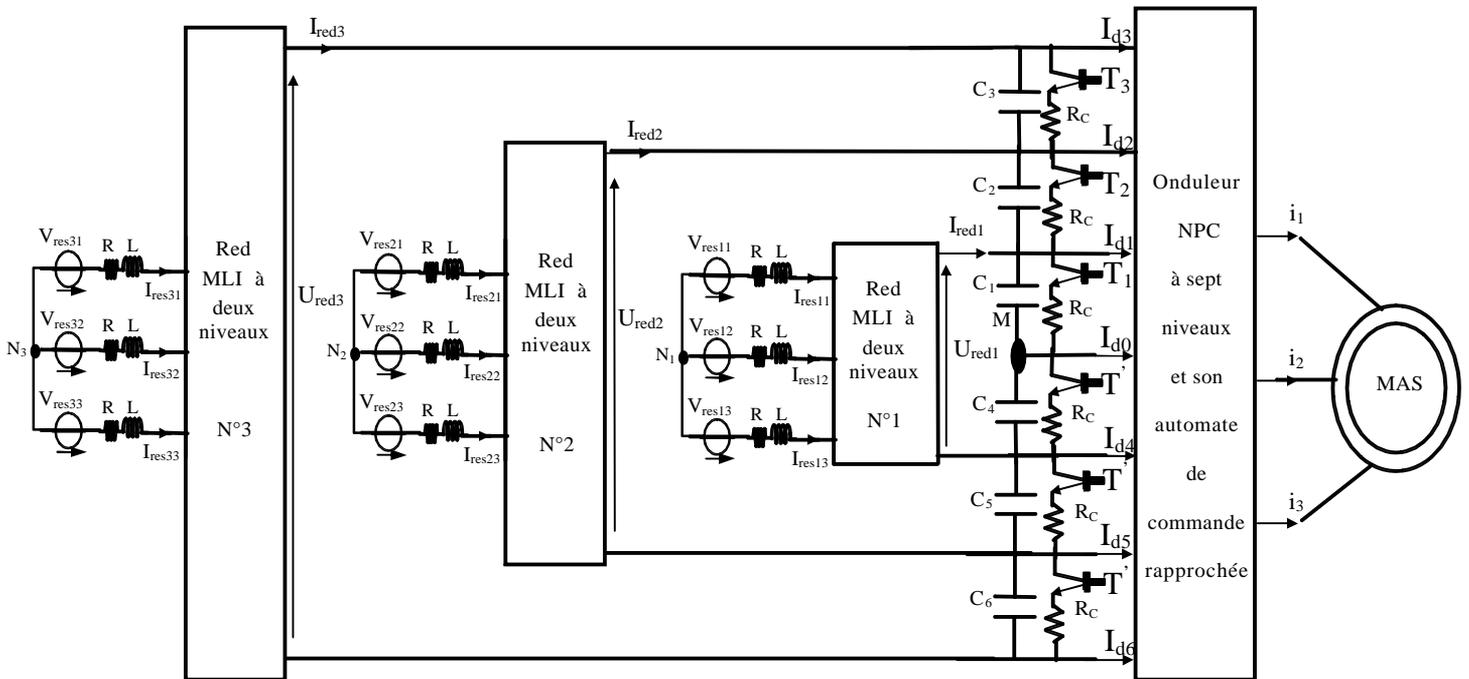


Fig.V.7. cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS ($V_{res1-ef}=(220/3)V$, $V_{res2-ef}=(220*2/3)V$, $V_{res3-ef}=220V$, $R=0.25\Omega$, $L=10\text{ mH}$, $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=10\text{mF}$, $R_c=25\Omega$)

Les tensions de référence des boucles d'asservissement des redresseurs MLI à deux niveaux sont définies par :

$$U_{\text{ref1}} = \begin{cases} 200\text{V} & \text{if } t < 1.7\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 180\text{V} & \text{if } t \in [1.7\text{s}, 2.4\text{s}] \end{cases}$$

$$U_{\text{ref2}} = \begin{cases} 400\text{V} & \text{if } t < 1.7\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 380\text{V} & \text{if } t \in [1.7\text{s}, 2.4\text{s}] \end{cases}$$

$$U_{\text{ref3}} = \begin{cases} 600\text{V} & \text{if } t < 1.7\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 580\text{V} & \text{if } t \in [1.7\text{s}, 2.4\text{s}] \end{cases}$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{\text{PC1,4}} = U_{\text{PC}} = \begin{cases} 100\text{V} & \text{if } t < 1.7\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 90\text{V} & \text{if } t \in [1.7\text{s}, 2.4\text{s}] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6):

$$U_{\text{PC2,3,5,6}} = 100\text{V} = C^{\text{te}}$$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0, 0.7]; Cr=5\text{Nm} \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

Les figures V.8.* présentent les résultats de performance de la cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux ; en boucle fermée de la tension de sortie de chaque redresseur MLI. Cette cascade est appliquée à la conduite de la machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.05\text{A}$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$).

La figure V.8.a présente les tensions de sortie des redresseurs MLI à deux niveaux ($U_{\text{red1}}, U_{\text{red2}}, U_{\text{red3}}$). Ces tensions suivent bien leurs références imposées par les boucles d'asservissement, et rejettent la perturbation du couple de charge. Les tensions continues ($U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}, U'_{C1}, U'_{C2}, U'_{C3}$) sont stables et égales et ne présentent aucun régime transitoire. Ainsi, le phénomène du retard ($\tau=R_C.C$) de la réponse des tensions continues dû particulièrement à la résistance du pont de clamping ; a été éliminé (Fig. V.8.b). A cet effet, la tension de sortie de l'onduleur est stable, et uniforme par l'égalité des différents paliers de tension continue qui constituent une parfaite onde sinusoïdale (Fig. V.8.c). La figure V.8.d présente la mauvaise qualité des courants I_{resk} du réseau triphasé. La figure V.8.e présente les courants de sortie des redresseurs MLI à deux niveaux ($I_{\text{red1}}, I_{\text{red2}}, I_{\text{red3}}$). La figure V.8.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants ($I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}, I_{d4}, I_{d5}, I_{d6}$) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension, et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}, I_{d2} \approx -I_{d5}, I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0}

est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées aux figures V.8.g,h,i .

- Simulation numérique

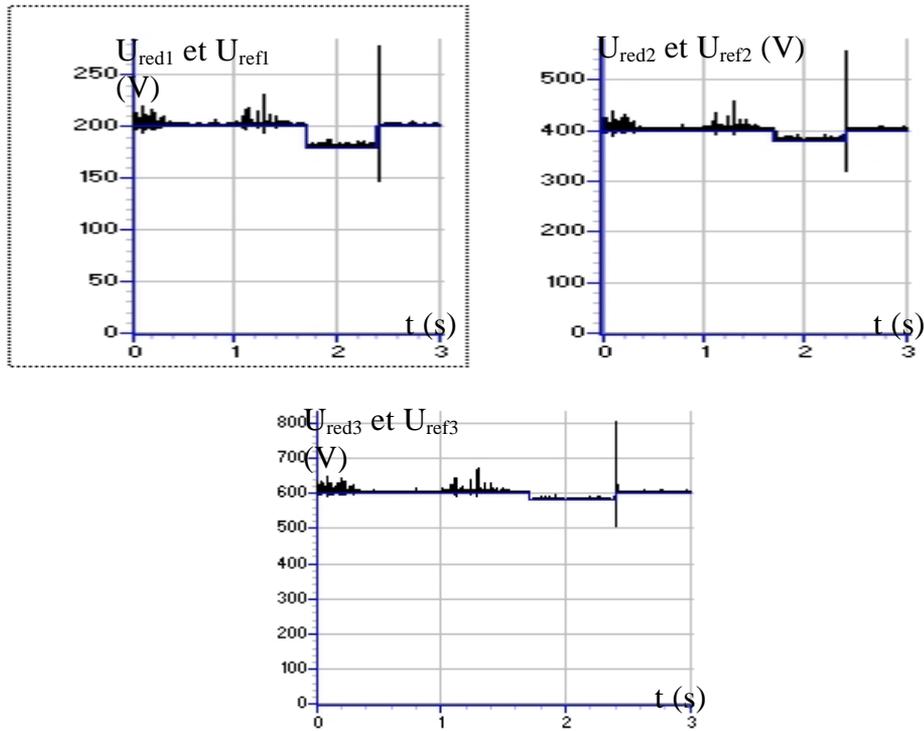
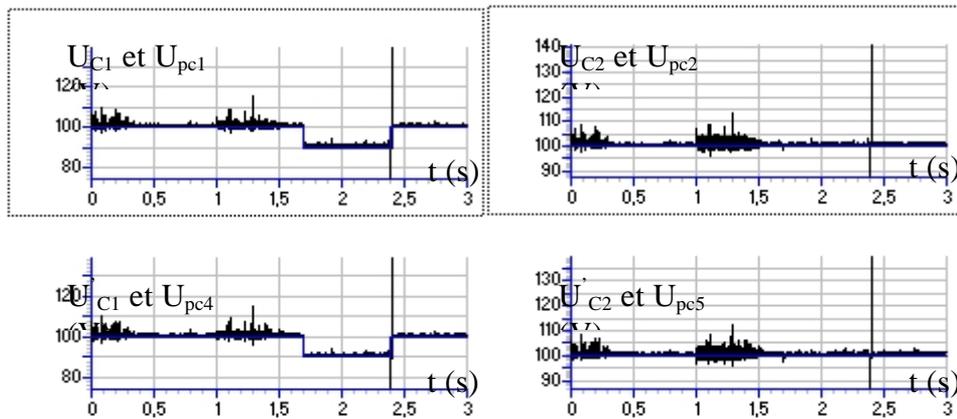


Fig.V.8.a. Tensions de sortie des redresseurs MLI



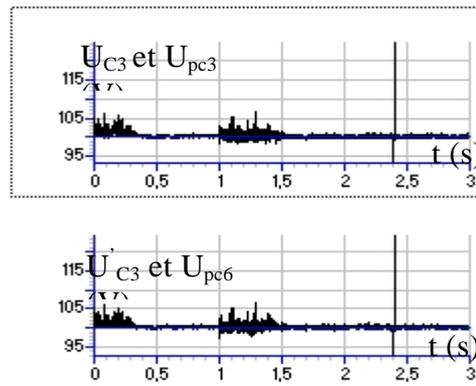


Fig.V.8.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

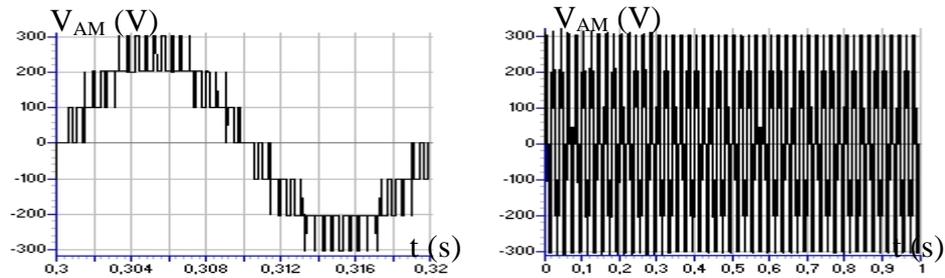


Fig.V.8.c. Tension de sortie de l'onduleur

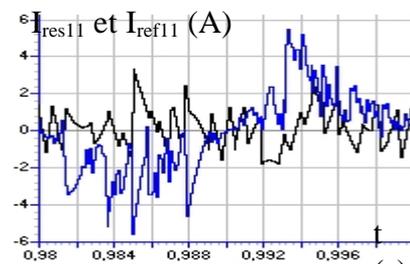


Fig.V.8.d. Courant du réseau et sa référence

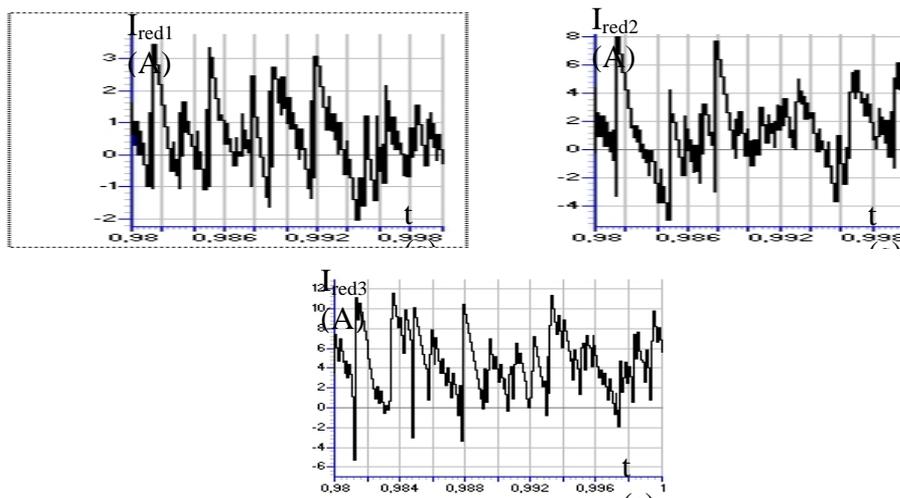


Fig.V.8.e. Courants de sortie des redresseurs MLI

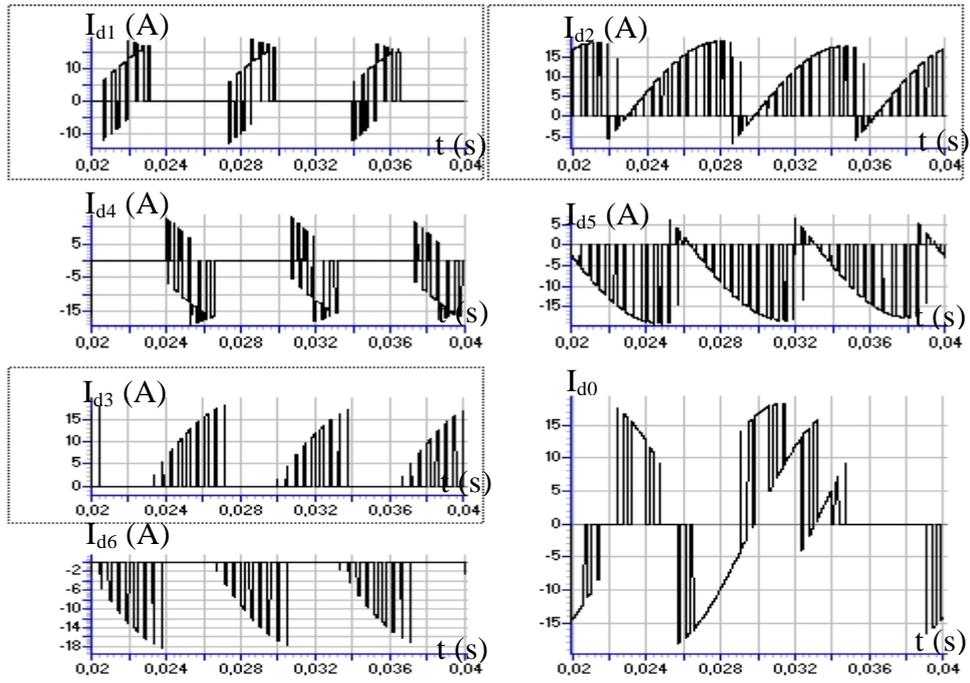


Fig.V.8.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

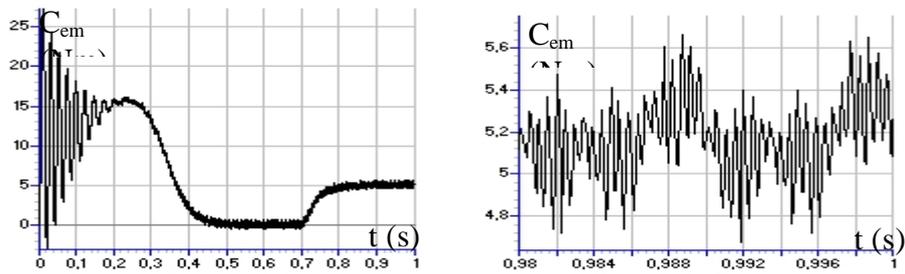


Fig.V.8.g. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

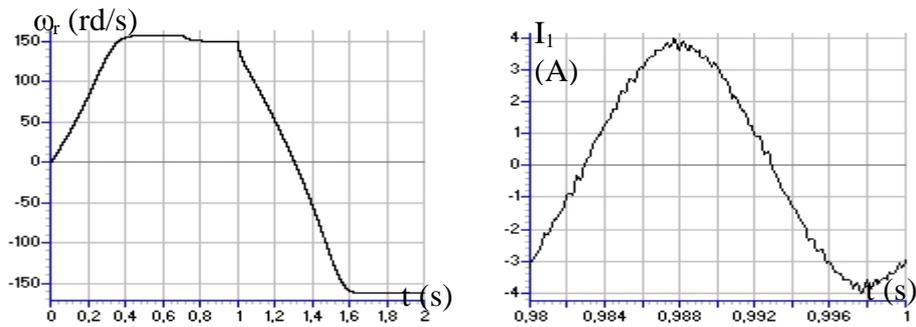


Fig.V.8.h. Vitesse de la machine asynchrone

Fig.V.8.i. Courant d'une phase de la MAS

I.4. Cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

La structure de cette cascade est présentée dans la figure V.9.

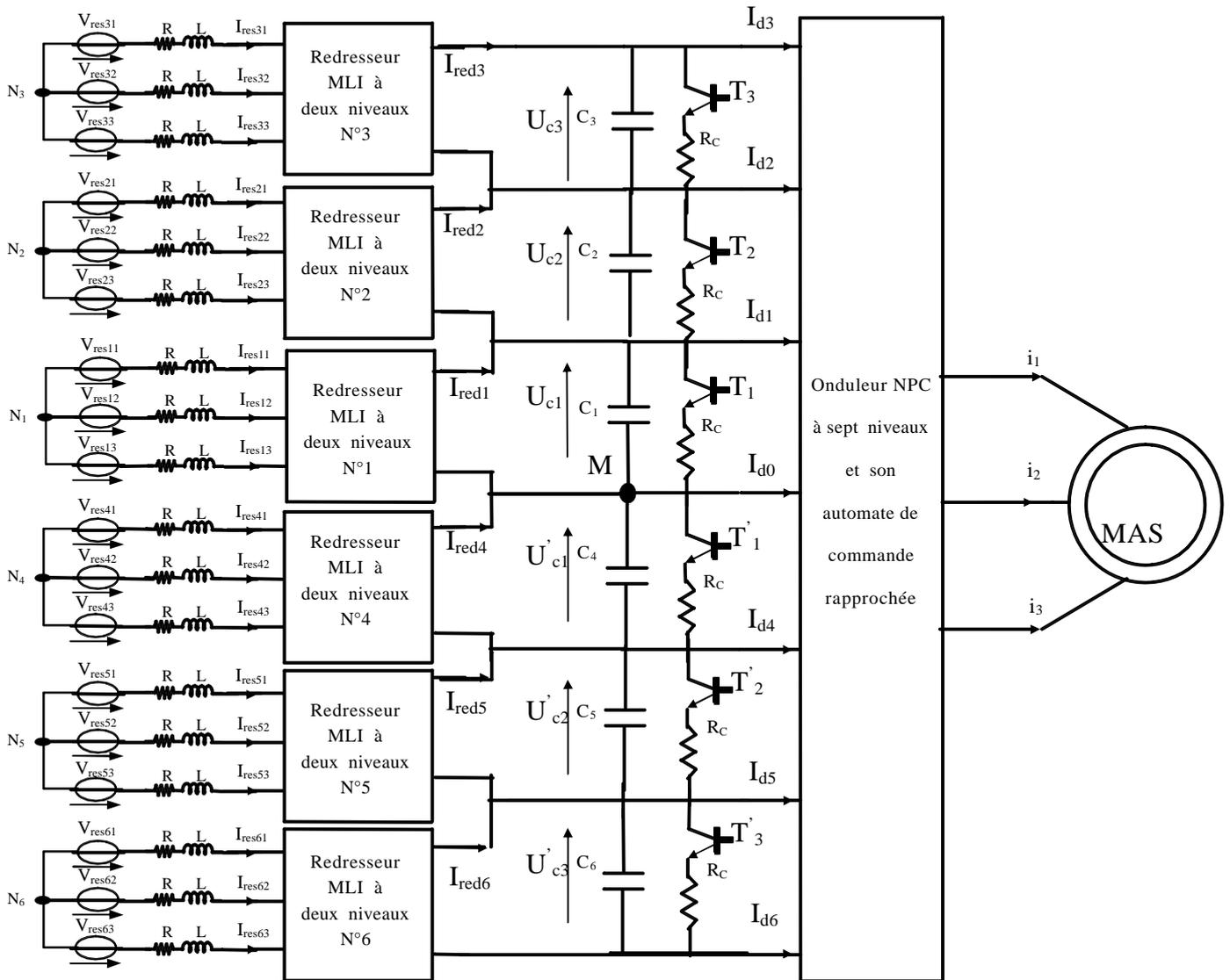


Fig.V.9. cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

$$(V_{res-eff}=220V, R=0.25\Omega, L=10\text{ mH}, C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10mF, R_C =25\Omega)$$

Les tensions de référence des boucles d'asservissement des redresseurs MLI à deux niveaux sont définies par :

$$U_{ref1,4} = \begin{cases} 100V & \text{if } t < 1.7s \text{ et } t > 2.4s \\ 90V & \text{if } t \in [1.7s, 2.4s] \end{cases}$$

$$U_{ref2,3,5,6} = 100V$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{PC1,4} = U_{PC} = \begin{cases} 100V & \text{if } t < 1.7s \quad \text{et} \quad t > 2.4s \\ 90V & \text{if } t \in [1.7s, 2.4s] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6):

$$U_{PC2,3,5,6} = 100V = C^{te}$$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0, 0.7]; Cr=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

Les figures V.10.* présentent les résultats de performance de la cascade six redresseurs MLI à deux niveaux (mis en série) - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux ; en boucle fermée de la tension de sortie de chaque redresseur MLI. Cette cascade est appliquée à la conduite de la machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à deux niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.05A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$).

La figure V.10.a présente les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux ($U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}, U'_{C1}, U'_{C2}, U'_{C3}$). Ces tensions sont stables et contrôlées à la fois par les cellules du pont de clamping et les boucles de régulation. Chaque tension suit la tension de référence, et rejette la perturbation du couple de charge. Ainsi, on constate l'amortissement considérable de l'effet du phénomène transitoire et l'élimination du retard ($\tau=R_C.C$) de la réponse des tensions continues dû particulièrement à la résistance du pont de clamping. A cet effet, la tension de sortie de l'onduleur est stable, et uniforme par l'égalité des différents paliers de tension continue qui constituent une parfaite onde sinusoïdale (Fig. V.8.b). Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent leurs références I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.V.10.c). La figure V.10.d présente les courants de sortie des redresseurs MLI à deux niveaux I_{redi} . La figure V.10.e montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants ($I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}, I_{d4}, I_{d5}, I_{d6}$) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}, I_{d2} \approx -I_{d5}, I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées aux figures IV.10.f,g,h.

• Simulation numérique

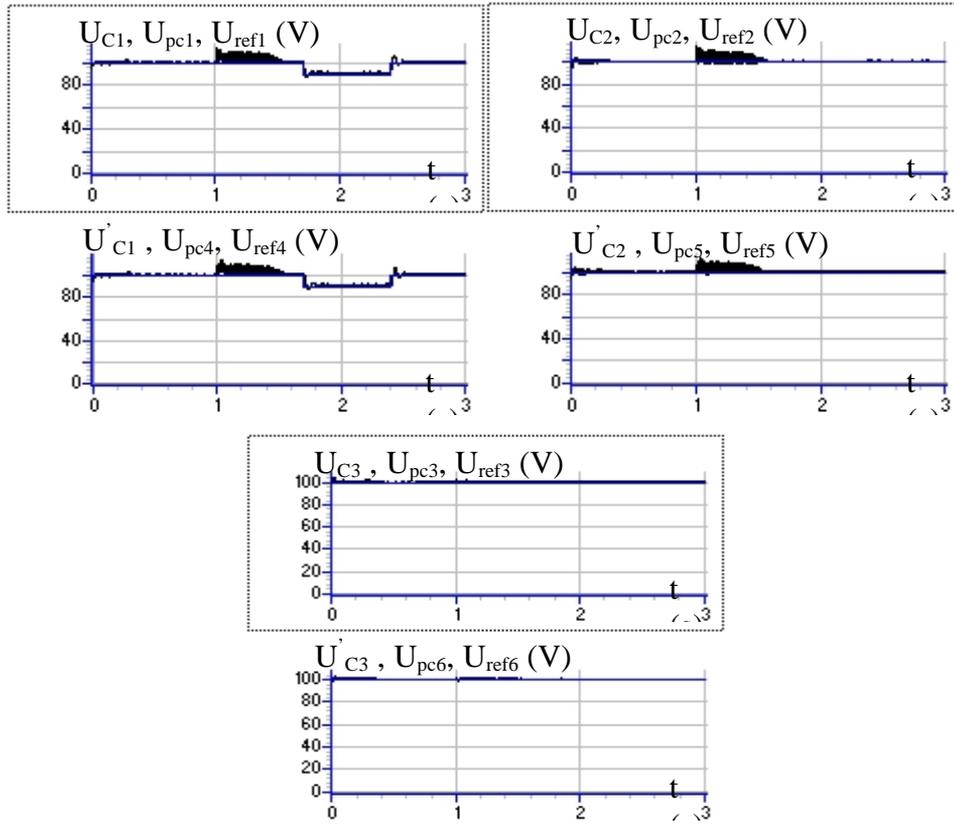


Fig.V.10.a. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

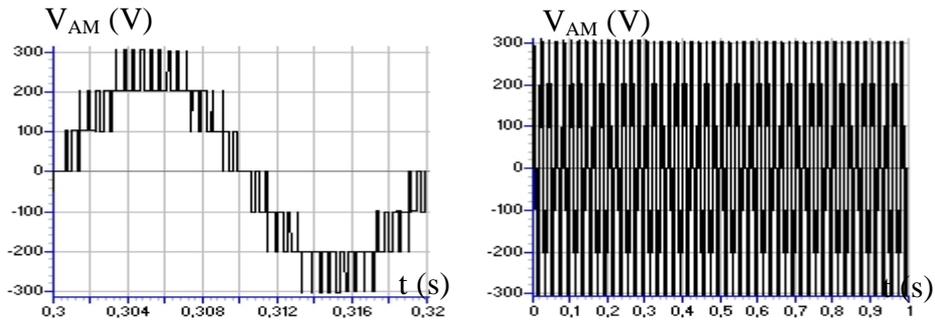


Fig.V.10.b. Tension de sortie de l'onduleur

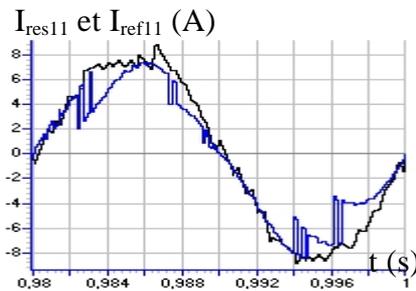


Fig.V.10.c. Courant du réseau et sa référence

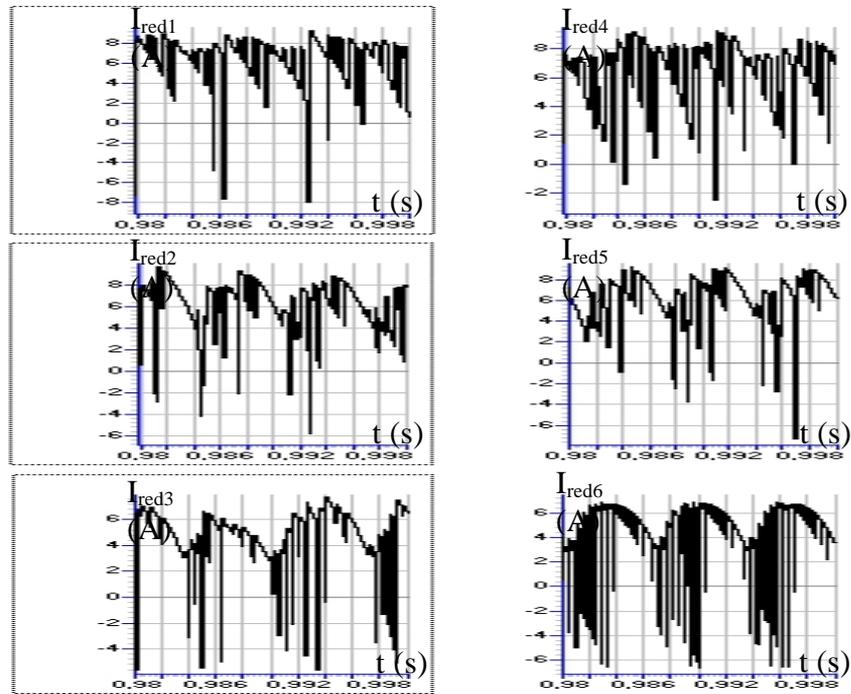


Fig.V.10.d. Courants de sortie des redresseurs MLI

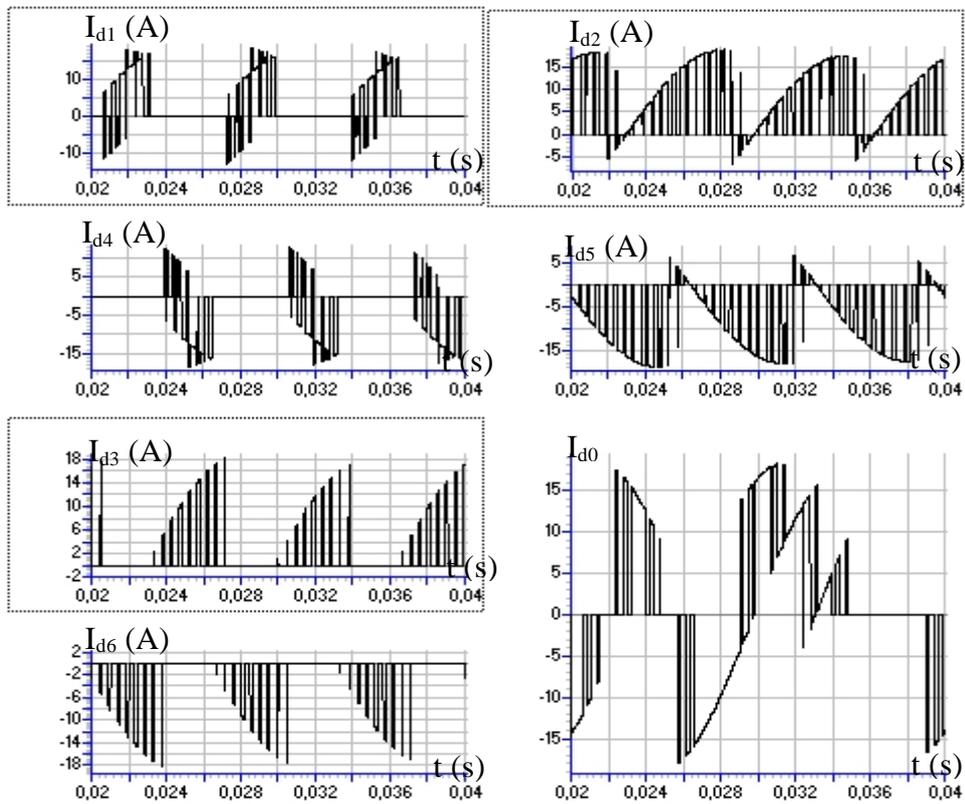


Fig.V.10.e. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

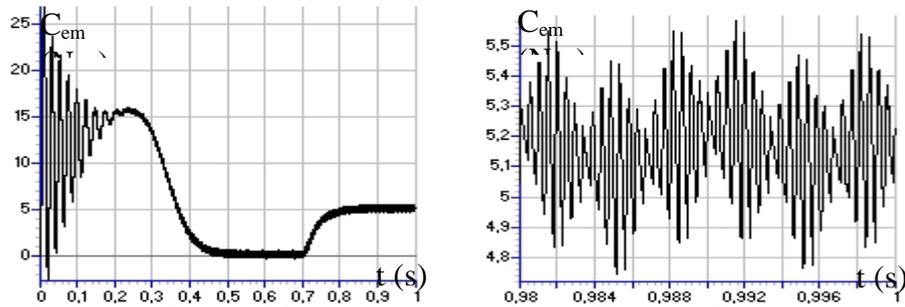


Fig.V.10.f. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

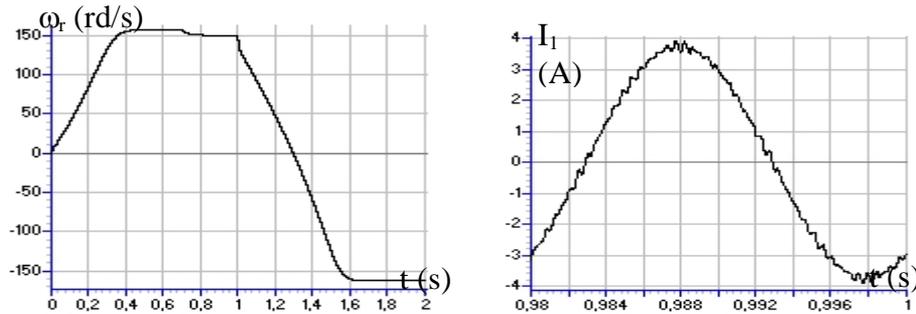


Fig.V.10.g. Vitesse de la machine asynchrone Fig.V.10.h. Courant d'une phase de la MAS

II. Cascades redresseurs de courant à MLI triphasés à trois niveaux - pont de clamping - onduleur triphasé à sept niveaux

On étudiera dans cette partie en boucle fermée; les cascades constituées d'un redresseur de courant triphasé à trois niveaux, le pont de clamping et l'onduleur triphasé à sept niveaux. Ces cascades sont appliquées à la conduite de la machines asynchrone triphasée.

II.1. Cascade un redresseur MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux -MAS

La structure de cette cascade est présentée dans la figure V.11. La tension de référence de la boucle d'asservissement du redresseur MLI à trois niveaux est définie par :

$$U_{ref} = \begin{cases} 300V & \text{if } t < 1.7s \text{ et } t > 2.4s \\ 280V & \text{if } t \in [1.7s, 2.4s] \end{cases}$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{PC1,4} = U_{PC} = \begin{cases} 100V & \text{if } t < 1.7s \text{ et } t > 2.4s \\ 90V & \text{if } t \in [1.7s, 2.4s] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6):

$$U_{PC2,3,5,6} = 100V = C^{te}$$

Le couple de charge est défini par $C_r \{ C_r=0 \text{ si } t(s) \in [0 \ 0.7]; C_r=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7 \}$.

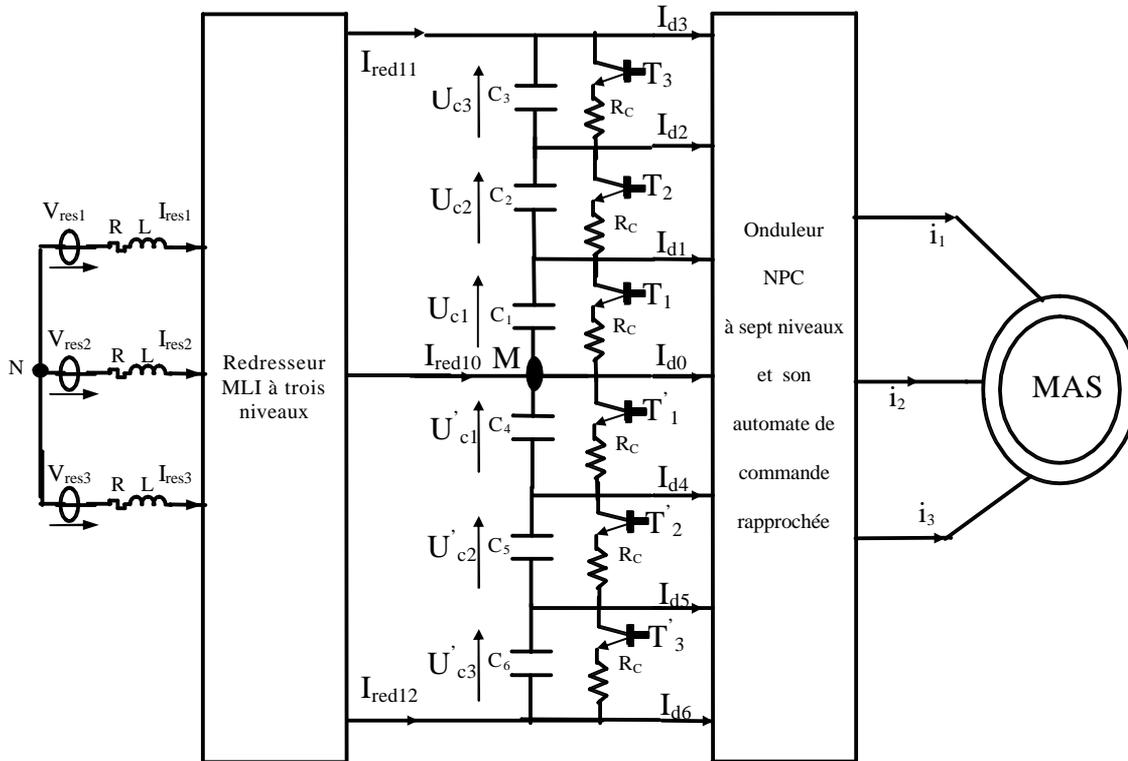


Fig.V.11. cascade un redresseur MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

$$(V_{\text{res-eff}}=220V, R=0.25\Omega, L=10 \text{ mH}, C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10mF, R_C =25\Omega)$$

Les figures V.12.* présentent les résultats de performance de la cascade un redresseur MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux ; en boucle fermée de la tension de sortie du redresseur MLI à trois niveaux. Cette cascade est appliquée à la conduite de la machine asynchrone triphasée. Le redresseur MLI à trois niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.001A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$).

La figure V.12.a présente la tension continue moyenne de sortie du redresseur MLI à trois niveaux $\{ U_{Cmoy} (U_{Cmoy} = \frac{U_{C1} + U_{C2} + U_{C3} + U'_{C1} + U'_{C2} + U'_{C3}}{2}) \}$. Cette tension suit parfaitement sa référence imposée par la boucle d'asservissement, et rejette la perturbation du couple de charge. Les tensions continue ($U_{C1}, U_{C3}, U'_{C1}, U'_{C3}$) deviennent stables et égales après un régime transitoire qui se manifeste par un retard généré par la structure du pont de clamping ($\tau=R_C.C$) (Fig. V.12.b). Ainsi, on note le suivie parfait (sans retard) des tensions : U_{C2} et U'_{C2} ; leur références imposées par le pont de clamping (Fig. V.12.b). A cet effet, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant les régimes transitoires (Fig.V.12.c). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une

tension stable et pratiquement uniforme (Fig.V.12.c), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent bien leurs références I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.V.12.d). La figure V.12.e présente les courants de sortie du redresseur MLI à trois niveaux (I_{red11} , I_{red12} , I_{red10}). La valeur moyenne du courant I_{red10} est pratiquement nulle. La figure V.12.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension, et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}$, $I_{d2} \approx -I_{d5}$, $I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées aux figures V.12.g,h,i.

• Simulation numérique

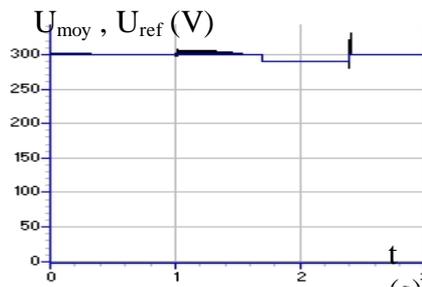


Fig.V.12.a. Tension moyenne de sortie du redresseur MLI à trois niveaux

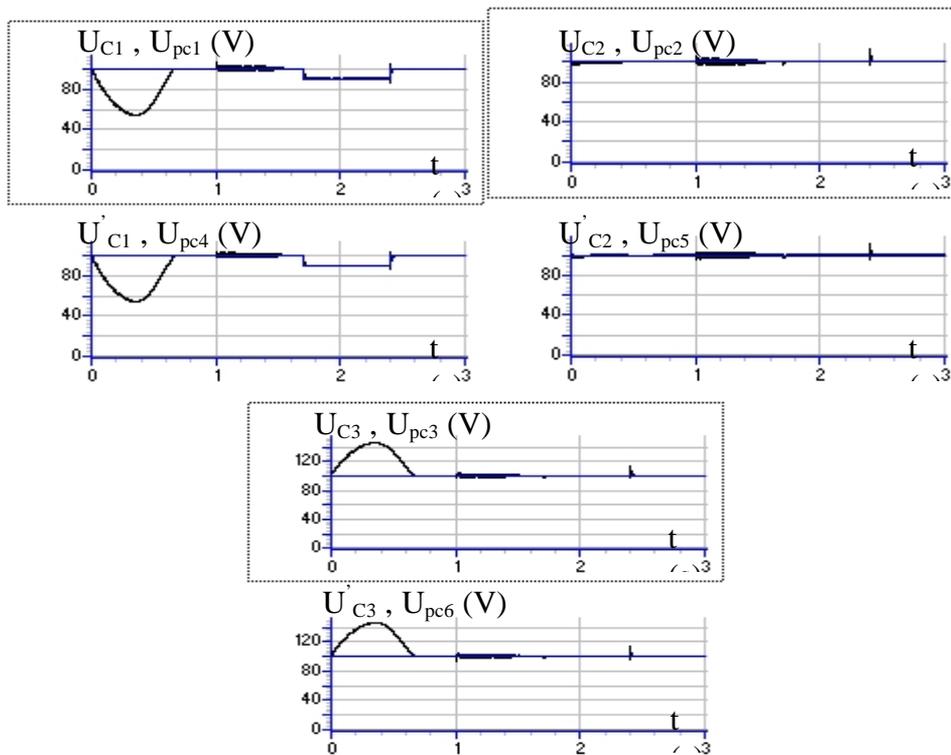


Fig.V.12.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

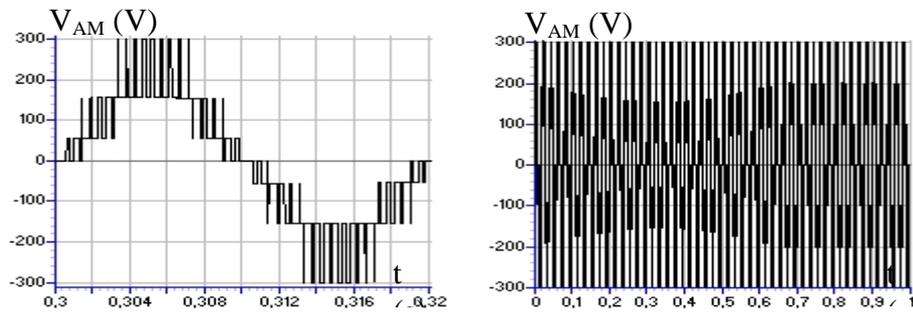


Fig.V.12.c. Tension de sortie de l'onduleur

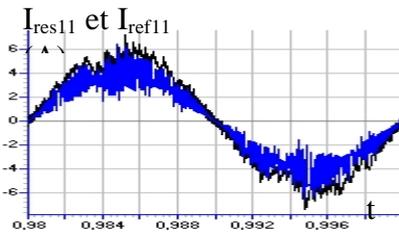


Fig.V.12.d. Courant du réseau et sa référence

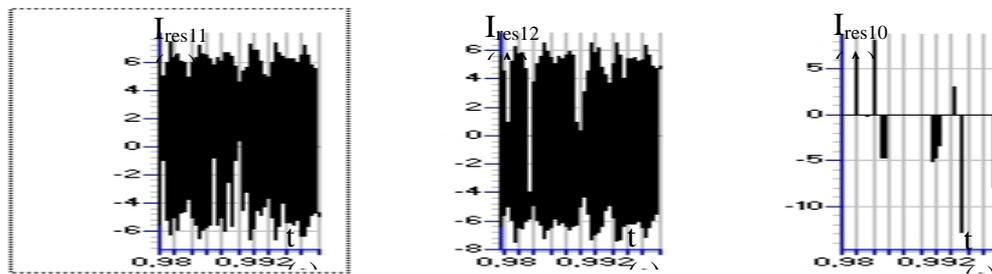


Fig.V.12.e. Courants de sortie du redresseur MLI à trois niveaux

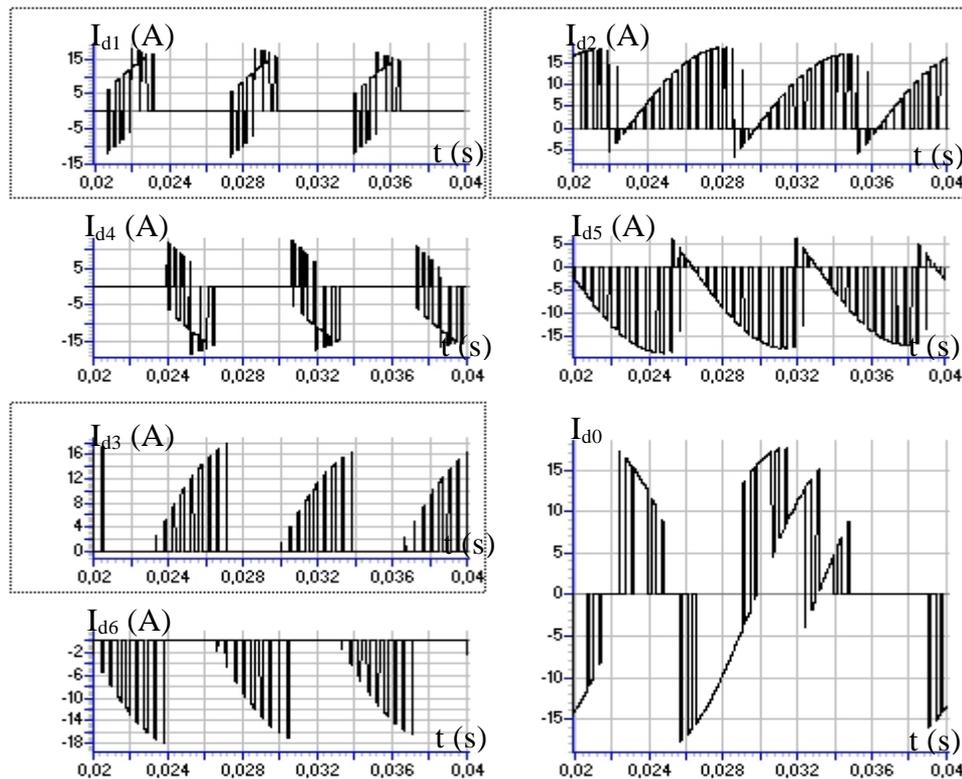


Fig.V.12.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

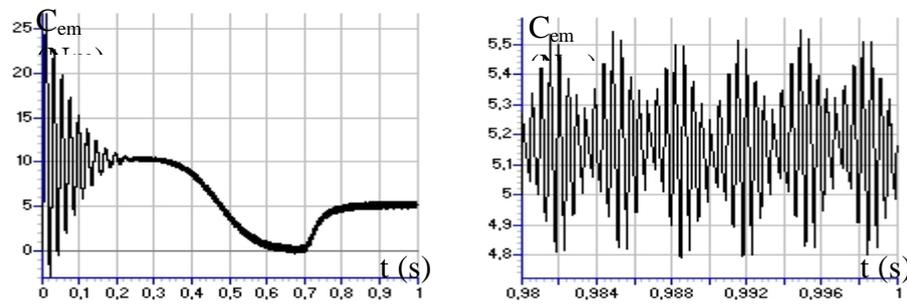


Fig.V.12.g. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

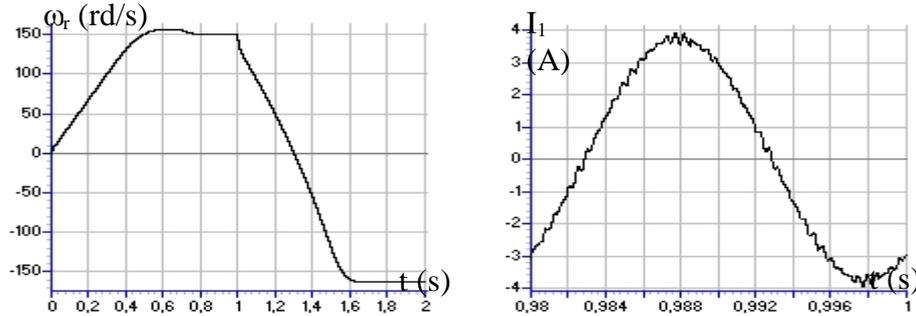


Fig.V.12.h. Vitesse de la machine asynchrone

Fig.V.12.i. Courant d'une phase de la MAS

II.2. Cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux -MAS

II.2.1. Structure série : La cascade correspondante à cette structure est donnée par la figure V.13. Les tensions de référence des boucles d'asservissement des redresseurs MLI à trois niveaux sont définies comme suit :

$$U_{ref1,3} = 100 \text{ V}$$

$$U_{ref2} = \begin{cases} 100 \text{ V} & \text{if } t < 1.7 \text{ s et } t > 2.4 \text{ s} \\ 90 \text{ V} & \text{if } t \in [1.7 \text{ s}, 2.4 \text{ s}] \end{cases}$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{PC1,4} = U_{PC} = \begin{cases} 100 \text{ V} & \text{if } t < 1.7 \text{ s et } t > 2.4 \text{ s} \\ 90 \text{ V} & \text{if } t \in [1.7 \text{ s}, 2.4 \text{ s}] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6):

$$U_{PC2,3,5,6} = 100 \text{ V} = C^{te}$$

Le couple de charge est défini par C_r $\{C_r=0 \text{ si } t(s) \in [0, 0.7]; C_r=5 \text{ Nm si } t(s) > 0.7\}$.

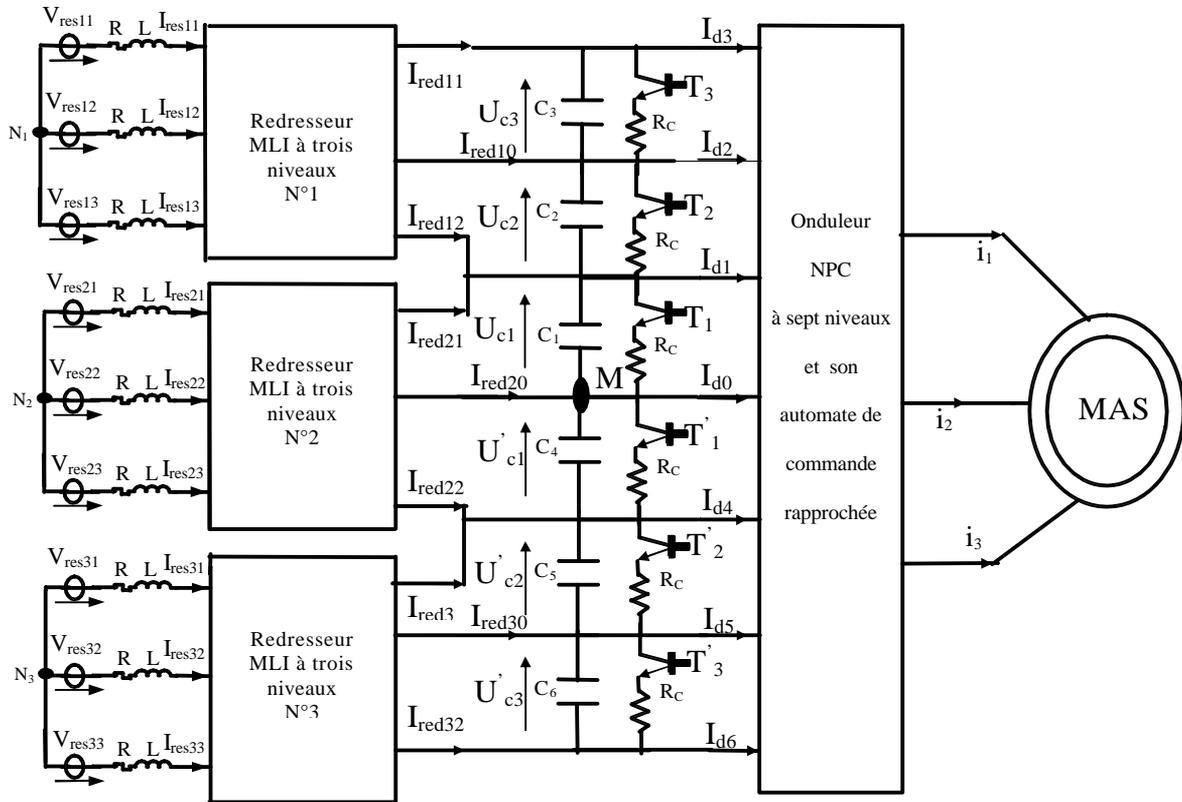


Fig.V.13. cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS ($V_{res-eff}=(220/3)V$, $R=0.25\Omega$, $L=10\text{ mH}$, $C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10\text{mF}$, $R_C =25\Omega$) Les figures V.14.* présentent les résultats de performance de la cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux ; en boucle fermée de la tension de sortie de chaque redresseur MLI à trois niveaux. Cette cascade est appliquée à la conduite de la machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à trois niveaux sont commandés par la stratégie d’hystérésis ($\epsilon_k=0.001A$). L’onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8$, $m=42$).

La figure V.14.a présente les tensions continues moyennes de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux $\{U_{Cmoy1} (U_{Cmoy1}=\frac{U_{C2} + U_{C3}}{2})$, $U_{Cmoy2} (U_{Cmoy2}=\frac{U_{C1} + U'_{C1}}{2})$ et $U_{Cmoy3}(U_{Cmoy3}=\frac{U'_{C2} + U'_{C3}}{2})\}$. Ces tensions continues (U_{Cmoy1} , U_{Cmoy2} , U_{Cmoy3}) suivent leurs références imposées par les boucles d’asservissement, et rejettent la perturbation du couple de charge. Ainsi, ces tension présentent des pics de tension allant jusqu’à $10\% \cdot U_{refi}$; pendant le régime transitoire. Néanmoins, la tension U_{Cmoy3} présente une erreur statique de l’ordre 5%. Les tensions continues d’entrée de l’onduleur à sept niveaux (U_{C2} , U_{C3} , U'_{C2} , U'_{C3}) deviennent stables et égales après un régime transitoire qui se manifeste par un retard généré par la structure du pont de clamping ($\tau=R_C \cdot C$) (Fig. V.14.b). Néanmoins, la tension U'_{C2} présente une erreur statique par rapport à sa référence de l’ordre 5%.

Ainsi, on note le suivi parfait (sans retard) des tensions : U_{C1} et U'_{C1} ; leur références imposées par le pont de clamping, avec l'élimination parfaite du régime transitoire (Fig. V.14.b). A cet effet, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant le régime transitoire (Fig.V.14.c). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.V.14.c), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent leurs références I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.V.14.d). La figure V.14.e présente les courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux. La figure V.14.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}$, $I_{d2} \approx -I_{d5}$, $I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées aux figures V.14.g,h,i.

- Simulation numérique

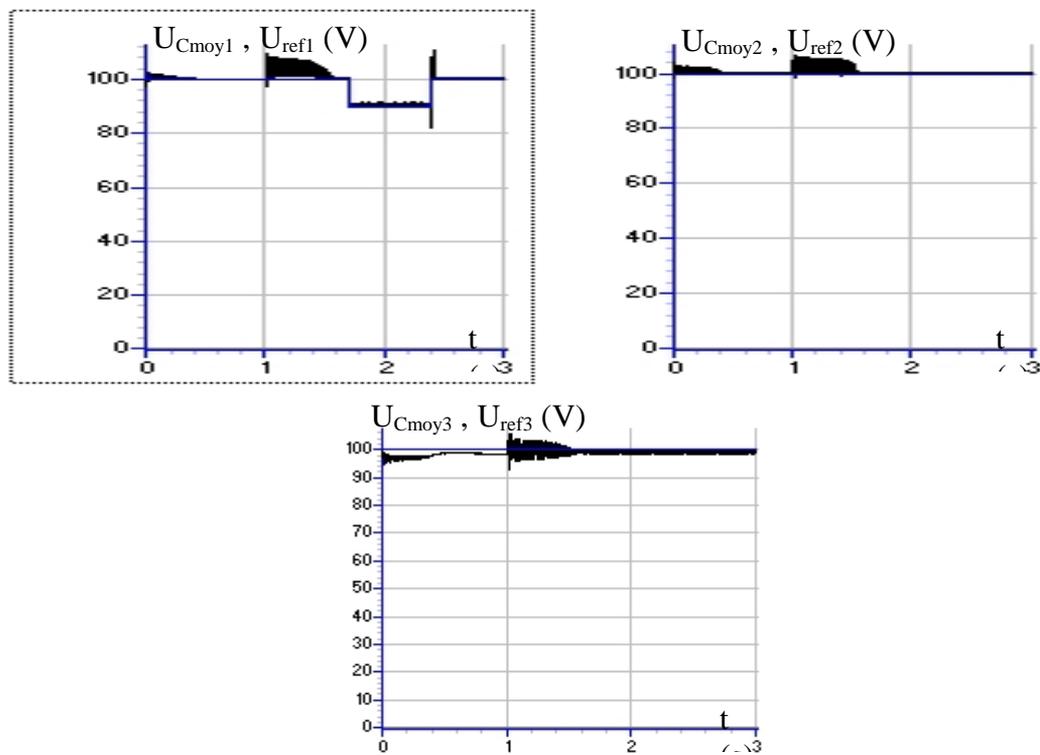


Fig.V.14.a. Tensions moyennes de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux

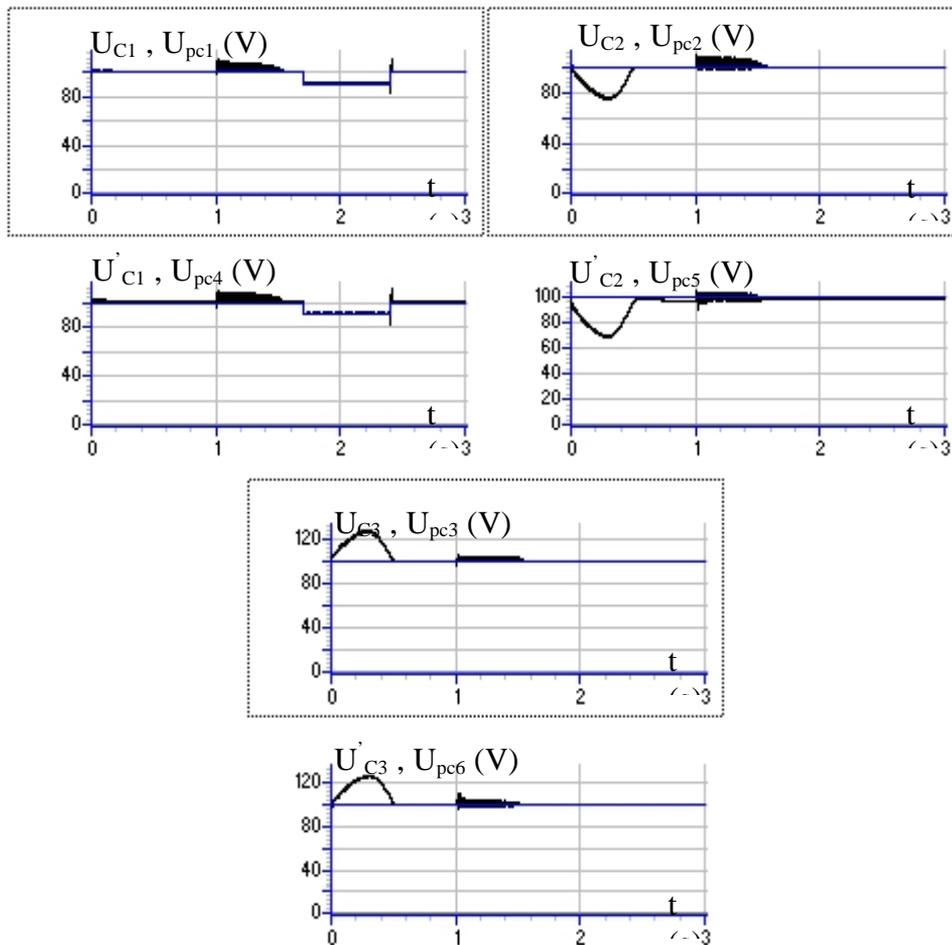


Fig.V.14.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

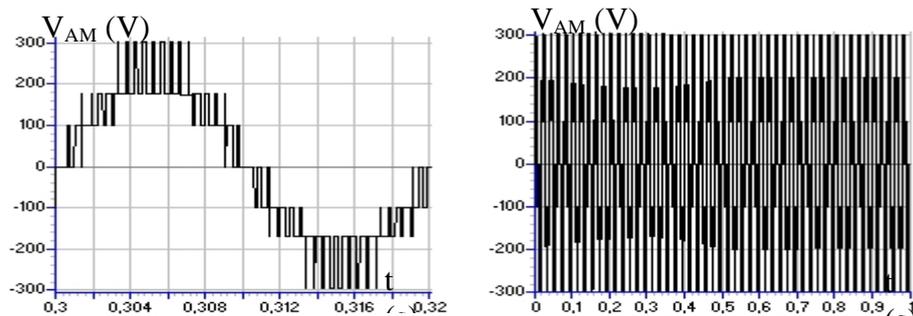


Fig.V.14.c. Tension de sortie de l'onduleur

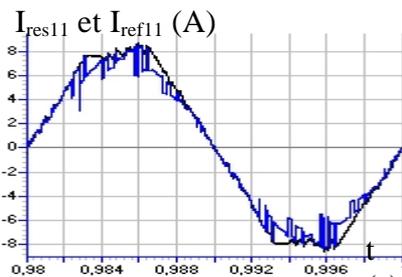


Fig.V.14.d. Courant du réseau et sa référence

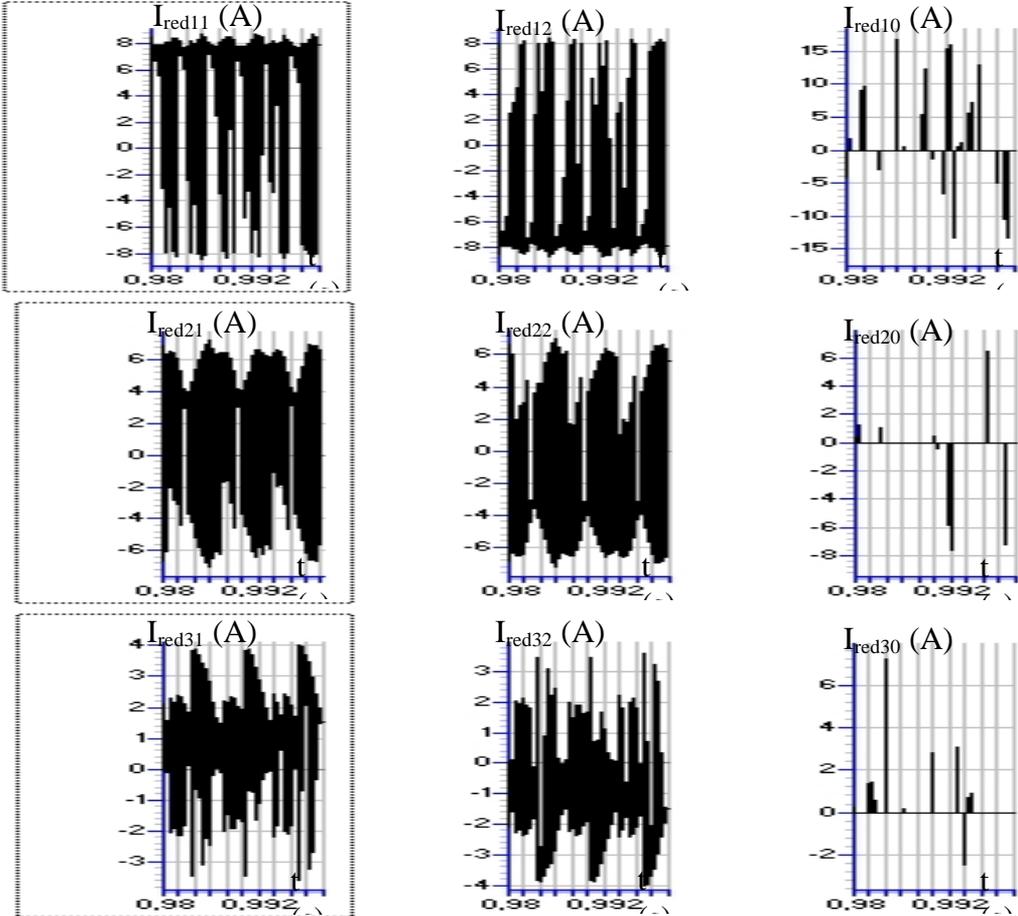
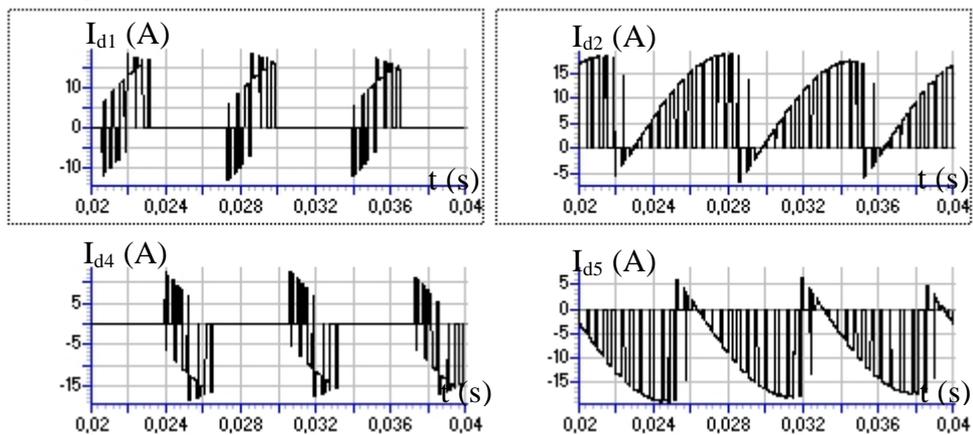


Fig.V.14.e. Courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux



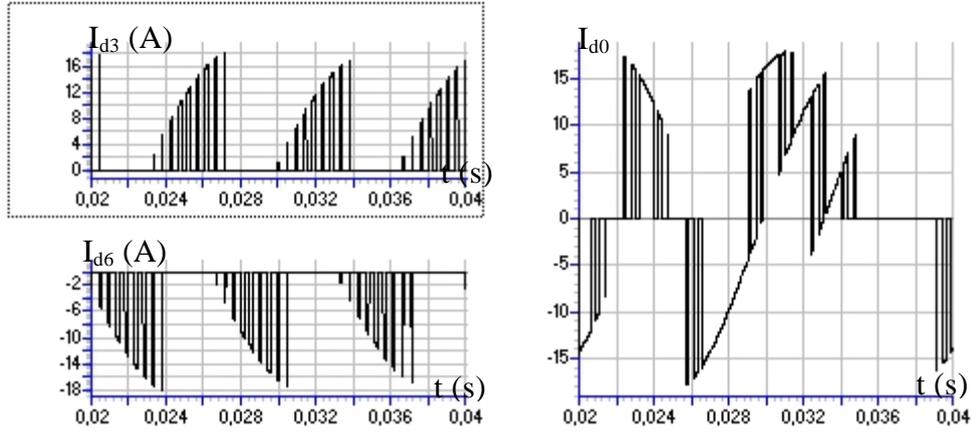


Fig.V.14.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

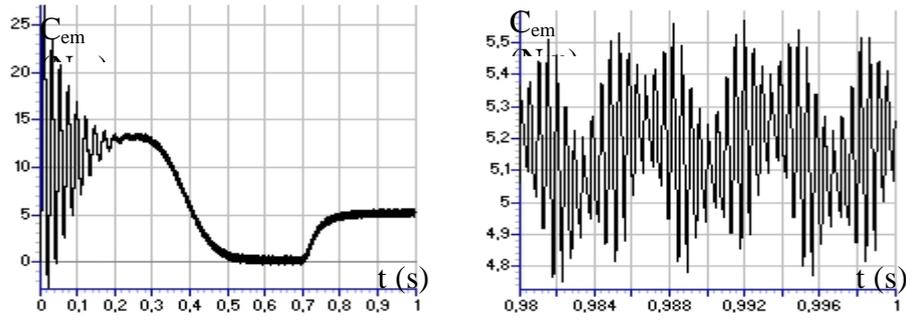


Fig.V.14.g. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

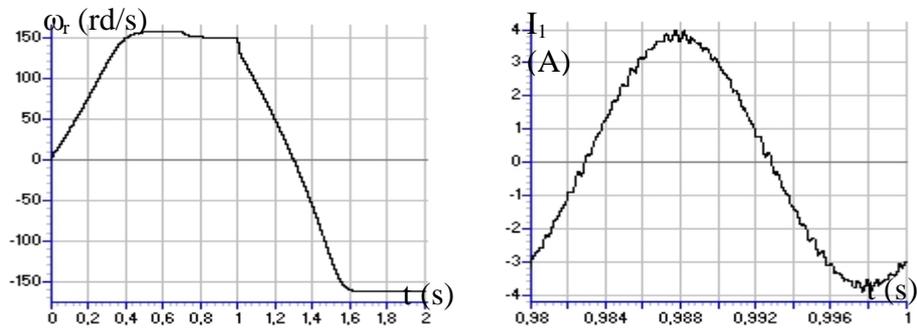


Fig.V.14.h. Vitesse de la machine asynchrone Fig.V.14.i. Courant d'une phase de la MAS

II.2.2. Structure imbriquée : La cascade correspondante à cette structure est présentée par la figure V.15. Les tensions de référence des boucles d'asservissement des redresseurs MLI à trois niveaux sont définies par :

$$U_{ref1} = \begin{cases} 200V & \text{if } t < 1.7s \text{ et } t > 2.4s \\ 180V & \text{if } t \in [1.7s, 2.4s] \end{cases}$$

$$U_{ref2} = \begin{cases} 400V & \text{if } t < 1.7s \text{ et } t > 2.4s \\ 380V & \text{if } t \in [1.7s, 2.4s] \end{cases}$$

$$U_{ref3} = \begin{cases} 600V & \text{if } t < 1.7s \text{ et } t > 2.4s \\ 580V & \text{if } t \in [1.7s, 2.4s] \end{cases}$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{PC1,4} = U_{PC} = \begin{cases} 100V & \text{if } t < 1.7s \text{ et } t > 2.4s \\ 90V & \text{if } t \in [1.7s, 2.4s] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont de clamping correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6):

$$U_{PC2,3,5,6} = 100V = C^{te}$$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(s) \in [0, 0.7]; Cr=5Nm \text{ si } t(s) > 0.7\}$.

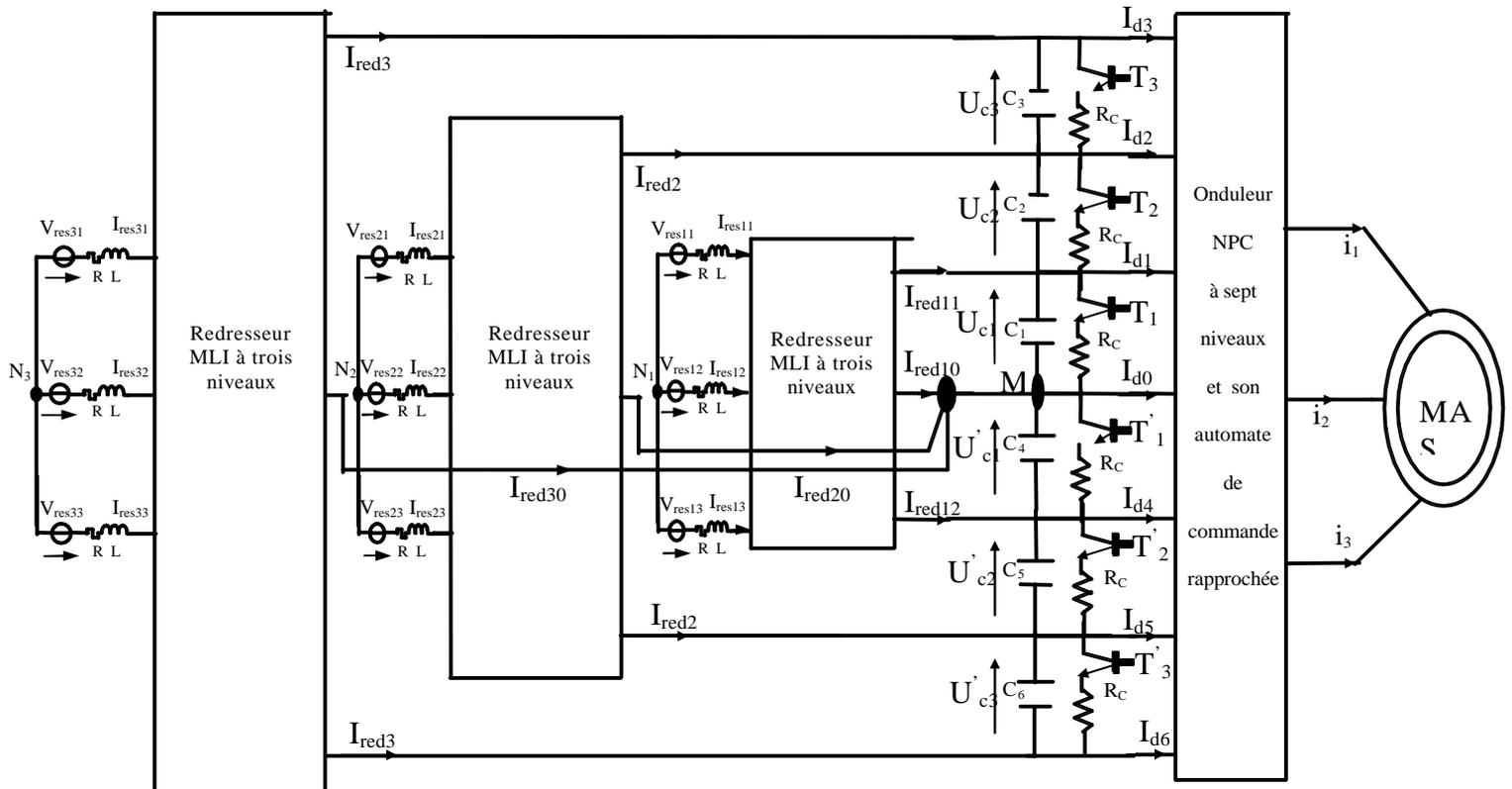
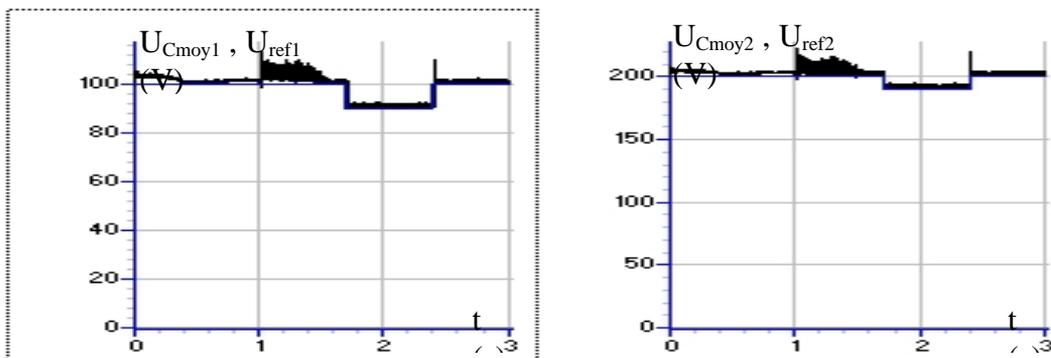


Fig. V.15. cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS ($V_{res1-ef}=(220/3)V$, $V_{res2-ef}=(220*2/3)V$, $V_{res3-ef}=220V$, $R=0.25\Omega$, $L=10 \text{ mH}$, $C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10mF$, $R_C =25\Omega$)

Les figures V.16.* présentent les résultats de performance de la cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux ; en boucle fermée de la tension de sortie de chaque redresseur MLI à trois niveaux. Cette cascade est appliquée à la conduite de la machine asynchrone triphasée. Les redresseurs MLI à trois niveaux sont commandés par la stratégie d'hystérésis ($\epsilon_k=0.001A$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$).

La figure V.16.a présente les tensions continues moyennes de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux $\{U_{C\ moy\ 1} (U_{C\ moy\ 1} = \frac{U_{C1} + U'_{C1}}{2}), U_{C\ moy\ 2} (U_{C\ moy\ 2} = \frac{U_{C1} + U_{C2} + U'_{C1} + U'_{C2}}{2}) \text{ et } U_{C\ moy\ 3} (U_{C\ moy\ 3} = \frac{U_{C1} + U_{C2} + U_{C3} + U'_{C1} + U'_{C2} + U'_{C3}}{2})\}$. Ces tensions continues ($U_{C\ moy\ 1}, U_{C\ moy\ 2}, U_{C\ moy\ 3}$) suivent leurs références imposées par les boucles d'asservissement, et rejettent la perturbation du couple de charge. Néanmoins, ces tension présentent des pics de tension allant jusqu'à $10\% \cdot U_{refi}$; pendant le régime transitoire (démarrage et inversion du sens de rotation de la MAS). Les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux ($U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}, U'_{C1}, U'_{C2}, U'_{C3}$) sont stables et égales (Fig. V.16.b). Chaque tension continue suit sa référence imposée par la cellule du pont de clamping correspondante avec une erreur statique allant jusqu'à 5%. A cet effet, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension stable et pratiquement uniforme grâce à l'égalité des différents paliers de tension continue qui constituent une parfaite onde sinusoïdale (Fig.V.14.c). Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent leurs références sinusoïdaux, et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.V.16.d). La figure V.16.e présente les courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux. La figure V.16.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants ($I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}, I_{d4}, I_{d5}, I_{d6}$) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension, et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}, I_{d2} \approx -I_{d5}, I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées aux figures V.16.g,h,i.

- Simulation numérique



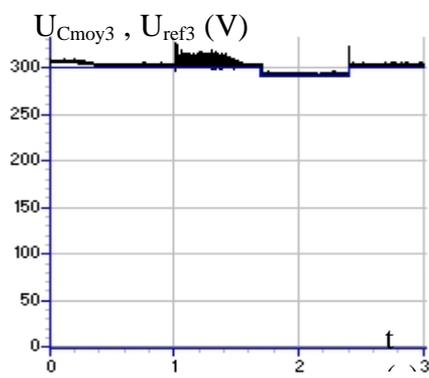


Fig.V.16.a. Tensions moyennes de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux

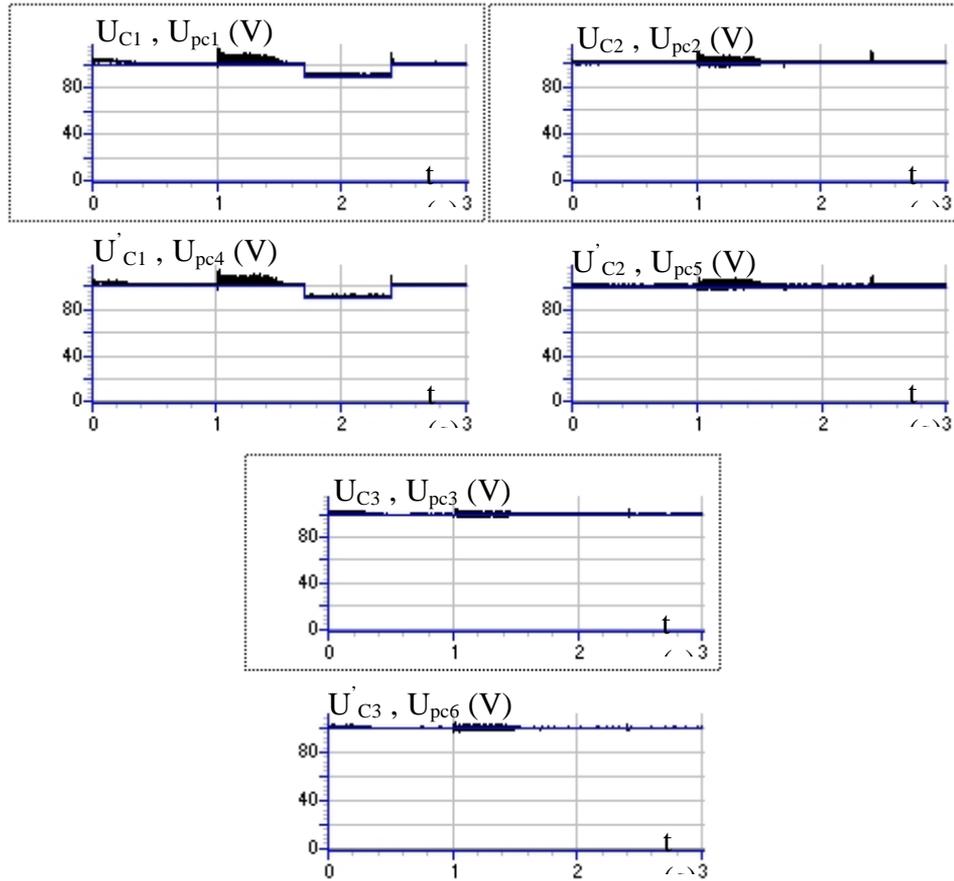


Fig. V.16.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

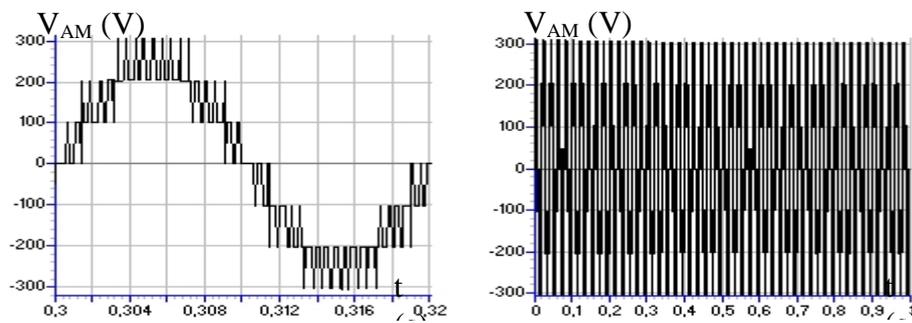


Fig. V.16.c. Tension de sortie de l'onduleur

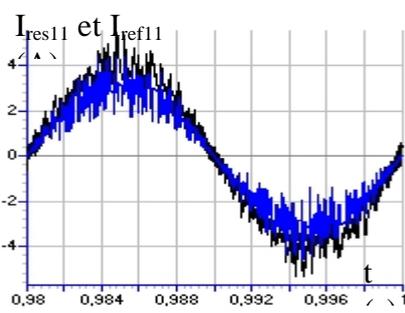


Fig. V.16.d. Courant du réseau et sa référence

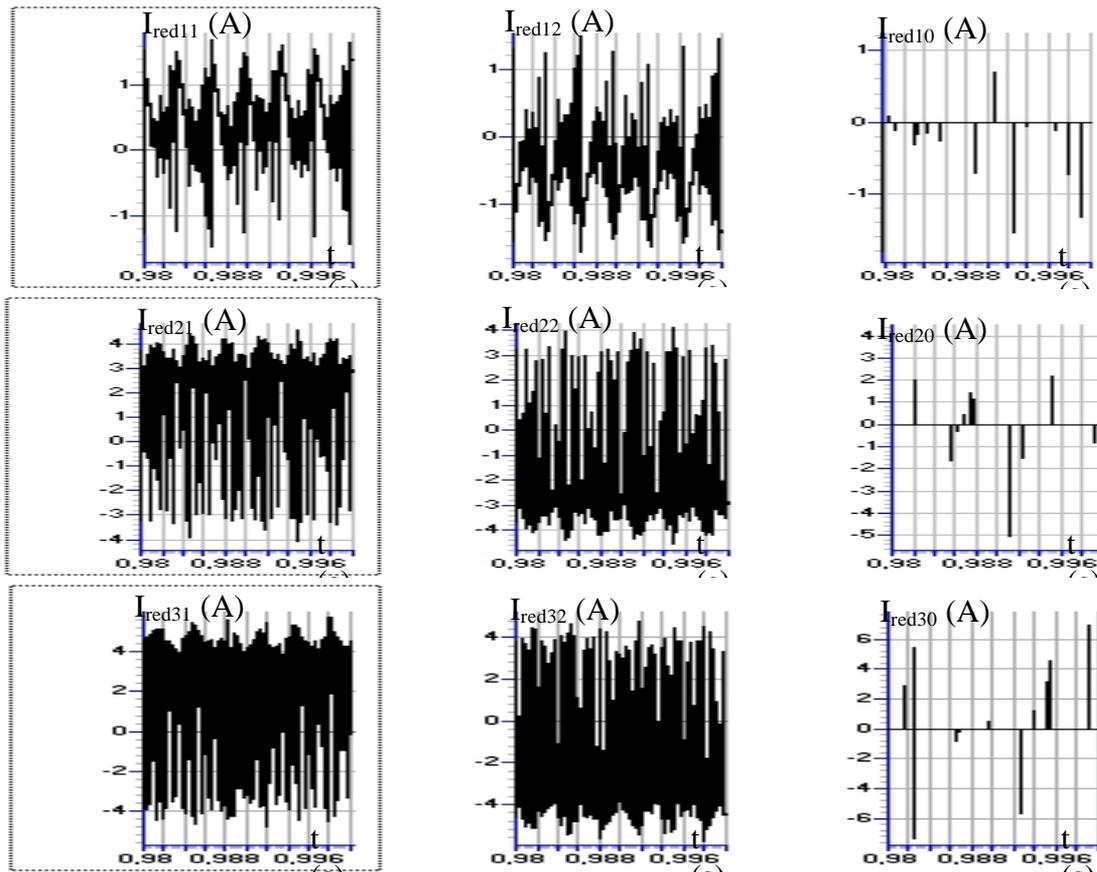
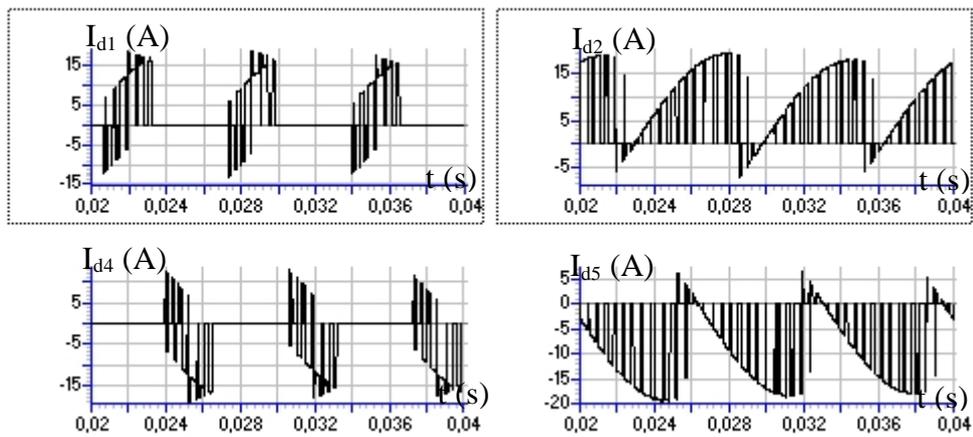


Fig. V.16.e. Courants de sortie des redresseurs MLI à trois niveaux



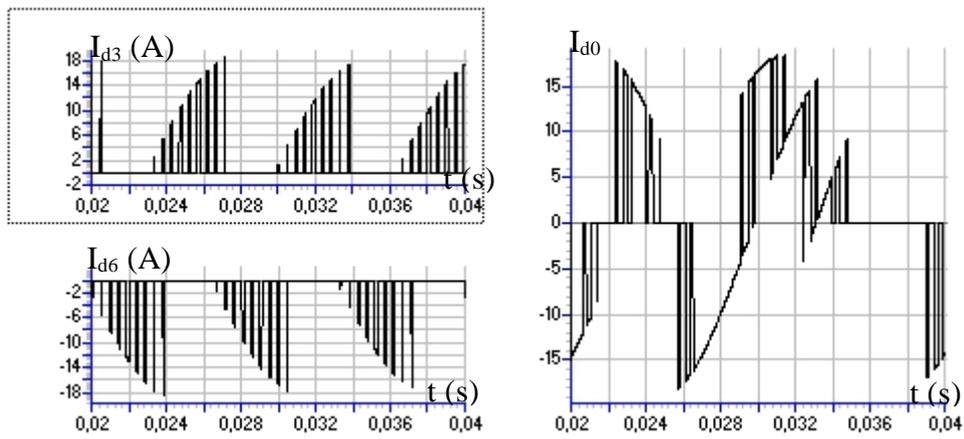


Fig. V.16.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

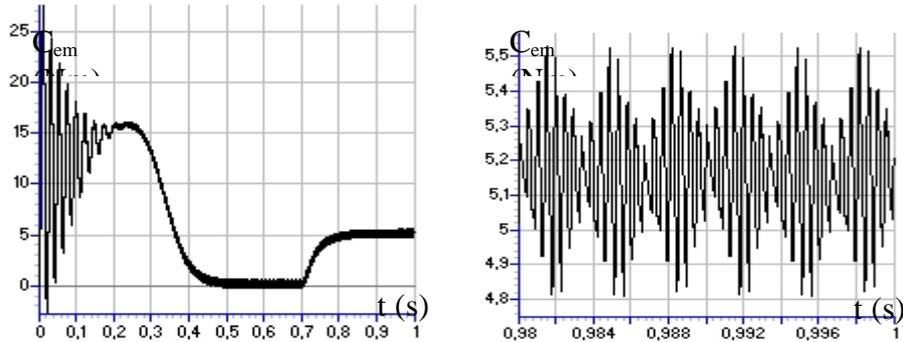


Fig.V.16.g. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

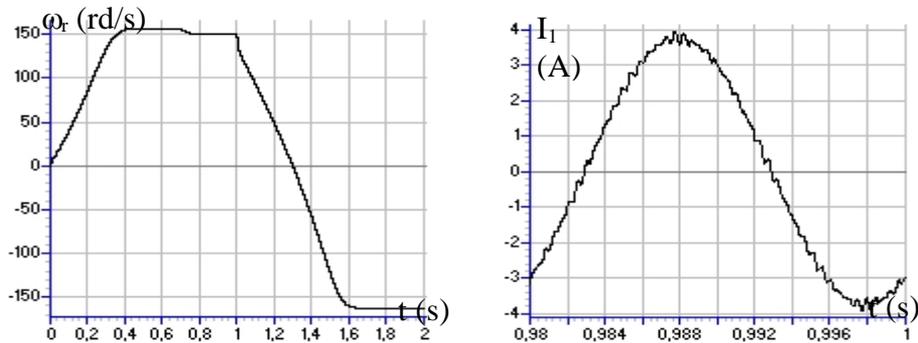


Fig.V.16.h. Vitesse de la machine asynchrone

Fig.V.16.i. Courant d'une phase de la MAS

III. Cascade redresseur de courant à MLI triphasé à sept niveaux - pont de clamping - onduleur triphasé à sept niveaux

On examine dans cette partie en boucle fermée; la cascade constituée d'un redresseur MLI triphasé à sept niveaux, le pont de clamping et l'onduleur de tension NPC triphasé à sept niveaux. Cette cascade est appliquée à la conduite de la machine asynchrone triphasée.

III.1. Cascade un redresseur MLI à sept niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

La structure de la cascade est donnée par la figure V.17.

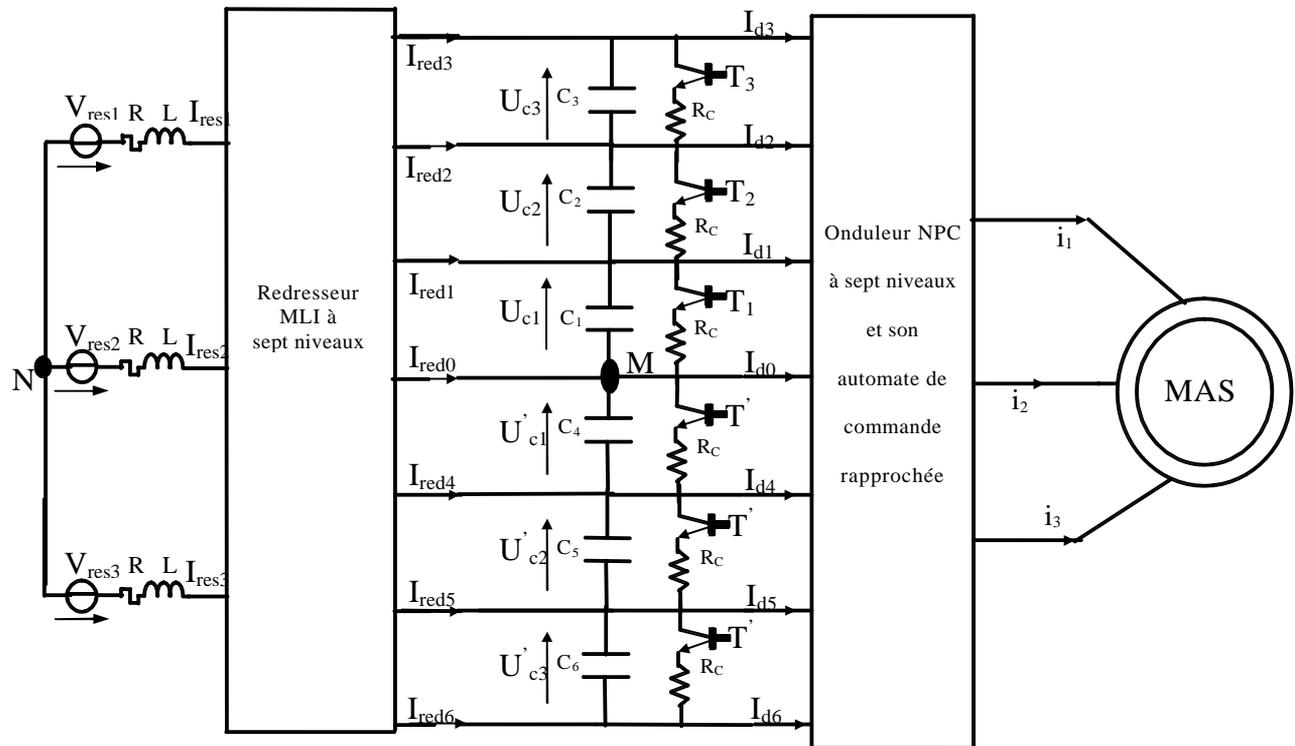


Fig.V.17. cascade un redresseur MLI à sept niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

$$(V_{\text{res-eff}}=220\text{V}, R=0.25\Omega, L=10 \text{ mH}, C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6=10\text{mF}, R_c =25\Omega)$$

La tension de référence de la boucle d'asservissement du redresseur MLI à deux niveaux est définie par :

$$U_{\text{ref}} = \begin{cases} 100\text{V} & \text{if } t < 1.6\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 90\text{V} & \text{if } t \in [1.6\text{s}, 2.4\text{s}] \end{cases}$$

Les tensions de limitation de charge du pont de clamping (U_{pci}) sont définies comme suit :

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités C_1 et C_4 :

$$U_{\text{PC1,4}} = U_{\text{PC}} = \begin{cases} 100\text{V} & \text{if } t < 1.6\text{s} \text{ et } t > 2.4\text{s} \\ 90 \text{ V} & \text{if } t \in [1.6\text{s}, 2.4\text{s}] \end{cases}$$

- Pour les cellules du pont correspondantes aux capacités (C_2, C_3, C_5, C_6): $U_{\text{PC2,3,5,6}} = 100\text{V} = C^{\text{te}}$

Le couple de charge est défini par $Cr \{Cr=0 \text{ si } t(\text{s}) \in [0, 0.7]; Cr=5\text{Nm} \text{ si } t(\text{s}) > 0.7\}$.

Les figures V.18.* présentent les résultats de performance de la cascade un redresseur MLI à sept niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux; en boucle fermée de la tension de sortie du redresseur à sept niveaux. Cette cascade est appliquée à la conduite de la machine asynchrone

triphasée. Le redresseur MLI à sept niveaux est commandé par la stratégie d'hystérésis ($\varepsilon_k=0.01\text{A}$). L'onduleur à sept niveaux est commandé par la stratégie de modulation calculée ($r=0.8, m=42$).

La figure V.18.a présente la tension continue moyenne de sortie du redresseur MLI à sept niveaux $\{U_{C_{moy}} (U_{C_{moy}} = \frac{U_{C1} + U_{C2} + U_{C3} + U'_{C1} + U'_{C2} + U'_{C3}}{6})\}$. Cette tension suit parfaitement sa référence imposée par la boucle d'asservissement, et rejette la perturbation du couple de charge. Ainsi, le comportement de la tension moyenne du redresseur MLI à sept niveaux est pratiquement dépourvu du régime transitoire (Fig.V.18.a). Les tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux (U_{C1} , U_{C3} , U'_{C1} , U'_{C3}) deviennent stables et égales après un régime transitoire qui se manifeste par un retard généré par la structure du pont de clamping ($\tau=R_C.C$) (Fig. V.18.b). Les tensions : U_{C2} et U'_{C2} ; suit parfaitement leur références imposées par le pont de clamping, avec l'élimination pratiquement parfaite du régime transitoire (Fig. V.18.b). A cet effet, l'onduleur à sept niveaux génère une onde de tension non sinusoïdale mais symétrique pendant le régime transitoire (Fig.V.18.c). Grâce à la stabilité et l'égalité des différents paliers de tension continue après le régime transitoire, l'onduleur génère une tension stable et pratiquement uniforme (Fig.V.18.c), ce qui permet d'avoir une parfaite onde de tension sinusoïdale. Les courants I_{resk} du réseau triphasé suivent leurs références sinusoïdales I_{refk} , et sont en phase avec les tensions V_{resk} (Fig.V.18.d). La figure V.18.e présente les courants de sortie du redresseur MLI à sept niveaux (I_{red1} , I_{red2} , I_{red3} , I_{red4} , I_{red5} , I_{red6}). Ces courants sont inversement égales par paire ($I_{red1} \approx -I_{red4}$, $I_{red2} \approx -I_{red5}$, $I_{red3} \approx -I_{red6}$). La valeur moyenne du courant I_{red0} est pratiquement nulle. La figure V.18.f montre les courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux. Ces courants (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6}) ont pratiquement des fréquences trois fois celle de la tension et inversement égales par paire ($I_{d1} \approx -I_{d4}$, $I_{d2} \approx -I_{d5}$, $I_{d3} \approx -I_{d6}$). La valeur moyenne du courant I_{d0} est pratiquement nulle. Les grandeurs de la machine asynchrone triphasée (couple, vitesse et le courant) sont présentées aux figures V.18.g,h,i.

- Simulation numérique

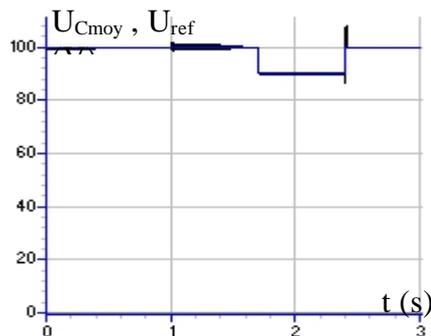


Fig.V.18.a. Tension moyenne de sortie du redresseur à sept niveaux

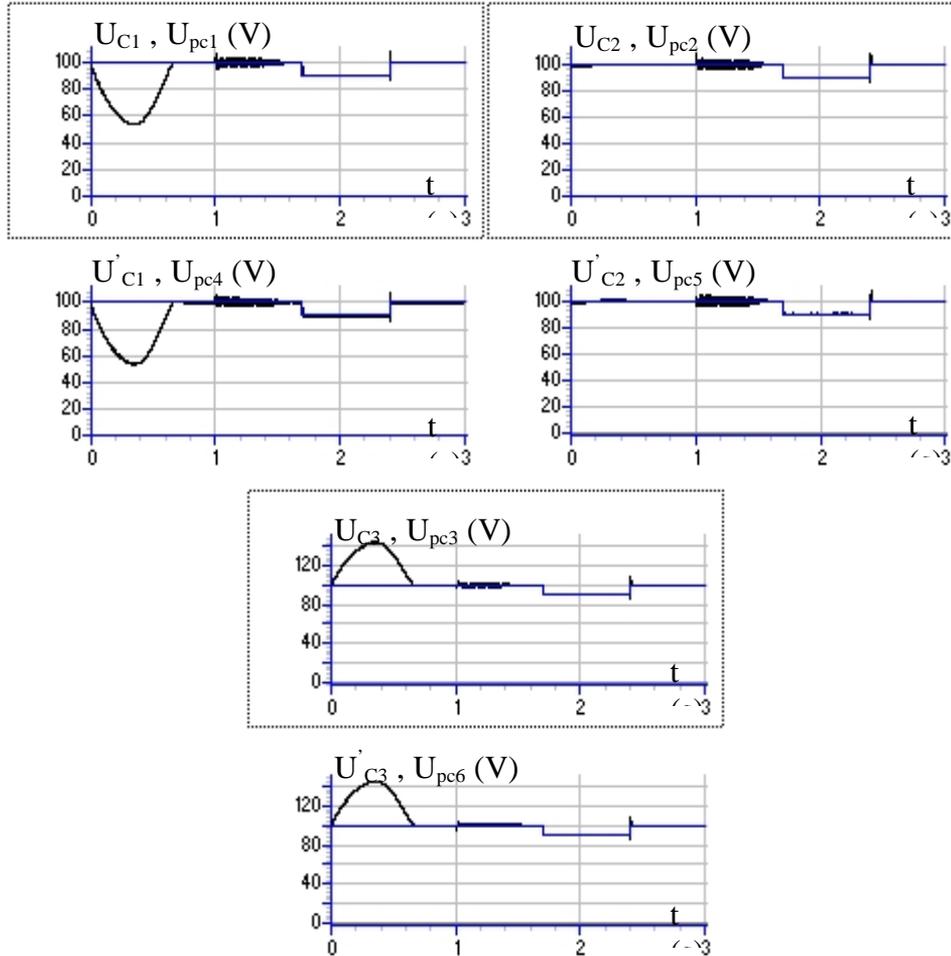


Fig.V.18.b. Tensions continues d'entrée de l'onduleur

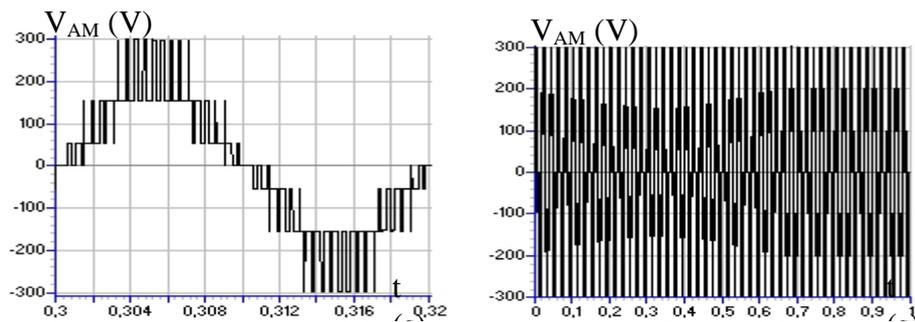


Fig.V.18.c. Tension de sortie de l'onduleur

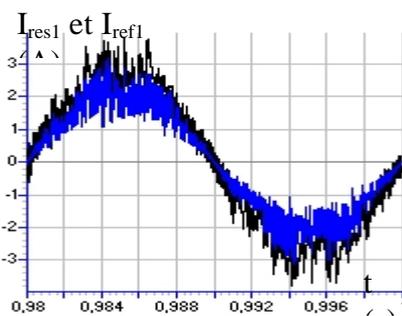


Fig.V.18.d. Courant du réseau et sa référence

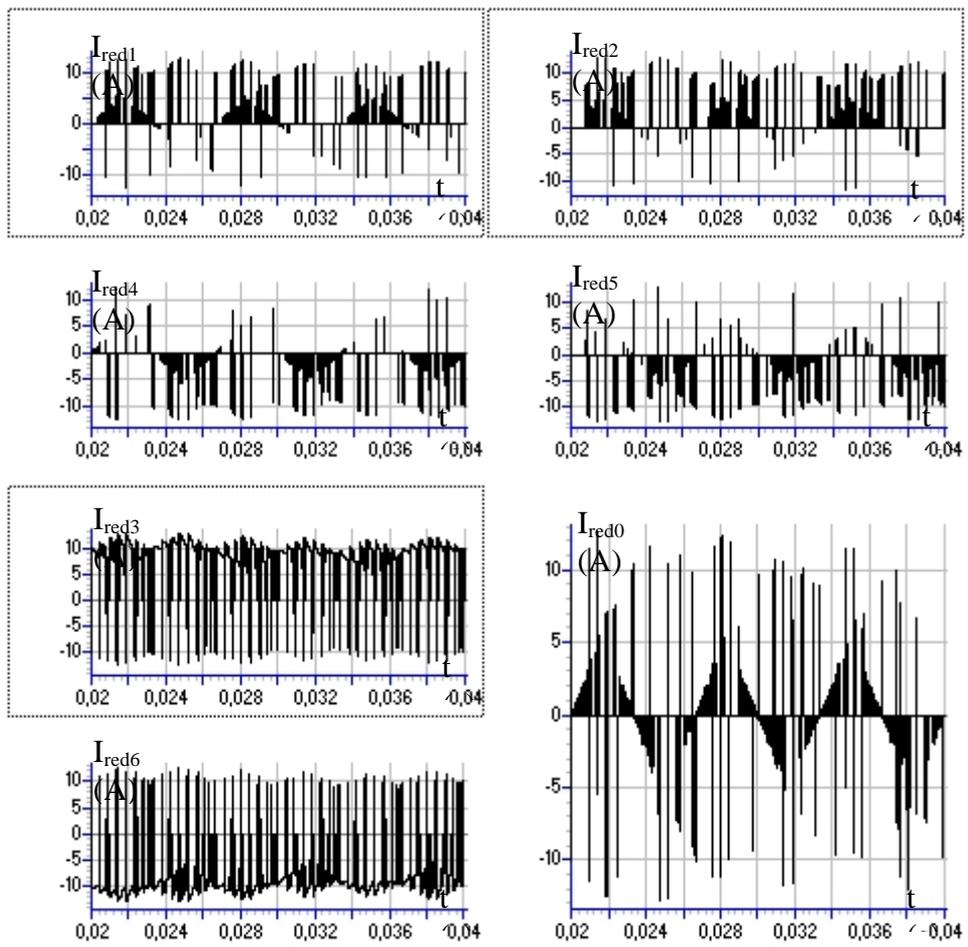
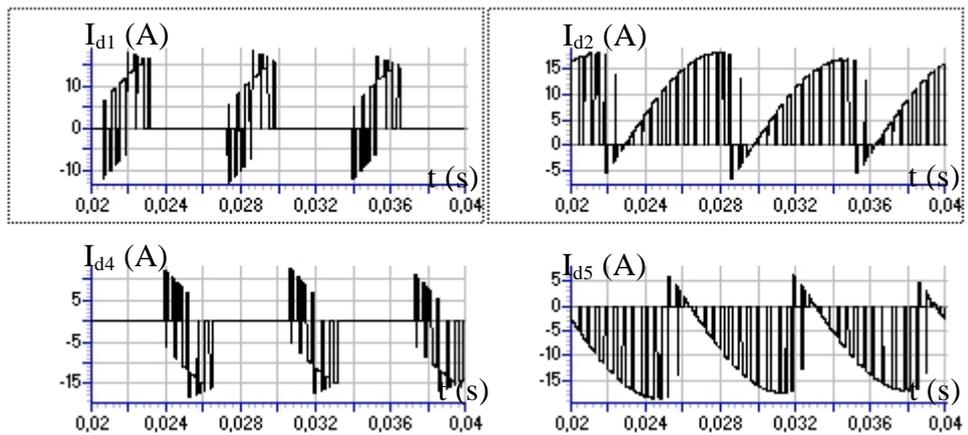


Fig.V.18.e. Courants de sortie du redresseur sept niveaux



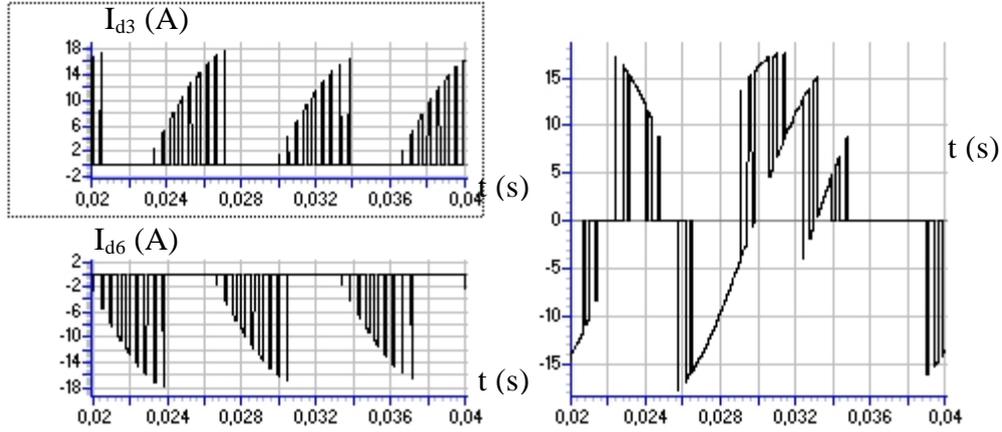


Fig.V.18.f. Courants d'entrée de l'onduleur à sept niveaux

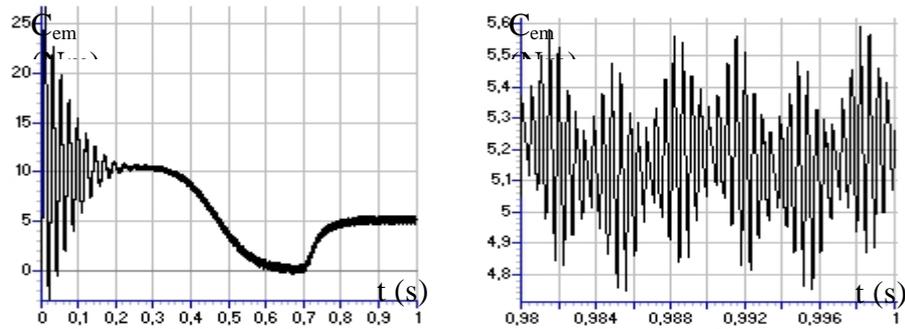


Fig.V.18.g. Couple électromagnétique de la machine asynchrone

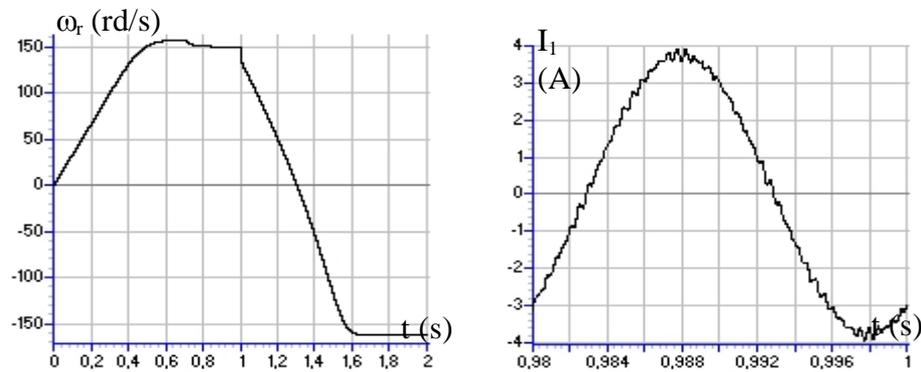


Fig.V.18.h. Vitesse de la machine asynchrone

Fig.V.18.i. Courant d'une phase de la MAS

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la stabilité des tensions continues de l'onduleur à sept niveaux avec des condensateurs de capacités réduites. A cet effet, nous avons examiné les performances de toutes les structures de cascade proposées au chapitre II, en introduisant le pont de clamping avec l'application des algorithmes d'asservissement des redresseurs MLI (à deux et multiniveaux) élaborés. Ainsi, on note :

1- Pour le cas des cascades ayant un, deux et trois redresseurs MLI à deux niveaux (association série):

- Les tensions continues présentent un régime transitoire qui se manifeste par des pics de tension importants, et un retard généré particulièrement par la structure du pont de clamping ($\tau=R_C.C$). Ces tensions deviennent stables et égales après le régime transitoire.
- Déformation de la tension de sortie de l'onduleur pendant le régime transitoire; suite à l'instabilité et l'inégalité des tensions continues.
- Déformation des courants du réseau et la dégradation du facteur de puissance.

2- Pour le cas de la cascade à six redresseurs MLI à deux niveaux :

- Les tensions continues ne présentent aucun régime transitoire, et sont stables avec un partage égal des tensions sur les différents niveaux de l'onduleur.
- Une tension de sortie de l'onduleur stable et pratiquement sinusoïdale par l'uniformité des niveaux de tensions continues.
- Des courants du réseau ayant des formes proches des sinusoides.

3- Le comportement de la cascade à trois redresseurs MLI à deux niveaux imbriqués présente des performances similaires à celle de la cascade à six redresseurs mis en série. Néanmoins, on note la mauvaise qualité des courants du réseau et la dégradation du facteur de puissance.

L'analogie du modèle de la boucle d'asservissement des redresseurs multiniveaux avec celui des redresseurs à deux niveaux, en utilisant la notion de tension moyenne redressée est prouvée par la ressemblance du comportement des tensions continues. Ainsi, cette analogie est vérifiée pour le cas des cascades à redresseurs MLI à trois et sept niveaux avec les cascades à redresseurs MLI à deux niveaux à nombre équivalent. Ainsi, on note :

1- Le comportement des cascades à un redresseur MLI à trois niveaux ou à sept niveaux est similaire avec celui de la cascade à un redresseur MLI à deux niveaux, à savoir :

- Les tensions continues ($U_{C1}, U'_{C1}, U_{C3}, U'_{C3}$) présentent un régime transitoire avec un retard de la réponse généré par la structure du pont de clamping ($\tau=R_C.C$). Ces tensions deviennent stables et égales après le régime transitoire.
- Les tensions continues : U_{C2} et U'_{C2} ; sont stables et pratiquement égales sans présence du régime transitoire.
- Déformation de la tension de sortie de l'onduleur pendant le régime transitoire ; suite à l'instabilité et l'inégalité des tensions continues.

2- Le comportement de la cascade à trois redresseurs MLI à trois niveaux mis en série est similaire à celle de la cascade à trois redresseurs MLI à deux niveaux mis en série, à savoir :

- Les tensions continues ($U_{C2}, U'_{C2}, U_{C3}, U_{C3}$) présentent un régime transitoire avec un retard de la réponse généré par la structure du pont de clamping ($\tau=R_C.C$). Ces tensions

deviennent stables et égales après le régime transitoire. Néanmoins, la tension U_{C2} présente une erreur statique d'ordre 5%.

- Les tensions continues : U_{C1} et U'_{C1} ; sont stables et égales sans présence du régime transitoire.
- Déformation de la tension de sortie de l'onduleur pendant le régime transitoire suite à l'instabilité et l'inégalité des tensions continues.

3- La cascade à trois redresseurs MLI à trois niveaux imbriqués présente des performances identiques avec celles de la cascade à trois redresseurs à deux niveaux imbriqués; à savoir une stabilité pratiquement parfaite avec une égalité de partage des tensions continues. Néanmoins, cette cascade permet d'avoir des courants du réseau proches des sinusoïdes, et un facteur de puissance proche de l'unité.

Ainsi, l'application des algorithmes d'asservissement avec l'introduction du pont de clamping dans les différentes structures de cascade proposées, montre l'insensibilité des tensions continues à la perturbation du couple de charge (C_r) de la machine asynchrone.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à l'alimentation continue des associations à onduleurs multiniveaux et la machine asynchrone triphasée. Afin d'aborder cette étude, nous avons commencé par présenter le modèle de la machine asynchrone triphasée en vue d'une alimentation par convertisseur statique. Dans ce modèle, nous avons appliqué la transformation de Park liée au champ tournant. Pour des applications nécessitant des performances de plus en plus importantes tant en puissance et en qualité de la tension délivrée, nous avons proposé d'étudier l'alimentation de la machine asynchrone par onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC. Ainsi, nous avons commencé par présenter le modèle de commande de cet onduleur : nous avons montré en particulier que l'utilisation des fonctions de connexion des demi-bras permet d'avoir l'analogie du modèle de commande des onduleurs à sept niveaux avec ceux à trois et à deux niveaux. Deux stratégies de commande utilisant ce modèle ont été élaborées en vue d'une implémentation numérique. Ces stratégies de commande donnent des couples et des courants de fréquence six fois ou trois fois celle des tensions de sortie. Dans l'étape suivante, nous avons étudié les différentes structures de cascade ayant les redresseurs MLI (à deux, à trois et à sept niveaux) comme pont d'entrée, et pour pont de sortie l'onduleur à sept niveaux. Ces cascades sont appliquées à la conduite de la machine asynchrone triphasée. On a analysé en particulier les cascades suivantes :

- * Cascade un redresseur MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
- * Cascade deux redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
- * Cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
 - 1- trois redresseurs MLI à deux niveaux en série
 - 2- trois redresseurs MLI à deux niveaux imbriqués
- * Cascade six redresseurs MLI à deux niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
- * Cascade un redresseur MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
- * Cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS
 - 1- trois redresseurs MLI à trois niveaux en série
 - 2- trois redresseurs MLI à trois niveaux imbriqués
- * Cascade un redresseur MLI à sept niveaux - onduleur NPC à sept niveaux - MAS

Cette étude a montré :

- L'instabilité des sources de tension continue de l'onduleur à sept niveaux malgré l'utilisation des condensateurs de capacité importante ($C_{i=1,6} = 60 \text{ mF}$). Ce problème est plus accentué pour le cas des cascades à un seul redresseur MLI à deux niveaux (alimentation sans point milieu relié au point M).

- Les tensions continues du demi-pont capacitif supérieur de l'onduleur multiniveaux sont égales avec celles du demi-pont inférieur pour le cas des cascades ayant plus d'un redresseur MLI à deux niveaux.
- La possibilité d'utiliser les onduleurs de tension multiniveaux à structure NPC en redresseurs de courant.

Le comportement instable des sources de tension continue présente des risques certains pour les cascades, et particulièrement sur l'onduleur multiniveaux ; à savoir la destruction des composants semi-conducteurs (GTO ou IGBT) par le dépassement de la tension de blocage maximale des semi-conducteurs, et la répartition non égale des courants traversant ces composants. Pour résoudre ce problème, nous avons élaboré des algorithmes d'asservissement appliqués aux redresseurs MLI (à deux, trois et sept niveaux). Ainsi, nous avons étudié en boucle fermée les différentes cascades proposées dans le chapitre II. Les performances de ces cascades ont montré :

- L'état du comportement des sources de tension continue de l'onduleur à sept niveaux change selon la structure de la cascade. En effet, on distingue deux principaux cas :
 - 1^{er} cas : la stabilité et l'égalité pratiquement parfaite des tensions continues d'entrée de l'onduleur pour les cascades suivantes :
 - cascade à six redresseurs MLI à deux niveaux.
 - cascade à trois redresseurs MLI (à deux, et à trois niveaux) imbriqués.
 - 2^{eme} cas : Pour le reste des cascades, on note l'instabilité des tensions en régime transitoire. Elles se stabilisent en régime permanent mais sans être égales.
- La limite de stabilité des tensions continues en fonction de la capacité des condensateurs, avec le risque d'inversion de la polarité des tensions continues pour de faibles valeurs des capacités ($C_{i=1,6} < 20 \text{ mF}$).
- La qualité médiocre des courants du réseau (TDH élevés).

Ainsi, la stabilité des tensions redressées obtenue par l'application des algorithmes d'asservissement des redresseurs MLI ne produit pas toujours des tensions continues constantes et également réparties sur tous les niveaux de l'onduleur à sept niveaux. Cependant, la condition de stabilité avec l'égalité de partition des tensions continues est fondamentale afin d'avoir les performances requises par les convertisseurs de puissances multiniveaux à savoir : la tension de sortie sinusoïdale, le faible taux d'harmoniques des courants et couple de la machine asynchrone,..etc. Pour résoudre le problème d'inégalité de partage des tensions continues de l'onduleur à sept niveaux, nous avons proposé un mécanisme d'équilibrage des tensions par le pont de clamping. L'étude du comportement du pont de clamping, nous a mené à analyser les performances en boucle ouverte de l'ensemble des cascades proposées dans le chapitre II, en incluant le pont de clamping. Les performances de ces cascades ont montré :

- Le pont de clamping trouve son intérêt uniquement pour le cas des cascades à structure série avec des capacités réduites ($C_{i=1,6}=10 \text{ mF}$).

- Une bonne stabilité et un partage égal des tensions continues après des régimes transitoires dus à la forte interaction de la machine avec son alimentation en cascade.
- La structure du pont de clamping génère un retard caractérisé par une constante de temps importante ($\tau=R_C.C$) au niveau de la réponse des tensions continues d'entrée de l'onduleur à sept niveaux.
- Les courants du réseau sont sinusoïdaux, avec un facteur de puissance proche de l'unité.
- Le rejet parfait de la perturbation du couple de charge (C_r).

Afin d'élargir le champ de stabilité avec l'égalité de partage des tensions continues, en utilisant des capacités réduites ($C_{i=1,6}=10$ mF) pour les différents changeurs de fréquence à onduleur sept niveaux comme pont de sorite, nous avons proposé une solution composée. Cette solution est un assemblage de l'asservissement des redresseurs MLI (à deux, trois et sept niveaux) et le pont de clamping. Ainsi, les performances de toutes les cascades obtenues avec cette solution montrent :

- Pour le cas des cascades ayant un, deux et trois redresseurs MLI à deux niveaux (association série):
 - Les tensions continues présentent un régime transitoire qui se manifeste par des pics importants, et un retard généré par la structure du pont de clamping ($\tau=R_C.C$). Ces tensions deviennent stables et égales après le régime transitoire.
 - Déformation des courants du réseau et la dégradation du facteur de puissance.
- Pour le cas de la cascade à six redresseurs MLI à deux niveaux :
 - Les tensions continues ne présentent aucun régime transitoire, et sont stables avec un partage égal des tensions continues sur tous les niveaux de l'onduleur.
 - Des courants du réseau ayant des formes proches des sinusoïdes.
- Le comportement de la cascade à trois redresseurs MLI à deux niveaux imbriqués présente des performances similaires à celle de la cascade à six redresseurs. Néanmoins, on note la mauvaise qualité des courants du réseau et la dégradation du facteur de puissance.

L'analogie du modèle de la boucle d'asservissement des redresseurs multiniveaux avec celui des redresseurs à deux niveaux, en utilisant la notion de tension moyenne redressée est prouvée par la ressemblance du comportement des tensions continues. Ainsi, cette analogie est vérifiée pour le cas des cascades à redresseurs MLI à trois ou sept niveaux avec les cascades à redresseurs MLI à deux niveaux à nombre équivalent. Ainsi, on note :

- Le comportement des cascades à un redresseur MLI à trois niveaux ou à sept niveaux est similaire avec celui de la cascade à un redresseur MLI à deux niveaux :
 - Les tensions continues (U_{C1} , U'_{C1} , U_{C3} , U'_{C3}) présentent un régime transitoire avec un retard de la réponse généré par la structure du pont de clamping ($\tau=R_C.C$). Ces tensions deviennent stables et égales après le régime transitoire.
 - Les tensions continues : U_{C2} et U'_{C2} ; sont stables et pratiquement égales sans présence du régime transitoire.

- Le comportement de la cascade à trois redresseurs MLI à trois niveaux mis en série est similaire à celle de la cascade à trois redresseurs MLI à deux niveaux mis en série, à savoir :
 - Les tensions continues (U_{C2} , U'_{C2} , U'_{C3} , U_{C3}) présentent un régime transitoire avec un retard de la réponse généré par la structure du pont de clamping ($\tau=R_C.C$). Ces tensions deviennent stables et égales après le régime transitoire. Néanmoins, la tension U'_{C2} présente une erreur statique d'ordre 5%.
 - Les tensions continues : U_{C1} et U'_{C1} ; sont stables et égales sans présence du régime transitoire.
- La cascade à trois redresseurs MLI à trois niveaux imbriqués présente des performances similaires avec celles de la cascade à trois redresseurs à deux niveaux imbriqués; à savoir une stabilité pratiquement parfaite avec une égalité de partage des tensions continues. Néanmoins, cette cascade permet d'avoir des courants du réseau proches des sinusoides, et un facteur de puissance proche de l'unité.
- L'application des algorithmes d'asservissement avec l'introduction du pont de clamping dans les différentes structures de cascade proposées, montre l'insensibilité des tensions continues à la perturbation du couple de charge (C_r).

Comme perspective à cette étude, nous proposons d'améliorer encore plus les performances des cascades proposées en matière de :

- Stabilité des tensions continues en introduisant une compensation de la constante de temps du pont de clamping ($\tau=R_C .C$) pour les cascades sensibles aux régimes transitoires.
- Qualité des courants absorbés par le réseau en introduisant l'asservissement échantillonné.
- Minimisation des pertes joules dans le pont de clamping.

Bibliographie

[Ben Romdhane 95.1] Y.B. Romdhane, E.M.Berkouk, F.Rabbouch, G.Manesse « Etude comparative des courants appelés au réseau par deux cascades de conversion à onduleur deux et trois niveaux » PRCR'95, France 95.

[Berkouk 95] E.M.Berkouk, « Contribution à la conduite des machines asynchrone monophasée et triphasée alimentée par des convertisseurs directs et indirects, application aux gradateurs et onduleur multiniveaux », Thèse de doctorat, CNAM 1998.

[Berkouk 95.1] E.M.berkouk, Y.B.Romdhane, G.Manesse, « High voltage rectifier -multilevel inverters cascade. Application to asynchronous machine field oriented control . »IEEE International Symposium on Electric power Engineering, SUEDE 1995.

[Berkouk 95.2] E.M.Berkouk, Y.B.Romdhane, G.Manesse, « Knowledge and control models for three level voltage inverters », IMACS'95, ALLEMAGNE 1995.

[Berkouk 95.3] E.M.berkouk, Y.B.Romdhane, G.Manesse, « PWM strategies to control three level inverter . Application to the induction motors drive », EPE'95 , Espagne 1995.

[Bose 86] P.K.Bose, « Power Electronics and AC Drives » Printice Hall, 1986.

[Boudjerda 93] N.boudjerda, « Etude et analyse des techniques MLI dérivées de la triangulo-sinusoidale : étude de leurs effets sur le comportement du moteur asynchrone alimenté par onduleur de tension », Thèse de magister ENP Alger 1993.

[Boussak 89] M.Boussak, « Contribution à la modélisation entrée sortie et l'identification parametrique des machines à induction », Thèse de doctorat, Paris VI, Paris 1989.

[Bowes 75] S.R.Bowes, and T.Davies, « Novel approach to the analysis of modulation processes in power convertors », IEE Proc, vol 122, N°5, Mai 1975.

[Bowes 85] S.R.Bowes, M.I.Mech, T.Davies, « Microprocessor-based developement system for PWM variable speed drives », IEE Proc, vol 132, January 1985.

[Carrere 95] P.Carrere, J.P.Lavieville, T.A.Meynard, « 4000V-300A eight-level IGBT inverter leg », EPE95, Espagne 1995.

[Chatelain 84] J. Chatelain, « Machine électriques » Tome 1 et 2, Ed dunod 1984.

[Chauvet 90] J.P.Chauvet, « Conception d'une commande rapprochée pour onduleur en tension à cinq niveaux », Memoire CNAM, Paris 1990.

[Degobert 94] P.Degobert, J.P.Hautier, « Sur une commande numérique de la machine asynchrone à flux statorique orienté », GDR CNRS, Paris 1994.

[Faucher 92] J.Faucher, M.Grandpierre, « Les graphes informationnels de causalité. Application à la simulation des systèmes Electriques », Journées EEA, Electrotechnique, CNAM , Paris 1992.

[Faucher 93] J.Faucher, « Quelques aspects de la modulation de largeur d'impulsion », France Fevrier 1993.

[Foch 93] H.Foch,A.Meynard, « Imbricated cells Multi-level voltage source inverter for high voltage application », EPE Journal,vol 3, N°2, Juin 1993.

[Gheraia 97] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse, «Commande de position par la méthode du flux orienté de la machine à induction de forte puissance alimentée par un onduleur NPC à 7 niveaux», AJOT International Publication , série B, Vol .13, N°1, 1997.

[Gheraia 98.1] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse, «Commande de position par la methode du flux orienté de la machine a induction de forte puissance alimentée par un onduleur NPC à sept niveaux »,SNAPSEA'98, Annaba ,Novembre1998.

[Gheraia 98.2] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse, « Commande d'un onduleur NPC à sept niveaux . Application a la conduite d'une machine asynchrone de forte puissance »,ICEL'98, Oran, October 1998.

[Gheraia 98.3] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse « Position control of an induction machine fed by a NPC seven level inverters » ICEM'98, Turkey 1998.

[Gheraia 99] H.Gheraia, «Modélisation et commande d'un onduleur NPC à sept niveaux. Application à la conduite d'une machine asynchrone triphasée», Thèse de magister, ENP 1999.

[Gheraia 99.1] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse «Fuzzy position control of an induction machine fed by a seven levels voltage source NPC inverter », CICEM'99, Chine 1999.

[Gheraia 99.2] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse «Knowledge and control models of seven levels voltage source inverters », ELECTRIMACS'99, Lisbon, Portugal 1999.

[Gheraia 99.3] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse «PWM strategies of a seven levels NPC inverter. Application to the induction machine drive », EPE'99, Lausanne, Suisse 1999.

[Gheraia 99.4] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse «Feedback control of the input DC voltage sources of the seven levels NPC voltage source inverter », IEEE'99, Africone 1999.

[Gheraia 99.5] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse «A high voltage two level PWM rectifier - seven levels NPC voltage source inverter - induction machine cascade», ELECTROMOTION '99, Greece 1999.

[Gheraia 2001] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse « Modelling and control models of a seven level NPC voltage source inverter. Application to high power induction machine drive», The European Physical Journal Applied physics. EDP Sciences 2001. Vol 15, N°2, 2001, pp 105-115.

[Gheraia 2002.1] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse «Control Strategies for the three-phase Seven-Level NPC Voltage Source Inverter », Electromotion Journal, Vol 9, N°1, 2002, pp 41-54.

[Gheraia 2002.2] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse «High voltage two PWM rectifiers - seven-level NPC voltage source inverter cascade. Application to the induction machine drive», ICEM'02, Brugge, Belgique 2002.

[Gheraia 2003] H.Gheraia,E.M.Berkouk,G.Manesse «High voltage three PWM rectifiers - seven-level NPC voltage source inverter cascade. Application to the induction machine drive», IEEE-IEMDC'03, Madison, USA 2003.

[Guillaud 92] X.Guillaud, « Sur la modélisation et la commande des redresseurs de courant à interrupteurs bicommandables », Thèse de doctorat, Lille 1992.

[Guillaud 94.1] X.Guillaud ,J.P.Hautier, « Concepts de modélisation pour la modélisation des convertisseurs », Journal physique 3, Avril 1994.

[Guillaud 94.2] X.Guillaud ,J.P. Hautier, « Modèle de commande d'un convertisseur monophasé », Journée SEE, Lille 1994.

[Hautier 89] J.P.Hautier et G.Manesse, « Utilisation des réseaux de Petri pour l'analyse des systèmes électrotechniques », Techniques de l'ingénieur traité Génie Electrique, CNAM Paris 1992.

[Hujeux 92] J.A.Hujeux, « Conception et réalisation d'un redresseur à modulation de largeurs d'impulsion », Memoire CNAM, Lille 1992.

[Jih-sheng Lai 96] Jih-sheng Lai, Fang Zheng Peng ,« Multilevel Converters-A New Breed of Power Converters »IEEE Transactions on industry application, Vol.32, NO.3, May/Juin 1996.

[Krause 86] P.C.Krause, « Analysis of Electrical Machinery » Mc.GRWHILL,1986.

[Kulkarny 87] A.B.Kulkarny ,J.W.Dixon,M.Nishimoto,B.Ooi, « Transient tests on a voltage regulated Controlled -Current PWM converter », IEEE Trans on Industrial Electronics, vol IE 34 n°3, Aout 1987.

[Levi 96] E.Levi,M.Sokola,A.Boglietti,and M.Pastorelli, « Iron Loss in Rotor-Flux-Oriented induction Machines : Identification, Assessment of Detuning, and Compensation », IEEE Transactions on power Electronics, vol.11,N° .5, September 1996.

[Lienart 89] P.Lienart, « Sur la commande rapproché d'une cascade réversible de deux convertisseurs statiques : modélisation et réalisation », Thèse de doctorat USTLFA, Lille 1989.

[Manesse 87] G.Manesse, « Sur une analyse fonctionnelle des groupements d'interrupteurs statiques. Extension à la modélisation des convertisseurs dans leur environnement de contrôle et de puissance », Thèse de doctorat ès sciences physiques, USTLFA, Lille 1987.

[Menzies 93] R.W.Menzies, P.Steimer, and J.K.Steinke, « Five level GTO inverters for large induction motor drives »in Conf Rec IEEE IAS Annu Meeting, 1993, pp.595 601.

[Mwinyiwiwa 97] B.Mwinyiwiwa,Z.Wolanski, yiqiang chen, and Boon-Teck Ooi « Multimodular Multilevel Converters with Input/Output Linearity »IEEE Transaction on industry Applications, vol.33,NO.5, September/October 1997.

[Nikolaus 98] Nikolaus P. Schibli, Tung Nguyen, and Alfred C. Rufer « A Three-Phase Multilevel Converter for High-Power Induction Motors » IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 13,NO. 5, Septembre 1998.

[Plateaux 94] J.P.Plateau, « Sur la conception et la réalisation d'un redresseur triphasé à modulation de largeur d'impulsions à faible pollution harmonique », Memoire CNAM, Paris 1994.

[Pouliquen 97] H.Pouliquen, P.Rioual, J.P.Louis « Régulation d'un redresseur MLI connecté a un réseau déséquilibré à partir d'un modèle généralisé » ISSN 1161-0581, EDF 1997.

[Rabbouch 95] F.Rabbouch, « Modelisation des convertisseurs en pont bidirectionnels en courant. Application au redressement et au filtrage », Thèse de doctorat, Paris VII, Paris 1993.

[Rahman 97] K.M.Rahman, M. Rezug khan, M.A.Choudhury,M.A.Rahman, « Variable-Band Hysteresis Current Controllers For PWM Voltage Source inverters »,IEEE Transactions on power Electronics,vol 12,N°6, November 1997.

[Rioval 93] P.Rioval , « Modelisation et commande d'un redresseur à MLI alimenté par un réseau déséquilibré », Thèse de doctorat, ENS Cachan 1993.

[Seguier 89] G. Seguier, F.Labrique, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance », Tome 4 :La conversion Continu-alternatif, Ed Lavoisier Tec & Doc 1989.

[Thomas 90] J.Thomas, « Contribution à la commande multivariable d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur MLI », Memoire d'ingenieur CNAM, Paris 1990.

Annexe I

1. Paramètres de la machine

Les données relatives de la machine asynchrone à cage utilisée pour la simulation sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tension	220 V/ 380 V
Courant nominal	6.7 A/ 3.7 A
Puissance	1.5 kW
Nombre de paires de pôles p	2
Résistance statorique par phase R_s	4.85 Ω
Résistance rotorique par phase ramenée au stator R_r	3.805 Ω
Inductance de fuite statorique L_{fs}	0.016 H
Inductance de fuite rotorique ramenée au stator L_{fr}	0.016 H
Inductance mutuelle cyclique stator-rotor M	0.258 H
Résistance équivalente au pertes fer R_{fe}	500 Ω
Moment d'inertie de la partie tournante J	0.031 Kg.m ²
Coefficient de frottement K_f	0.001136 Nm/rd/s
Vitesse nominale N_n	1420 tr/mn

Annexe II

Equilibrage des sources de tension continue de l'onduleur à sept niveaux utilisant le pont de clamping

Cette annexe donne quelques résultats importants de simulation numérique des cascades en boucles ouvertes; à trois redresseurs MLI (à deux et trois niveaux) mis en parallèle, le pont de clamping et l'onduleur à sept niveaux. On réalise la simulation de ces cascades avec les paramètres du pont de clamping suivantes : $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 10\text{mF}$, $R_c = 25\Omega$.

1- Cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux imbriqués - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS : La cascade correspondante à cette structure est présentée dans la figure AII.1. Nous avons

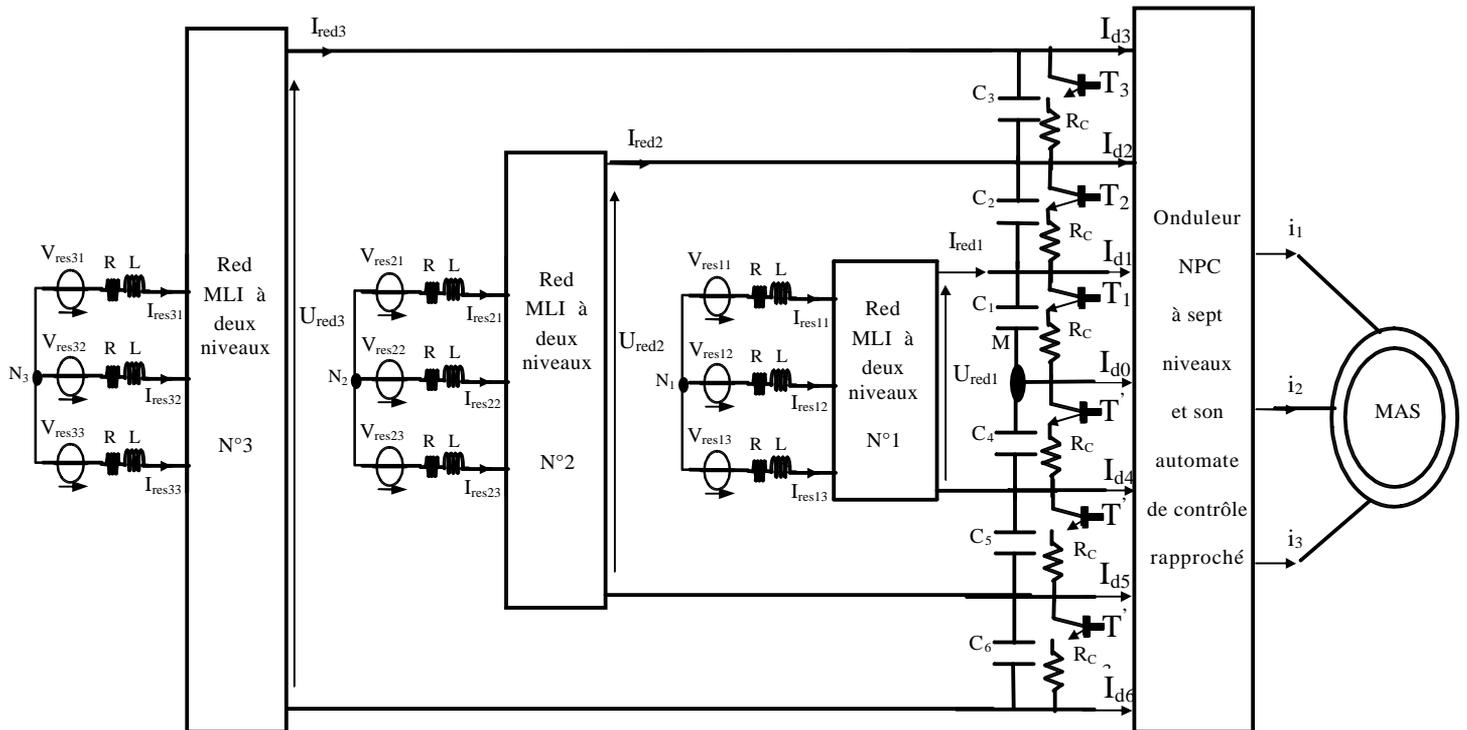


Fig.AII.1. cascade trois redresseurs MLI à deux niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux-MAS $V_{res1-eff}=(220/3)V$, $V_{res2-eff}=(220*2/3)V$, $V_{res3-eff}=220V$, $R=0.25\Omega$, $L=10\text{ mH}$

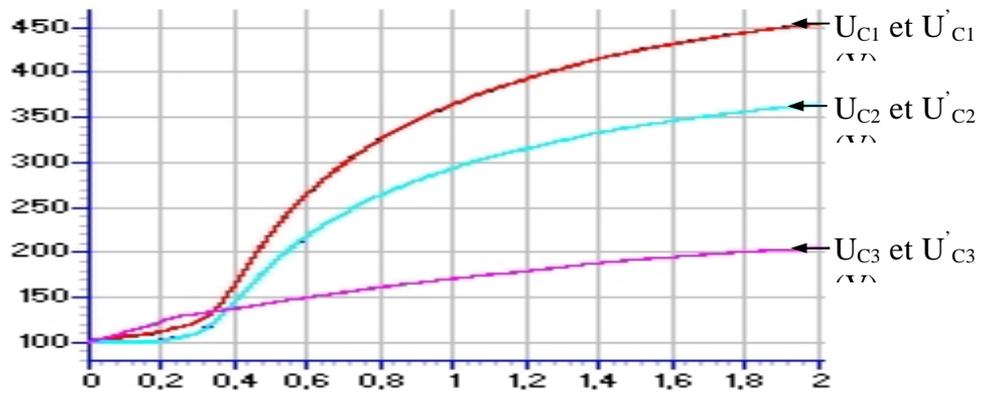


Fig.AII.2. Tensions continues d'entrée de l'onduleur NPC à sept niveaux

2- Cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux imbriqués - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux - MAS : La cascade correspondante à cette structure est présentée dans la figure AII.3.

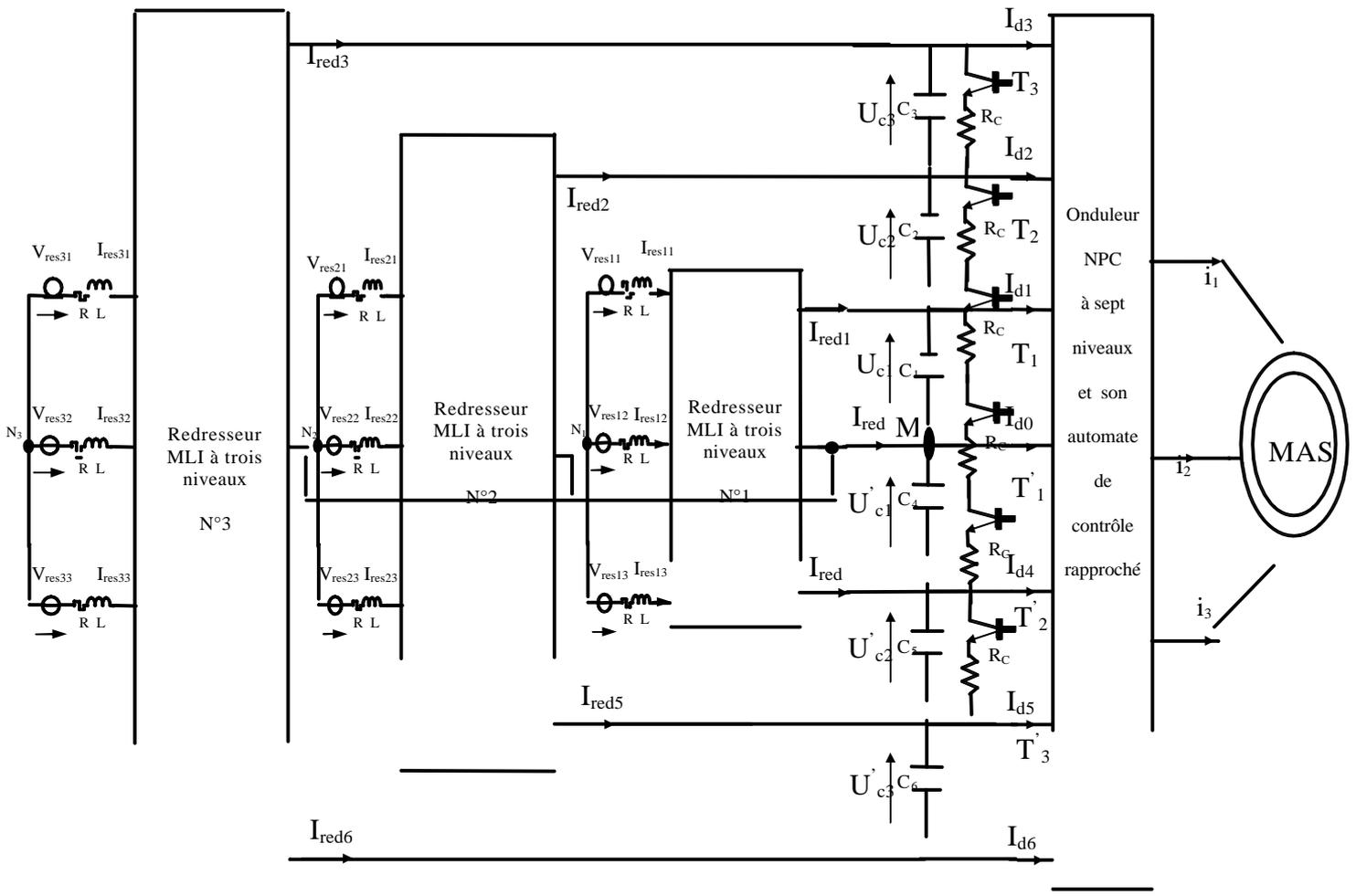


Fig.AII.3. cascade trois redresseurs MLI à trois niveaux - pont de clamping - onduleur NPC à sept niveaux-MAS $V_{res1-eff}=(220/3)V$, $V_{res2-eff}=(220*2/3)V$, $V_{res3-eff}=220V$, $R=0.25\Omega$, $L=10\text{ mH}$

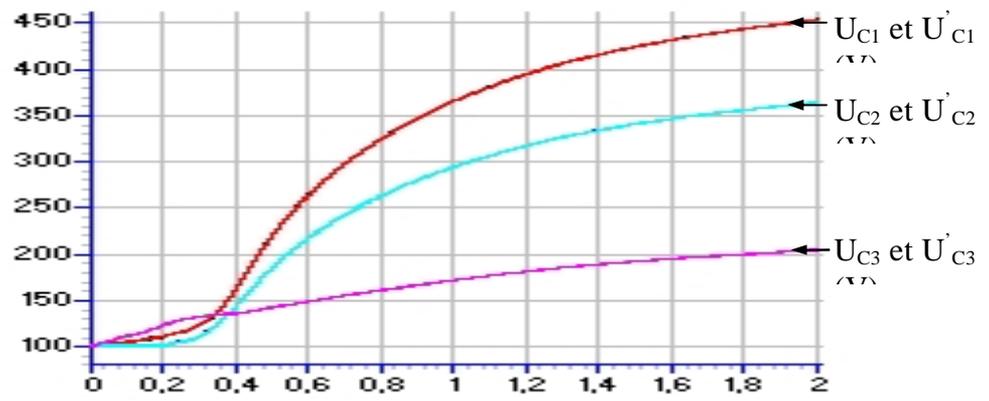


Fig.AII.4. Tensions continues d'entrée de l'onduleur NPC à sept niveaux

ملخص: من خلال هذه الدراسة، قمنا بمعالجة إمكانية إنشاء مخبر التوترات بموج ذو سبعة مستويات و تركيبية من النوع NPC مطبق على سلوك مكنة لا متزامنة ثلاثية الطور، لهذا الغرض، اقترحنا عدة تركيبات مختلفة لتتابع مقومات التيار ثلاثية الطور (ثنائية، ثلاثية، و سباعية المستوى) كمدخل لجسر التتابع، و موج ذو سبعة مستويات كمخرج للجسر. قمنا باستظهار على وجه الخصوص مشكلة عدم الاستقرار لمنبع الفولطية المستمرة للموج المتعدد المستويات. كحل لهذا الإشكال، قمنا بإيجاد خوارزميات لاستبعاد المقومات MLI، و التحليل للسيرة في نظام الحلقة المغلقة لكل التتابعات الممكنة و المقترحة يظهر نجاعة الاستبعاد لبعض تركيبات التتابع مع محدودية اختيار السعات. بغرض توسيع حقل الاستقرار لجميع التتابعات المقترحة قمنا بإدخال جسر التضييق. هذه الوسيلة للموازنة و المدرجة في جميع التركيبات للتتابعات المقترحة تسمح بالحصول على الاستقرار مع تساوي التقسيم لكل الفولطيات المستمرة و لكن بعد نظام الحلقة المخلفة لمقومات التيار تظهر تحسن معتبر لسلوك الفولطيات المستمرة لجميع التتابعات مع إمكانية الحصول على الاستقرار المثالي بسعات منخفضة.

كلمات مفتاحية: موج NPC، سبعة مستويات، ثلاثي الطور، نموذج معرفي، نموذج التحكم، مقوم التيار MLI، مغير التوتر، استبعاد، فولطية مستمرة، جسر التضييق، مكنة لا متزامنة، طاقة مرتفعة.

Résumé : a travers cette étude, nous avons traité la possibilité de réalisation d'un changeur de fréquence à onduleur NPC à sept niveaux, appliqué à la machine asynchrone triphasée. A cet effet, plusieurs structures de cascades ont été proposées ayant les redresseurs MLI (à deux, à trois et sept niveaux) comme pont d'entrée et pour pont de sortie l'onduleur à sept niveaux. Nous avons montré en particulier le problème d'instabilité des sources de tension continue de l'onduleur multi niveaux. Comme solution à ce problème, nous avons élaboré des algorithmes d'asservissement des redresseurs MLI. L'analyse en boucle fermée des performances de toutes les cascades proposées du pont d'entrée de l'onduleur. Afin d'élargir le champ de stabilité pour l'ensemble des cascades, nous avons introduit le pont de clamping. Ce mécanisme d'équilibrage incluse dans les différentes cascades proposées ; permet d'avoir la stabilité et l'égalité de partage des tensions continues après un certains regimes transitoires dû particulièrement à la structure du pont de clamping (Rc). L'étude en boucle fermée des cascades avec l'introduction du pont de clamping montre l'amélioration considérable du comportement des tensions continues pour l'ensemble des cascades, avec la possibilité d'avoir la stabilité parfaite utilisant des capacités réduites.

Mots clés : Onduleur NPC, Sept Niveau, Triphasé, Modèle de Connaissance, Modèle de Commande, Redresseur MLI, Changeur de Fréquence, Asservissement, Tension Continue, Pont de Clamping, Machine Asynchrone, Forte Puissance

Abstract : Through this study, we are treat the possibility to realize a frequency changer of NPC seven-level inverter applied to the induction machine drive. In fact, many structure of cascades are proposed which have PWM rectifiers (a two, three and a seven level) as an input bridge and the seven-level inverter as an output bridge. We have shown particularly the problem of instability of the DC voltage sources of the multilevel inverter. As solution to this problem, we have developed a feedback control of the PWM rectifiers. The performances of the différent cascades proposed in the closed loop show the effectiveness of the proposed solution only for some of cascades with a limit to choice of the capacité size of the input inverter bridge. In order to enlarge the stability range forv the whole of the cascades, we propose to introduce the clamping bridge. This equilibrate tool included in the différent casscades allows to have stability and equality of sharing all the DC voltages after a transient state due especially to the clamping bridge structure (Rc).The study in the closed loop of all the cascades including the clamping bridge show the \$important improvement of the behaviour of the DC link voltages for the whole of the cascades with the possibility to have a perfect stability by means of a low capacities.

Keys-Words : NPC Inverter, Seven Level, Three Phase, Knowledge Model, Control Model, PWM Rectifier, Frequency Converter, Enslavement, DC Voltage, Clamping Bridge, Induction Machine, High Power.