

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



UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D' ELECTROTECHNIQUE
MEMOIRE DE FIN D' ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D' INGENIEUR D' ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

THÈME

CONTRIBUTION A L' ETUDE D'UN
CONVERTISSEUR MULTINIVEAUX À DIODES
FLOTTANTES

Proposé et dirigé par :

Messier: GAAD. M^{ed}

Présentés par :

SALAH SALAHEDDINE
SOUIKEUR MOKHTAR

Année Universitaire: 2006/2007

Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme
d'ingénieur d'état en Génie Electrotechnique

Option : Electromécanique

Proposé et dirigé par Messier: GAAD M^{ed}

Présenté par : SALAH SALAHEDDINE et SOUIKEUR MOKHTAR

Thème :

Contribution à l'étude d'une nouvelle structure de convertisseur

Résumé :

Ce projet concerne l'étude d'une cascade redresseur-filtre-onduleur à neuf niveaux-machine asynchrone et propose une solution pour résoudre le problème de l'instabilité des tensions d'entrée de l'onduleur à neuf niveaux à diodes flottantes.

Dans la première partie traite de la modélisation d'un onduleur triphasé de tension à neuf niveaux à diodes flottantes et la simulation de quelques stratégies de commandes à savoir :

- Commande (MLI) à huit porteuses en dent de scie bipolaire.
- Commande (MLI) à huit porteuses en triangulaire bipolaire.

Dans la deuxième partie, on analysera la cascade sans asservissement des tensions d'entrée de l'onduleur et avec asservissement des ces tensions.

Mots clés : Onduleur de tension à neuf niveaux à diodes flottantes, redresseur de courant, Commande MLI, THD, Machine Asynchrone, filtre intermédiaire, Asservissement.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative scroll graphic with a grey shadow on the left side. The word "REMERCIEMENTS" is written in a stylized, black, serif font across the center of the scroll.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience , qu'il nous a donné durant toutes ces longues années .

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur M^{er}. Gaad Med pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département d'Electrotechnique qui a contribué à notre formation par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

Dédicace

Je dédie ce modeste & humble travail

*À mes chers parents, À mes frères, sœurs, oncles, tantes,
ainsi que leurs enfants, À tous les membres de ma grande famille.*

À tout mes profs qu'il m'ont appris durant toutes mes années d'étude.

*À tout les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un
jour un ingénieur d'état en électromécanique.*

*À tous mes collègues sans exception & à toutes les promos 2007 surtout
d'électromécanique.*

Je vous remercie tous

Saleh Salahedine

Dédicace

Je dédie ce modeste & humble travail

*A mes chers parents, A mes frères, ma sœur, oncles, tantes,
A tous mes amis que je ne vais pas nommer car ils sont nombreux &
je ne sais pas qui choisir.*

*A tous mes collègues sans exception & à toutes les promos 2007 surtout
d'électromécanique.*

Je vous remercie tous

Souikeur Mokhtar

Table des notation et symboles

1-Onduleur et redresseur :

MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
U_c (v)	Source de tension continue de l'onduleur.
V_{abcm} (v)	Tension de demi-bras A, B ou C
V_{abc} (v)	Tension de sortie de l'onduleur A, B ou C.
V_{ref123} (v)	Tension de référence 1, 2 ou 3 (sinusoïdal).
V_m (v)	Amplitude de la tension de référence.
V_p (v)	Porteuse triangulaire.
V_{pm} (v)	Amplitude de la porteuse triangulaire.
ω (rad/s)	Pulsation électrique .
f_{ref} (hz)	Fréquence de la tension de référence.
f_p (hz)	Fréquence de la porteuse triangulaire.
m	Indice de modulation.
r	Taux de modulation.
a	Nombre de phase
b	Nombre de niveaux

2- réseau électrique :

$K=(1,2\text{et}3)$	Les trois phases d'alimentation
V_{resK}	Tension du réseau triphasé
I_k	Courant du réseau triphasé
R	Résistance du réseau
L	Inductance du réseau
$V_{\lambda N}$ ($\lambda=a, b, c$)	Tension liée au bras k du redresseur

3- Machine asynchrone :

$a, b \text{ et } c$	Axes liés aux enroulements triphasés.
d, q	Axes de référentiel de Park.
$[P(\theta)]$	Matrice de Park.
Θ (rad)	Angle entre le stator et le rotor.

4- Grandeurs électriques et magnétiques au stator :

$V_s(v)$	Tension statorique.
$V_{sabc}(v)$	Tension statorique phase a, b ou c.
$V_{sdq}(v)$	Tension statorique sur l'axe d ou q.
$i_s(A)$	Courant statorique.
$i_{sabc}(A)$	Courant statorique phase a, b ou c.
$i_{sdq}(A)$	Courant statorique sur l'axe d ou q.
$R_s(\Omega)$	Résistance statorique par phase.
$L_s(H)$	Inductance propre statorique par phase.
$M_s(H)$	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
$L_s = l_s - M_s$	Inductance statorique par phase.
$\phi_{sabc}(wb)$	Flux statorique phase a, b ou c.
$\phi_{sdq}(wb)$	Flux statorique sur l'axe d ou q.

5-Grandeurs électriques et magnétiques au rotor :

$V_r(v)$	Tension rotorique.
$V_{rabc}(v)$	Tension rotorique phase a, b ou c.
$V_{rdq}(v)$	Tension rotorique sur l'axe d ou q.
$i_r(A)$	Courant rotorique.
$i_{rabc}(A)$	Courant rotorique phase a, b ou c.
$i_{rdq}(A)$	Courant rotorique sur l'axe d ou q.
$R_r(\Omega)$	Résistance rotorique par phase.
$l_r(H)$	Inductance propre rotorique par phase.
$M_r(H)$	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.
$L_r = l_r - M_r$	Inductance rotorique par phase.
$\phi_{rabc}(wb)$	Flux rotorique sur l'axe a,b ou c
$\phi_{rdq}(wb)$	Flux rotorique sur l'axe d ou q.
$M = (3/2)M_{sr}(H)$	Inductance mutuelle entre le stator et le rotor.
$M_{sr}(H)$	Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et rotor
P	Nombre de pôles.
$\omega(rad/s)$	Pulsation électrique rotorique.
$\Omega(rad/s)$	Vitesse mécanique rotorique.
σ	Coefficient de dispersion.

T_r	Constant de temps rotorique.
T_s	Constant de temps statorique.
$J \text{ (kg.m}^2\text{)}$	Moment d'inertie des parties tournantes.
$C_e \text{ (N.m)}$	Couple électromagnétique.
$C_r \text{ (N.m)}$	Couple résistant.

Sommaire

Introduction générale 01

Chapitre I : Modélisation de l'onduleur de tension à neuf niveaux à diodes flottantes

Introduction.....	03
I - L'onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes	03
I-1- La Structure	03
I-2- Modélisation du fonctionnement d'un bras	05
I-2-1-Différentes configurations d'un bras	06
I-2-2 cellule de commutation multipôle	09
I-2-3 Réseau de petri d'un bras	12
I-2-3-1 Réseau de petri en série	12
I-2-3-2 Réseau de petri parallèle	19
I-3-Modélisation en vue de la commande	20
I-3-1-Commandabilité des convertisseurs statiques	20
I-3-2-Fonction de connexion FKS.....	20
I-3-3- fonction génératrice de connexion FKSG	20
I-3-4-Commande complémentaire.....	21
I-3-5- Modèle de connaissance	22
a - relation de conversion simple	26
b - relation de conversion composée	28
I-3-6-Modèle de commande	30
Conclusion.....	33

Chapitre II : Stratégies de commande de l'onduleur de tension et redresseur de courant à neuf niveaux à diodes flottantes

Introduction	34
II-1-stratégie de commande de l' onduleurs de tension triphasé à neuf niveaux	34
II-1-1- Commande MLI à huit porteuses en dent de scie bipolaire.....	34
II-1-1-1 Simulation Numérique	37
II-1-1- 2-Interprétations et commentaires	38
II-1-2 Commande MLI à huit porteuses triangulaire bipolaire	38
II-1-2-1 Simulation Numérique	40
II-1-2- 2-Interprétations et commentaires	41
II-2-Stratégie de commande de redresseur de courant à neuf niveaux	42

II-2-1- Commande MLI à huit porteuses en dent de scie bipolaire	42
II-2-1-1 Simulation Numérique	44
II-2-2- Commande MLI à huit porteuses triangulaire bipolaire	47
II-2-2-1 Simulation Numérique	47
Commentaires	50
Conclusion	50

Chapitre III : Changeur de fréquence utilisant l'onduleur à neuf niveaux à diodes flottantes

Introduction	51
III -1 Modélisation du réseau électrique	51
• Les équations du réseau	51
III.2. Modélisation de la machine asynchrone triphasé.....	52
III.2.1. Description	52
III.2.2. Hypothèses simplificatrices	53
III.2.3. Mise en équation du modèle de la machine	53
• équations électriques	53
• équations magnétiques	54
• Modèle de PARK	54
• équations électriques	54
• Les équations liées au stator	54
• Les équations liées au rotor	55
• équations magnétiques	56
• équation mécanique	57
• équations états	57
III-3-1 Cascade un redresseur de courant à deux niveaux-onduleur triphasé à neuf niveaux-MAS	58
III-3-1-1- Filtre intermédiaire pour cette cascade	58
III-3-1-2- Simulation et interprétation	59
Commentaires.....	61
III-3-2 Cascade un redresseur de courant à neuf niveaux-onduleur triphasé à neuf niveaux-MAS	61
III-3-2-1- Filtre intermédiaire pour cette cascade	62

III-3-2- Simulation et interprétation	63
Conclusion.....	65
Chapitre VI : Asservissement des tensions d'entrée de l'onduleur de tension à neuf niveaux à diodes flottantes	
Introduction.....	66
IV-1-Modélisation de la boucle de tension dans l'axe abc	66
IV-2- Application de l'algorithme d'asservissement à la cascade	69
Conclusion	70
Conclusion générale	71
Bibliographie	72

Introduction générale

Introduction générale

Les avancées technologiques obtenues ces dernières années dans le domaine des composants de l'électronique de puissance ont favorisé une croissance du marché des convertisseurs de puissance. L'électronique de puissance s'est imposée comme un des éléments essentiels dans la conversion de l'énergie électrique. Le développement de la méthode dite Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) à apporté une plus grande souplesse dans le contrôle des convertisseurs autorisant une meilleur dynamique, une précision plus grande dans la régulation des machines.

L'évolution de l'électronique de puissance et le progrès de la micro-informatique ont permis la conception de nouveaux convertisseurs statiques comme variateurs de vitesse à ces machines à courant alternatif.

Après l'apparition des nouveaux convertisseurs multiniveaux qui sont utilisés pour l'alimentation des machines alternatives, plusieurs structures de ces convertisseurs multiniveaux ont été proposées telles que: les onduleurs multiniveaux à diodes flottantes, cellules imbriquées et ceux à structure NPC(Neutral Point Clamping). Dans le cas de notre travail, nous étudions un onduleur à neuf niveaux à diodes flottantes. Ce dernier permet d'augmenter la puissance délivrée à la charge. Ainsi, il permet de générer une tension la plus sinusoïdale possible.

Ce type de convertisseurs permet de synthétiser un signal sinusoïdal à partir de plusieurs niveaux de tension par bras de l'onduleur. Plus on augmente le nombre de niveaux, plus le signal de sortie s'approche de la sinusoïde avec un minimum de distorsion harmonique.

Dans ce mémoire, le travail est consacré à l'étude de la commande de différentes cascades à onduleur à neuf niveaux à diodes flottantes. Le but est de remédier au problème de fluctuation du potentiel du point milieu des tensions d'entrée de l'onduleur à neuf niveaux à structure NPC.

La première partie est consacrée à la modélisation et à la synthèse des stratégies de command de l'onduleur à neuf niveaux à diodes flottantes. La deuxième partie est consacrée à

la modélisation du réseau électrique dans le repaire abc, ensuite on a élaboré le modèle de fonctionnement des redresseurs de courant à MLI.

Dans la troisième partie la modélisation de la machine asynchrone est donnée. La cascade d'un redresseurs de courant triphasé deux et multiniveaux - onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes –MAS est simulée et on a mis en évidence le problème du déséquilibre des tensions d'entrée de l'onduleur.

Dans la dernière partie, on propose des solutions à ce problème du déséquilibre des tensions par rapport au point milieu par l'introduction du pont d'équilibrage et les algorithmes d'asservissement des tensions d'entrée de l'onduleur.

CHAPITRE I

Modélisation de l'onduleur de tension à neuf niveaux à diodes flottantes

Introduction:

Dans la première partie Elaboration des modèles des fonctionnements d'un onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes sans a priori sur la commande .Ces modèles sont élaborés en utilisant la méthode DESIGN associé aux réseaux de PETRI.

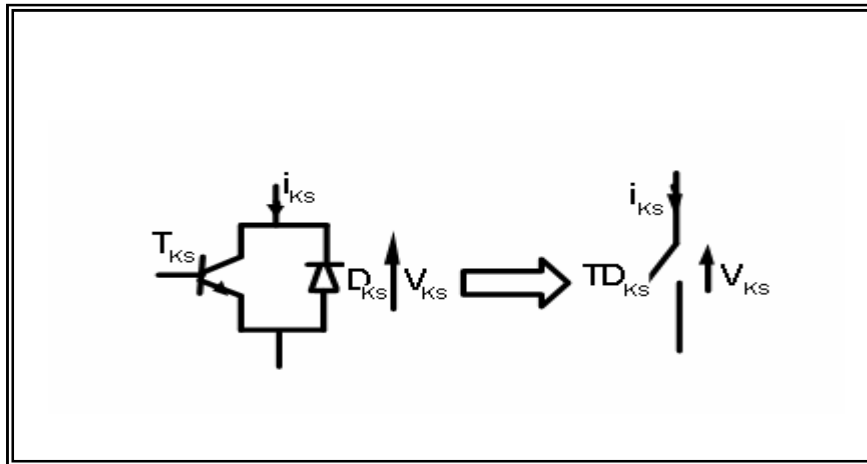
Presque tous les travaux développés sur les onduleurs de tension multi-niveaux sont basés des résultats connus sur les onduleurs de tension à cinq niveaux à diodes flottantes.

N.B: Dans ce mémoire, on utilise le mot onduleur tout court au lieu de l'onduleur de tension .

I-1- Structure:

L'onduleur à neuf niveaux à diodes flottantes est une nouvelle structure de conversion utilisée pour alimenter les machines à courant alternatif de forte puissance à tension et fréquence variable. Ce dernier se compose de trois bras symétriques constitué chacun de (16) interrupteurs bidirectionnels en série, Chaque interrupteur est composé d'un transistors "GTO, IGBT,...", et d'une diode montée en tête bêche et (14) diodes, on les appelle les diodes flottantes. Chaque bras est relié à une alimentation continue de force électromotrice (8Uc), ces huit générateurs sont égaux ($U_{c1}=U_{c2}=U_{c3}=U_{c4}= U_{c5}=U_{c6}= U_{c7}=U_{c8}$).

La représentation schématique de cet onduleur est donnée par la figure (I-2). Pour simplifier cette représentation et pour réduire le nombre de places de son réseau de Pétri, on représente chaque paire "transistor–diode" par un seul interrupteur bidirectionnel figure (I-1) .



Figure(I-1) : Interrupteur bidirectionnel équivalent à la paire "Transistor–Diode"

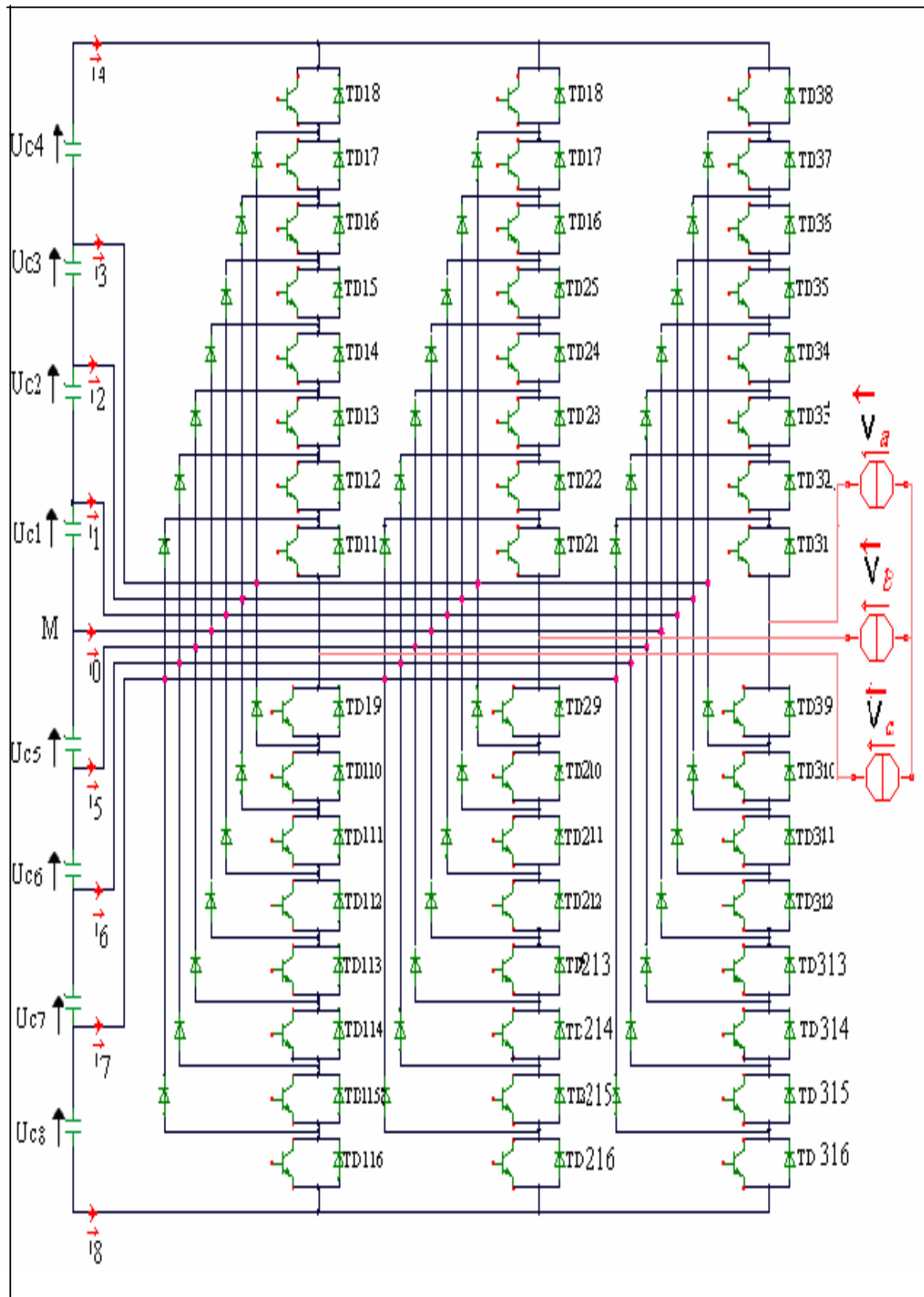
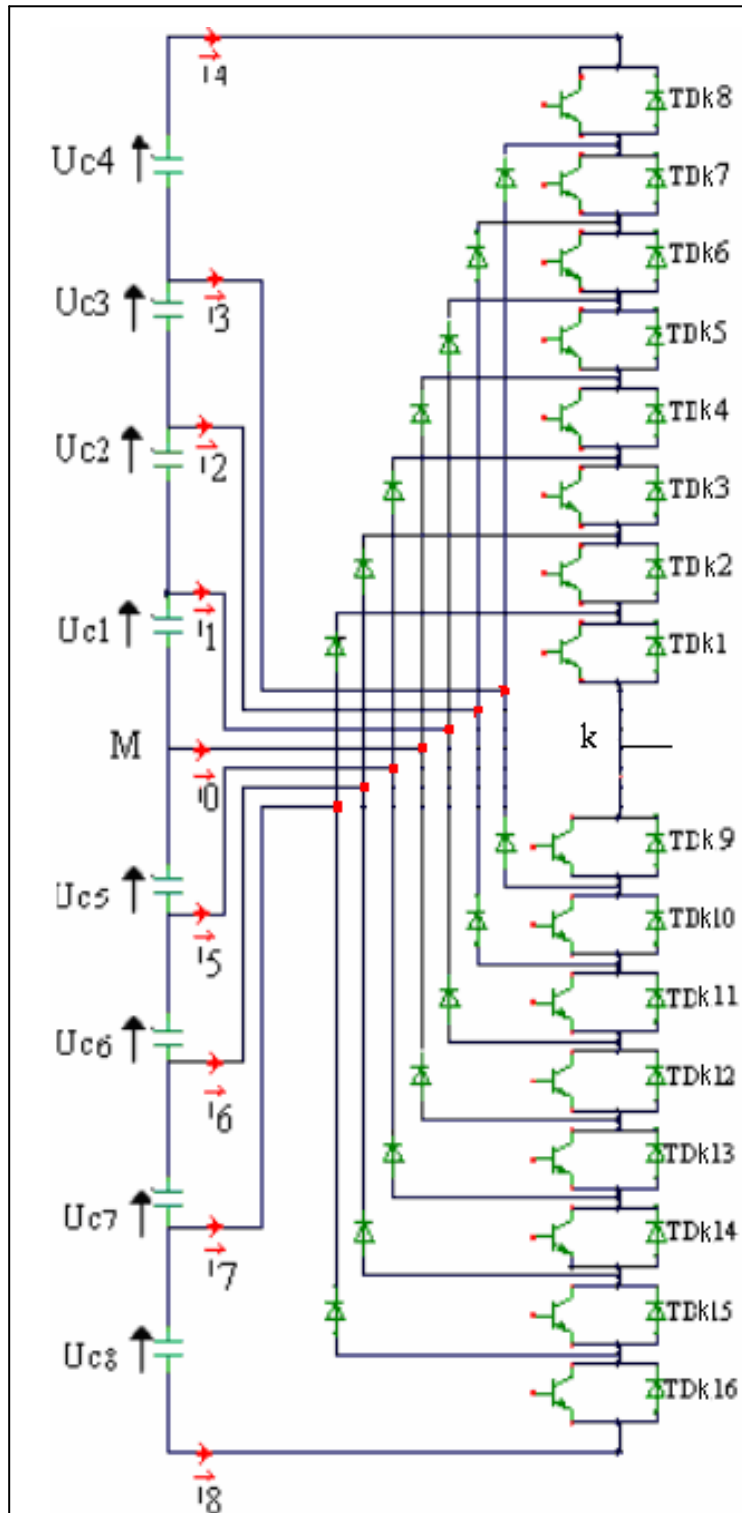


Figure (I-2) : Structure d'un Onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes

I-2- Modélisation du fonctionnement d'un bras :

La symétrie des onduleurs triphasés permet leur modélisation par bras, ensuite en déduit celui de l'onduleur complet. Chaque branche du convertisseur est vue comme un commutateur dont les positions permettent de modifier le potentiel du point K. Ce point est connecté à chaque fois à l'une des tensions aux bornes des condensateurs qui sont mis en série figure (I-3).



Figure(I-3): Structure d'un bras de l'onduleur triphasé à neuf niveaux

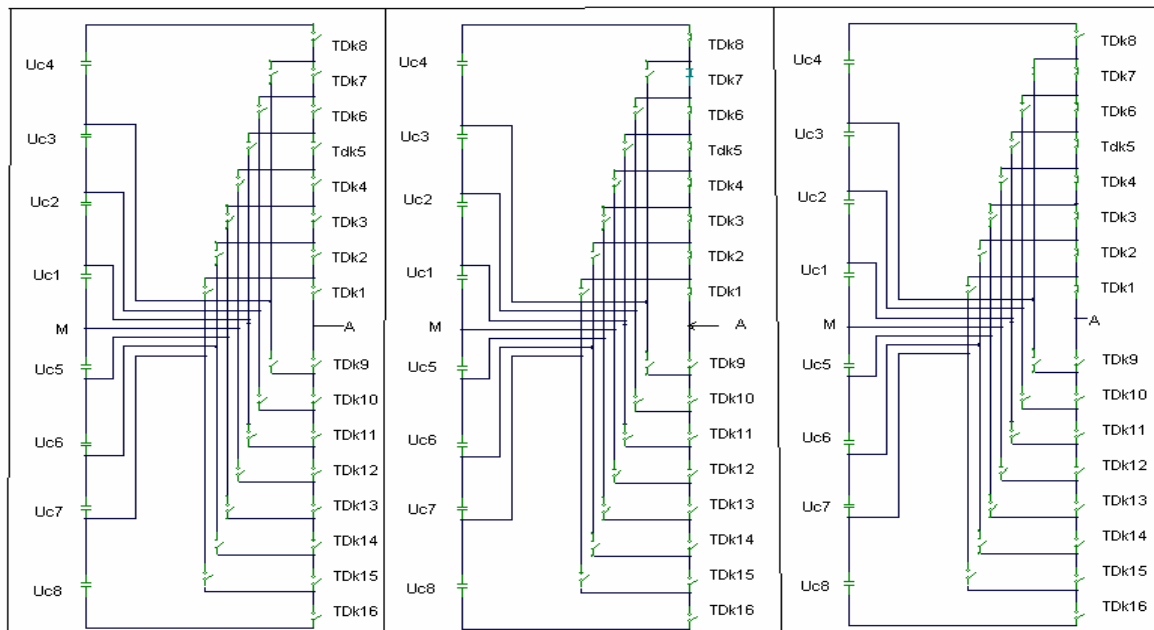
I-2-1-Différentes configurations d'un bras :

Les valeurs de la tension U_{KM} varie en fonction de l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de commande. Ces variation possède plusieurs type de configuration, pour un onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes, on trouve dix-sept modes de configurations les réceptivités de transition entre les différents configurations d'un bras sont fonction logique

Commande externe: B_{KS} qui est l'ordre d'amorçage ou de blocage de semi-conducteur T_{KS}

Commande interne: définie par les signes du courant du bras et des tensions aux bornes du semi-conducteurs

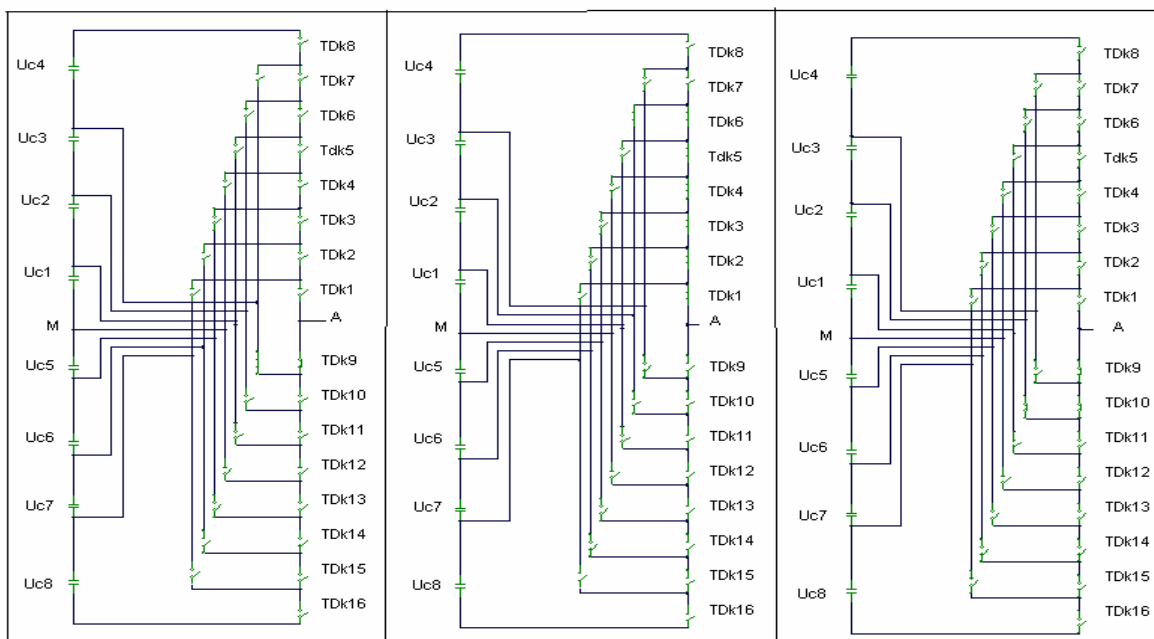
les configurations ci-dessous :



Configuration E0

configuration E1

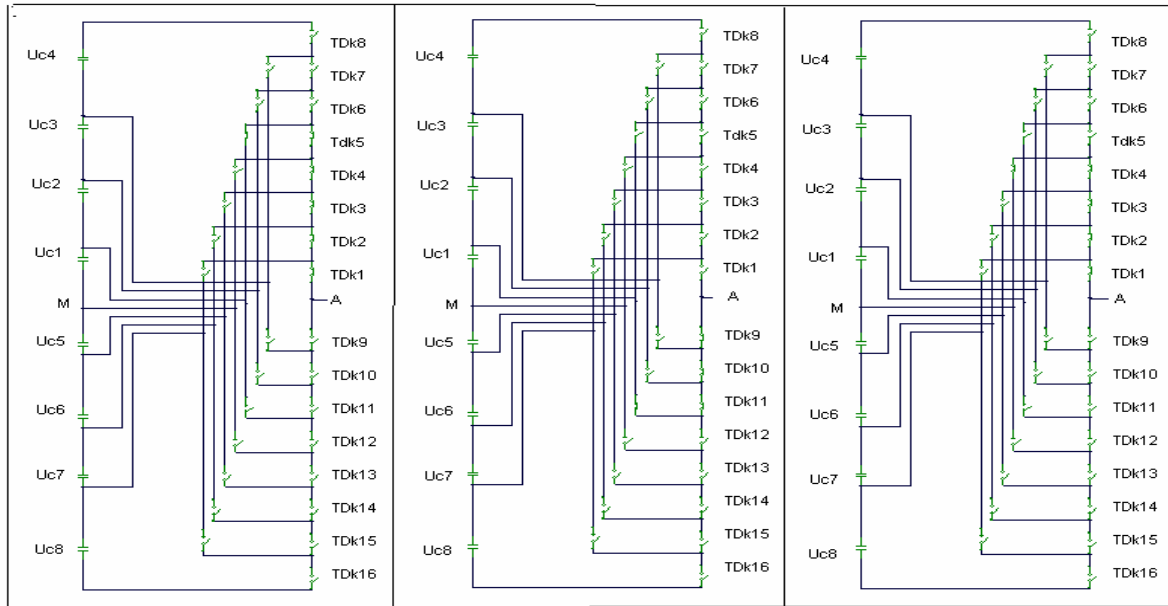
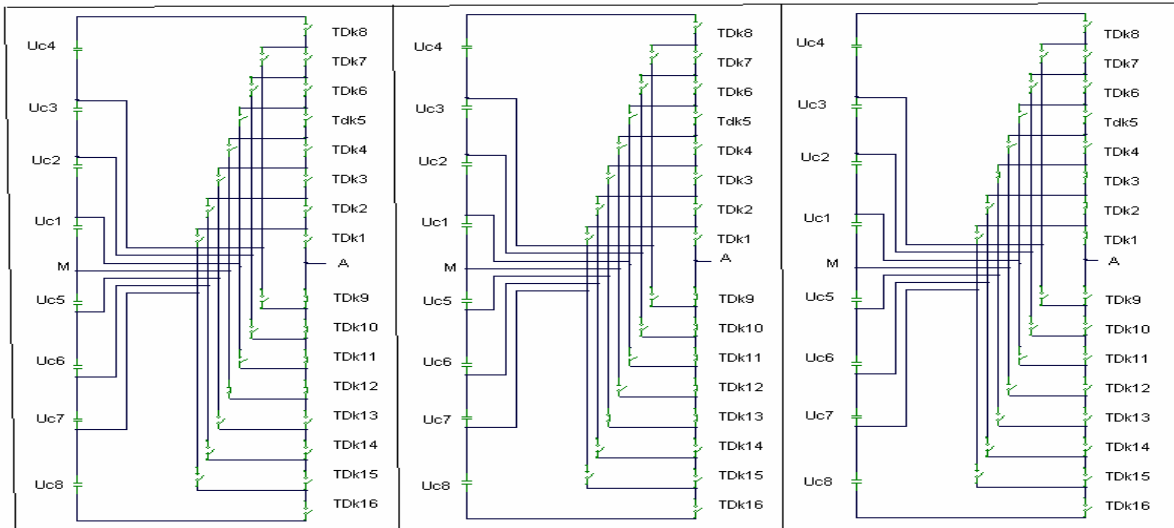
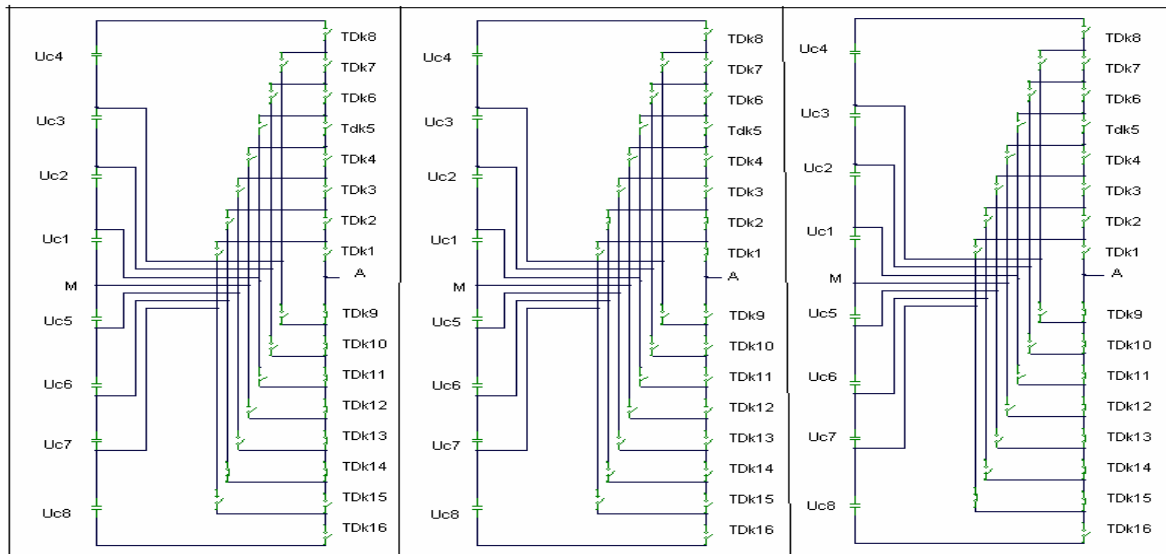
configuration E2

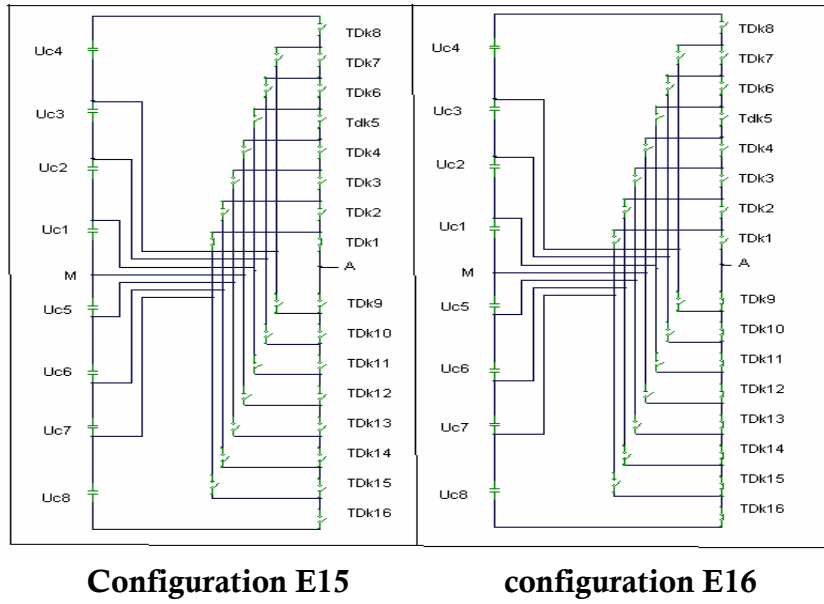


Configuration E3

configuration E4

configuration E5

**Configuration E6****configuration E7****configuration E8****Configuration E9****configuration E10****configuration E11****Configuration E12****configuration E13****configuration E14**



Figure(I-4): Les différentes configurations possibles pour un bras k de l'onduleur à neuf niveaux à diodes flottantes

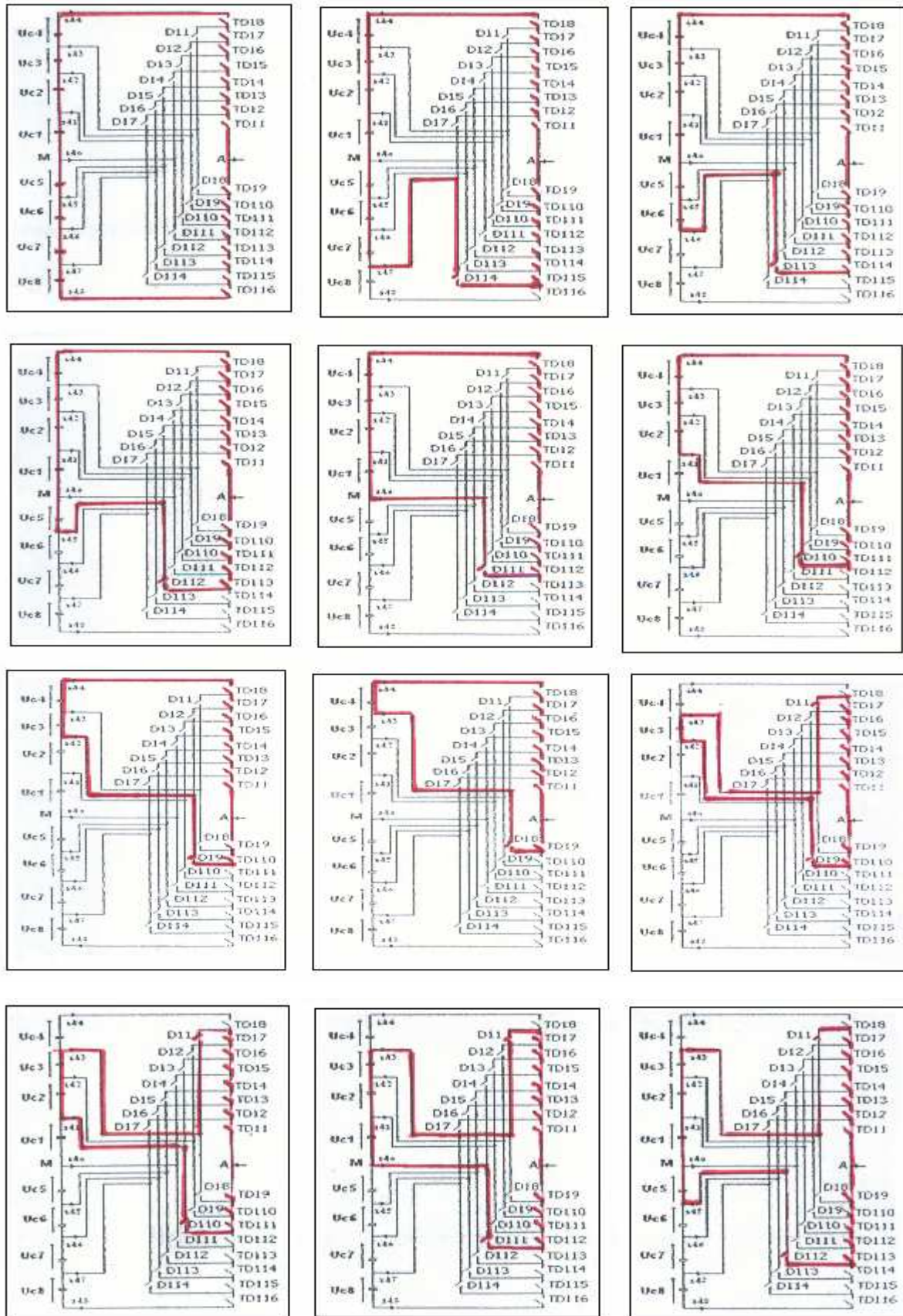
Le tableau [I-1] donne les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations (avec M origine des potentiels et V_{KM} le potentiel du nœud k du bras k).

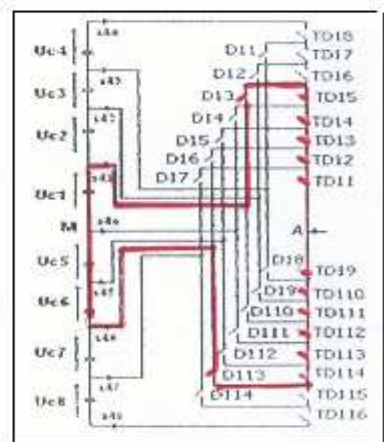
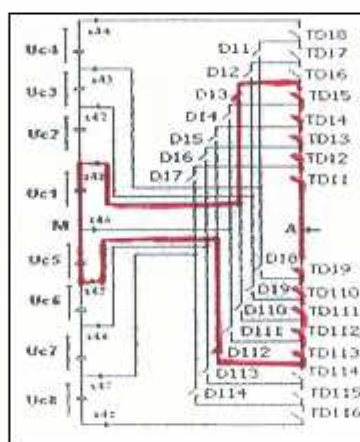
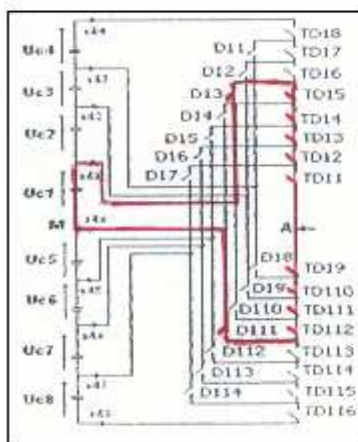
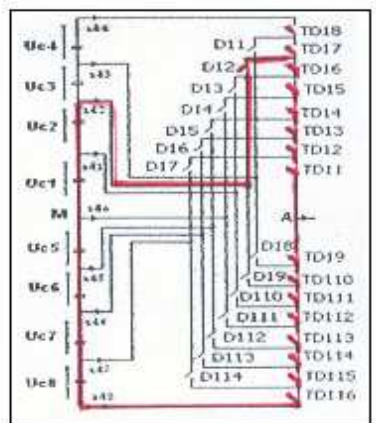
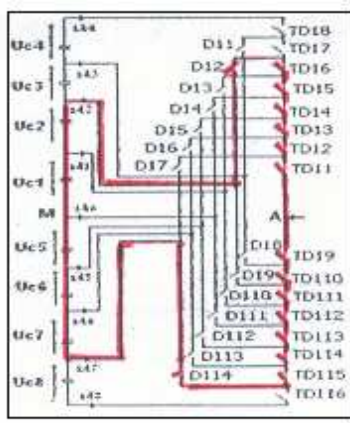
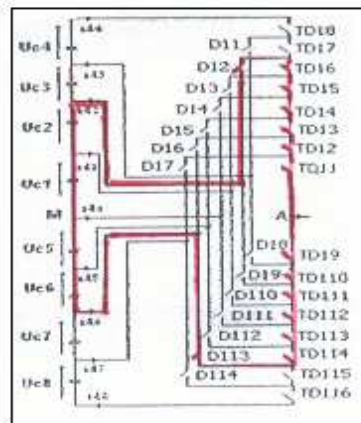
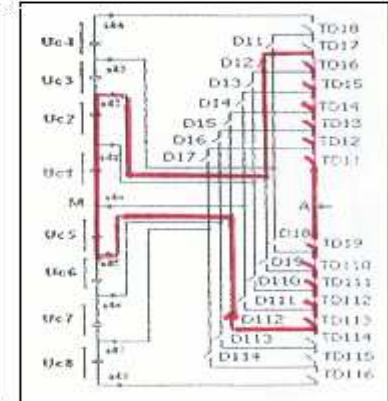
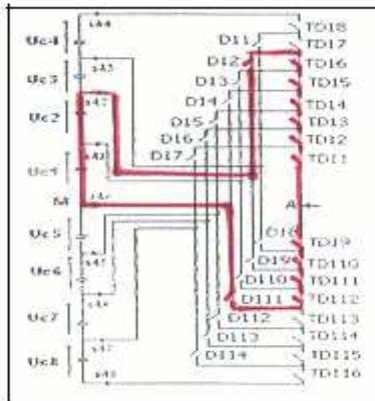
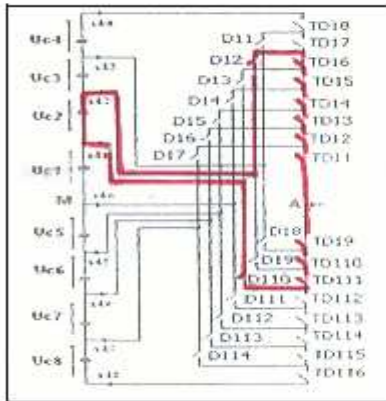
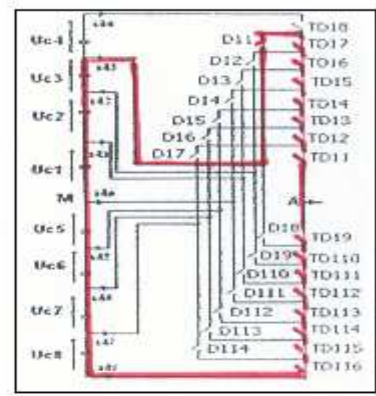
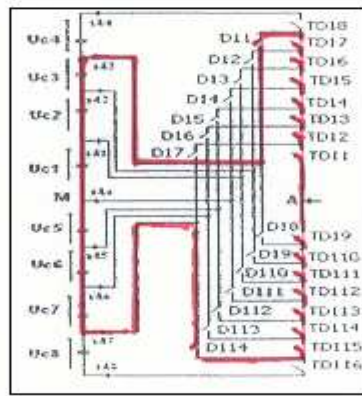
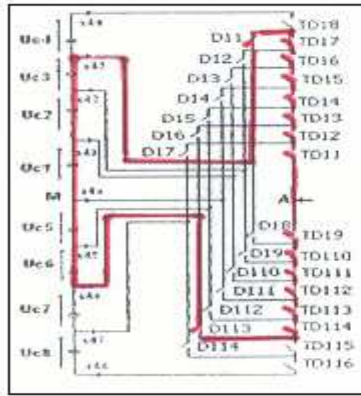
Configuration	Grandeurs électrique
E 0	$I_{KM} = 0$
E 1	$U_{KM} = 4 U_c$
E 2	$U_{KM} = 3 U_c$
E 3	$U_{KM} = 3 U_c$
E 4	$U_{KM} = 2 U_c$
E 5	$U_{KM} = 2 U_c$
E 6	$U_{KM} = 1 U_c$
E 7	$U_{KM} = 1 U_c$
E 8	$U_{KM} = 0$
E 9	$U_{KM} = 0$
E 10	$U_{KM} = -1 U_c$
E 11	$U_{KM} = -1 U_c$
E 12	$U_{KM} = -2 U_c$
E 13	$U_{KM} = -2 U_c$
E 14	$U_{KM} = -3 U_c$
E 15	$U_{KM} = -3 U_c$
E 16	$U_{KM} = -4 U_c$

Tableau[I-1]: Grandeurs électriques correspondantes à chacune des configurations d'un bras k d'onduleur à neuf niveaux à diodes flottantes

I-2-2 cellule de commutation multipôle :

L'onduleur à neuf niveaux consiste à trois bras , chaque bras K consiste de cellules de commutation multi pôle[**Hautier92**] . les 36 cellules tri pôles sont montrées à la figure (I-5) :





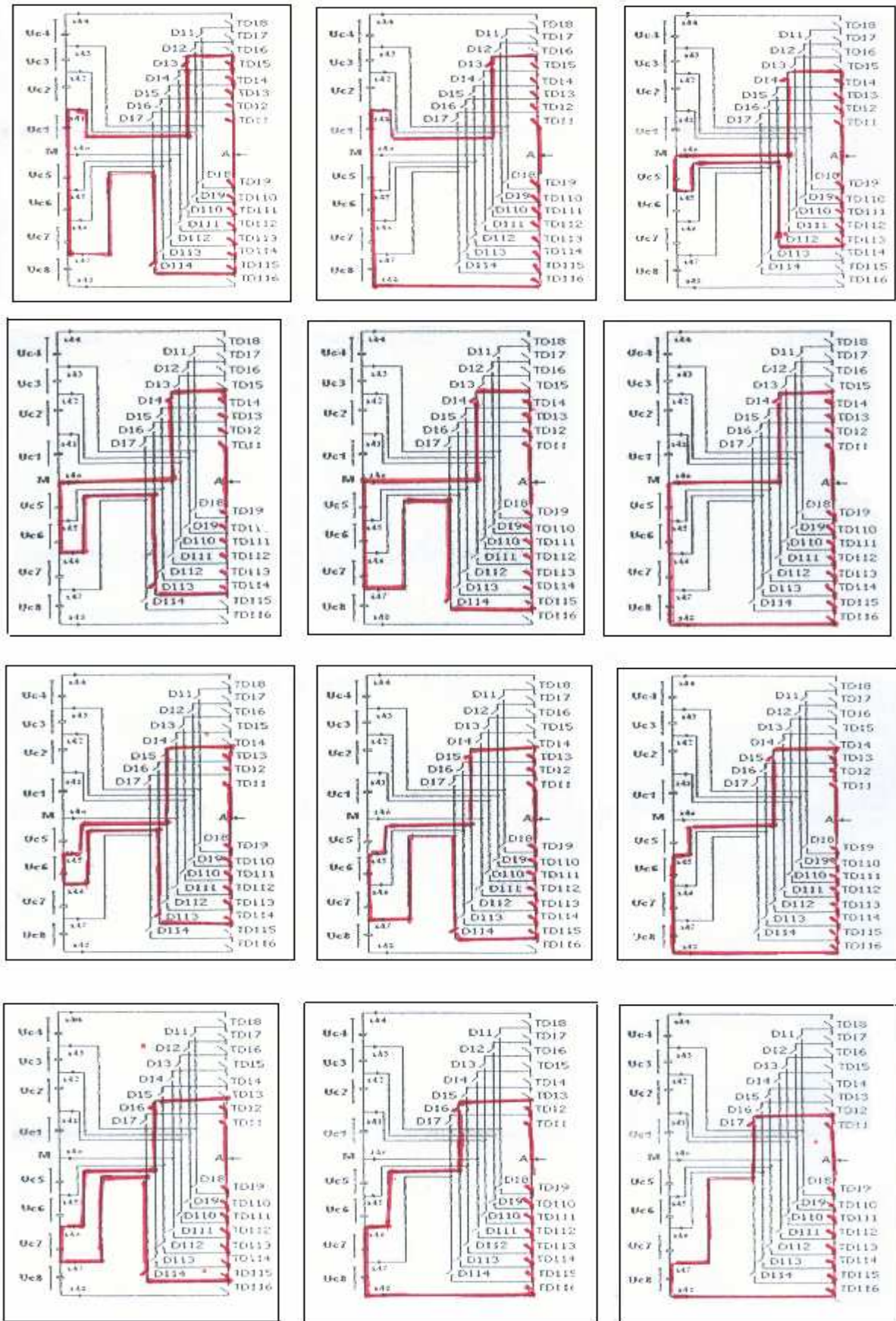


Figure (I-5) : les cellules tri -pôles d'un bras K
L'onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes

I-2-3 Réseau de petri d'un bras :

I-2-3-1 Réseau de petri en série :

Pour faire la transmission entre une configuration à une autre . on doit utilisé une méthode développé qui simplifie la déplacement entre les dix-sept configurations , l'analyse des condition de transmission donné les réceptivités du réseau de petri .

La variable R_{mn} intervenant dans ce réseau représente la réceptivité de transmission de la configuration E_m à la configuration E_n , ces déférentes variables sont expliquées ci-dessous :

$$\begin{aligned}
R_{01} &= [(B_{k1} \& U_{k1} > 0) \& (B_{k2} \& U_{k2} > 0) \& (B_{k3} \& U_{k3} > 0) \& (B_{k4} \& U_{k4} > 0) \& (B_{k5} \& U_{k5} > 0) \\
&\& (B_{k6} \& U_{k6} > 0) \& (B_{k7} \& U_{k7} > 0) \& (B_{k8} \& U_{k8} > 0)] \text{ ou } [(U_{k1} < 0) \& (U_{k2} < 0) \& (U_{k3} < 0) \\
&\& (U_{k4} < 0) \& (U_{k5} < 0) \& (U_{k6} < 0) \& (U_{k7} < 0) \& (U_{k8} < 0)]. \\
R_{02} &= [(B_{k1} \& U_{k1} > 0) \& (B_{k2} \& U_{k2} > 0) \& (B_{k3} \& U_{k3} > 0) \& (B_{k4} \& U_{k4} > 0) \& (B_{k5} \& U_{k5} > 0) \\
&\& (B_{k6} \& U_{k6} > 0) \& (B_{k7} \& U_{k7} > 0) \& (\overline{B_{k8}})] \\
R_{03} &= [(B_{k9} \& U_{k9} > 0) \& (\overline{B_{k10}})] \\
R_{04} &= [(B_{k1} \& U_{k1} > 0) \& (B_{k2} \& U_{k2} > 0) \& (B_{k3} \& U_{k3} > 0) \& (B_{k4} \& U_{k4} > 0) \& (B_{k5} \& U_{k5} > 0) \\
&\& (B_{k6} \& U_{k6} > 0) \& (\overline{B_{k7}})] \\
R_{05} &= [(B_{k9} \& U_{k9} > 0) \& (B_{k10} \& U_{k10} > 0) \& (\overline{B_{k11}})] \\
R_{06} &= [(B_{k1} \& U_{k1} > 0) \& (B_{k2} \& U_{k2} > 0) \& (B_{k3} \& U_{k3} > 0) \& (B_{k4} \& U_{k4} > 0) \& (B_{k5} \& U_{k5} > 0) \& (\overline{B_{k6}})] \\
R_{07} &= [(B_{k9} \& U_{k9} > 0) \& (B_{k10} \& U_{k10} > 0) \& (B_{k11} \& U_{k11} > 0) \& (\overline{B_{k12}})] \\
R_{08} &= [(B_{k1} \& U_{k1} > 0) \& (B_{k2} \& U_{k2} > 0) \& (B_{k3} \& U_{k3} > 0) \& (B_{k4} \& U_{k4} > 0) \& (\overline{B_{k5}})] \\
R_{09} &= [(B_{k9} \& U_{k9} > 0) \& (B_{k10} \& U_{k10} > 0) \& (B_{k11} \& U_{k11} > 0) \& (B_{k12} \& U_{k12} > 0) \& (\overline{B_{k13}})] \\
R_{010} &= [(B_{k9} \& U_{k9} > 0) \& (B_{k10} \& U_{k10} > 0) \& (B_{k11} \& U_{k11} > 0) \& (B_{k12} \& U_{k12} > 0) \& (B_{k13} \& U_{k13} > 0) \\
&\& (\overline{B_{k14}})] \\
R_{011} &= [(B_{k1} \& U_{k1} > 0) \& (B_{k2} \& U_{k2} > 0) \& (B_{k3} \& U_{k3} > 0) \& (\overline{B_{k4}})] \\
R_{012} &= [(B_{k9} \& U_{k9} > 0) \& (B_{k10} \& U_{k10} > 0) \& (B_{k11} \& U_{k11} > 0) \& (B_{k12} \& U_{k12} > 0) \& (B_{k13} \& U_{k13} > 0) \\
&\& (B_{k14} \& U_{k14} > 0) \& (\overline{B_{k15}})] \\
R_{013} &= [(B_{k1} \& U_{k1} > 0) \& (B_{k2} \& U_{k2} > 0) \& (\overline{B_{k3}})] \\
R_{014} &= [(B_{k9} \& U_{k9} > 0) \& (B_{k10} \& U_{k10} > 0) \& (B_{k11} \& U_{k11} > 0) \& (B_{k12} \& U_{k12} > 0) \& (B_{k13} \& U_{k13} > 0) \\
&\& (B_{k14} \& U_{k14} > 0) \& (B_{k15} \& U_{k15} > 0) \& (\overline{B_{k16}})] \\
R_{015} &= [(B_{k1} \& U_{k1} > 0) \& (\overline{B_{k2}})] \\
R_{016} &= [(B_{k9} \& U_{k9} > 0) \& (B_{k10} \& U_{k10} > 0) \& (B_{k11} \& U_{k11} > 0) \& (B_{k12} \& U_{k12} > 0) \& (B_{k13} \& U_{k13} > 0) \\
&\& (B_{k14} \& U_{k14} > 0) \& (B_{k15} \& U_{k15} > 0) \& (B_{k16} \& U_{k16} > 0)] \text{ ou } [(U_{k9} < 0) \& (U_{k10} < 0) \\
&\& (U_{k11} < 0) \& (U_{k12} < 0) \& (U_{k13} < 0) \& (U_{k14} < 0) \& (U_{k15} < 0) \& (U_{k16} < 0)]. \\
R_{10} &= (I_k = 0) \\
R_{12} &= [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& \overline{B_{k8}})] \\
R_{13} &= [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& \overline{B_{k10}})] \\
R_{14} &= [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& \overline{B_{k3}} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& \overline{B_{k7}})] \\
R_{15} &= [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& \overline{B_{k11}})] \\
R_{16} &= [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& \overline{B_{k6}})] \\
R_{17} &= [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& \overline{B_{k12}})] \\
R_{18} &= [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& \overline{B_{k5}})] \\
R_{19} &= [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& \overline{B_{k13}})] \\
R_{110} &= [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& \overline{B_{k14}})] \\
R_{111} &= [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& \overline{B_{k4}})] \\
R_{112} &= [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& \overline{B_{k15}})] \\
R_{113} &= [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& \overline{B_{k3}})] \\
R_{114} &= [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& \overline{B_{k10}} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& \overline{B_{k16}})] \\
R_{115} &= [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& \overline{B_{k2}})] \\
R_{116} &= [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& B_{k16}) \text{ ou } (I_k > 0 \& \overline{B_{k1}})]
\end{aligned}$$

$R_{20} = (I_k = 0)$
 $R_{21} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& B_{k8})]$
 $R_{23} = \text{impossible}$
 $R_{24} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& \overline{B_{k7}})]$
 $R_{25} = \text{impossible}$
 $R_{26} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& \overline{B_{k6}})]$
 $R_{27} = \text{impossible}$
 $R_{28} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& \overline{B_{k5}})]$
 $R_{29} = \text{impossible}$
 $R_{210} = \text{impossible}$
 $R_{211} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& \overline{B_{k4}})]$
 $R_{212} = \text{impossible}$
 $R_{213} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& \overline{B_{k3}})]$
 $R_{214} = \text{impossible}$
 $R_{215} = [(I_k > 0) \text{ et } (\overline{B_{k1}} \& \overline{B_{k2}})]$
 $R_{216} = [(I_k > 0 \& \overline{B_{k1}})]$
 $R_{30} = (I_k = 0)$
 $R_{31} = [(I_k < 0) \text{ et } (\overline{B_{k9}})]$
 $R_{32} = \text{impossible}$
 $R_{34} = \text{impossible}$
 $R_{35} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& \overline{B_{k11}})]$
 $R_{36} = \text{impossible}$
 $R_{37} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& \overline{B_{k12}})]$
 $R_{38} = \text{impossible}$
 $R_{39} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& \overline{B_{k13}})]$
 $R_{310} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& \overline{B_{k14}})]$
 $R_{311} = \text{impossible}$
 $R_{312} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& \overline{B_{k15}})]$
 $R_{313} = \text{impossible}$
 $R_{314} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& \overline{B_{k16}})]$
 $R_{315} = \text{impossible}$
 $R_{316} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& B_{k16})]$
 $R_{40} = (I_k = 0)$
 $R_{41} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& B_{k8})]$
 $R_{42} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& \overline{B_{k8}})]$
 $R_{43} = \text{impossible}$
 $R_{45} = \text{impossible}$
 $R_{46} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& \overline{B_{k6}})]$
 $R_{47} = \text{impossible}$
 $R_{48} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& \overline{B_{k5}})]$
 $R_{49} = \text{impossible}$
 $R_{410} = \text{impossible}$
 $R_{411} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& \overline{B_{k4}})]$
 $R_{412} = \text{impossible}$
 $R_{413} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& \overline{B_{k3}})]$
 $R_{414} = \text{impossible}$
 $R_{415} = [(I_k > 0) \text{ et } (\overline{B_{k1}} \& \overline{B_{k2}})]$
 $R_{416} = [(I_k > 0 \& \overline{B_{k1}})]$
 $R_{50} = (I_k = 0)$
 $R_{51} = \text{impossible}$
 $R_{52} = \text{impossible}$

$R_{53} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& \overline{B_{k10}})]$
 $R_{34} = \text{impossible}$
 $R_{56} = \text{impossible}$
 $R_{57} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& \overline{B_{k12}})]$
 $R_{58} = \text{impossible}$
 $R_{59} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& \overline{B_{k13}})]$
 $R_{510} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& \overline{B_{k14}})]$
 $R_{511} = \text{impossible}$
 $R_{512} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& \overline{B_{k15}})]$
 $R_{513} = \text{impossible}$
 $R_{514} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& \overline{B_{k16}})]$
 $R_{515} = \text{impossible}$
 $R_{516} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& B_{k16})]$
 $R_{60} = (I_k = 0)$
 $R_{61} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& B_{k8})]$
 $R_{62} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& \overline{B_{k8}})]$
 $R_{63} = \text{impossible}$
 $R_{64} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& \overline{B_{k7}})]$
 $R_{65} = \text{impossible}$
 $R_{67} = \text{impossible}$
 $R_{68} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& \overline{B_{k5}})]$
 $R_{69} = \text{impossible}$
 $R_{610} = \text{impossible}$
 $R_{611} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& \overline{B_{k4}})]$
 $R_{612} = \text{impossible}$
 $R_{613} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& \overline{B_{k3}})]$
 $R_{614} = \text{impossible}$
 $R_{615} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& \overline{B_{k2}})]$
 $R_{616} = [(I_k > 0 \& \overline{B_{k1}})]$
 $R_{70} = (I_k = 0)$
 $R_{71} = \text{impossible}$
 $R_{72} = \text{impossible}$
 $R_{73} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& \overline{B_{k10}})]$
 $R_{74} = \text{impossible}$
 $R_{75} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& \overline{B_{k11}})]$
 $R_{76} = \text{impossible}$
 $R_{78} = \text{impossible}$
 $R_{79} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& \overline{B_{k13}})]$
 $R_{710} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& \overline{B_{k14}})]$
 $R_{711} = \text{impossible}$
 $R_{712} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& \overline{B_{k15}})]$
 $R_{713} = \text{impossible}$
 $R_{714} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& \overline{B_{k16}})]$
 $R_{715} = \text{impossible}$
 $R_{716} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& B_{k16})]$
 $R_{80} = (I_k = 0)$
 $R_{81} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& B_{k8})]$
 $R_{82} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& \overline{B_{k8}})]$
 $R_{83} = \text{impossible}$
 $R_{84} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& \overline{B_{k7}})]$
 $R_{85} = \text{impossible}$
 $R_{86} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& \overline{B_{k6}})]$

$R_{87} = \text{impossible}$
 $R_{89} = \text{impossible}$
 $R_{810} = \text{impossible}$
 $R_{811} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& \overline{B_{k4}})]$
 $R_{812} = \text{impossible}$
 $R_{813} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& \overline{B_{k3}})]$
 $R_{814} = \text{impossible}$
 $R_{815} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& \overline{B_{k2}})]$
 $R_{816} = [(I_k > 0 \& \overline{B_{k1}})]$
 $R_{90} = (I_k = 0)$
 $R_{91} = \text{impossible}$
 $R_{92} = \text{impossible}$
 $R_{93} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& \overline{B_{k10}})]$
 $R_{94} = \text{impossible}$
 $R_{95} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& \overline{B_{k11}})]$
 $R_{96} = \text{impossible}$
 $R_{97} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& \overline{B_{k12}})]$
 $R_{98} = \text{impossible}$
 $R_{910} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& \overline{B_{k14}})]$
 $R_{911} = \text{impossible}$
 $R_{912} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& \overline{B_{k15}})]$
 $R_{913} = \text{impossible}$
 $R_{914} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& \overline{B_{k16}})]$
 $R_{915} = \text{impossible}$
 $R_{916} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& B_{k16})]$
 $R_{100} = (I_k = 0)$
 $R_{101} = \text{impossible}$
 $R_{102} = \text{impossible}$
 $R_{103} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& \overline{B_{k10}})]$
 $R_{104} = \text{impossible}$
 $R_{105} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& \overline{B_{k11}})]$
 $R_{106} = \text{impossible}$
 $R_{107} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& \overline{B_{k12}})]$
 $R_{108} = \text{impossible}$
 $R_{109} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& \overline{B_{k13}})]$
 $R_{1011} = \text{impossible}$
 $R_{1012} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& \overline{B_{k15}})]$
 $R_{1013} = \text{impossible}$
 $R_{1014} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& \overline{B_{k16}})]$
 $R_{1015} = \text{impossible}$
 $R_{1016} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& B_{k16})]$
 $R_{110} = (I_k = 0)$
 $R_{111} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& B_{k8})]$
 $R_{112} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& \overline{B_{k8}})]$
 $R_{113} = \text{impossible}$
 $R_{114} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& \overline{B_{k7}})]$
 $R_{115} = \text{impossible}$
 $R_{116} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& \overline{B_{k6}})]$
 $R_{117} = \text{impossible}$
 $R_{118} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& \overline{B_{k5}})]$
 $R_{119} = \text{impossible}$
 $R_{1110} = \text{impossible}$

$R_{1112} = \text{impossible}$
 $R_{1113} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& \overline{B_{k3}})]$
 $R_{1114} = \text{impossible}$
 $R_{1115} = [(I_k > 0) \text{ et } (\overline{B_{k1}} \& \overline{B_{k2}})]$
 $R_{1116} = [(I_k > 0 \& \overline{B_{k1}})]$
 $R_{120} = (I_k = 0)$
 $R_{121} = \text{impossible}$
 $R_{122} = \text{impossible}$
 $R_{123} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& \overline{B_{k10}})]$
 $R_{124} = \text{impossible}$
 $R_{125} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& \overline{B_{k11}})]$
 $R_{126} = \text{impossible}$
 $R_{127} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& \overline{B_{k12}})]$
 $R_{128} = \text{impossible}$
 $R_{129} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& \overline{B_{k13}})]$
 $R_{1210} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& \overline{B_{k14}})]$
 $R_{1211} = \text{impossible}$
 $R_{1213} = \text{impossible}$
 $R_{1214} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& \overline{B_{k16}})]$
 $R_{1215} = \text{impossible}$
 $R_{1216} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& B_{k16})]$
 $R_{130} = (I_k = 0)$
 $R_{131} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& B_{k8})]$
 $R_{132} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& \overline{B_{k8}})]$
 $R_{133} = \text{impossible}$
 $R_{134} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& \overline{B_{k7}})]$
 $R_{135} = \text{impossible}$
 $R_{136} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& \overline{B_{k6}})]$
 $R_{137} = \text{impossible}$
 $R_{138} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& \overline{B_{k5}})]$
 $R_{139} = \text{impossible}$
 $R_{1310} = \text{impossible}$
 $R_{1311} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& \overline{B_{k4}})]$
 $R_{1312} = \text{impossible}$
 $R_{1314} = \text{impossible}$
 $R_{1315} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& \overline{B_{k2}})]$
 $R_{1316} = [(I_k > 0 \& \overline{B_{k1}})]$
 $R_{140} = (I_k = 0)$
 $R_{141} = \text{impossible}$
 $R_{142} = \text{impossible}$
 $R_{143} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& \overline{B_{k10}})]$
 $R_{144} = \text{impossible}$
 $R_{145} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& \overline{B_{k11}})]$
 $R_{146} = \text{impossible}$
 $R_{147} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& \overline{B_{k12}})]$
 $R_{148} = \text{impossible}$
 $R_{149} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& \overline{B_{k13}})]$
 $R_{1410} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& \overline{B_{k14}})]$
 $R_{1411} = \text{impossible}$
 $R_{1412} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& \overline{B_{k15}})]$
 $R_{1413} = \text{impossible}$
 $R_{1415} = \text{impossible}$

$$R_{1416} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& B_{k16})]$$

$$R_{150} = (I_k = 0)$$

$$R_{151} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& B_{k8})]$$

$$R_{152} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& B_{k7} \& \overline{B_{k8}})]$$

$$R_{153} = \text{impossible}$$

$$R_{154} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& B_{k6} \& \overline{B_{k7}})]$$

$$R_{155} = \text{impossible}$$

$$R_{156} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& B_{k5} \& \overline{B_{k6}})]$$

$$R_{157} = \text{impossible}$$

$$R_{158} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& B_{k4} \& \overline{B_{k5}})]$$

$$R_{159} = \text{impossible}$$

$$R_{1510} = \text{impossible}$$

$$R_{1511} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& B_{k3} \& \overline{B_{k4}})]$$

$$R_{1512} = \text{impossible}$$

$$R_{1513} = [(I_k > 0) \text{ et } (B_{k1} \& B_{k2} \& \overline{B_{k3}})]$$

$$R_{1514} = \text{impossible}$$

$$R_{1516} = [(I_k > 0 \& \overline{B_{k1}})]$$

$$R_{160} = (I_k = 0)$$

$$R_{161} = \text{impossible}$$

$$R_{162} = \text{impossible}$$

$$R_{163} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& \overline{B_{k10}})]$$

$$R_{164} = \text{impossible}$$

$$R_{165} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& \overline{B_{k11}})]$$

$$R_{166} = \text{impossible}$$

$$R_{167} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& \overline{B_{k12}})]$$

$$R_{168} = \text{impossible}$$

$$R_{169} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& \overline{B_{k13}})]$$

$$R_{1610} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& \overline{B_{k14}})]$$

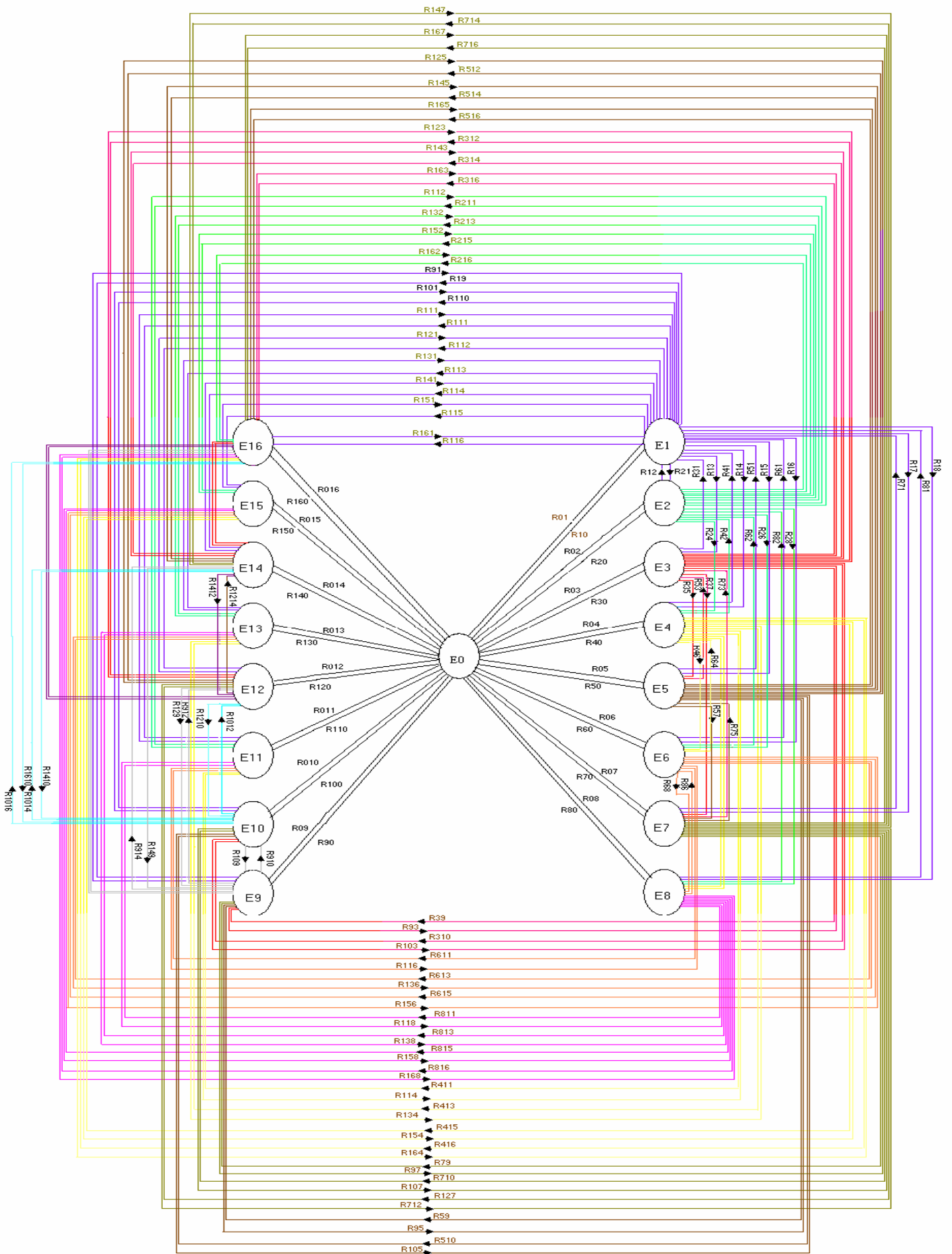
$$R_{1611} = \text{impossible}$$

$$R_{1612} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& \overline{B_{k15}})]$$

$$R_{1613} = \text{impossible}$$

$$R_{1614} = [(I_k < 0) \text{ et } (B_{k9} \& B_{k10} \& B_{k11} \& B_{k12} \& B_{k13} \& B_{k14} \& B_{k15} \& \overline{B_{k16}})]$$

$$R_{1615} = \text{impossible}$$



I-2-3-2 Réseau de petri parallèle :

Dans le réseau est composé par les réceptivités d'entrée R_E et les réceptivités de sortie R_S . La figure (I_7) est représenté la fonction des réceptivités de transmission :

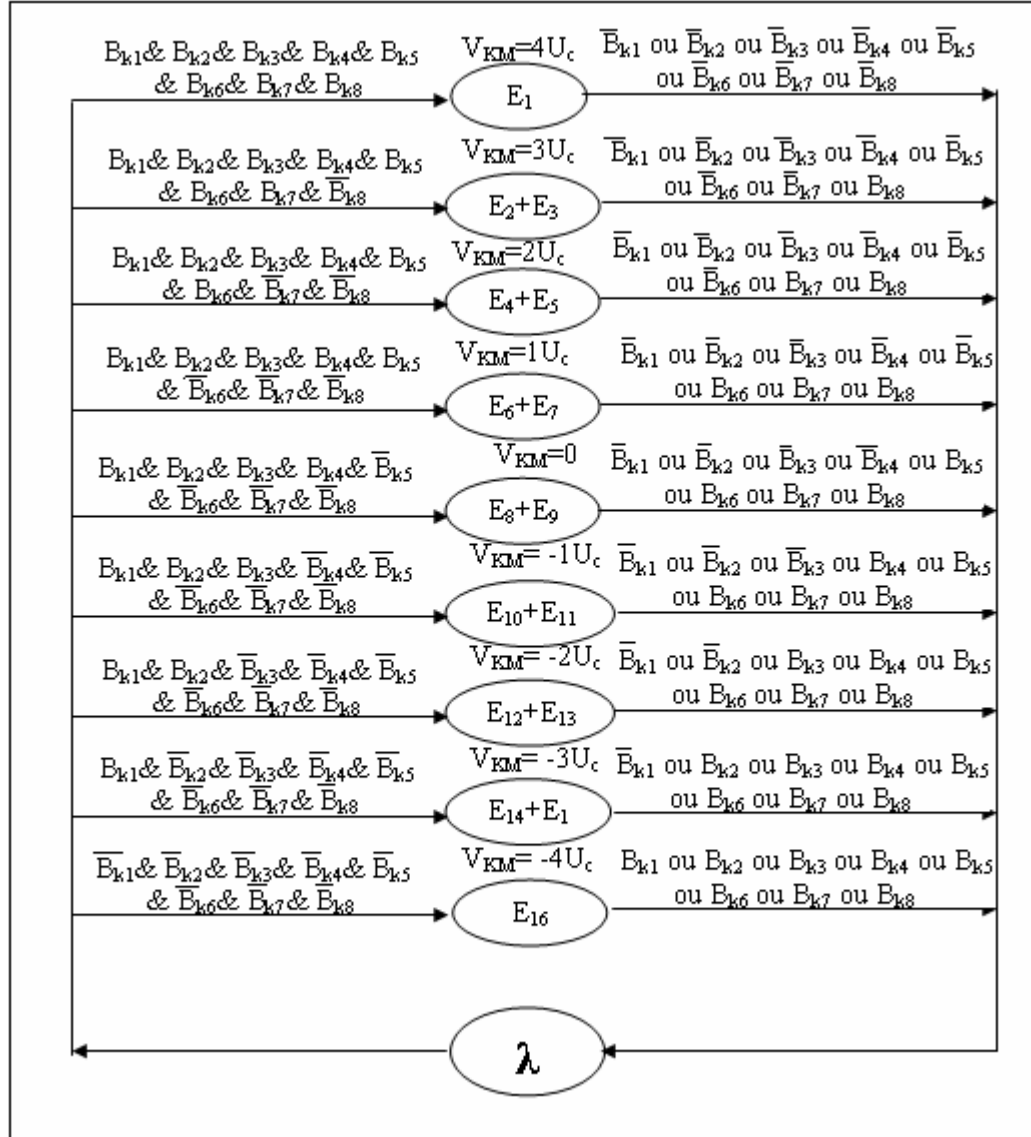


Figure (I-7) : Réseau de petri parallèle d'un bras de L'onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes

I-3-Modélisation en vue de la commande

I-3-1-Commandabilité des convertisseurs statiques :

On dit un convertisseur statique en mode commandable , si la condition suivante est vérifiée :

les transitions entre les différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe de transistor [berkoug95.1] [Guillaud94] .

D'une façon optimale donc qui permet le fonctionnement en mode commandable , on suppose dans la suite que ses conditions sont toujours vérifiées .

Hypothèses

- La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est supposée faible (négligeable devant U_C).
- V_A , V_B et V_C : les tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge.
- V_{AM} , V_{BM} , V_{CM} : les tensions entre chaque bras de l'onduleur et le point milieu M de l'alimentation continue de l'onduleur.
- V_{NM} : la tension entre le point neutre de la charge et le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur.
- La charge est triphasée, couplée en étoile avec neutre isolé. Alors on a :

$$\begin{cases} V_A + V_B + V_C = 0 \\ I_A + I_B + I_C = 0 \end{cases} \quad [I-1]$$

I-3-2-Fonction de connexion F_{KS} :

Cette fonction est associée à chaque interrupteur TD_{KS} , et décrit son état fermé ou ouvert. Cette fonction vaut «1» si l'interrupteur est fermé , «0» dans le cas contraire ,

tel que [Seguier89.2][chauvet 90] :

$$F_{KS} = \begin{cases} 1 & \text{si } TD_{KS} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } TD_{KS} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad [I-2]$$

I-3-3- fonction génératrice de connexion F_{KSg} :

C'est une fonction continue qui représente la valeur moyenne de la fonction discontinue de connexion F_{KSg} sur une période de commutation T_c est supposé infiniment petit .

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{KSg} = \left[\frac{1}{T_e} \int_{nT_e}^{(n+1)T_e} F_{KS}(\tau) d\tau \right] \in [0,1] \text{ avec } \begin{cases} n \in \mathbb{N} \\ T_e \rightarrow 0 \end{cases} \quad [I-3]$$

I-3-4-Commande complémentaire:

Pour éviter la conduction simultanée des dix-sept interrupteurs d'un bras k qui peut engendrer leurs destructions par croissance du courant lors du court-circuit ou par une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, et en mode commandable , on définit une commande complémentaire des différents semi-conducteurs d'un bras qui est la plus optimale comme suite :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k16}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k15}} \\ B_{k3} = \overline{B_{k14}} \\ B_{k4} = \overline{B_{k13}} \\ B_{k5} = \overline{B_{k12}} \\ B_{k6} = \overline{B_{k11}} \\ B_{k7} = \overline{B_{k10}} \\ B_{k8} = \overline{B_{k9}} \end{array} \right. \quad [I-4]$$

Avec B_{ks} commande du transistor T_{ks} de bras K, et commande complémentaire est fait pour éviter des court-circuit des sources de tension continu par conduction de plusieurs interrupteurs de bras K , les fonctions de connexions des interrupteurs du bras k sont liées par les relations

$$\text{suivantes : } \left\{ \begin{array}{l} F_{k1} = 1 - F_{k16} \\ F_{k2} = 1 - F_{k15} \\ F_{k3} = 1 - F_{k14} \\ F_{k4} = 1 - F_{k13} \\ F_{k5} = 1 - F_{k12} \\ F_{k6} = 1 - F_{k11} \\ F_{k7} = 1 - F_{k10} \\ F_{k8} = 1 - F_{k9} \end{array} \right. \quad [I-5]$$

On peut observer deux fonctions de connexions , les fonctions de connexion de demi-bras interne $F_{km}^{b'}$ et les fonctions de connexion de demi-bras externe F_{km}^b :

$$k : \text{numéro du bras (k = 1, 2, 3).et } m = \begin{cases} 0 & \text{pour le demi-bras du bas} \\ 1 & \text{pour le demi-bras du haut} \end{cases}$$

Pour le bras k, les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{k1}^b = F_{k1} F_{k2} F_{k3} F_{k4} F_{k5} F_{k6} F_{k7} F_{k8} \\ F_{k0}^b = F_{k9} F_{k10} F_{k11} F_{k12} F_{k13} F_{k14} F_{k15} F_{k16} \end{array} \right. \quad [I-6]$$

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1}F_{k2}F_{k3}F_{k4}F_{k5} F_{k6}F_{k7}(1-F_{k8}) \text{ ou } F_{k1}F_{k2}F_{k3}F_{k4}F_{k5} F_{k6}(1-F_{k7}) \\ \text{ou } F_{k1}F_{k2}F_{k3}F_{k4}F_{k5}(1-F_{k6}) \\ F_{k0}^b = F_{k9}F_{k10}F_{k11}F_{k12}F_{k13} F_{k14}F_{k15}(1-F_{k16}) \text{ ou } F_{k9}F_{k10}F_{k11}F_{k12}F_{k13} F_{k14}(1-F_{k15}) \\ \text{ou } F_{k9}F_{k10}F_{k11}F_{k12}F_{k13}(1-F_{k14}) \end{cases} \quad [I-7]$$

Le tableau [I-2] représente les états des interrupteurs de l'onduleur à neuf niveaux qui permet d'avoir un fonctionnement à neuf niveaux de tension :

F_{K_M}	FK1	FK2	FK3	FK4	FK5	FK6	FK7	FK8
4Uc	1	1	1	1	1	1	1	1
3Uc	1	1	1	1	1	1	1	0
2Uc	1	1	1	1	1	1	0	0
Uc	1	1	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	1	0	0	0	0
-Uc	1	1	1	0	0	0	0	0
-2Uc	1	1	0	0	0	0	0	0
-3Uc	1	0	0	0	0	0	0	0
-4Uc	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab[I-2]: Table d'excitation des interrupteurs de l'onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes

I-3-5- Modèle de connaissance :

L'association de l'onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes avec une charge triphasée (MAS) couplée en étoile et neutre isolé .

On définit les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à neuf niveaux par rapport au point milieu «M» s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}F_{12}F_{13}F_{14}F_{15} F_{16}F_{17}F_{18} (Uc1+Uc2+ Uc3+Uc4) \\ + F_{11}F_{12}F_{13}F_{14} F_{15}F_{16}F_{17}(1-F_{18})(Uc1+Uc2+ Uc3) + F_{11}F_{12} F_{13}F_{14}F_{15}F_{16} (1-F_{17}) (Uc1+Uc2) \\ + F_{11}F_{12} F_{13}F_{14}F_{15} (1-F_{16})Uc1 - F_{19}F_{110}F_{111}F_{112}F_{113} F_{114}F_{115}F_{116}(Uc5+Uc6+Uc7+Uc8) \\ - F_{19}F_{110}F_{111}F_{112}F_{113}F_{114}F_{115}(1-F_{116}) (Uc5+Uc6+ Uc7) \\ - F_{19}F_{110}F_{111}F_{112}F_{113}F_{114}(1-F_{115}) (Uc5+Uc6)-F_{19}F_{110}F_{111}F_{112}F_{113}(1- F_{114}) Uc5 \\ V_{BM} = F_{21}F_{22}F_{23}F_{24}F_{25}F_{26}F_{27}F_{28}(Uc1+Uc2+ Uc3+Uc4) \\ + F_{21}F_{22}F_{23}F_{24}F_{25}F_{26}F_{27}(1-F_{28})(Uc1+Uc2+Uc3)+F_{21}F_{22}F_{23}F_{24}F_{25}F_{26}(1-F_{27})(Uc1+Uc2) \\ + F_{21}F_{22} F_{23} F_{24}F_{25}(1-F_{26})Uc1 - F_{29}F_{210}F_{211}F_{212}F_{213}F_{214}F_{215}F_{216} (Uc5+Uc6+ Uc7+Uc8) \\ - F_{29}F_{210}F_{211}F_{212}F_{213}F_{214}F_{215}(1-F_{216}) (Uc5+Uc6+ Uc7) \\ - F_{29}F_{210}F_{211}F_{212}F_{213}F_{214}(1-F_{215}) (Uc5+Uc6)- F_{29}F_{210}F_{211}F_{212}F_{213}(1- F_{214}) Uc5 \\ V_{CM} = F_{31}F_{32}F_{33}F_{34}F_{35} F_{36}F_{37}F_{38}(Uc1+Uc2+ Uc3+Uc4) \\ + F_{31}F_{32}F_{33}F_{34} F_{35}F_{36}F_{37}(1-F_{38}) (Uc1+Uc2+Uc3)+ F_{31}F_{32}F_{33}F_{34}F_{35}F_{36}(1-F_{37}) (Uc1+Uc2) \\ + F_{31}F_{32}F_{33}F_{34}F_{35}(1-F_{36})Uc1 - F_{39}F_{310}F_{311}F_{312}F_{313} F_{314}F_{315}F_{316}(Uc5+Uc6+ Uc7+Uc8) \\ - F_{39}F_{310}F_{311}F_{312}F_{313} F_{314}F_{315}(1-F_{316}) (Uc5+Uc6+ Uc7) \\ - F_{39}F_{310}F_{311}F_{312}F_{313} F_{314}(1-F_{315}) (Uc5+Uc6)- F_{39}F_{310}F_{311}F_{312}F_{313}(1- F_{314}) Uc5 \end{cases} \quad \dots [I-8]$$

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment de la manière suivante :

- externe :

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11}F_{12}F_{13}F_{14}F_{15} F_{16}F_{17}F_{18} \\ F_{10}^b = F_{19}F_{110}F_{111}F_{112}F_{113} F_{114}F_{115}F_{116} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{21}^b = F_{21}F_{22}F_{23}F_{24}F_{25}F_{26}F_{27}F_{28} \\ F_{20}^b = F_{29}F_{210}F_{211}F_{212}F_{213} F_{214}F_{215}F_{216} \end{cases} \quad [I-9]$$

$$\begin{cases} F_{31}^b = F_{31}F_{32}F_{33}F_{34}F_{35}F_{36}F_{37}F_{38} \\ F_{30}^b = F_{39}F_{310}F_{311}F_{312}F_{313}F_{314}F_{315}F_{316} \end{cases}$$

- interne .

$$\begin{cases} F_{11}^{\bar{b}} = F_{11}F_{12}F_{13}F_{14}F_{15} F_{16}F_{17}(1-F_{18}) \\ F_{10}^{\bar{b}} = F_{19}F_{110}F_{111}F_{112}F_{113} F_{114}F_{115}(1-F_{116}) \end{cases} \quad \begin{cases} F_{21}^{\bar{b}} = F_{21}F_{22}F_{23}F_{24}F_{25}F_{26}F_{27}(1-F_{28}) \\ F_{20}^{\bar{b}} = F_{29}F_{210}F_{211}F_{212}F_{213} F_{214}F_{215}(1-F_{216}) \end{cases} \quad [I-10]$$

$$\begin{cases} F_{31}^{\bar{b}} = F_{31}F_{32}F_{33}F_{34}F_{35}F_{36}F_{37}(1-F_{38}) \\ F_{30}^{\bar{b}} = F_{39}F_{310}F_{311}F_{312}F_{313}F_{314}F_{315}(1-F_{316}) \end{cases}$$

En introduisant les fonctions [I-9] et [I-10] dans le système [I-8], on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b(U_{c1}) + 3F_{11}^{\bar{b}}(U_{c1}) + F_{11}^b(U_{c2}) + 2F_{11}^{\bar{b}}(U_{c2}) + F_{11}^b(U_{c3}) + F_{11}^{\bar{b}}(U_{c3}) \\ \quad + F_{11}^b(U_{c4}) - F_{10}^b(U_{c5}) - 3F_{10}^{\bar{b}}(U_{c5}) - F_{10}^b(U_{c6}) - 2F_{10}^{\bar{b}}(U_{c6}) - F_{10}^b(U_{c7}) \\ \quad - F_{10}^{\bar{b}}(U_{c7}) - F_{10}^b(U_{c8}) \\ V_{BM} = F_{21}^b(U_{c1}) + 3F_{21}^{\bar{b}}(U_{c1}) + F_{21}^b(U_{c2}) + 2F_{21}^{\bar{b}}(U_{c2}) + F_{21}^b(U_{c3}) + F_{21}^{\bar{b}}(U_{c3}) \\ \quad + F_{21}^b(U_{c4}) - F_{20}^b(U_{c5}) - 3F_{20}^{\bar{b}}(U_{c5}) - F_{20}^b(U_{c6}) - 2F_{20}^{\bar{b}}(U_{c6}) \\ \quad - F_{20}^b(U_{c7}) - F_{20}^{\bar{b}}(U_{c7}) - F_{20}^b(U_{c8}) \\ V_{CM} = F_{31}^b(U_{c1}) + 3F_{31}^{\bar{b}}(U_{c1}) + F_{31}^b(U_{c2}) + 2F_{31}^{\bar{b}}(U_{c2}) + F_{31}^b(U_{c3}) \\ \quad + F_{31}^b(U_{c4}) - F_{30}^b(U_{c5}) - 3F_{30}^{\bar{b}}(U_{c5}) - F_{30}^b(U_{c6}) \\ \quad - 2F_{30}^{\bar{b}}(U_{c6}) - F_{30}^b(U_{c7}) - F_{30}^{\bar{b}}(U_{c7}) - F_{30}^b(U_{c8}) \end{cases} \quad [I-11]$$

D'après ce système [I-11], on peut s'écrire sous la forme matricielle suivante

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b + 3F_{11}^{\bar{b}} \\ F_{21}^b + 3F_{21}^{\bar{b}} \\ F_{31}^b + 3F_{31}^{\bar{b}} \end{bmatrix} U_{c1} + \begin{bmatrix} F_{11}^b + 2F_{11}^{\bar{b}} \\ F_{21}^b + 2F_{21}^{\bar{b}} \\ F_{31}^b + 2F_{31}^{\bar{b}} \end{bmatrix} U_{c2} + \begin{bmatrix} F_{11}^b + F_{11}^{\bar{b}} \\ F_{21}^b + F_{21}^{\bar{b}} \\ F_{31}^b + F_{31}^{\bar{b}} \end{bmatrix} U_{c3} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c4} \\ - \begin{bmatrix} F_{10}^b + 3F_{10}^{\bar{b}} \\ F_{20}^b + 3F_{20}^{\bar{b}} \\ F_{30}^b + 3F_{30}^{\bar{b}} \end{bmatrix} U_{c5} - \begin{bmatrix} F_{10}^b + 2F_{10}^{\bar{b}} \\ F_{20}^b + 2F_{20}^{\bar{b}} \\ F_{30}^b + 2F_{30}^{\bar{b}} \end{bmatrix} U_{c6} - \begin{bmatrix} F_{10}^b + F_{10}^{\bar{b}} \\ F_{20}^b + F_{20}^{\bar{b}} \\ F_{30}^b + F_{30}^{\bar{b}} \end{bmatrix} U_{c7} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c8} \quad [I-12]$$

:

Alors l'équation [I-11] devient comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4F_{11}^b + 6F_{11}^{b'} - 4F_{10}^b - 6F_{10}^{b'} \\ 4F_{21}^b + 6F_{21}^{b'} - 4F_{20}^b - 6F_{20}^{b'} \\ 4F_{31}^b + 6F_{31}^{b'} - 4F_{30}^b - 6F_{30}^{b'} \end{bmatrix} U_c \quad [I-13]$$

les équations des mailles du système source-onduleur-charge donnent :

$$V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} = V_A + V_B + V_C + 3V_{NM} \quad [I-14]$$

Les tensions composées s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AM} - V_{BM} \\ U_{BC} = V_{BM} - V_{CM} \\ U_{CA} = V_{CM} - V_{AM} \end{cases} \quad [I-15]$$

Les tensions simples aux bornes de la charge sont :

$$\begin{cases} V_A = V_{AN} = V_{AM} - V_{NM} \\ V_B = V_{BN} = V_{BM} - V_{NM} \\ V_C = V_{CN} = V_{CM} - V_{NM} \end{cases} \quad [I-16]$$

Avec V_{NM} tension entre le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur et le point neutre de la charge qui est représentée comme suit :

$$V_{NM} = \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) \quad [I-17]$$

A partir des relations [I-16] et [I-17], on a :

$$\begin{cases} V_A = V_{AM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) = \frac{1}{3}(2V_{AM} - V_{BM} - V_{CM}) \\ V_B = V_{BM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) = \frac{1}{3}(-V_{AM} + 2V_{BM} - V_{CM}) \\ V_C = V_{CM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) = \frac{1}{3}(-V_{AM} - V_{BM} + 2V_{CM}) \end{cases} \quad [I-18]$$

Donc, ces tensions simples s'expriment grâce aux fonctions de connexion des demi-bras selon le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} \quad [I-19]$$

La relation (I-19) se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4F_{11}^b + 6F_{11}^{b'} - 4F_{10}^b - 6F_{10}^{b'} \\ 4F_{21}^b + 6F_{21}^{b'} - 4F_{20}^b - 6F_{20}^{b'} \\ 4F_{31}^b + 6F_{31}^{b'} - 4F_{30}^b - 6F_{30}^{b'} \end{bmatrix} U_c \quad [I-20]$$

Les différentes tension composées s'expriment comme suit :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} \quad [I-21]$$

Cette relation se réduit à :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4F_{11}^b + 6F_{11}^{b'} - 4F_{10}^b - 6F_{10}^{b'} \\ 4F_{21}^b + 6F_{21}^{b'} - 4F_{20}^b - 6F_{20}^{b'} \\ 4F_{31}^b + 6F_{31}^{b'} - 4F_{30}^b - 6F_{30}^{b'} \end{bmatrix} U_c \quad [I-22]$$

Ainsi les courants d'entrée de l'onduleur triphasé s'expriment en fonction des courants de la charge i_1, i_2, i_3 et au moyen des fonctions de connexion des demi-bras par les relations

suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{d1} = F_{11}F_{12}F_{13}F_{14}F_{15} (1-F_{16})I_1 + F_{21}F_{22}F_{23}F_{24}F_{25}(1-F_{26})I_2 + F_{31}F_{32}F_{33}F_{34}F_{35} (1-F_{36})I_3 \\ I_{d2} = F_{11}F_{12}F_{13}F_{14}F_{15} F_{16} (1-F_{17})I_1 + F_{21}F_{22}F_{23}F_{24}F_{25} F_{26}(1-F_{27})I_2 \\ \quad + F_{31}F_{32}F_{33}F_{34}F_{35} F_{36} (1-F_{37})I_3 \\ I_{d3} = F_{11}F_{12}F_{13}F_{14}F_{15} F_{16}F_{17}(1-F_{18})I_1 + F_{21}F_{22}F_{23}F_{24}F_{25} F_{56}F_{27}(1-F_{28})I_2 \\ \quad + F_{31}F_{32}F_{33}F_{34}F_{35} F_{36} F_{37} (1-F_{38})I_3 \\ I_{d4} = F_{11}F_{12}F_{13}F_{14}F_{15} F_{16}F_{17}F_{18}I_1 + F_{21}F_{22}F_{23}F_{24}F_{25}F_{26}F_{27}F_{28}I_2 \\ \quad + F_{31}F_{32}F_{33}F_{34}F_{35}F_{36}F_{37}F_{38}I_3 \\ I_{d5} = F_{19}F_{110}F_{111}F_{112}F_{113}(1-F_{114})I_1 + F_{29}F_{210}F_{211}F_{212}F_{213}(1-F_{214})I_2 \\ \quad + F_{39}F_{310}F_{311}F_{312}F_{313}(1-F_{314})I_3 \\ I_{d6} = F_{19}F_{110}F_{111}F_{112}F_{113}F_{114}(1-F_{115})I_1 + F_{29}F_{210}F_{211}F_{212}F_{213}F_{214}(1-F_{215})I_2 \\ \quad + F_{39}F_{310}F_{311}F_{312}F_{313}F_{314}(1-F_{315})I_3 \\ I_{d7} = F_{19}F_{110}F_{111}F_{112}F_{113}F_{114}F_{115}(1-F_{116})I_1 + F_{29}F_{210}F_{211}F_{212}F_{213}F_{214}F_{215}(1-F_{216})I_2 \\ \quad + F_{39}F_{310}F_{311}F_{312}F_{313} F_{314}F_{315}(1-F_{316})I_3 \\ I_{d8} = F_{19}F_{110}F_{111}F_{112}F_{113} F_{114}F_{115}F_{116}I_1 + F_{29}F_{210}F_{211}F_{212}F_{213}F_{214}F_{215}F_{216}I_2 \\ \quad + F_{39}F_{310}F_{311}F_{312}F_{313} F_{314}F_{315}F_{316}I_3 \end{array} \right. \quad [I-23]$$

On remplaçant les fonctions de connexion des interrupteurs par la relation [I-23] le système devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{d1} = F_{11}^{b'} I_1 + F_{21}^{b'} I_2 + F_{31}^{b'} I_3 \\ I_{d2} = F_{11}^{b'} I_1 + F_{21}^{b'} I_2 + F_{31}^{b'} I_3 \\ I_{d3} = F_{11}^{b'} I_1 + F_{21}^{b'} I_2 + F_{31}^{b'} I_3 \\ I_{d4} = F_{11}^b I_1 + F_{21}^b I_2 + F_{31}^b I_3 \\ I_{d5} = F_{10}^{b'} I_1 + F_{20}^{b'} I_2 + F_{30}^{b'} I_3 \\ I_{d6} = F_{10}^{b'} I_1 + F_{20}^{b'} I_2 + F_{30}^{b'} I_3 \\ I_{d7} = F_{10}^{b'} I_1 + F_{20}^{b'} I_2 + F_{30}^{b'} I_3 \\ I_{d8} = F_{10}^b I_1 + F_{20}^b I_2 + F_{30}^b I_3 \end{array} \right.$$

Le courant i_{d0} est lié aux courants d'entrée et aux courants de charge par la relation suivante:

$$i_{d0} = (i_1 + i_2 + i_3) - (i_{d1} + i_{d2} + i_{d3} + i_{d4} + i_{d5} + i_{d6} + i_{d7} + i_{d8}) \quad [I-25]$$

En utilisant la relation [I-24] dans l'équation [I-25], on obtient :

$$I_{d0} = [1 - (3F_{11}^{b'} + F_{11}^b + 3F_{10}^{b'} + F_{10}^b)]I_1 + [1 - (3F_{21}^{b'} + F_{21}^b + 3F_{20}^{b'} + F_{20}^b)]I_2 \quad [I-26]$$

$$+ [1 - (3F_{31}^{b'} + F_{31}^b + 3F_{30}^{b'} + F_{30}^b)]I_3$$

On définit la matrice de conversion simple $[N(t)]$, reliant le vecteur d'entrée interne

$[V_A, V_B, V_C, i_{d1}, i_{d2}, i_{d3}, i_{d4}, i_{d5}, i_{d6}, i_{d7}, i_{d8}]^t$ au vecteur d'état

$[U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}, U_{C4}, U_{C5}, U_{C6}, U_{C7}, U_{C8}, i_1, i_2, i_3]^t$

• **relation de conversion simple :**

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d3} \\ i_{d4} \\ i_{d5} \\ i_{d6} \\ i_{d7} \\ i_{d8} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [N(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U_{C4} \\ U_{C5} \\ U_{C6} \\ U_{C7} \\ U_{C8} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad [I-27]$$

Avec:

$$[N(t)] = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} & N_{14} & N_{15} & N_{16} & N_{17} & N_{18} & 0 & 0 & 0 \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} & N_{24} & N_{25} & N_{26} & N_{27} & N_{28} & 0 & 0 & 0 \\ N_{31} & N_{32} & N_{33} & N_{34} & N_{35} & N_{36} & N_{37} & N_{38} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{49} & N_{410} & N_{411} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{59} & N_{510} & N_{511} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{69} & N_{610} & N_{611} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{79} & N_{710} & N_{711} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{89} & N_{810} & N_{811} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{99} & N_{910} & N_{911} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{109} & N_{1010} & N_{1011} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{119} & N_{1110} & N_{1111} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{129} & N_{1210} & N_{1211} \end{bmatrix} \quad [I-28]$$

$$\begin{aligned}
N_{11} &= \frac{1}{3}[2(F_{11}^b + 3F_{11}^v) - (F_{21}^b + 3F_{21}^v) - (F_{31}^b + 3F_{31}^v)] \\
N_{21} &= \frac{1}{3}[-(F_{11}^b + 3F_{11}^v) + 2(F_{21}^b + 3F_{21}^v) - (F_{31}^b + 3F_{31}^v)] \\
N_{31} &= \frac{1}{3}[-(F_{11}^b + 3F_{11}^v) - (F_{21}^b + 3F_{21}^v) + 2(F_{31}^b + 3F_{31}^v)] \\
N_{12} &= \frac{1}{3}[2(F_{11}^b + 2F_{11}^v) - (F_{21}^b + 2F_{21}^v) - (F_{31}^b + 2F_{31}^v)] \\
N_{22} &= \frac{1}{3}[-(F_{11}^b + 2F_{11}^v) + 2(F_{21}^b + 2F_{21}^v) - (F_{31}^b + 2F_{31}^v)] \\
N_{32} &= \frac{1}{3}[-(F_{11}^b + 2F_{11}^v) - (F_{21}^b + 2F_{21}^v) + 2(F_{31}^b + 2F_{31}^v)] \\
N_{13} &= \frac{1}{3}[2(F_{11}^b + F_{11}^v) - (F_{21}^b + F_{21}^v) - (F_{31}^b + F_{31}^v)] \\
N_{23} &= \frac{1}{3}[-(F_{11}^b + F_{11}^v) + 2(F_{21}^b + F_{21}^v) - (F_{31}^b + F_{31}^v)] \\
N_{33} &= \frac{1}{3}[-(F_{11}^b + F_{11}^v) - (F_{21}^b + F_{21}^v) + 2(F_{31}^b + F_{31}^v)] \\
N_{14} &= \frac{1}{3}[2(F_{11}^b) - (F_{21}^b) - (F_{31}^b)] \\
N_{24} &= \frac{1}{3}[-(F_{11}^b) + 2(F_{21}^b) - (F_{31}^b)] \\
N_{34} &= \frac{1}{3}[-(F_{11}^b) - (F_{21}^b) + 2(F_{31}^b)] \\
N_{15} &= -\frac{1}{3}[2(F_{10}^b + 3F_{10}^v) - (F_{20}^b + 3F_{20}^v) - (F_{30}^b + 3F_{30}^v)] \\
N_{25} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10}^b + 3F_{10}^v) + 2(F_{20}^b + 3F_{20}^v) - (F_{30}^b + 3F_{30}^v)] \\
N_{35} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10}^b + 3F_{10}^v) - (F_{20}^b + 3F_{20}^v) + 2(F_{30}^b + 3F_{30}^v)] \\
N_{16} &= -\frac{1}{3}[2(F_{10}^b + 2F_{10}^v) - (F_{20}^b + 2F_{20}^v) - (F_{30}^b + 2F_{30}^v)] \\
N_{26} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10}^b + 2F_{10}^v) + 2(F_{20}^b + 2F_{20}^v) - (F_{30}^b + 2F_{30}^v)] \\
N_{36} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10}^b + 2F_{10}^v) - (F_{20}^b + 2F_{20}^v) + 2(F_{30}^b + 2F_{30}^v)] \\
N_{17} &= -\frac{1}{3}[2(F_{10}^b + F_{10}^v) - (F_{20}^b + F_{20}^v) - (F_{30}^b + F_{30}^v)] \\
N_{27} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10}^b + F_{10}^v) + 2(F_{20}^b + F_{20}^v) - (F_{30}^b + F_{30}^v)] \\
N_{37} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10}^b + F_{10}^v) - (F_{20}^b + F_{20}^v) + 2(F_{30}^b + F_{30}^v)] \\
N_{18} &= -\frac{1}{3}[2(F_{10}^b) - (F_{20}^b) - (F_{30}^b)] \\
N_{28} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10}^b) + 2(F_{20}^b) - (F_{30}^b)] \\
N_{38} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10}^b) - (F_{20}^b) + 2(F_{30}^b)] \\
N_{49} &= F_{11}^v & N_{410} &= F_{21}^v & N_{411} &= F_{31}^v \\
N_{59} &= F_{11}^v & N_{510} &= F_{21}^v & N_{511} &= F_{31}^v \\
N_{69} &= F_{11}^v & N_{610} &= F_{21}^v & N_{611} &= F_{31}^v \\
N_{79} &= F_{11}^b & N_{710} &= F_{21}^b & N_{711} &= F_{31}^b \\
N_{89} &= F_{10}^v & N_{810} &= F_{20}^v & N_{811} &= F_{30}^v \\
N_{99} &= F_{10}^v & N_{910} &= F_{20}^v & N_{911} &= F_{30}^v \\
N_{109} &= F_{10}^v & N_{1010} &= F_{20}^v & N_{1011} &= F_{30}^v \\
N_{119} &= F_{10}^b & N_{1110} &= F_{20}^b & N_{1111} &= F_{30}^b \\
N_{129} &= [1 - (3F_{11}^v + F_{11}^b + 3F_{10}^v + F_{10}^b)] \\
N_{1210} &= [1 - (3F_{21}^v + F_{21}^b + 3F_{20}^v + F_{20}^b)] \\
N_{1211} &= [1 - (3F_{31}^v + F_{31}^b + 3F_{30}^v + F_{30}^b)]
\end{aligned}
\tag{I-29}$$

• **relation de conversion composée :**

De même, on définit la matrice de conversion composée $[M(t)]$:

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d3} \\ i_{d4} \\ i_{d5} \\ i_{d6} \\ i_{d7} \\ i_{d8} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [M(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U_{C4} \\ U_{C5} \\ U_{C6} \\ U_{C7} \\ U_{C8} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad [I-30]$$

Avec :

$$[M(t)] = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} & M_{17} & M_{18} & 0 & 0 & 0 \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & M_{27} & M_{28} & 0 & 0 & 0 \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & M_{37} & M_{38} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{49} & M_{410} & M_{411} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{59} & M_{510} & M_{511} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{69} & M_{610} & M_{611} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{79} & M_{710} & M_{711} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{89} & M_{810} & M_{811} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{99} & M_{910} & M_{911} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{109} & M_{1010} & M_{1011} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{119} & M_{1110} & M_{1111} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{129} & M_{1210} & M_{1211} \end{bmatrix} \quad [I-31]$$

Avec :

$$\begin{aligned} M_{11} &= [(F_{11}^b + 3F_{11}^{\psi}) - (F_{21}^b + 3F_{21}^{\psi})] & M_{13} &= [(F_{11}^b + 1F_{11}^{\psi}) - (F_{21}^b + 1F_{21}^{\psi})] \\ M_{21} &= [(F_{21}^b + 3F_{21}^{\psi}) - (F_{31}^b + 3F_{31}^{\psi})] & M_{23} &= [(F_{21}^b + 1F_{21}^{\psi}) - (F_{31}^b + 1F_{31}^{\psi})] \\ M_{31} &= [(F_{31}^b + 3F_{31}^{\psi}) - (F_{11}^b + 3F_{11}^{\psi})] & M_{33} &= [(F_{31}^b + 1F_{31}^{\psi}) - (F_{11}^b + 1F_{11}^{\psi})] \\ M_{12} &= [(F_{11}^b + 2F_{11}^{\psi}) - (F_{21}^b + 2F_{21}^{\psi})] & M_{14} &= [(F_{11}^b) - (F_{21}^b)] \\ M_{22} &= [(F_{21}^b + 2F_{21}^{\psi}) - (F_{31}^b + 2F_{31}^{\psi})] & M_{24} &= [(F_{21}^b) - (F_{31}^b)] \\ M_{32} &= [(F_{31}^b + 2F_{31}^{\psi}) - (F_{11}^b + 2F_{11}^{\psi})] & M_{34} &= [(F_{31}^b) - (F_{11}^b)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_{15} &= -[(F_{10}^b + 3F_{10}^{\psi}) - (F_{20}^b + 3F_{20}^{\psi})] & \mathbf{M}_{17} &= -[(F_{10}^b + 1F_{10}^{\psi}) - (F_{20}^b + 1F_{20}^{\psi})] \\
\mathbf{M}_{25} &= -[(F_{20}^b + 3F_{20}^{\psi}) - (F_{30}^b + 3F_{30}^{\psi})] & \mathbf{M}_{27} &= -[(F_{20}^b + 1F_{20}^{\psi}) - (F_{30}^b + 1F_{30}^{\psi})] \\
\mathbf{M}_{35} &= -[(F_{30}^b + 3F_{30}^{\psi}) - (F_{10}^b + 3F_{10}^{\psi})] & \mathbf{M}_{37} &= -[(F_{30}^b + 1F_{30}^{\psi}) - (F_{10}^b + 1F_{10}^{\psi})] \\
\mathbf{M}_{16} &= -[(F_{10}^b + 2F_{10}^{\psi}) - (F_{20}^b + 2F_{20}^{\psi})] & \mathbf{M}_{18} &= -[(F_{10}^b) - (F_{20}^b)] \\
\mathbf{M}_{26} &= -[(F_{20}^b + 2F_{20}^{\psi}) - (F_{30}^b + 2F_{30}^{\psi})] & \mathbf{M}_{28} &= -[(F_{20}^b) - (F_{30}^b)] \\
\mathbf{M}_{36} &= -[(F_{30}^b + 2F_{30}^{\psi}) - (F_{10}^b + 2F_{10}^{\psi})] & \mathbf{M}_{38} &= -[(F_{30}^b) - (F_{10}^b)] \\
\mathbf{M}_{49} &= F_{11}^{\psi} & \mathbf{M}_{410} &= F_{21}^{\psi} & \mathbf{M}_{411} &= F_{31}^{\psi} \\
\mathbf{M}_{59} &= F_{11}^{\psi} & \mathbf{M}_{510} &= F_{21}^{\psi} & \mathbf{M}_{511} &= F_{31}^{\psi} \\
\mathbf{M}_{69} &= F_{11}^{\psi} & \mathbf{M}_{610} &= F_{21}^{\psi} & \mathbf{M}_{611} &= F_{31}^{\psi} \\
\mathbf{M}_{79} &= F_{11}^b & \mathbf{M}_{710} &= F_{21}^b & \mathbf{M}_{711} &= F_{31}^b \\
\mathbf{M}_{89} &= F_{10}^{\psi} & \mathbf{M}_{810} &= F_{20}^{\psi} & \mathbf{M}_{811} &= F_{30}^{\psi} \\
\mathbf{M}_{99} &= F_{10}^{\psi} & \mathbf{M}_{910} &= F_{20}^{\psi} & \mathbf{M}_{911} &= F_{30}^{\psi} \\
\mathbf{M}_{109} &= F_{10}^{\psi} & \mathbf{M}_{1010} &= F_{20}^{\psi} & \mathbf{M}_{1011} &= F_{30}^{\psi} \\
\mathbf{M}_{119} &= F_{10}^b & \mathbf{M}_{1110} &= F_{20}^b & \mathbf{M}_{1111} &= F_{30}^b \\
\mathbf{M}_{129} &= [1 - (3F_{11}^{\psi} + F_{11}^b + 3F_{10}^{\psi} + F_{10}^b)] \\
\mathbf{M}_{1210} &= [1 - (3F_{21}^{\psi} + F_{21}^b + 3F_{20}^{\psi} + F_{20}^b)] \\
\mathbf{M}_{1211} &= [1 - (3F_{31}^{\psi} + F_{31}^b + 3F_{30}^{\psi} + F_{30}^b)]
\end{aligned} \tag{I-32}$$

partir de cette figure, on distingue deux parties :

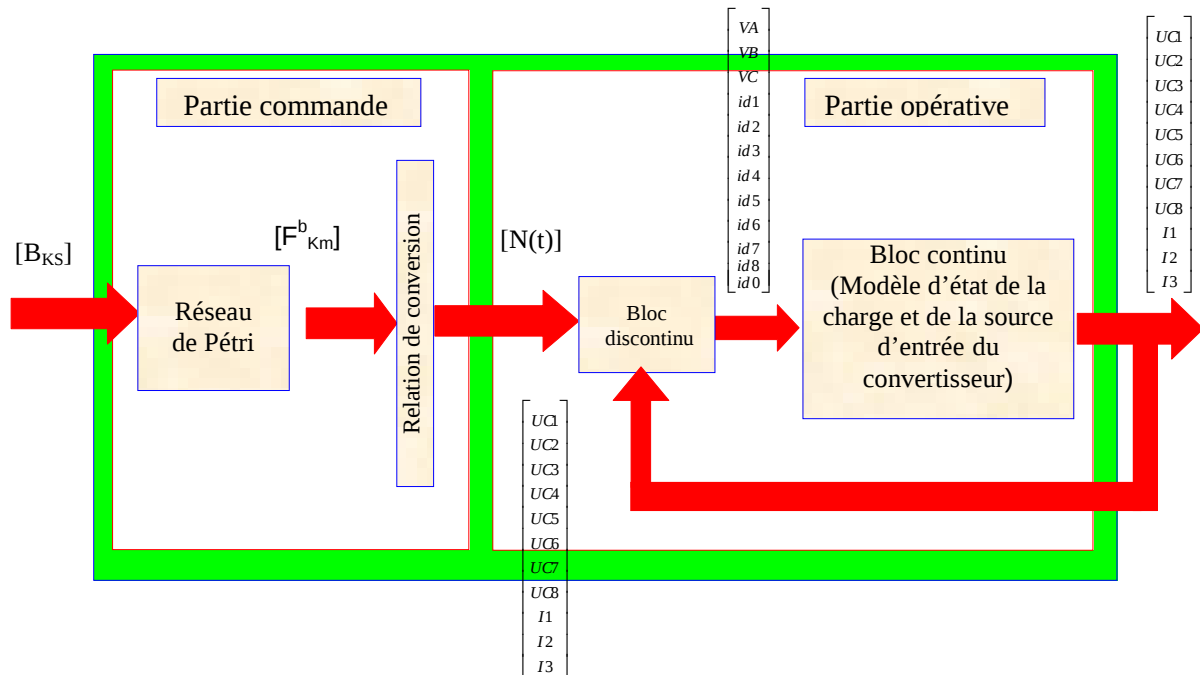


Figure (I-8): Modèle de connaissance global de l'onduleur triphasé à neuf niveaux en mode commandable associé à une charge

- la partie commande : qui est représentée par le réseau de petri , la matrice de conversion dans cette partie c'est la relation [I-28] .
- la partie opérative : qui est consistée :
 - D'un bloc discontinu : délivrant les entrées internes .
 - D'un bloc continu : qui représente le modèle d'état de la charge .

I-3-6-Modèle de commande:

le modèle de connaissance global de l'onduleur présenté précédemment, on introduit la notion de fonction génératrice qui permet d'approcher le bloc discontinu par un bloc continu[1,8,12]. L'utilisation de ces fonctions génératrices permet une modélisation aux valeurs moyennes du bloc discontinu du modèle de connaissance ,le même pour les fonctions génératrices de connexion des demi-bras :

Les relations de conversion [I-20] et [I-22] deviennent alors :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d3} \\ i_{d4} \\ i_{d5} \\ i_{d6} \\ i_{d7} \\ i_{d8} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [N_g(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U_{C4} \\ U_{C5} \\ U_{C6} \\ U_{C7} \\ U_{C8} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad [I-33]$$

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d3} \\ i_{d4} \\ i_{d5} \\ i_{d6} \\ i_{d7} \\ i_{d8} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [M_g(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U_{C4} \\ U_{C5} \\ U_{C6} \\ U_{C7} \\ U_{C8} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad [I-34]$$

Avec $[N_g(t)]$ et $[M_g(t)]$ comme suit :

$$\begin{aligned}
 N_{g11} &= \frac{1}{3}[2(F_{11g}^b + 3F_{11g}^v) - (F_{21g}^b + 3F_{21g}^v) - (F_{31g}^b + 3F_{31g}^v)] \\
 N_{g21} &= \frac{1}{3}[-(F_{11g}^b + 3F_{11g}^v) + 2(F_{21g}^b + 3F_{21g}^v) - (F_{31g}^b + 3F_{31g}^v)] \\
 N_{g31} &= \frac{1}{3}[-(F_{11g}^b + 3F_{11g}^v) - (F_{21g}^b + 3F_{21g}^v) + 2(F_{31g}^b + 3F_{31g}^v)] \\
 N_{g12} &= \frac{1}{3}[2(F_{11g}^b + 2F_{11g}^v) - (F_{21g}^b + 2F_{21g}^v) - (F_{31g}^b + 2F_{31g}^v)] \\
 N_{g22} &= \frac{1}{3}[-(F_{11g}^b + 2F_{11g}^v) + 2(F_{21g}^b + 2F_{21g}^v) - (F_{31g}^b + 2F_{31g}^v)] \\
 N_{g32} &= \frac{1}{3}[-(F_{11g}^b + 2F_{11g}^v) - (F_{21g}^b + 2F_{21g}^v) + 2(F_{31g}^b + 2F_{31g}^v)] \\
 N_{g13} &= \frac{1}{3}[2(F_{11g}^b + F_{11g}^v) - (F_{21g}^b + F_{21g}^v) - (F_{31g}^b + F_{31g}^v)] \\
 N_{g23} &= \frac{1}{3}[-(F_{11g}^b + F_{11g}^v) + 2(F_{21g}^b + F_{21g}^v) - (F_{31g}^b + F_{31g}^v)] \\
 N_{g33} &= \frac{1}{3}[-(F_{11g}^b + F_{11g}^v) - (F_{21g}^b + F_{21g}^v) + 2(F_{31g}^b + F_{31g}^v)] \\
 N_{g14} &= \frac{1}{3}[2(F_{11g}^b) - (F_{21g}^b) - (F_{31g}^b)] \\
 N_{g24} &= \frac{1}{3}[-(F_{11g}^b) + 2(F_{21g}^b) - (F_{31g}^b)] \\
 N_{g34} &= \frac{1}{3}[-(F_{11g}^b) - (F_{21g}^b) + 2(F_{31g}^b)]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{g15} &= -\frac{1}{3}[2(F_{10g}^b + 3F_{10g}^f) - (F_{20g}^b + 3F_{20g}^f) - (F_{30g}^b + 3F_{30g}^f)] \\
N_{g25} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10g}^b + 3F_{10g}^f) + 2(F_{20g}^b + 3F_{20g}^f) - (F_{30g}^b + 3F_{30g}^f)] \\
N_{g35} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10g}^b + 3F_{10g}^f) - (F_{20g}^b + 3F_{20g}^f) + 2(F_{30g}^b + 3F_{30g}^f)] \\
N_{g16} &= -\frac{1}{3}[2(F_{10g}^b + 2F_{10g}^f) - (F_{20g}^b + 2F_{20g}^f) - (F_{30g}^b + 2F_{30g}^f)] \\
N_{g26} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10g}^b + 2F_{10g}^f) + 2(F_{20g}^b + 2F_{20g}^f) - (F_{30g}^b + 2F_{30g}^f)] \\
N_{g36} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10g}^b + 2F_{10g}^f) - (F_{20g}^b + 2F_{20g}^f) + 2(F_{30g}^b + 2F_{30g}^f)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{g17} &= -\frac{1}{3}[2(F_{10g}^b + F_{10g}^f) - (F_{20g}^b + F_{20g}^f) - (F_{30g}^b + F_{30g}^f)] \\
N_{g27} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10g}^b + F_{10g}^f) + 2(F_{20g}^b + F_{20g}^f) - (F_{30g}^b + F_{30g}^f)] \\
N_{g37} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10g}^b + F_{10g}^f) - (F_{20g}^b + F_{20g}^f) + 2(F_{30g}^b + F_{30g}^f)] \\
N_{g18} &= -\frac{1}{3}[2(F_{10g}^b) - (F_{20g}^b) - (F_{30g}^b)] \\
N_{g28} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10g}^b) + 2(F_{20g}^b) - (F_{30g}^b)] \\
N_{g38} &= -\frac{1}{3}[-(F_{10g}^b) - (F_{20g}^b) + 2(F_{30g}^b)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{g49} &= F_{11g}^f & N_{g410} &= F_{21g}^f & N_{g411} &= F_{31g}^f \\
N_{g59} &= F_{11g}^f & N_{g510} &= F_{21g}^f & N_{g511} &= F_{31g}^f \\
N_{g69} &= F_{11g}^f & N_{g610} &= F_{21g}^f & N_{g611} &= F_{31g}^f \\
N_{g79} &= F_{11g}^b & N_{g710} &= F_{21g}^b & N_{g711} &= F_{31g}^b \\
N_{g89} &= F_{10g}^f & N_{g810} &= F_{20g}^f & N_{g811} &= F_{30g}^f \\
N_{g99} &= F_{10g}^f & N_{g910} &= F_{20g}^f & N_{g911} &= F_{30g}^f \\
N_{g109} &= F_{10g}^f & N_{g1010} &= F_{20g}^f & N_{g1011} &= F_{30g}^f \\
N_{g119} &= F_{10g}^f & N_{g1110} &= F_{20g}^f & N_{g1111} &= F_{30g}^f
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{g129} &= [1 - (3F_{11g}^f + F_{11g}^b + 3F_{10g}^f + F_{10g}^b)] \\
N_{g1210} &= [1 - (3F_{21g}^f + F_{21g}^b + 3F_{20g}^f + F_{20g}^b)] \\
N_{g1211} &= [1 - (3F_{31g}^f + F_{31g}^b + 3F_{30g}^f + F_{30g}^b)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{g11} &= [(F_{11g}^b + 3F_{11g}^f) - (F_{21g}^b + 3F_{21g}^f)] & M_{g13} &= [(F_{11g}^b + 1F_{11g}^f) - (F_{21g}^b + 1F_{21g}^f)] \\
M_{g21} &= [(F_{21g}^b + 3F_{21g}^f) - (F_{31g}^b + 3F_{31g}^f)] & M_{g23} &= [(F_{21g}^b + 1F_{21g}^f) - (F_{31g}^b + 1F_{31g}^f)] \\
M_{g31} &= [(F_{31g}^b + 3F_{31g}^f) - (F_{11g}^b + 3F_{11g}^f)] & M_{g33} &= [(F_{31g}^b + 1F_{31g}^f) - (F_{11g}^b + 1F_{11g}^f)] \\
M_{g12} &= [(F_{11g}^b + 2F_{11g}^f) - (F_{21g}^b + 2F_{21g}^f)] & M_{g14} &= [(F_{11g}^b) - (F_{21g}^b)] \\
M_{g22} &= [(F_{21g}^b + 2F_{21g}^f) - (F_{31g}^b + 2F_{31g}^f)] & M_{g24} &= [(F_{21g}^b) - (F_{31g}^b)] \\
M_{g32} &= [(F_{31g}^b + 2F_{31g}^f) - (F_{11g}^b + 2F_{11g}^f)] & M_{g34} &= [(F_{31g}^b) - (F_{11g}^b)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{g15} &= -[(F_{10g}^b + 3F_{10g}^f) - (F_{20g}^b + 3F_{20g}^f)] & M_{g17} &= -[(F_{10g}^b + 1F_{10g}^f) - (F_{20g}^b + 1F_{20g}^f)] \\
M_{g25} &= -[(F_{20g}^b + 3F_{20g}^f) - (F_{30g}^b + 3F_{30g}^f)] & M_{g27} &= -[(F_{20g}^b + 1F_{20g}^f) - (F_{30g}^b + 1F_{30g}^f)] \\
M_{g35} &= -[(F_{30g}^b + 3F_{30g}^f) - (F_{10g}^b + 3F_{10g}^f)] & M_{g37} &= -[(F_{30g}^b + 1F_{30g}^f) - (F_{10g}^b + 1F_{10g}^f)] \\
M_{g16} &= -[(F_{10g}^b + 2F_{10g}^f) - (F_{20g}^b + 2F_{20g}^f)] & M_{g18} &= -[(F_{10g}^b) - (F_{20g}^b)] \\
M_{g26} &= -[(F_{20g}^b + 2F_{20g}^f) - (F_{30g}^b + 2F_{30g}^f)] & M_{g28} &= -[(F_{20g}^b) - (F_{30g}^b)] \\
M_{g36} &= -[(F_{30g}^b + 2F_{30g}^f) - (F_{10g}^b + 2F_{10g}^f)] & M_{g38} &= -[(F_{30g}^b) - (F_{10g}^b)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_{g49} &= F_{11g}^b & \mathbf{M}_{g410} &= F_{21g}^b & \mathbf{M}_{g411} &= F_{31g}^b \\
\mathbf{M}_{g59} &= F_{11g}^b & \mathbf{M}_{g510} &= F_{21g}^b & \mathbf{M}_{g511} &= F_{31g}^b \\
\mathbf{M}_{g69} &= F_{11g}^b & \mathbf{M}_{g610} &= F_{21g}^b & \mathbf{M}_{g611} &= F_{31g}^b \\
\mathbf{M}_{g79} &= F_{11g}^b & \mathbf{M}_{g710} &= F_{21g}^b & \mathbf{M}_{g711} &= F_{31g}^b \\
\mathbf{M}_{g89} &= F_{10g}^b & \mathbf{M}_{g810} &= F_{20g}^b & \mathbf{M}_{g811} &= F_{30g}^b \\
\mathbf{M}_{g99} &= F_{10g}^b & \mathbf{M}_{g910} &= F_{20g}^b & \mathbf{M}_{g911} &= F_{30g}^b \\
\mathbf{M}_{g109} &= F_{10g}^b & \mathbf{M}_{g1010} &= F_{20g}^b & \mathbf{M}_{g1011} &= F_{30g}^b \\
\mathbf{M}_{g119} &= F_{10g}^b & \mathbf{M}_{g1110} &= F_{20g}^b & \mathbf{M}_{g1111} &= F_{30g}^b \\
\mathbf{M}_{g129} &= [1 - (3F_{11g}^b + F_{11g}^b + 3F_{10g}^b + F_{10g}^b)] \\
\mathbf{M}_{g1210} &= [1 - (3F_{21g}^b + F_{21g}^b + 3F_{20g}^b + F_{20g}^b)] \\
\mathbf{M}_{g1211} &= [1 - (3F_{31g}^b + F_{31g}^b + 3F_{30g}^b + F_{30g}^b)]
\end{aligned}$$

Dans ce cas et avec l'hypothèse $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = U_{C5} = U_{C6} = U_{C7} = U_{C8} = U_C$, les relations [I-33] et [I-34] peuvent être réduites respectivement aux relations [I-35] et [I-36]:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d3} \\ i_{d4} \\ i_{d5} \\ i_{d6} \\ i_{d7} \\ i_{d8} \\ i_{d9} \end{bmatrix} = [N_g(t)] \begin{bmatrix} U_C \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad [I-35];$$

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d3} \\ i_{d4} \\ i_{d5} \\ i_{d6} \\ i_{d7} \\ i_{d8} \\ i_{d9} \end{bmatrix} = [M_g(t)] \begin{bmatrix} U_C \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad [I-36]$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, une des structures des convertisseurs multi niveaux a été développée. Il s'agit de l'onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes.

Ce modèle sera utilisé pour l'élaboration des différentes stratégies de commande appliquées à l'onduleur à neuf niveaux à diodes flottantes alimentant la machine asynchrone de grande puissance.

Nous avons présenté le modèle de connaissance de l'onduleur, sans à priori sur sa commande en utilisant les réseaux de Petri pour un fonctionnement complètement commandable.

L'utilisation des fonctions de connexion des demi bras de l'onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes , nous a permis d'avoir l'analogie entre les tensions de sortie de l'onduleur à neuf niveaux et celles à deux niveaux . On a montré également que l'onduleur triphasé à neuf niveaux est la mise en série de huit onduleurs à deux niveaux, donc de quatre onduleurs à trois niveaux ou deux onduleurs à cinq niveaux .

CHAPITRE II

Stratégies de commande de onduleur triphasé de tension à neuf niveaux à diodes flottantes

Introduction:

Les récents progrès technologiques dans le domaine des dispositifs à semi-conducteurs ont élargi le domaine d'application des techniques de modulation de largeurs d'impulsions dans le contrôle de la tension de sortie des convertisseurs statiques.

Dans ce chapitre, on élabore les stratégies de commande MLI à huit porteuses d'un onduleur à neuf niveaux.

II-1- Stratégie de commande de l' onduleurs de tension triphasé à neuf niveaux :

Dans cette partie, nous élaborons quelques stratégies qui sont :

- ❖ Commande (MLI) à huit porteuses en dens de scie bipolaires
- ❖ Commande (MLI) à huit porteuses en triangulaire bipolaires

Les tensions de référence de l'onduleur triphasé à neuf niveaux sont données comme suit :

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_m \sin wt \\ V_{ref2} = V_m \sin\left(wt - \frac{2}{3}\pi\right) \\ V_{ref3} = V_m \sin\left(wt - \frac{4}{3}\pi\right) \end{cases} \quad [II-1]$$

Deux paramètres caractérisent cette stratégie:

- L'indice de modulation "m" qui est définit comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse (fp) à la fréquence de la tension de référence: $m = fp/f$
- Taux de modulation "r" qui est le rapport de l'amplitude maximale de la tension de référence (Vm) et celle de la porteuse (Upm): $r = Vm/Upm$

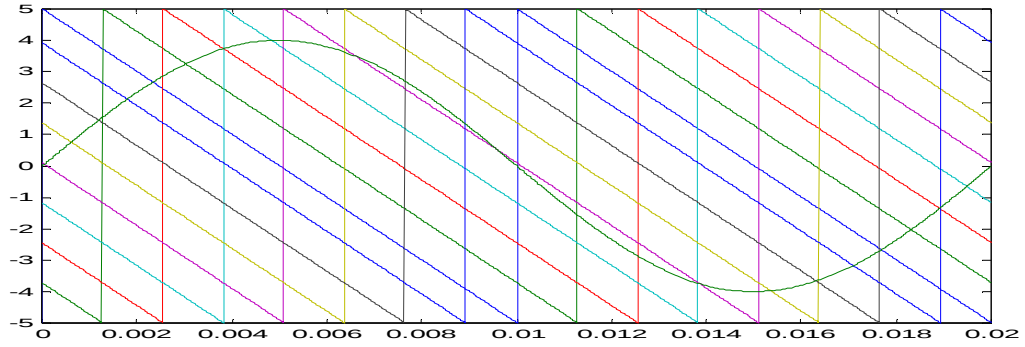
II-1-1- Commande MLI à huit porteuses en dent de scie bipolaire :

On a huit porteuses en dents de scie bipolaire ($Up_1, Up_2, Up_3, Up_4, Up_5, Up_6, Up_7, Up_8$), leurs équations sont données comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} Up_1 = \left\{ U_{pm} \left(\frac{-2t_1}{T_p} - 1 \right); 0 \leq t_1 \leq T_p \right. \\ \\ Up_2 = \left\{ U_{pm} \left(\frac{-2t_2}{T_p} - 1 \right); 0 \leq t_2 \leq \frac{T_p}{8} \right. \\ \\ \quad \left. U_{pm} \left(\frac{-2t_2}{T_p} - 1 \right); \frac{T}{8} \leq t_2 \leq T_p \right. \\ \\ Up_3 = \left\{ U_{pm} \left(\frac{-2t_3}{T_p} - 1 \right); 0 \leq t_3 \leq \frac{2T_p}{8} \right. \\ \\ \quad \left. U_{pm} \left(\frac{-2t_3}{T_p} - 1 \right); \frac{2T}{8} \leq t_3 \leq T_p \right. \\ \\ Up_4 = \left\{ U_{pm} \left(\frac{-2t_4}{T_p} - 1 \right); 0 \leq t_4 \leq \frac{3T_p}{8} \right. \\ \\ \quad \left. U_{pm} \left(\frac{-2t_4}{T_p} - 1 \right); \frac{3T}{8} \leq t_4 \leq T_p \right. \\ \\ Up_5 = \left\{ U_{pm} \left(\frac{-2t_5}{T_p} - 1 \right); 0 \leq t_5 \leq \frac{4T_p}{8} \right. \\ \\ \quad \left. U_{pm} \left(\frac{-2t_5}{T_p} - 1 \right); \frac{4T}{8} \leq t_5 \leq T_p \right. \\ \\ Up_6 = \left\{ U_{pm} \left(\frac{-2t_6}{T_p} - 1 \right); 0 \leq t_6 \leq \frac{5T_p}{8} \right. \\ \\ \quad \left. U_{pm} \left(\frac{-2t_6}{T_p} - 1 \right); \frac{5T}{8} \leq t_6 \leq T_p \right. \\ \\ Up_7 = \left\{ U_{pm} \left(\frac{-2t_7}{T_p} - 1 \right); 0 \leq t_7 \leq \frac{6T_p}{8} \right. \\ \\ \quad \left. U_{pm} \left(\frac{-2t_7}{T_p} - 1 \right); \frac{6T}{8} \leq t_7 \leq T_p \right. \\ \\ Up_8 = \left\{ U_{pm} \left(\frac{-2t_8}{T_p} - 1 \right); 0 \leq t_8 \leq \frac{7T_p}{8} \right. \\ \\ \quad \left. U_{pm} \left(\frac{-2t_8}{T_p} - 1 \right); \frac{7T}{8} \leq t_8 \leq T_p \right. \end{array} \right. \quad [\text{II-2}]$$

La figure suivante représente les signaux des porteuses ($Up_1, \dots, Up_8$) avec l'onde de référence

V_{ref1}



**Figure [II-1] : Les huit porteuses en dents de scie bipolaire
($m=2, r=0.8$)**

1^{ère} étape: Détermination des tensions intermédiaires:

$$\begin{cases} V_{refk} \geq Up_4 \Rightarrow V_{k1} = 4U_c \\ V_{refk} < Up_4 \Rightarrow V_{k1} = 3U_c \end{cases} \quad \begin{cases} V_{refk} \geq Up_3 \Rightarrow V_{k2} = 3U_c \\ V_{refk} < Up_3 \Rightarrow V_{k2} = 2U_c \end{cases} \quad \begin{cases} V_{refk} \geq Up_2 \Rightarrow V_{k3} = 2U_c \\ V_{refk} < Up_2 \Rightarrow V_{k3} = U_c \end{cases} \\
 \begin{cases} V_{refk} \geq Up_1 \Rightarrow V_{k4} = U_c \\ V_{refk} < Up_1 \Rightarrow V_{k4} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} V_{refk} \geq Up_5 \Rightarrow V_{k5} = 0 \\ V_{refk} < Up_5 \Rightarrow V_{k5} = -U_c \end{cases} \quad \begin{cases} V_{refk} \geq Up_6 \Rightarrow V_{k6} = -U_c \\ V_{refk} < Up_6 \Rightarrow V_{k6} = -2U_c \end{cases} \\
 \begin{cases} V_{refk} \geq Up_7 \Rightarrow V_{k7} = -2U_c \\ V_{refk} < Up_7 \Rightarrow V_{k7} = -3U_c \end{cases} \quad \begin{cases} V_{refk} \geq Up_8 \Rightarrow V_{k8} = -3U_c \\ V_{refk} < Up_8 \Rightarrow V_{k8} = -4U_c \end{cases}
 \end{cases} \quad [II-3]$$

2^{ème} étape: Détermination du signal V_{km} et les ordres de commande B_{ks} des interrupteurs:

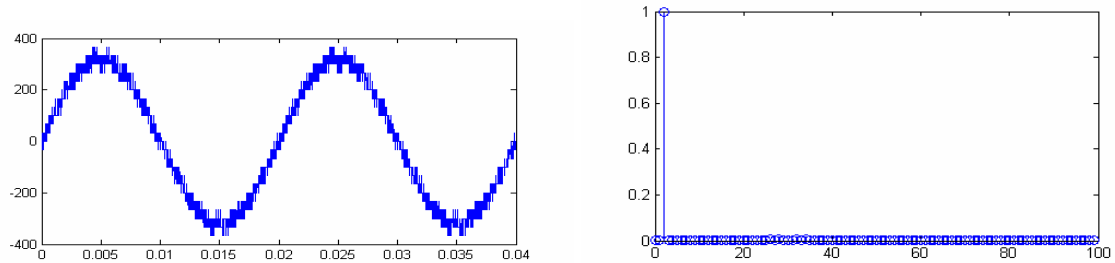
$$V_{km} = \begin{cases} 4U_c \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 1 \\ 3U_c \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = 1 \text{ et } B_{k8} = 0 \\ 2U_c \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = 1 \text{ et } B_{k7} = B_{k8} = 0 \\ 1U_c \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = 1 \text{ et } B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 0 \\ 0U_c \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = 1 \text{ et } B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 0 \\ -1U_c \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = 1 \text{ et } B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 0 \\ -2U_c \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = 1 \text{ et } B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 0 \\ -3U_c \Rightarrow B_{k1} = 1 \text{ et } B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 0 \\ -4U_c \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 0 \end{cases} \quad [II-4]$$

Avec :

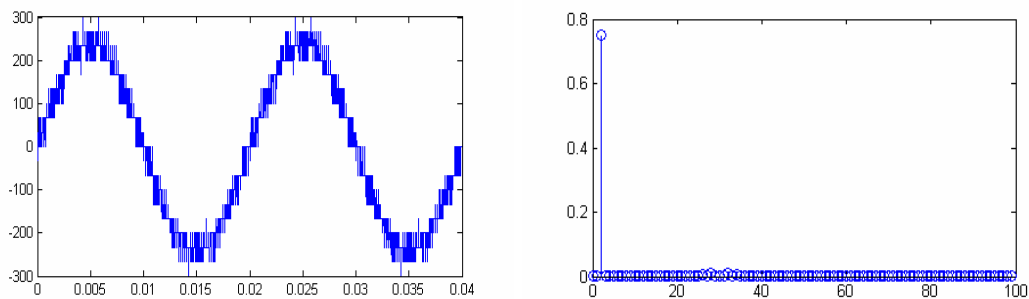
$$\begin{cases} V_{km} = V_{k1} + V_{k2} + V_{k3} + V_{k4} + V_{k5} + V_{k6} + V_{k7} + V_{k8} \\ B_{k1} = \overline{B_{k16}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k15}} \\ B_{k3} = \overline{B_{k14}} \\ B_{k4} = \overline{B_{k13}} \\ B_{k5} = \overline{B_{k12}} \\ B_{k6} = \overline{B_{k11}} \\ B_{k7} = \overline{B_{k10}} \\ B_{k8} = \overline{B_{k9}} \end{cases} \quad [II-5]$$

II-1-1-1 Simulation Numérique:

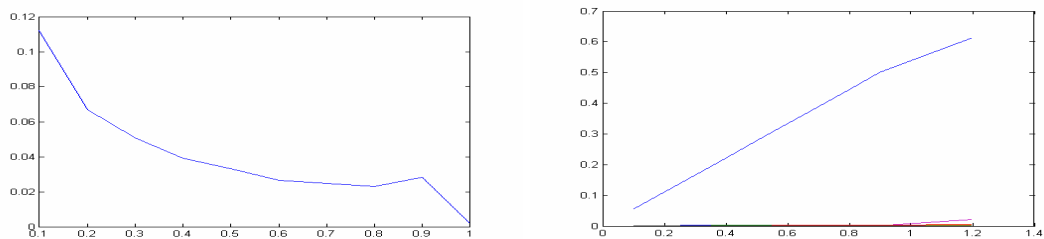
- ♦ Pour $m=12$ et 15 avec $r=0.6$ et $r=0.8$, $f=50\text{Hz}$ on peut tracer dans les figures suivant la tension simple V_a de l'onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes et son spectre d'harmonique :



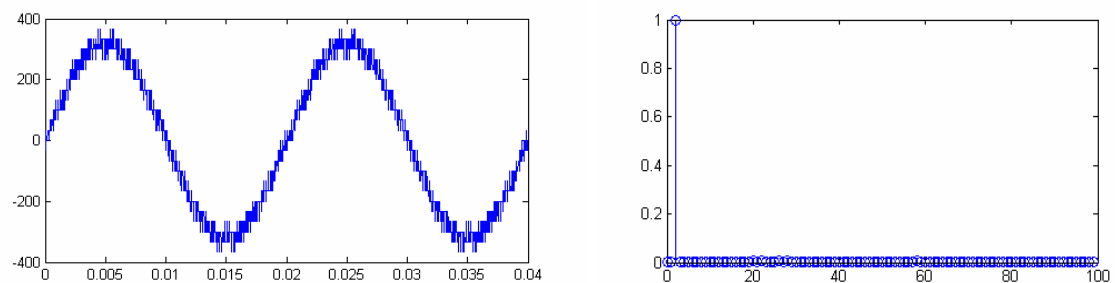
Figure[II-3]: La tension simple V_a , et son spectre pour $m = 15$ et $r=0.8$



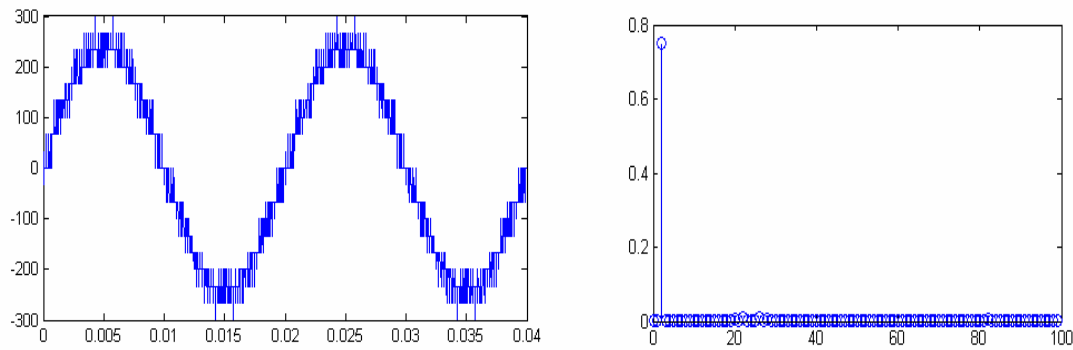
Figure[II-4]: La tension simple V_a , et son spectre pour $m = 15$ et $r=0.6$



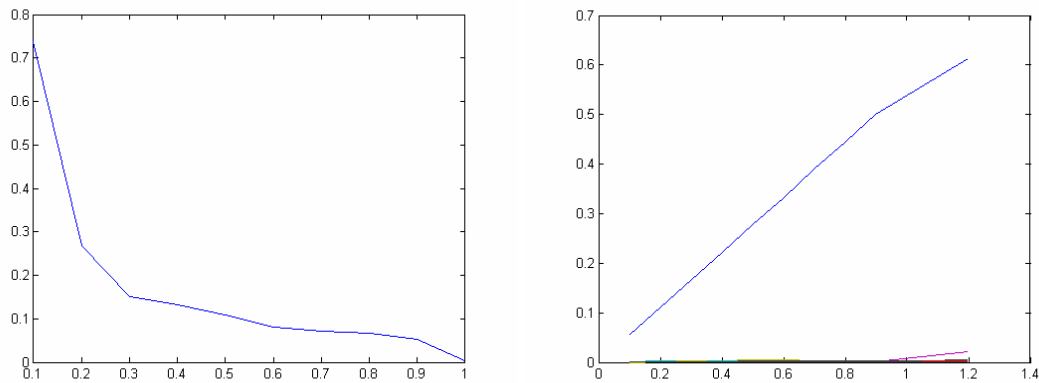
Figure[II-5]: Caractéristiques de la tension V_a de l'onduleur pour $m=15$



Figure[II-6]: La tension simple V_a , et son spectre pour $m = 12$ et $r=0.8$



Figure[II-7] : La tension simple V_a , et son spectre pour $m=12$ et $r=0.6$



Figure[II-8]: Caractéristiques de la tension V_a de l'onduleur pour $m=12$

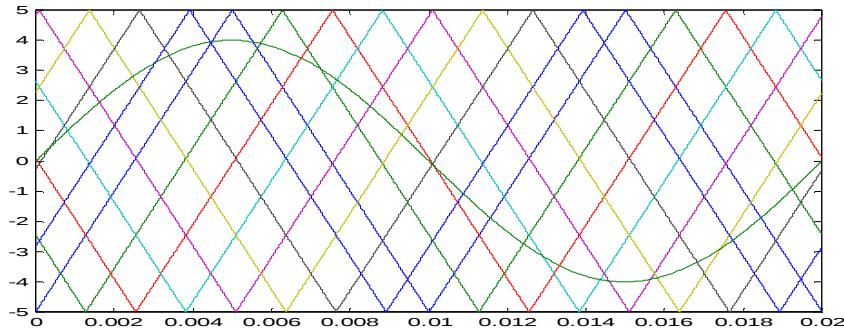
II-1-1- 2-Interprétations et commentaires:

- Pour tout les valeurs de l'indice de modulation m , la tension V_a présente une symétrie par rapport à $T/4$ et donc seuls les harmoniques impaires existant..
- L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevées et donc facilement filtrées par l'inductance de la machine.
- La stratégie de commande permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de $r = 0$ à $r = 1,2$. Le taux d'harmoniques est décroissant en fonction de r (figure [II-8]).

II-1-2 Commande MLI à huit porteuses triangulaire bipolaire:

Le principe de cette stratégie consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante (qui est l'image de l'onde de sortie qu'on veut obtenir) généralement sinusoïdale avec huit porteuses triangulaires bipolaires.

La figure suivante représente les porteuse ($Up_1, \dots, Up_8$) avec l'onde de référence V_{ref}



Figure[II-9] :La commande à huit porteuses tringulaire bipolaire($m=2$, $r=0.8$)

L'algorithme de commande est comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} Up1 = \begin{cases} Upm \left(4 \frac{t}{T_p} - 1 \right) & 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ Upm \left(-4 \frac{t}{T_p} + 3 \right) & \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \\ \\ Up2 = Upm \left(t - \frac{T_p}{8} \right) \\ Up3 = Upm \left(t - \frac{T_p}{4} \right) \\ \\ Up4 = Upm \left(t - 3 \frac{T_p}{8} \right) \\ Up5 = Upm \left(t - \frac{T_p}{2} \right) \\ Up6 = Upm \left(t - 5 \frac{T_p}{8} \right) \\ Up7 = Upm \left(t - 3 \frac{T_p}{2} \right) \\ Up8 = Upm \left(t - 7 \frac{T_p}{8} \right) \end{array} \right. \quad [II-6]$$

II-1-2-1 Simulation Numérique:

Pour $m=12$ et 15 avec $r=0.6$ et $r=0.8$, $f=50\text{Hz}$ on peut tracer dans les figures suivantes la tension simple V_a de l'onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes et son spectre d'harmonique

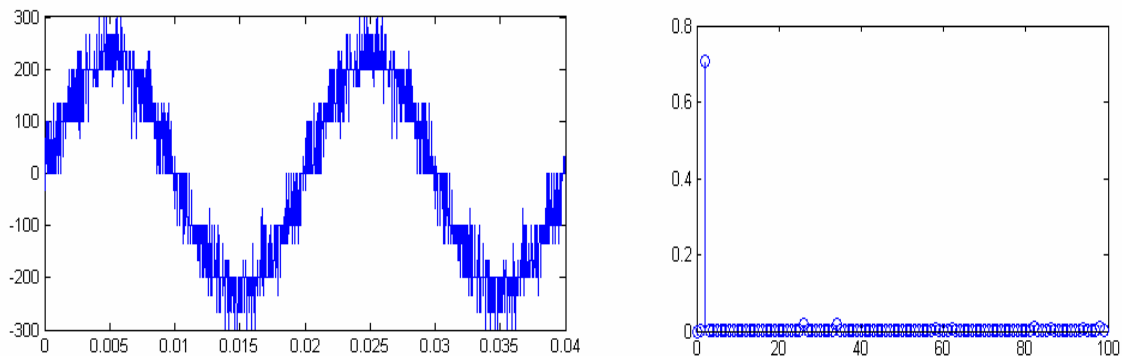


Figure [II-10]: La tension simple V_a , et son spectre pour $m = 15$ et $r=0.8$

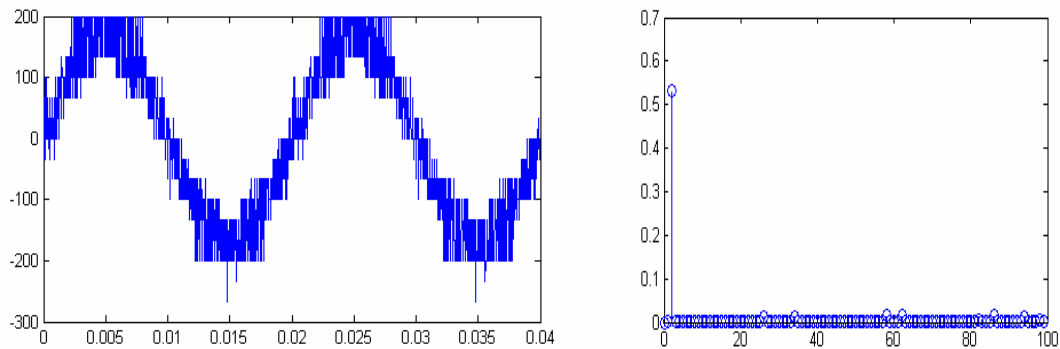


Figure [II-11]: La tension simple V_a , et son spectre pour $m = 15$ et $r=0.6$

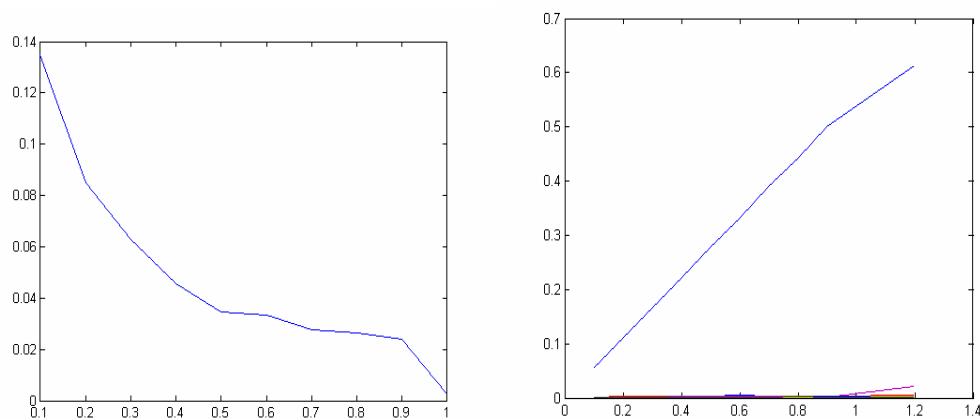
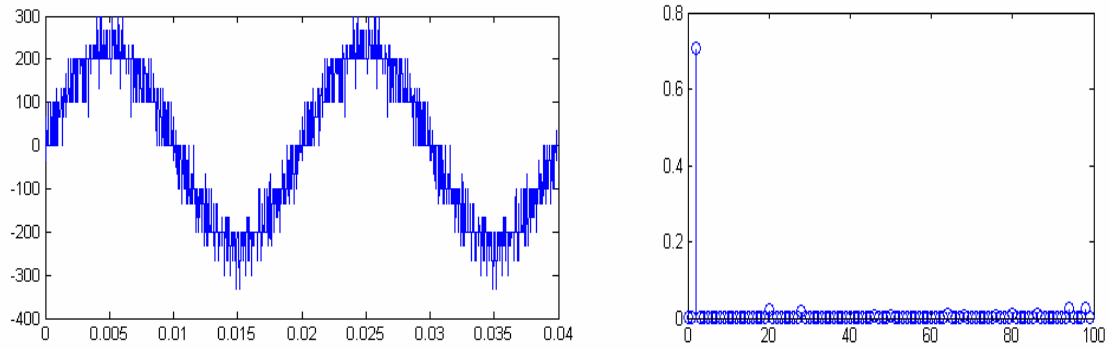
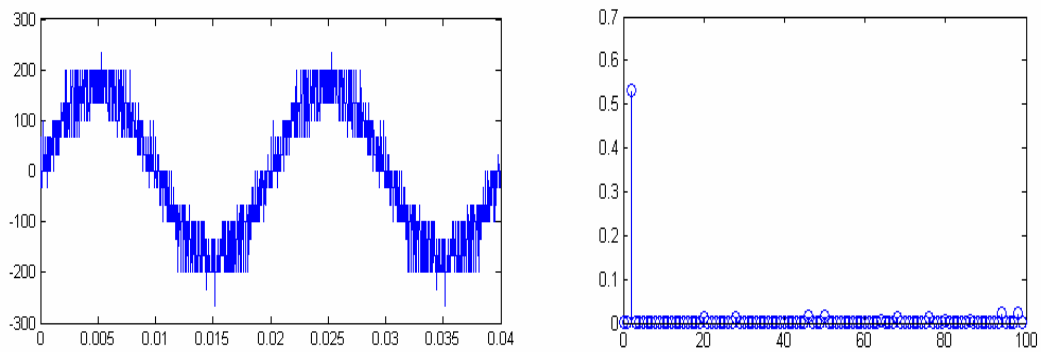


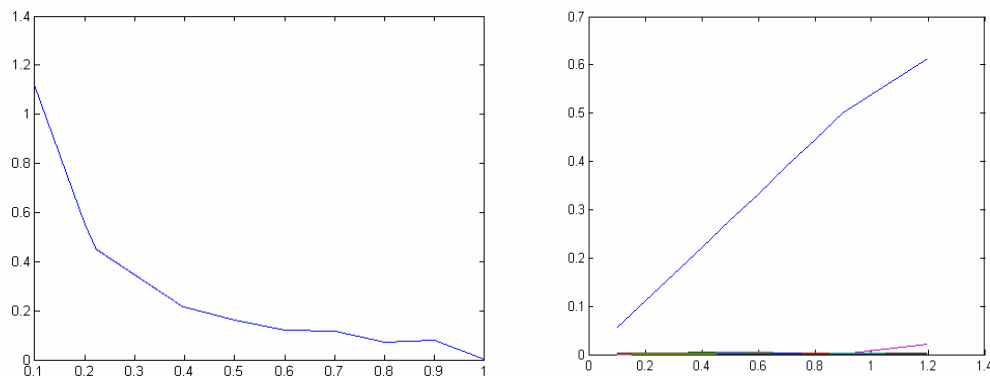
Figure [II-12]: Caractéristiques de la tension V_a de l'onduleur pour $m=15$



Figure[II-13]: La tension simple V_a , et son spectre pour $m = 12$ et $r=0.8$



Figure[II-14]: La tension simple V_a , et son spectre pour $m = 12$ et $r=0.6$



Figure[II-15]: Caractéristiques de la tension V_a de l'onduleur pour $m=12$

II-1-2- 2-Interprétations et commentaires:

- On montre que pour tout les valeurs de l'indice de modulation " m ", la tension de sortie V_a présente une symétrie par rapport à π et $\pi/2$.
- L'augmentation de l'indice de modulation " m " permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevées et donc facilement filtrées par l'inductance de la machine.
- Le taux de modulation " r " permet un réglage linéaire de l'amplitude de fondamentale de 0 à $4U_c$.

- La stratégie est de commande permet un réglage linéaire de l'omplitude du fondamental de $r=0$ à $r=1,15$. Le taux d'harmoniques est décroissant en fonction de r (figure [II-12]).
- La figure [II-15] montre la caractéristique de réglage présente une linéarité jusqu'à $r=1,2$ et que le taux de distortion harmonique est inversement proportionnel à " r ".

II-2-stratégie de commande du redresseur de courant à neuf niveaux :

Dans cette partie, nous élaborons quelques stratégies qui sont :

- ❖ Commande (MLI) à huit porteuses en dents de scie bipolaire
- ❖ Commande (MLI) à huit porteuses en triangulaire bipolaire

Les courants de réseaux de redresseur à neuf niveaux sont données comme suit :

$$\begin{cases} I_{res1} = (1/L)V_{res1} - (R/L) - V_{AN} \\ I_{res2} = (1/L)V_{res2} - (R/L) - V_{BN} \\ I_{res3} = (1/L)V_{res3} - (R/L) - V_{CN} \end{cases} \quad [II-7]$$

V_{KN} : la tension liée au bras i du redresseur qui est en série avec l'impédance du réseau ($R-L$)

Les courants de référence de redresseur à neuf niveaux sont données comme suit :

$$\begin{cases} I_{ref1} = I_m \sin(2\pi f t) \\ I_{ref2} = I_m \sin(2\pi f t - 2\pi/3) \\ I_{ref3} = I_m \sin(2\pi f t - 4\pi/3) \end{cases} \quad .[II-8]$$

II-2-1- Commande MLI à huit porteuses en dent de scie bipolaire :

On a huit porteuses en dents de scie bipolaire ($I_{p1}, I_{p2}, I_{p3}, I_{p4}, I_{p5}, I_{p6}, I_{p7}, I_{p8}$), leurs équations peuvent être données comme suit :

$$\left\{ \begin{aligned} Ip_1 &= \begin{cases} I_{pm} \left(\frac{-2t_1}{T_p} - 1 \right); & 0 \leq t_1 \leq T_p \\ I_{pm} \left(\frac{-2t_2}{T_p} - 1 \right); & 0 \leq t_2 \leq \frac{T_p}{8} \\ I_{pm} \left(\frac{-2t_2}{T_p} - 1 \right); & \frac{T}{8} \leq t_2 \leq T_p \end{cases} \\ Ip_2 &= \begin{cases} I_{pm} \left(\frac{-2t_3}{T_p} - 1 \right); & 0 \leq t_3 \leq \frac{2T_p}{8} \\ I_{pm} \left(\frac{-2t_3}{T_p} - 1 \right); & \frac{2T}{8} \leq t_3 \leq T_p \end{cases} \\ Ip_3 &= \begin{cases} I_{pm} \left(\frac{-2t_4}{T_p} - 1 \right); & 0 \leq t_4 \leq \frac{3T_p}{8} \\ I_{pm} \left(\frac{-2t_4}{T_p} - 1 \right); & \frac{3T}{8} \leq t_4 \leq T_p \end{cases} \\ Ip_4 &= \begin{cases} I_{pm} \left(\frac{-2t_5}{T_p} - 1 \right); & 0 \leq t_5 \leq \frac{4T_p}{8} \\ I_{pm} \left(\frac{-2t_5}{T_p} - 1 \right); & \frac{4T}{8} \leq t_5 \leq T_p \end{cases} \\ Ip_5 &= \begin{cases} I_{pm} \left(\frac{-2t_6}{T_p} - 1 \right); & 0 \leq t_6 \leq \frac{5T_p}{8} \\ I_{pm} \left(\frac{-2t_6}{T_p} - 1 \right); & \frac{5T}{8} \leq t_6 \leq T_p \end{cases} \\ Ip_6 &= \begin{cases} I_{pm} \left(\frac{-2t_7}{T_p} - 1 \right); & 0 \leq t_7 \leq \frac{6T_p}{8} \\ I_{pm} \left(\frac{-2t_7}{T_p} - 1 \right); & \frac{6T}{8} \leq t_7 \leq T_p \end{cases} \\ Ip_7 &= \begin{cases} I_{pm} \left(\frac{-2t_8}{T_p} - 1 \right); & 0 \leq t_8 \leq \frac{7T_p}{8} \\ I_{pm} \left(\frac{-2t_8}{T_p} - 1 \right); & \frac{7T}{8} \leq t_8 \leq T_p \end{cases} \\ Ip_8 &= \begin{cases} I_{pm} \left(\frac{-2t_8}{T_p} - 1 \right); & 0 \leq t_8 \leq \frac{7T_p}{8} \\ I_{pm} \left(\frac{-2t_8}{T_p} - 1 \right); & \frac{7T}{8} \leq t_8 \leq T_p \end{cases} \end{aligned} \right. \quad [\text{II-9}]$$

1^{ère} étape: Détermination des courants intermédiaires:

$$\begin{cases} I_{refk} \geq I_{p4} \Rightarrow I_{k1} = 4I_c \\ I_{refk} < I_{p4} \Rightarrow I_{k1} = 3I_c \end{cases} \quad \begin{cases} I_{refk} \geq I_{p3} \Rightarrow I_{k2} = 3I_c \\ I_{refk} < I_{p3} \Rightarrow I_{k2} = 2I_c \end{cases} \quad \begin{cases} I_{refk} \geq I_{p2} \Rightarrow I_{k3} = 2I_c \\ I_{refk} < I_{p2} \Rightarrow I_{k3} = I_c \end{cases} \\
 \begin{cases} I_{refk} \geq I_{p1} \Rightarrow I_{k4} = I_c \\ I_{refk} < I_{p1} \Rightarrow I_{k4} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} I_{refk} \geq I_{p5} \Rightarrow I_{k5} = 0 \\ I_{refk} < I_{p5} \Rightarrow I_{k5} = -I_c \end{cases} \quad \begin{cases} I_{refk} \geq I_{p6} \Rightarrow I_{k6} = -I_c \\ I_{refk} < I_{p6} \Rightarrow I_{k6} = -2I_c \end{cases} \\
 \begin{cases} I_{refk} \geq I_{p7} \Rightarrow I_{k7} = -2I_c \\ I_{refk} < I_{p7} \Rightarrow I_{k7} = -3I_c \end{cases} \quad \begin{cases} I_{refk} \geq I_{p8} \Rightarrow I_{k8} = -3I_c \\ I_{refk} < I_{p8} \Rightarrow I_{k8} = -4I_c \end{cases}
 \end{cases} \quad [II-10]$$

2^{ème} étape: Détermination du signal I_{km} et les ordres de commande B_{ks} des interrupteurs:

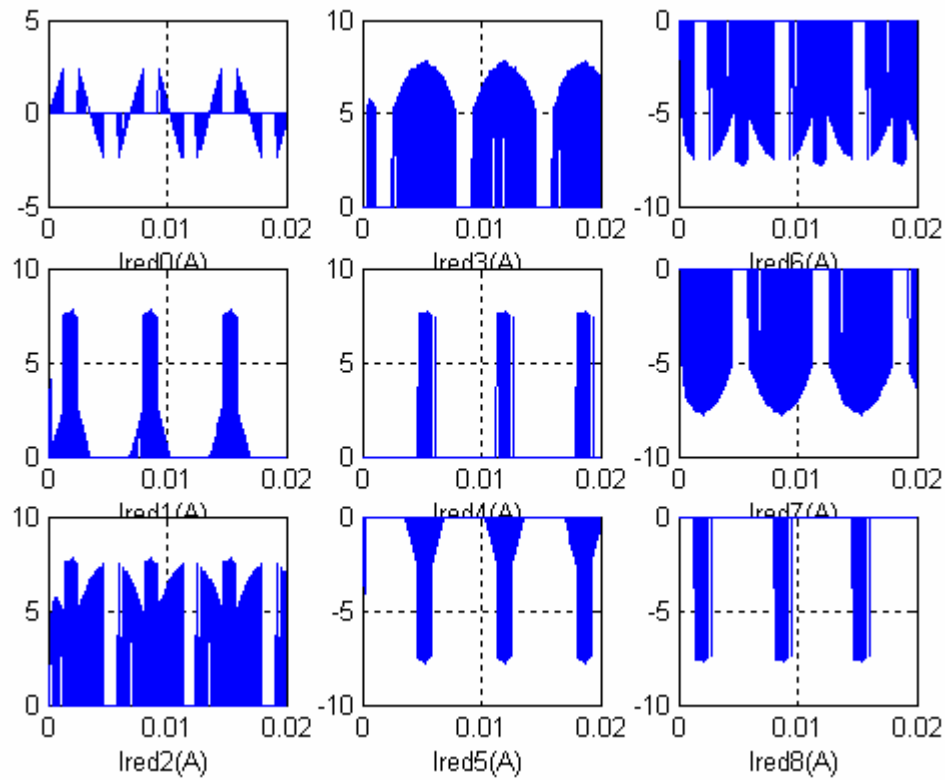
$$I_{kred} = \begin{cases} 4I_{red} \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 1 \\ 3I_{red} \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = 1 \text{ et } B_{k8} = 0 \\ 2I_{red} \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = 1 \text{ et } B_{k7} = B_{k8} = 0 \\ 1I_{red} \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = 1 \text{ et } B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 0 \\ 0I_{red} \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = 1 \text{ et } B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 0 \\ -1I_{red} \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = 1 \text{ et } B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 0 \\ -2I_{red} \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = 1 \text{ et } B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 0 \\ -3I_{red} \Rightarrow B_{k1} = 1 \text{ et } B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 0 \\ -4I_{red} \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = B_{k4} = B_{k5} = B_{k6} = B_{k7} = B_{k8} = 0 \end{cases} \quad [II-11]$$

Avec :

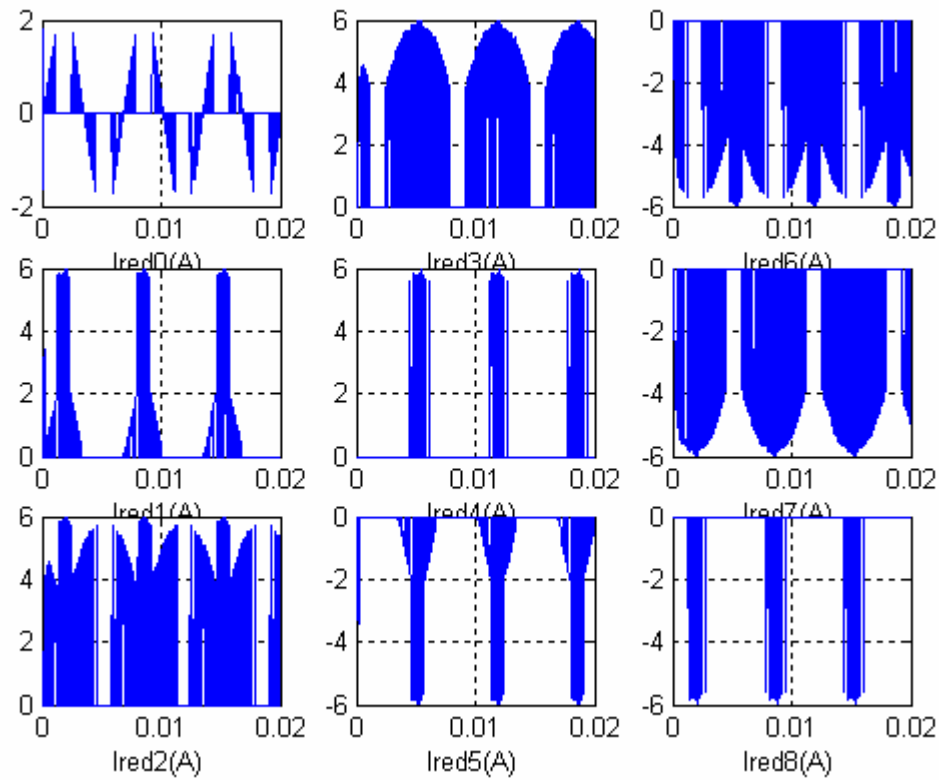
$$\begin{cases} I_{kred} = I_{k1} + I_{k2} + I_{k3} + I_{k4} + I_{k5} + I_{k6} + I_{k7} + I_{k8} \\ B_{k1} = \overline{B_{k16}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k15}} \\ B_{k3} = \overline{B_{k14}} \\ B_{k4} = \overline{B_{k13}} \\ B_{k5} = \overline{B_{k12}} \\ B_{k6} = \overline{B_{k11}} \\ B_{k7} = \overline{B_{k10}} \\ B_{k8} = \overline{B_{k9}} \end{cases} \quad [II-12]$$

II-2-1-1 Simulation Numérique:

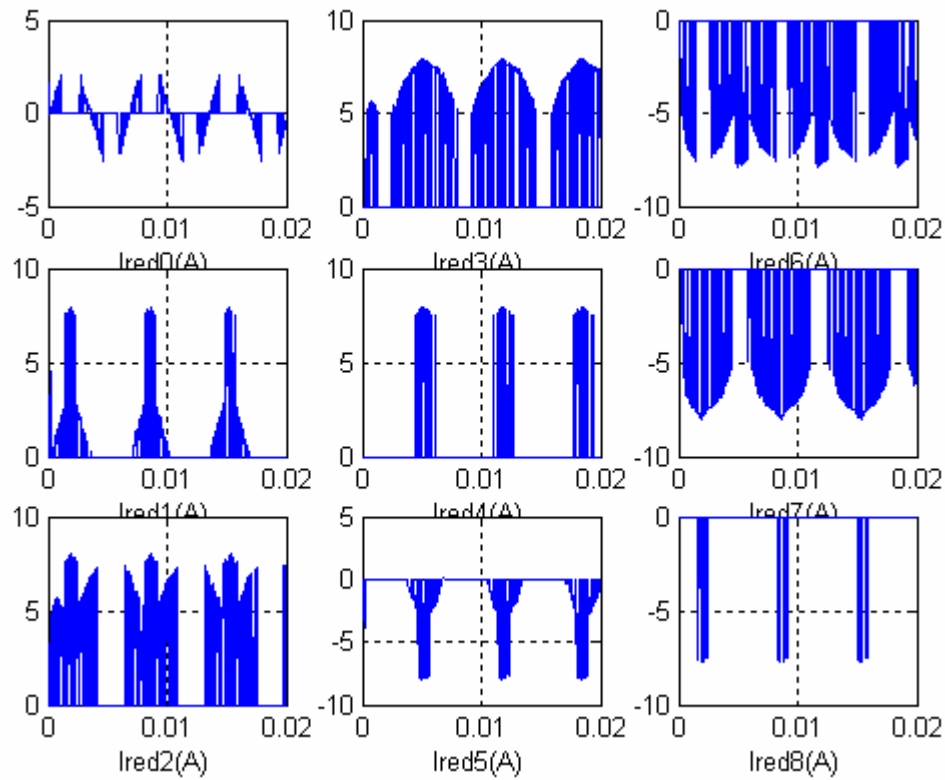
Pour $m=12$ et 15 avec $r=0.6$ et $r=0.8$, $f=50\text{Hz}$ on donne les figures des courants ido à id8 du redresseur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes :



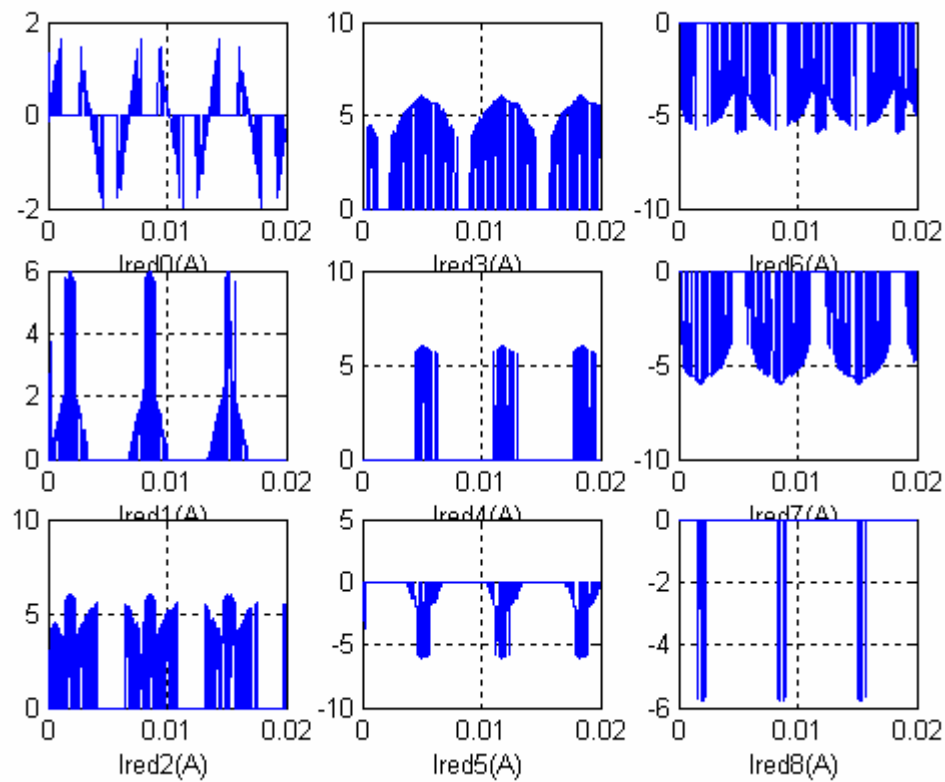
figure(II-16) Les courants du redresseur à neuf niveau pour $m=15$ et $r=0.8$



figure[II-17]: Les courants du redresseur à neuf niveau pour $m=15$ et $r=0.6$



figure[II-18]: Les courants du redresseur à neuf niveau pour $m=12$ et $r=0.8$



figure[II-19]: Les courants du redresseur à neuf niveau pour $m=12$ et $r=0.6$

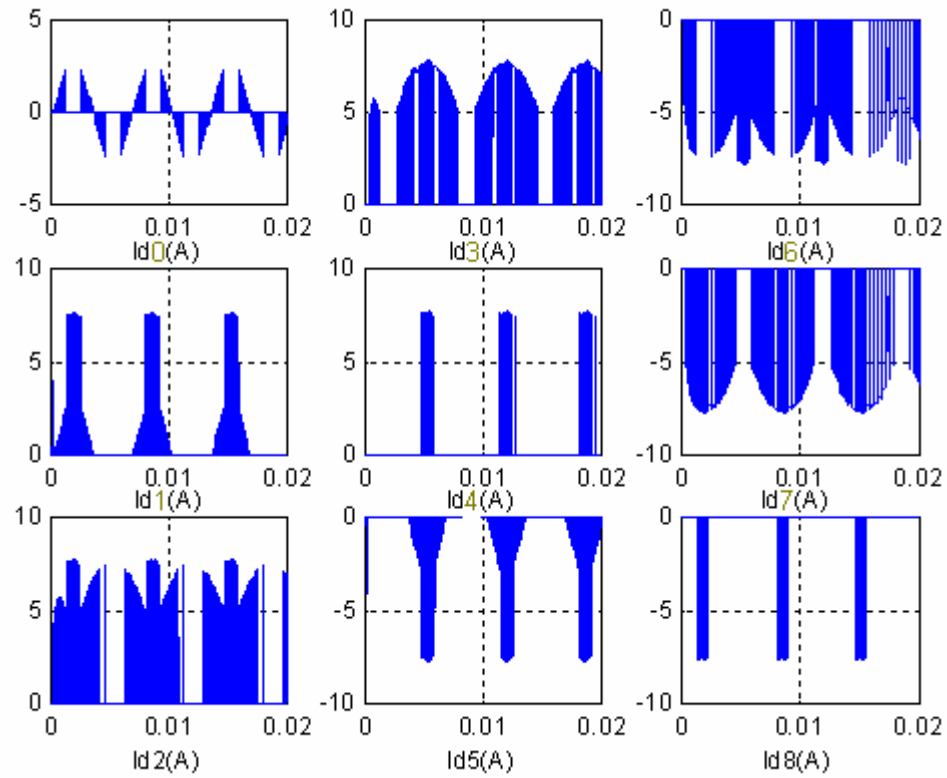
II-2-2- Commande MLI à huit porteuses triangulaire bipolaire :

L'algorithme de commande comme suit :

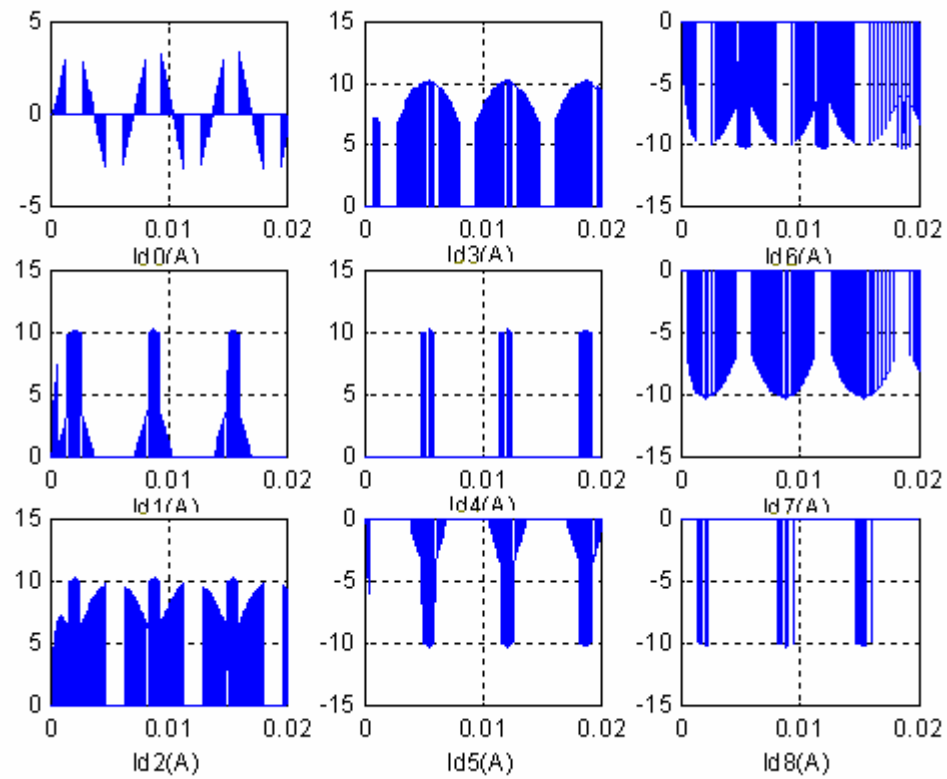
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ip1} = \begin{cases} \text{Ipm} \left(4 \frac{t}{T_p} - 1 \right) & 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ \text{Ipm} \left(-4 \frac{t}{T_p} + 3 \right) & \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \\ \text{Ip2} = \text{Ipm} \left(t - \frac{T_p}{8} \right) \\ \text{Ip3} = \text{Ipm} \left(t - \frac{T_p}{4} \right) \\ \text{Ip4} = \text{Ipm} \left(t - 3 \frac{T_p}{8} \right) \\ \text{Ip5} = \text{Ipm} \left(t - \frac{T_p}{2} \right) \\ \text{Ip6} = \text{Ipm} \left(t - 5 \frac{T_p}{8} \right) \\ \text{Ip7} = \text{Ipm} \left(t - 3 \frac{T_p}{2} \right) \\ \text{Ip8} = \text{Ipm} \left(t - 7 \frac{T_p}{8} \right) \end{array} \right. \quad [\text{II-13}]$$

II-2-2-1 Simulation Numérique:

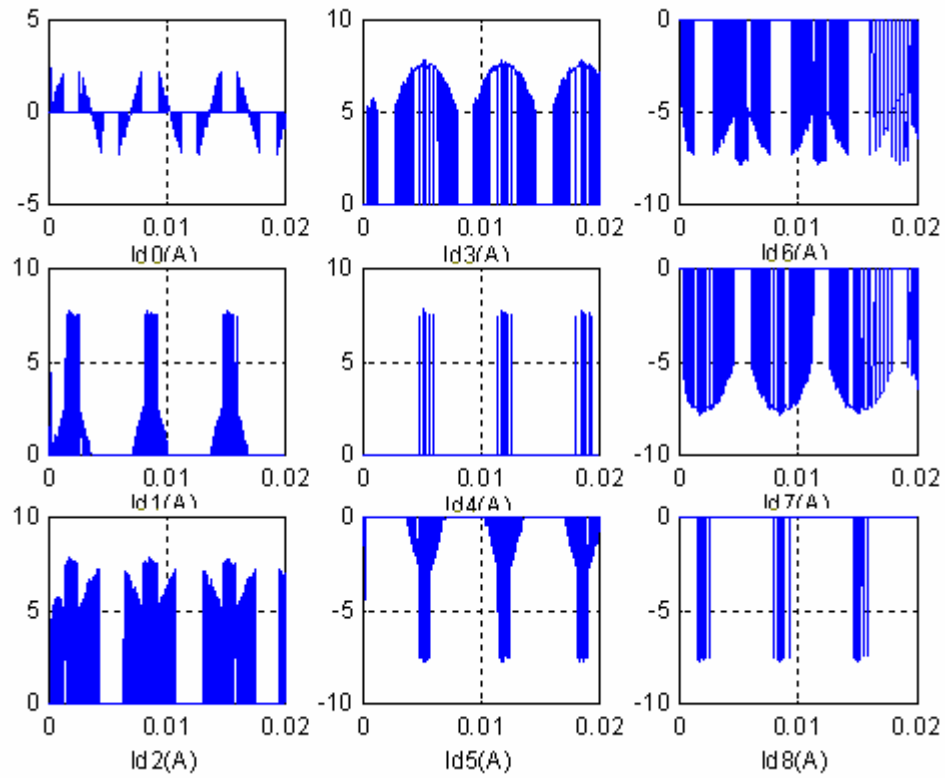
Pour m=12 et 15 avec r=0.6 et r=0.8 , f=50Hz on donne les figures des courants ido à id8 du redresseur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes :



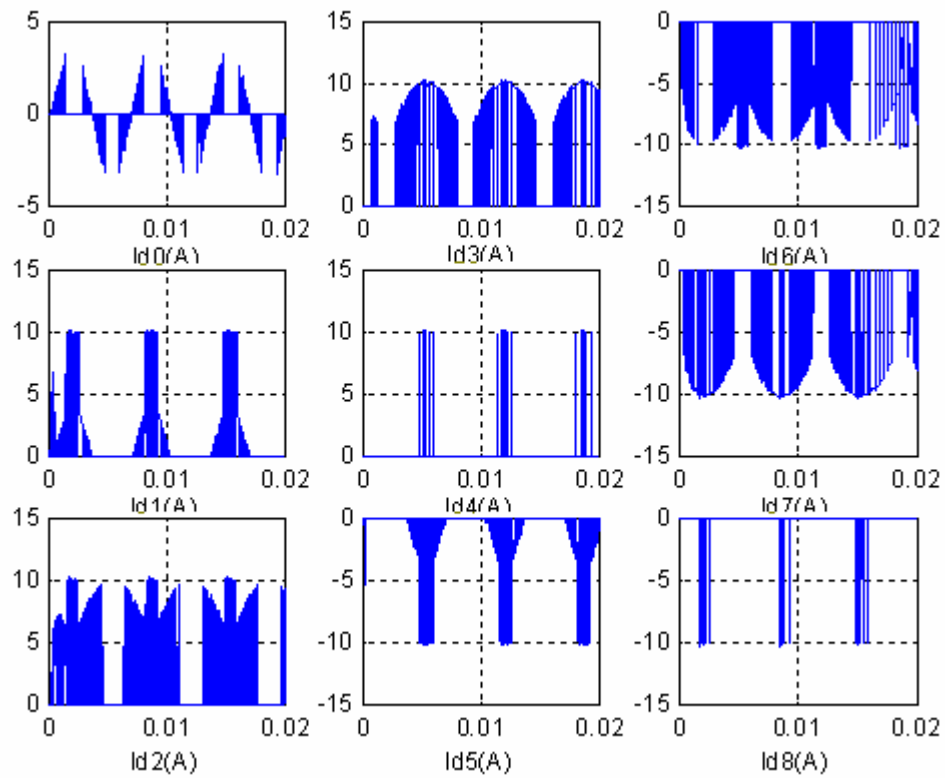
figure[II-20]: Les courants redressés redresseur à neuf niveau pour $m=15$ et $r=0.8$



figure[II-21]: Les courants redressés redresseur à neuf niveau pour $m=15$ et $r=0.6$



figure[II-22]: Les courants redressés redresseur à neuf niveau pour $m=12$ et $r=0.8$



figure[II-23]: Les courants redressés redresseur à neuf niveau pour $m=12$ et $r=0.6$

Commentaires

Les figures (II-12) , (II-13) , (II-14) , (II-15) , (II-16) et (II-17) représentent les courants du redresseur a neuf niveaux ($V_{res}=220V$, $f=50Hz$, $R=25\Omega$, $L_{res} =10mH$).

Comme c'est un redresseur de courant on peut donner uniquement son onde de courant imposé a la charge.

Nous remarquons que réellement les courants I_{red1} , I_{red2} , I_{red3} , I_{red4} , I_{red5} , I_{red6} , I_{red7} et I_{red8} sont continus ;mais le courant i_{red0} est variable(leur valeur moyenne et nulle $\Delta I_{red}=0$) .

On constate que respectivement les courants I_{red1} , I_{red2} , I_{red3} et I_{red4} ont la même allures et symétriques en sens inverse par rapport au point milieu avec les courants I_{red5} , I_{red6} , I_{red7} , I_{red8} .

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié et élaboré deux différentes stratégie de commande d'un onduleur et du redresseur MLI a neuf niveaux.

La MLI triangulo-sinusoidale est caractérisée par deux paramètres "m" et "r". Plus "m" est grand plus le résultats de simulation sont meilleurs, mais ce dernier dépend de la qualité des composant existants. Le taux de modulation "r" permet un réglage linéaire de l'amplitude de fondamentale.

CHAPITRE III

*Changeur de fréquence
utilisant l'onduleur triphasé
de tension à neuf niveaux
à diodes flottantes*

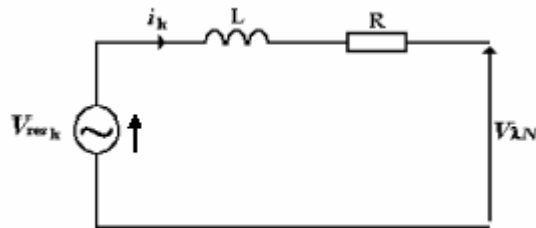
Introduction:

Dans ce chapitre, l'objectif principal est dans un premier temps la modélisation du moteur asynchrone. dans un second temps, la simulation du moteur avec une source de tension triphasé équilibrée. Le logiciel Matlab (programmation) le comportement du moteur en régime statique et dynamique. nous présenterons quelques dispositifs permettant de générer les huit tensions U_{c1} , U_{c2} , U_{c3} , U_{c4} , U_{c5} , U_{c6} , U_{c7} et U_{c8} à partir d'un réseau alternatif 50 Hz. Ainsi on étudiera un type seulement de Changeurs de fréquences utilisant l'onduleur à neuf niveaux à diodes flottantes :

- ❖ Cascade d'un redresseur de courant à deux niveaux – onduleur triphasé à neuf niveaux-MAS .
- ❖ Cascade d'un redresseur de courant à neuf niveaux – onduleur triphasé à neuf niveaux-MAS .

III-1 Modélisation du réseau électrique :

- Les équations du réseau :



Figure(III.1) : schéma équivalent du réseau triphasé

Le réseau est modélisé par une source de tension en série avec une inductance, se comportant ainsi comme une source de courant. vu que l'inductance du réseau est faible et mal connue, elle est généralement insuffisante pour atténuer l'ondulation du courant .

Il est donc nécessaire d'ajouter une inductance L et une résistance R plus importantes en série, afin de négliger celle du réseau mal connu et de réduire l'effet de leur variation[1] .

En appliquant loi des mailles au modèle de la figure (III-1) on trouve :

$$V_{\lambda N} = V_{res\ K} - R * I_K - L * (dI/dt) \quad (III-1)$$

V_{resk} et I_k : respectivement la tension et le courant de phase k ($k = 1, 2, 3$) du réseau triphasé.

$V_{\lambda N} (\lambda = a, b, c)$: la tension liée au bras k du redresseur qui est en série avec l'impédance du réseau (R et L).

Après la transformation de Laplace, le système prédéfini s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{res1} \\ V_{res2} \\ V_{res3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + LS & 0 & 0 \\ 0 & R + LS & 0 \\ 0 & 0 & R + LS \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} \quad (III.2)$$

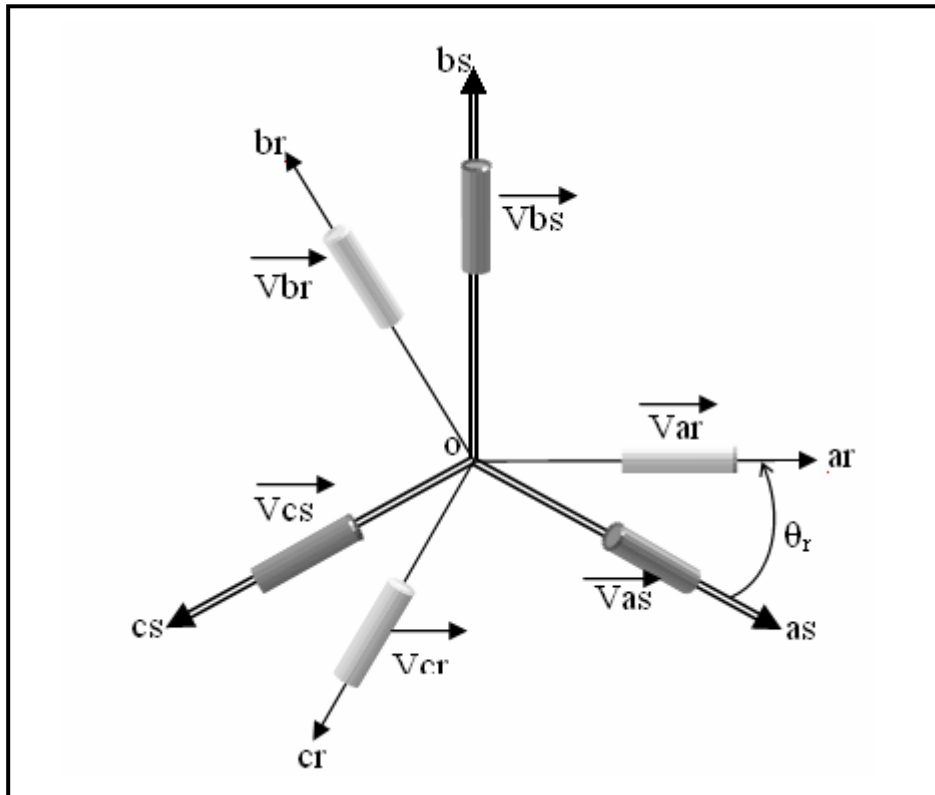
III.2. Modélisation de la machine asynchrone triphasé :

III.2.1. Description[2]:

La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine asynchrone. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques. Leurs axes sont distants entre eux d'un angle égal à $(2\pi/3)$.

Les enroulements du stator sont alimentés par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales , à fréquence et amplitude constantes ou par un onduleur de tension ou de courant à fréquence et amplitude réglables. Les enroulements du rotor sont court-circuités.

La figure (III.2) présente les enroulements de la machine asynchrone triphasée dans le repaire (a,b,c) .



Figure(III.2):Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans espace électrique

III.2.2. Hypothèses simplificatrices[3] :

Le modèle de la machine que nous adopterons repose sur les hypothèses suivantes :

- proportionnalité des flux aux courants.
- Entrefer constant (pas d'effet d'encoches).
- Forces magnétomotrices à répartition spatiale sinusoïdale.
- Courants autres que dans les bobinages négligés.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.
- La machine est de constitution symétrique.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et le courant de Foucault sont tous négligés.
- Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases est à répartition
- 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 .
- L'additivité des flux.
- La constante des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

III.2.3. Mise en équation du modèle de la machine :

▪ Equations électriques :

Les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques, qui décrivent le fonctionnement de la machine asynchrone sont[4] :

$$[V_{abcs}] = [R_s] [i_{abcs}] + (d/dt)[\phi_{abcs}] \quad (I.1)$$

$$[V_{abcr}] = [R_r] [i_{abcr}] + (d/dt)[\phi_{abcr}] \quad (I.2)$$

Avec :

$$[V_{abcs}] = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]t ; [i_{abcs}] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]t ; [\varphi_{abcs}] = [\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs}]t .$$

$$[V_{abcr}] = [V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]t ; [i_{abcr}] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]t ; [\varphi_{abcr}] = [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]t .$$

▪ Equations magnétiques :

Les flux sont donnés par [4] :

$$[\varphi_{abcs}] = [L_{ss}][I_{abcs}] + [L_{sr}][I_{abcr}] \quad (I.3)$$

$$[\varphi_{abcr}] = [L_{sr}][I_{abcs}] + [L_{rr}][I_{abcr}] \quad (I.4)$$

➤ Modèle de PARK :

La transformation de PARK consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et l'axe « d » et « q ».

Elle est définie par la matrice de transformation suivante **P (θ)** [5] [6] :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.5)$$

L'angle (θ) dans la matrice P(θ) , prend la valeur (θs) pour les grandeurs statoriques et la valeur (θs - θr) pour les grandeurs rotoriques, le modèle de la machine asynchrone après la transformation de PARK est décrit par :

▪ Equations électriques :

$$\begin{cases} V = Ri - e \\ e = -\frac{d\phi}{dt} \\ V = Ri + \frac{d\phi}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} \end{cases} \quad [III-3]$$

A partir de ce modèle on déduit l'ensemble des équations électriques de la machine

Les équations liées au stator :

$$\begin{cases} V_{as} = R_{as} i_{as} + \frac{d\phi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = R_{bs} i_{bs} + \frac{d\phi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = R_{cs} i_{cs} + \frac{d\phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad [III-4]$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{as} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad [\text{III-5}]$$

Ou :

$$[V_{sabc}] = [R_{sabc}] [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad [\text{III-6}]$$

Les équations liées au rotor :

$$\begin{cases} V_{ar} = R_{ar} i_{ar} + \frac{d\phi_{ar}}{dt} = 0 \\ V_{br} = R_{br} i_{br} + \frac{d\phi_{br}}{dt} = 0 \\ V_{cr} = R_{cr} i_{cr} + \frac{d\phi_{cr}}{dt} = 0 \end{cases} \quad [\text{III-7}]$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [\text{III-8}]$$

$$\begin{cases} V_d = R i_d + \frac{[d\phi_d]}{dt} - \left[\frac{d\theta}{dt} \right] \phi_q \\ V_q = R i_q + \frac{[d\phi_q]}{dt} - \left[\frac{d\theta}{dt} \right] \phi_d \\ V_o = R i_o + \frac{[d\phi_o]}{dt} \end{cases} \quad [\text{III-9}]$$

Ou :

$$[V_{rabc}] = [R_{rabc}] [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] = [0] \quad [\text{III-10}]$$

Tel que :

$$R_{as} = R_{bs} = R_{cs} = R_s$$

$$R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r$$

R_s : résistance propre d'une phase statorique.

R_r : résistance propre d'une phase rotorique.

▪ Equations magnétiques :

Avec les hypothèses précédentes, la relation entre les flux totalisés sur les enroulements et les courants peut être décrite par l'équation matricielle suivante[5] :

$$\begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [l_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad \text{[III-11]}$$

Tel que :

$$[\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} ; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad \text{[III-12]}$$

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} ; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad \text{[III-13]}$$

$$[l_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; [l_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} ; \quad \text{[III-14]}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad \text{[III-15]}$$

Cette dernière matrice est nommée inductance mutuelle entre le rotor et le stator.

M_{sr} : représente la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une bobine statorique et une bobine rotorique lorsque celles-ci sont en regard l'une de l'autre.

Finalement :

$$[V_{sabc}] = [R_{sabc}] [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} ([l_s] [i_{sabc}] + [M_{sr}] [i_{rabc}]) \quad \text{[III-16]}$$

$$[V_{rabc}] = [R_{rabc}] [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} ([l_r] [i_{rabc}] + [M_{rs}] [i_{sabc}]) \quad \text{[III-17]}$$

l_s : inductance propre d'une phase statorique.

l_r : inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : inductance mutuelle entre deux phases de stator.

M_r : inductance mutuelle entre deux phases de rotor.

θ_r : écart angulaire entre une phase statorique et la phase rotorique correspondante.

Les équations différentielles décrivant le fonctionnement de cette machine étant fonction de θ_r (système à résolution difficile). L'application de la transformation de PARK s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux courants, tensions et flux permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants.

▪ Equation mécanique :

Elle est solution de l'équation fondamentale de la dynamique.

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_e - C_r - f\Omega_r) \quad [\text{III-18}]$$

- pour une machine à 2P pôles (machine multipolaire) :

$$\frac{d\omega_{mec}}{dt} = \frac{P}{J} \left(C_e - C_r - f \frac{\omega}{P} \right) \quad [\text{III-19}]$$

J : moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.

P : nombre de paire de pôles.

f : coefficient du frottement visqueux.

Ce : couple électromagnétique.

Cr : couple de charge.

Ω_r : vitesse rotorique de moteur.

Ω_{mec} : vitesse mécanique de moteur.

▪ Représentation d états :

$$(d/dt) \mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{u}$$

avec

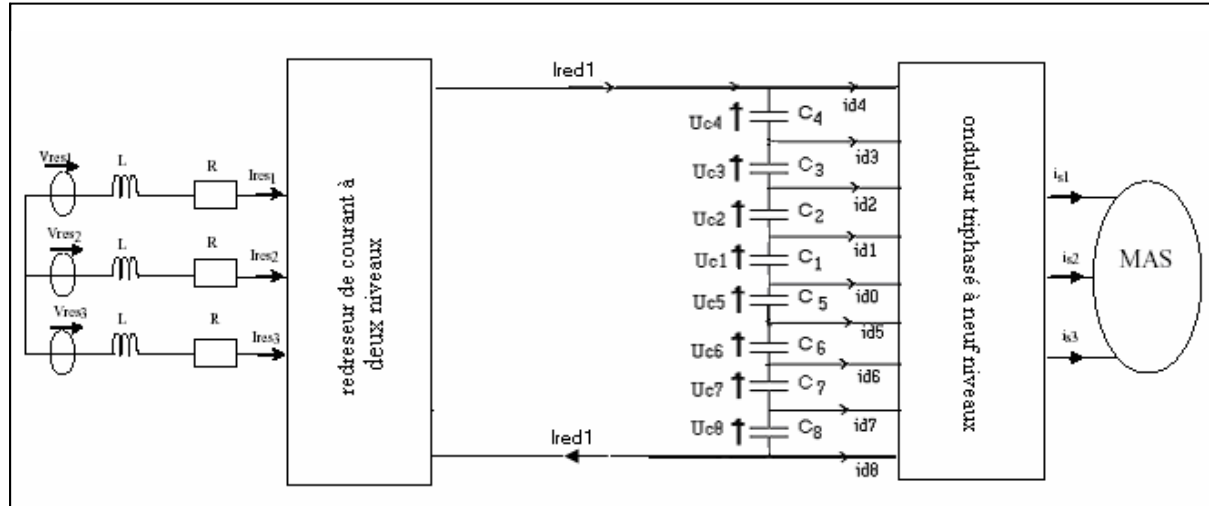
$$\mathbf{x} = [I_{ds} \ I_{qs} \ \varphi_{dr} \ \varphi_{qr} \ \omega_r]^t \cdot \mathbf{u} = [v_{ds} \ v_{qs}]^t. \quad [\text{III-20}]$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} -\mathbf{v}_{ds} + \omega_s \mathbf{i}_{qs} + \frac{k}{T_r} \varphi_{dr} + \mathbf{K} \varphi_{qr} \omega_r \\ -\omega_s \mathbf{i}_{ds} - \mathbf{v}_{qs} - \mathbf{K} \omega_r \varphi_{dr} + \frac{k}{T_r} \varphi_{qr} \\ \frac{M}{T_r} \mathbf{i}_{ds} - \frac{1}{T_r} \varphi_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ \frac{M}{T_r} \mathbf{i}_{qs} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qs} - \frac{1}{T_r} \varphi_{qr} \\ \frac{P^2 M}{JL} (\varphi_{dr} \mathbf{i}_{qs} - \varphi_{qr} \mathbf{i}_{ds}) - \frac{f}{J} \omega_r - \frac{P}{J} C_r \end{bmatrix}$$

$$\text{Avec: } v = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \left(R_s + R_r \cdot \left(\frac{M}{L_r} \right)^2 \right); T_r = \frac{L_r}{R_r}; \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}; k = \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r}. \quad [\text{III-21}]$$

III-3-1 Cascade d'un redresseur de courant à deux niveaux-onduleur triphasé à neuf niveaux-MAS :

On étudiera la cascade d'un redresseur de courant à MLI à deux niveaux-onduleur de tension neuf niveaux-MAS, la structure de cette cascade est donnée par le schéma suivant :



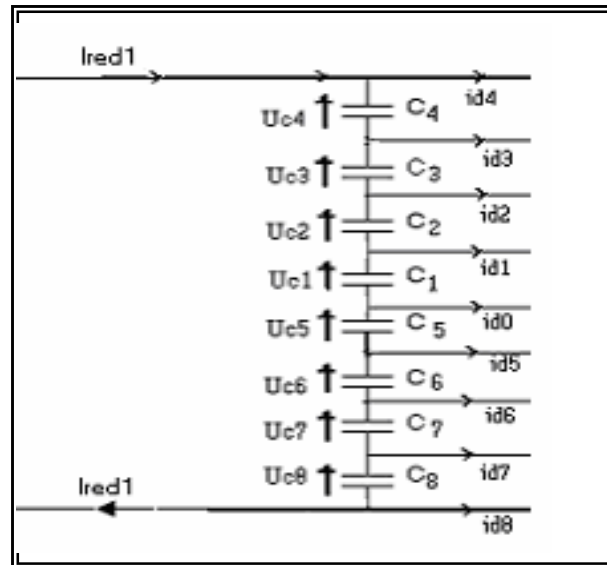
Figure(III-6): la structure de cascade d'un redresseur de courant à MLI à deux niveaux-onduleur de tension neuf niveaux-MAS

III-3-1-1- Filtre intermédiaire pour cette cascade :

La figure (III.7) représente la structure du filtre intermédiaire, les courants d'entrées (I_{red1}), les courants de sorties (I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} , I_{d4} , I_{d5} , I_{d6} , I_{d7} , I_{d8}), les tensions de la capacité (U_{c1} , U_{c2} , U_{c3} , U_{c4} , U_{c5} , U_{c6} , U_{c7} , U_{c8}) et les tensions redressée (U_{red1} , U_{red2} , U_{red3} , U_{red4} , U_{red5} , U_{red6} , U_{red7} , U_{red8}). le redresseur de courants est commandé par la stratégie de commande hystérésis.

Le modèle mathématique du filtre intermédiaire dans cette cascade est défini par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1(dU_{c1}/dt) = I_{red1} - I_{d1} - I_{d2} - I_{d3} - I_{d4} \\ C_2(dU_{c2}/dt) = I_{red1} - I_{d2} - I_{d3} - I_{d4} \\ C_3(dU_{c3}/dt) = I_{red1} - I_{d3} - I_{d4} \\ C_4(dU_{c4}/dt) = I_{red1} - I_{d4} \\ C_5(dU_{c5}/dt) = I_{red1} - I_{d5} - I_{d6} - I_{d7} - I_{d8} \\ C_6(dU_{c6}/dt) = I_{red1} - I_{d6} - I_{d7} - I_{d8} \\ C_7(dU_{c7}/dt) = I_{red1} - I_{d7} - I_{d8} \\ C_8(dU_{c8}/dt) = I_{red1} - I_{d8} \end{array} \right. \quad [III_22]$$



Figure(III-7): la structure du filtre intremédiaire

III-3-1-2- Simulation et interprétation

Les différentes caractéristiques principales de cette cascade sont représentées sur les figures (III-8, 9 et 10):

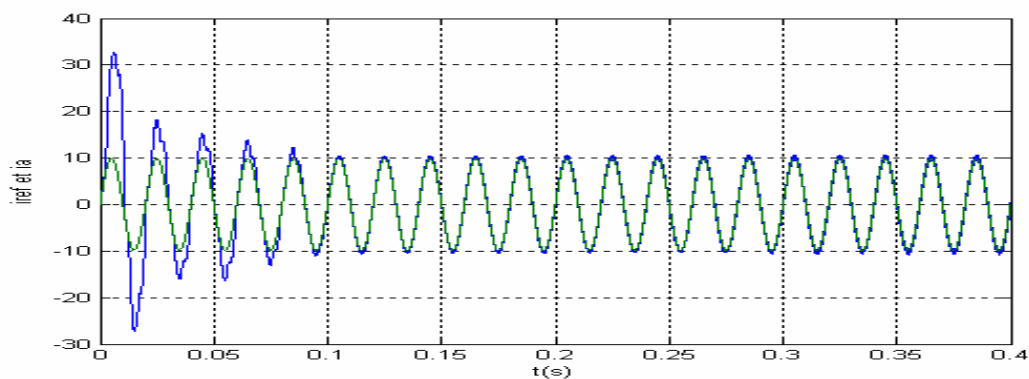
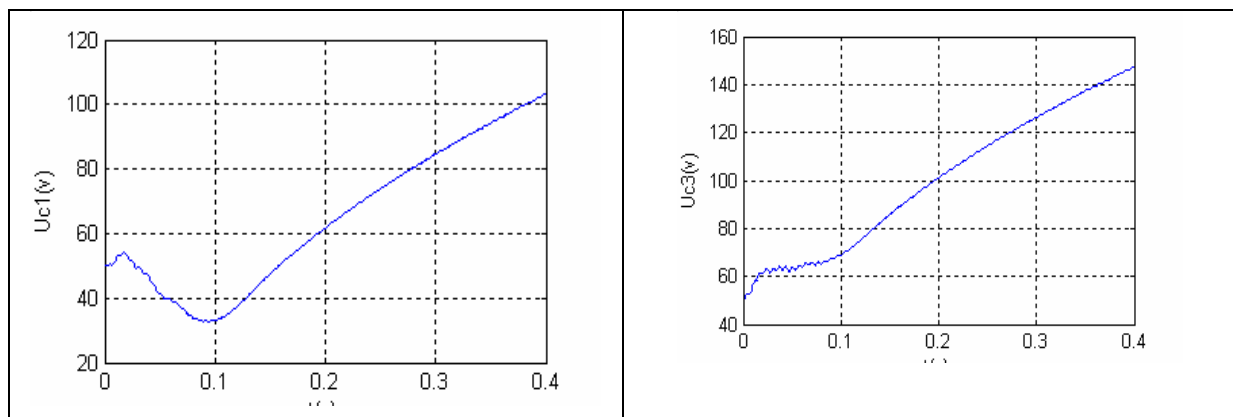


Figure III.8 Courant de référence et courant du réseau



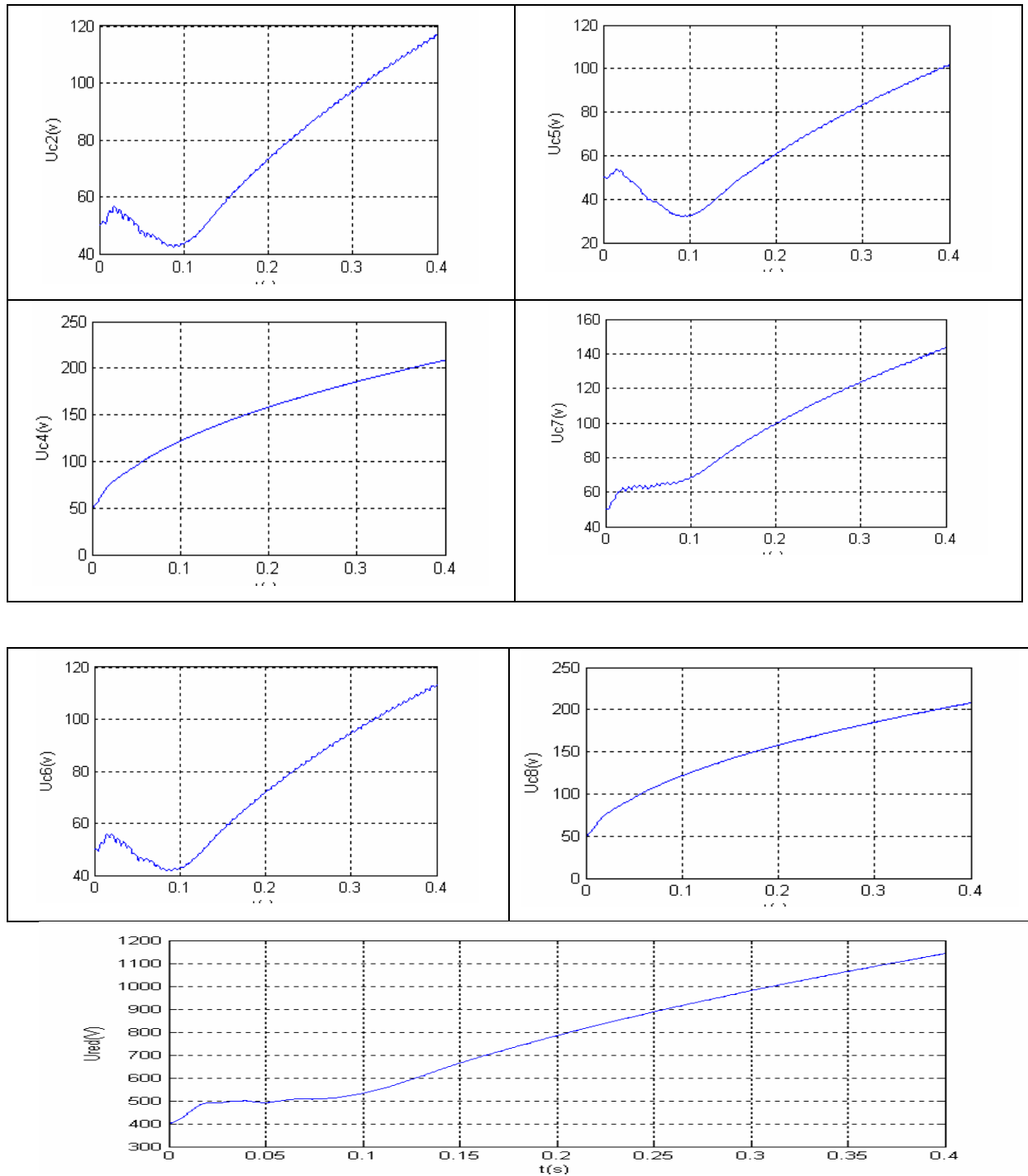
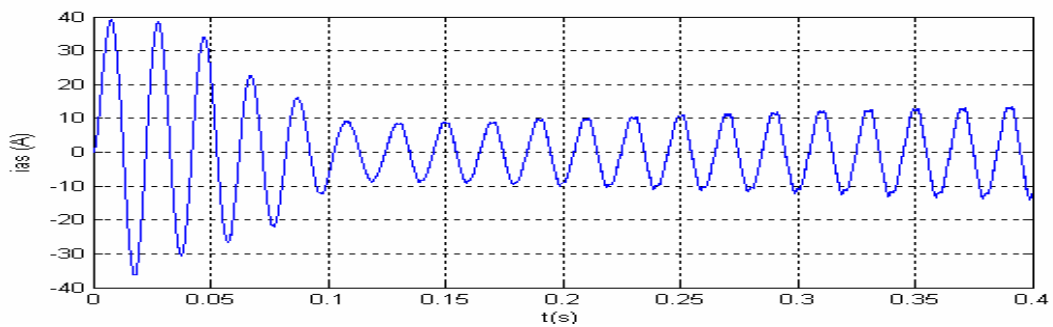


Figure III.9 Tensions aux des huit capacités et du redresseur



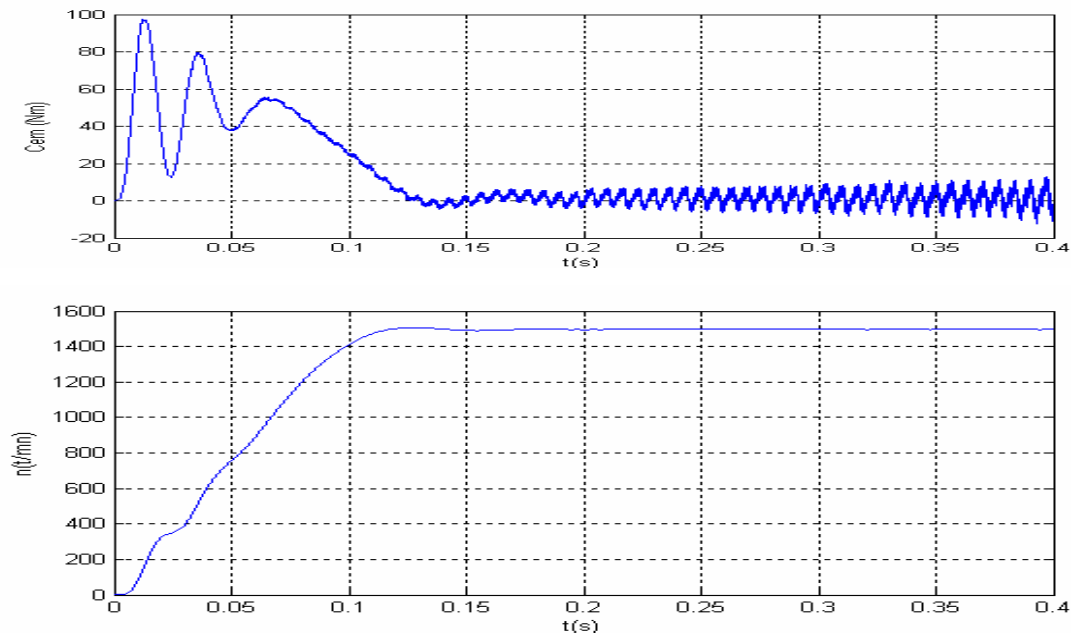


Figure (III-10: le Courant statorique, le couple et la vitesse de la MAS

Commentaires

On constate que les différentes tensions d'entrée de l'onduleur triphasé à neuf niveaux ne sont pas constantes et sont inégales par paire ($U_{c1} \neq U_{c5}$, $U_{c2} \neq U_{c6}$, $U_{c3} \neq U_{c7}$, $U_{c4} \neq U_{c8}$)

La tension redressée U_{red} est toujours croissante.

Et présentent le courant du réseau avec sa référence, on remarque que le courant du réseau i_{res} suit bien celui du courant de référence.

Les résultats de la conduite de la MAS montrent que la vitesse atteint rapidement sa valeur de référence et le couple électromagnétique oscille autour de sa valeur nominale.

III-3-2 Cascade d'un redresseur de courant à neuf niveaux-onduleur triphasé à neuf niveaux-MAS :

La figure (III.-11) représente la structure générale de cette cascade. L'onduleur est commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale bipolaire à huit porteuses, les redresseurs de courants sont commandés par la même stratégie dans l'onduleur de tension. La cascade alimente le moteur asynchrone triphasé .

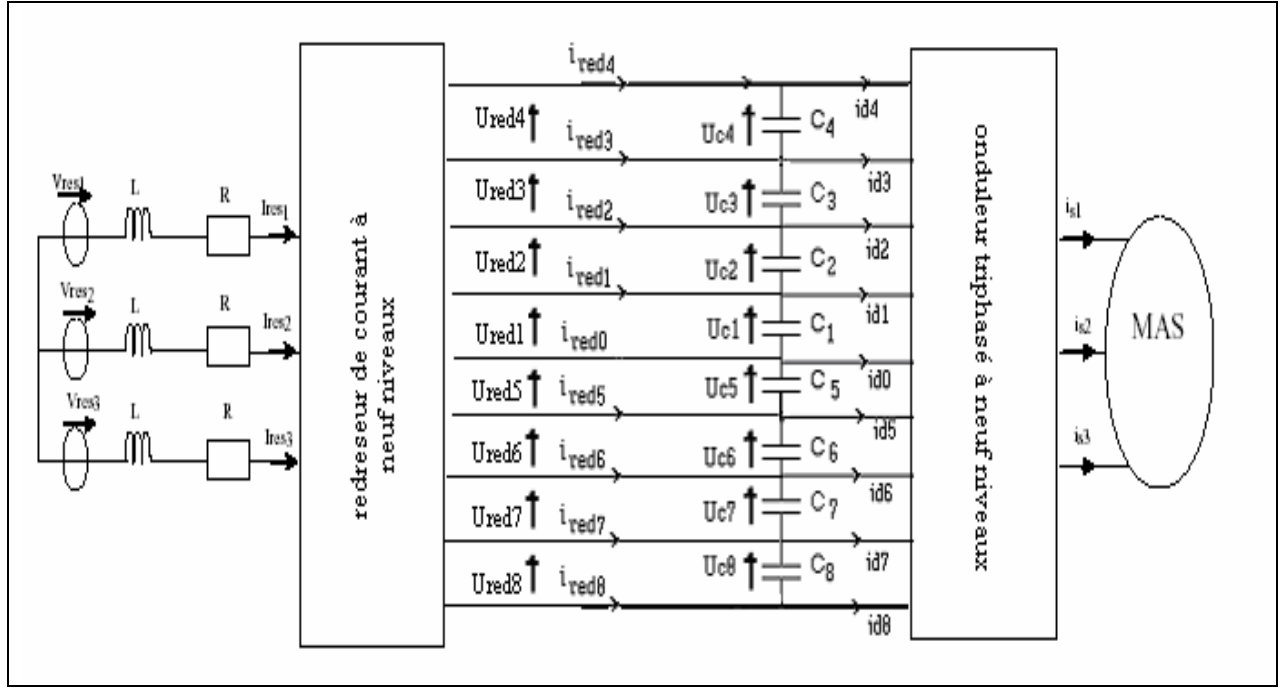


Figure (III-11): Cascade de redresseurs de courant triphasé à neuf niveaux – onduleur triphasé à neuf niveaux-MAS

III-3-2-1- Filtre intermédiaire pour cette cascade :

La figure (III.12) est représentée la structure du filtre intermédiaire, les courants d'entrées ($I_{red1}, I_{red2}, I_{red3}, I_{red4}, I_{red5}, I_{red6}, I_{red7}, I_{red8}$), les courants de sorties ($I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}, I_{d4}, I_{d5}, I_{d6}, I_{d7}, I_{d8}$), les tensions des capacités ($U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}, U_{c4}, U_{c5}, U_{c6}, U_{c7}, U_{c8}$), et les tensions redresses ($U_{red1}, U_{red2}, U_{red3}, U_{red4}, U_{red5}, U_{red6}, U_{red7}, U_{red8}$).

Le modèle mathématique du filtre intermédiaire dans cette cascade est défini par le système d'équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1(dU_{c1}/dt) = I_{red1} + I_{red2} + I_{red3} + I_{red4} - I_{d1} - I_{d2} - I_{d3} - I_{d4} \\ C_2(dU_{c2}/dt) = I_{red2} + I_{red3} + I_{red4} - I_{d2} - I_{d3} - I_{d4} \\ C_3(dU_{c3}/dt) = I_{red3} + I_{red4} - I_{d3} - I_{d4} \\ C_4(dU_{c4}/dt) = I_{red4} - I_{d4} \\ C_5(dU_{c5}/dt) = I_{red5} + I_{red6} + I_{red7} + I_{red8} - I_{d5} - I_{d6} - I_{d7} - I_{d8} \\ C_6(dU_{c6}/dt) = I_{red6} + I_{red7} + I_{red8} - I_{d6} - I_{d7} - I_{d8} \\ C_7(dU_{c7}/dt) = I_{red7} + I_{red8} - I_{d7} - I_{d8} \\ C_8(dU_{c8}/dt) = I_{red8} - I_{d8} \end{array} \right. \quad [III_23]$$

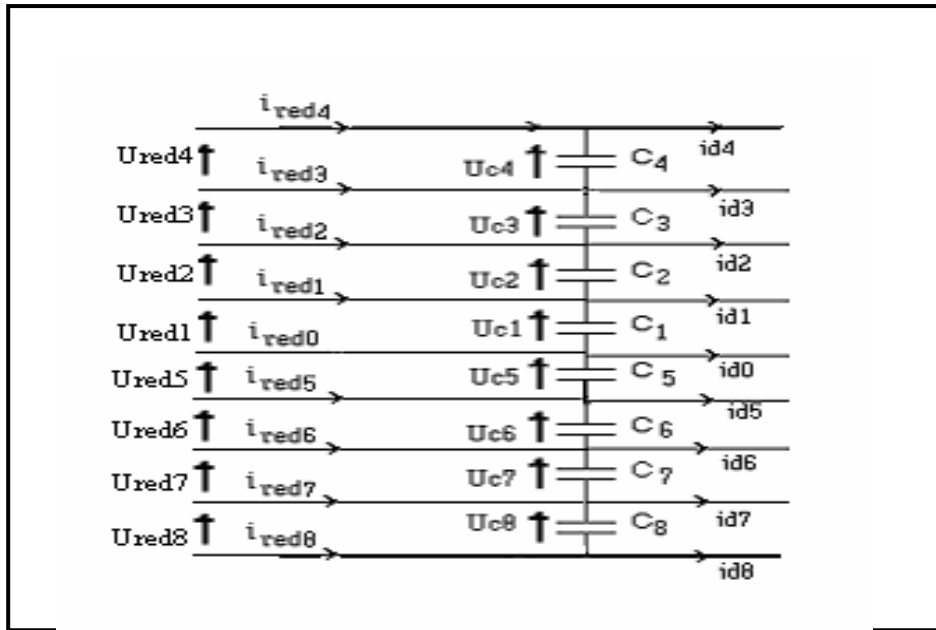
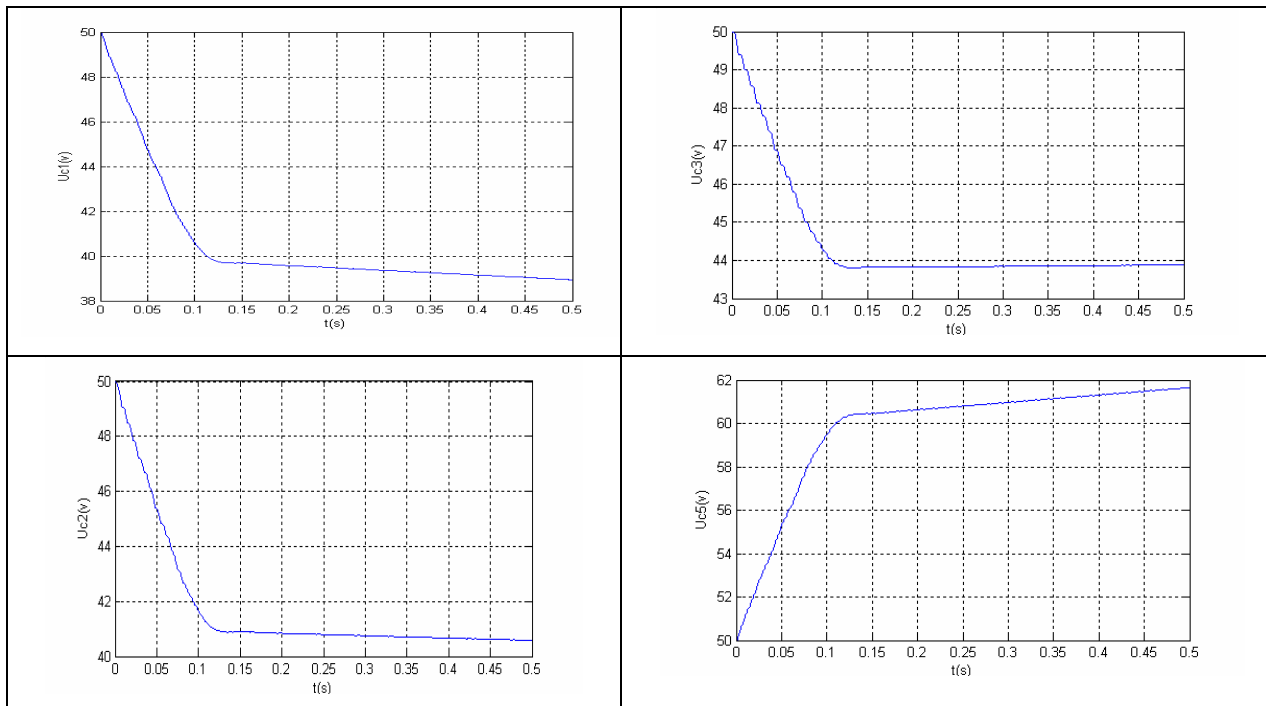


Figure (III-12): la structure du filtre intermédiaire

III-3-2- Simulation et interprétation

Les différentes grandeurs de cette cascade sont présentées sur les figures (III-13) :



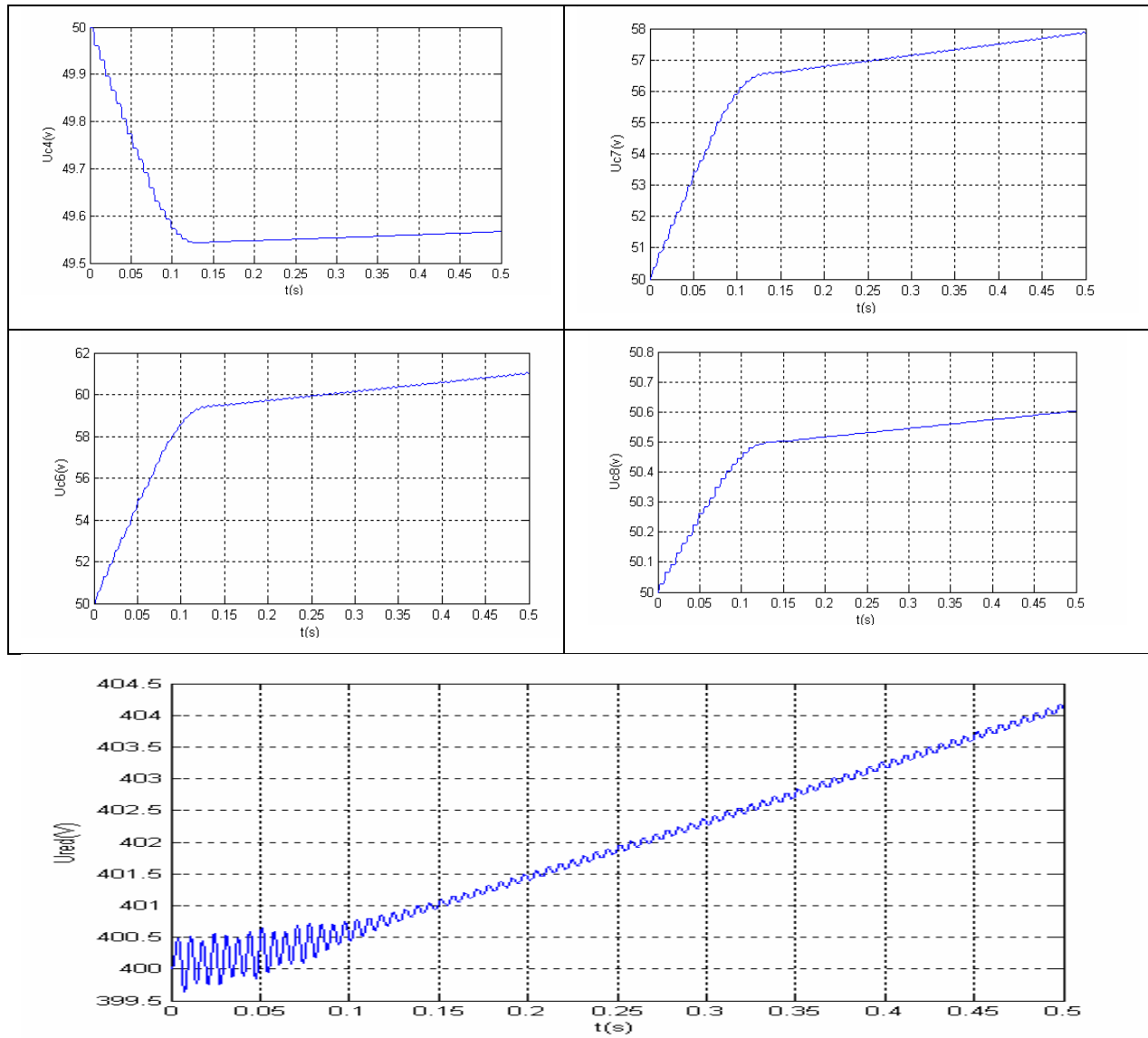
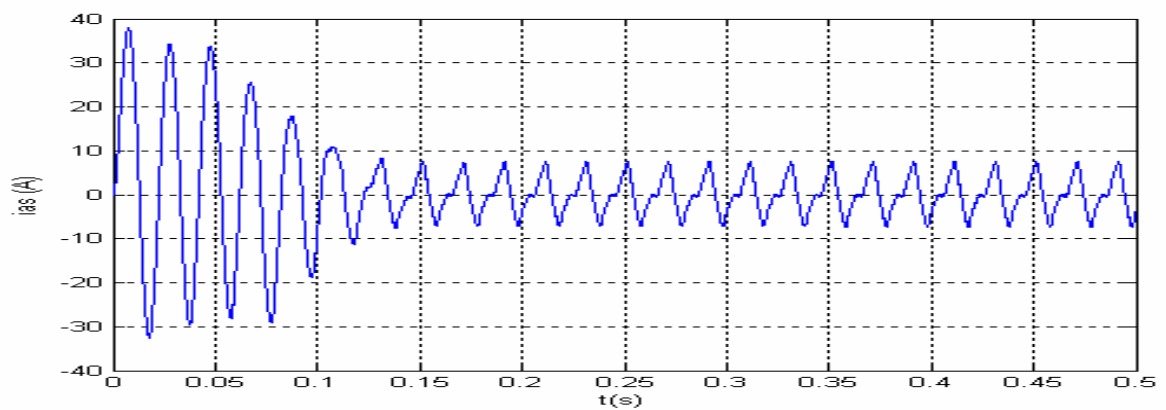


Figure III.13 Tensions aux des huit capacités et du redresseur



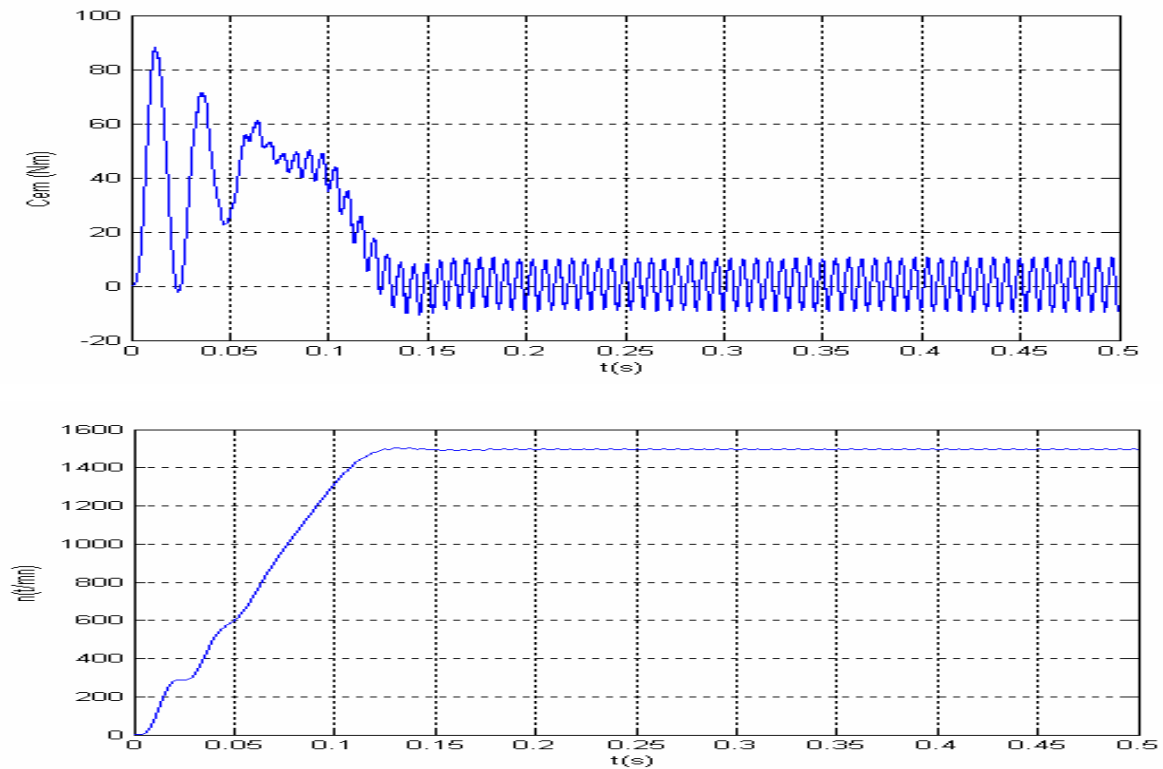


Figure (III-14: le Courant statorique, le couple et la vitesse de la MAS

On constat que les différentes tensions d'entrée de l'onduleur triphasé à neuf niveaux ne sont pas constantes et sont inégales par paire ($U_{c1} \neq U_{c5}, U_{c2} \neq U_{c6}, U_{c3} \neq U_{c7}, U_{c4} \neq U_{c8}$) .

Les tensions $U_{red1} \dots U_{red8}$ augmentent aussi, puis elles se maintiennent constantes. La tension U_{red} est faiblement croissante, du fait qu'elle est la somme des tensions $U_{red1}, U_{red2}, U_{red3}, U_{red4}, U_{red5}, U_{red6}, U_{red7}$ et U_{red8} .

Les résultats de la conduite de la MAS montrent que la vitesse atteint rapidement sa valeur de référence et le couple électromagnétique oscille autour de sa valeur nominale.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié dans la 1^{ère} partie la modélisation du moteur asynchrone. dans un second temps, la simulation de la cascade d'un redresseur de courant à hystérésis à deux niveaux –onduleur triphasé à neuf niveaux–MAS et la cascade d'un redresseur de courant à MLI à neuf niveaux–onduleur triphasé à neuf niveaux– MAS.

On a rencontré le problème de fluctuation du potentiel du point milieu M du à la dérivé des deux tentions $U_{c1} \dots$ et U_{c8} . La solution de ce problème sera proposé dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

*Asservissement des tensions
d'entrée de l'onduleur de
tension à neuf niveaux
à diodes flottantes*

Introduction:

Dans le chapitre précédent , on à étudié un changeur de fréquence à pont de sortie redresseur de courant à MLI neuf niveaux et pont d'entrée d'onduleur à neuf niveaux , nous à permet la mise en évidence du problème de fluctuation du potentiel du point milieu **M** dû à la dérivé des huit tensions $U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}, U_{c4}, U_{c5}, U_{c6}, U_{c7}$ et U_{c8} .

Pour résoudre ce problème, on peut proposer les trois solution suivantes qui donnent des performances plus au moins comparables pour la stabilité du potentiel du point M :

- ✓ Un pont d'équilibrage (pont de clamping) .
- ✓ Utilisation de capacités $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$ et C_8 des valeurs importantes.
- ✓ Régulation de la tension de sortie du redresseur.

Dans ce chapitre, on donnera donc la solution au problème de l'instabilité des tensions d'entée de l'onduleur à neuf niveaux à diode flottante par l'asservissement des ces tensions.

IV-1-Modélisation de la boucle de tension dans l'axe abc :

La modélisation de cette boucle est baée sur le principe de la conservation de la puissance instantanée avec l'hypothèse d'un redresseur sans pertes. Cette boucle impose la valeur efficace du courant de référence du réseau.

$$P_e = \sum_{i=1}^3 (V_{res} - R \cdot i^2 - \frac{L}{2} \frac{di_{res}^2}{dt}) \quad (IV-1)$$

Puissance de sortie :

$$P_s = \sum_{\lambda=0}^{N-1} (U_{red\lambda} I_{red\lambda}) = (n-1).U_{redmoy} (i_c + i_{ch}) \quad (IV-2)$$

Définitions les grandeurs i_c, i_{ch}, U_{redmoy} comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_c = \frac{\sum_{\lambda=0}^{N-1} i_{c\lambda}}{N-1} \\ i_{ch} = \frac{\sum_{\lambda=0}^{N-1} i_{ch\lambda}}{N-1} \\ U_{redmoy} = \frac{\sum_{\lambda=0}^{N-1} U_{red\lambda}}{N-1} \end{array} \right. \quad (IV-3)$$

En utilisant le principe de la conservation de la puissance et en négligeant les pertes joules dans la résistance R, on peut écrire:

$$\sum_{\lambda=0}^3 (V_{resi} \cdot i_{resi}) = \frac{L}{2} \frac{di_{resi}^2}{dt} + \sum_{\lambda=0}^{N-1} (U_{red\lambda} I_{red\lambda}) \quad (IV-4)$$

En supposant les courants du réseau sinusoïdaux et en phase avec leurs tensions V_{resi} correspondantes, on peut écrire alors:

$$3V_{eff} I_{eff} = 9 U_{redmoy} (i_c + i_{ch}) \quad (IV-5)$$

Avec:

$$\begin{cases} V_{resi} = \sqrt{2} V_{eff} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}(i-1)) \\ i_{resi} = \sqrt{2} I_{eff} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}(i-1)) \end{cases} \quad (IV-6)$$

i: numéro d'un bras du redresseur (i=1,2,3).

Ainsi le modèle de la boucle de tension déduit la relation [V-2], est présenté par la figure suivant :

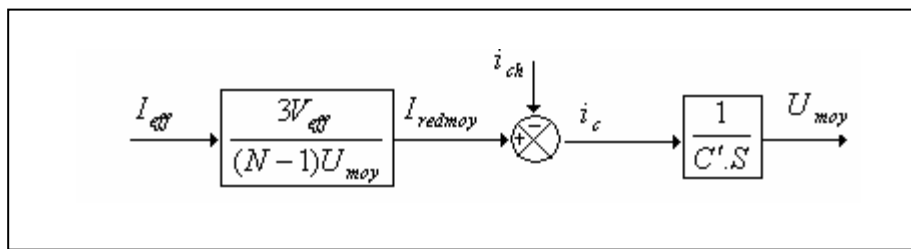


Figure [IV-2] Modèle de la boucle de tension du redresseur de courant triphasé à neuf niveaux dans le repère abc

Le schéma bloc de l'asservissement de la tension est donné par la figure [IV-3] :

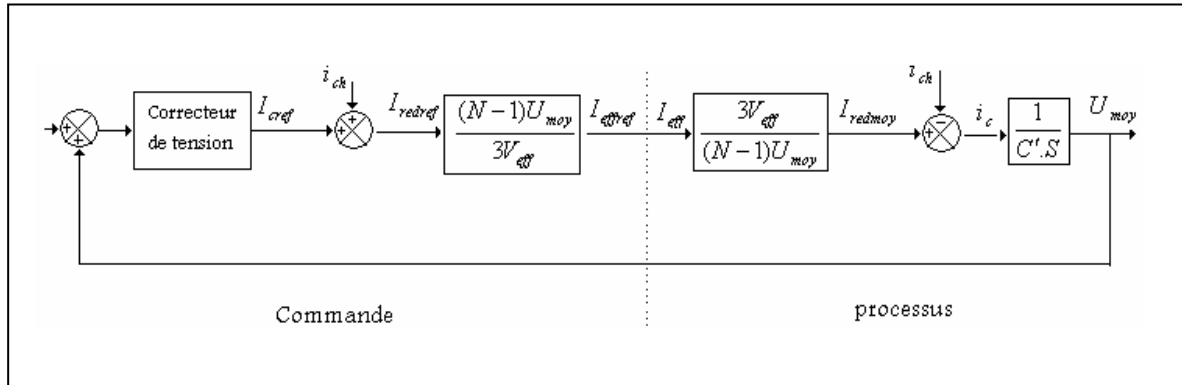


Figure [IV-3] Algorithme d'asservissement de la tension de sortie U_c moyenne du redresseur de courant triphasé à N niveau dans le repaire abc

Le schéma global d'asservissement (courant et tension) du redresseur à N niveaux dans le repaire abc est présenté par la figure [IV-4]

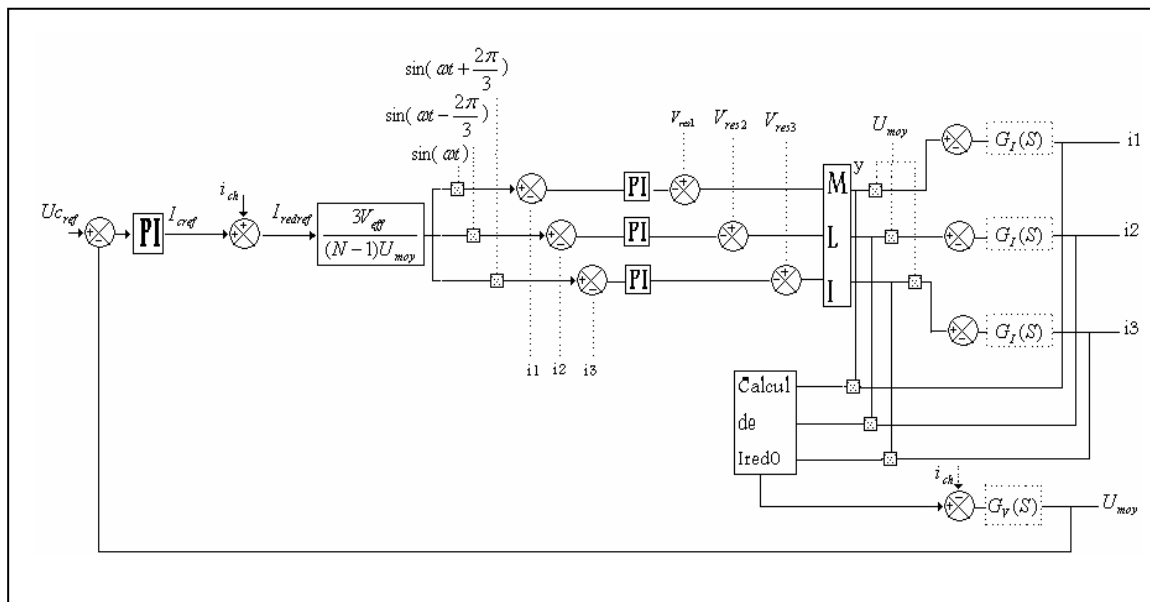


Figure [IV-4] Régulation d'un pont redresseur de courant triphasé à MLI à N niveaux dans le référentiel abc

IV-2- Application de l'algorithme d'asservissement à la cascade

On applique l'algorithme d'asservissement établi dans le repère abc pour commander le redresseur de la cascade constituée comme pont d'entrée différents redresseurs de courant triphasé multiniveaux-onduleur triphasé à neuf niveaux à diodes flottantes-MAS .

Les paramètres du filtre intermédiaire sont : $C_{i(i=1\div8)} = 20mF$. L'onduleur triphasé à neuf niveaux à structure NPC et les redresseurs sont commandés par la stratégie de modulation MLI à huit porteuses bipolaires.

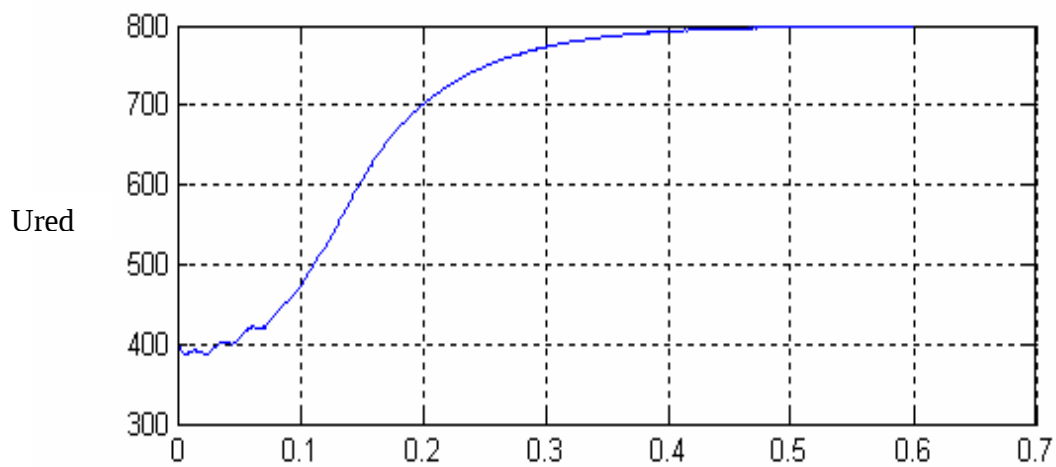


Figure [IV-5] La tension moyenne du redresseur à deux niveaux U_{red}

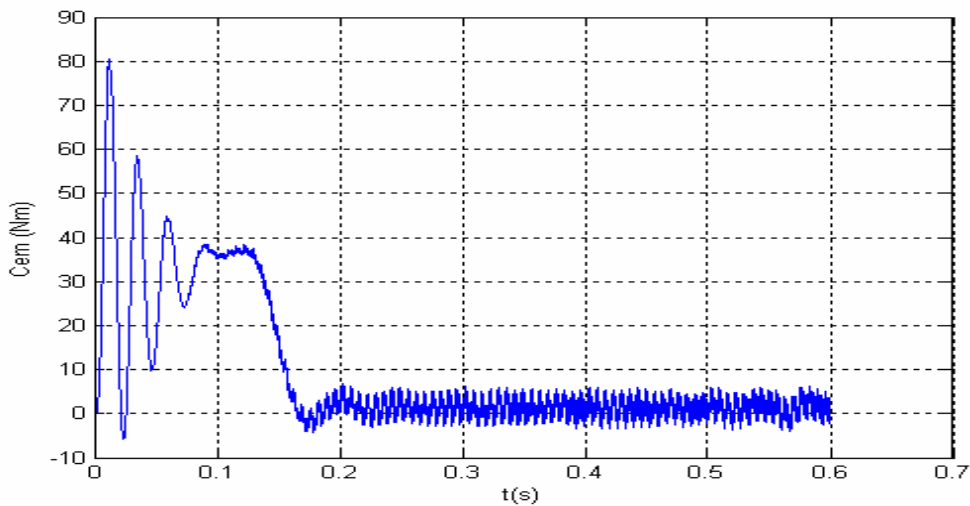


Figure [IV-6] : Le couple de la MAS

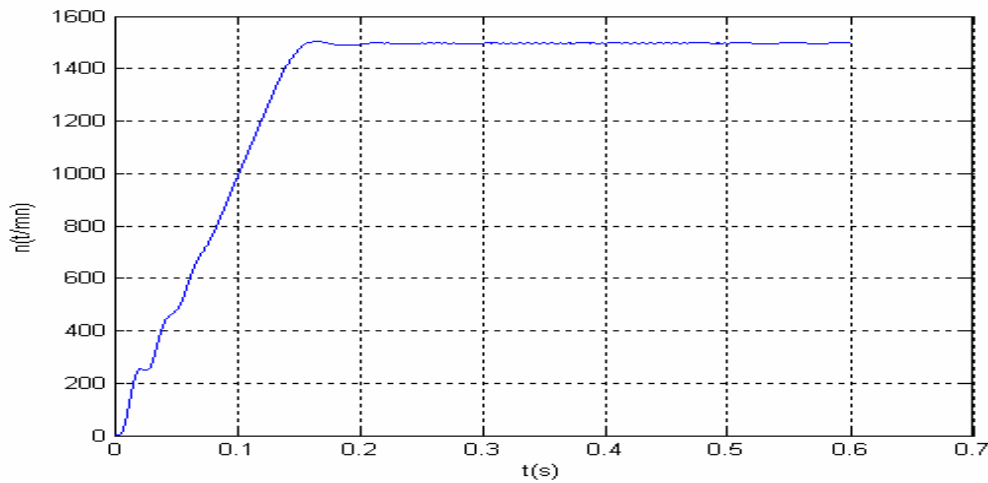


Figure [IV-6] : la vitesse de la MAS

La figure [IV-5] montre l'allure de la tension moyenne asservie est constante. La figure [IV-6] montre le couple ainsi que la vitesse de la MAS.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'asservissement des tensions d'entrée de l'onduleur à neuf niveaux à diodes flottantes.

Au premier lieu, nous avons donné le modèle de la boucle de tension du redresseur de courant triphasé à neuf niveaux dans le repère abc. Ensuite l'algorithme d'asservissement de la tension de sortie U_c moyenne du redresseur de courant triphasé a été donnée. Des résultats de simulation de la cascade avec cet asservissement ont été donnés.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude de la commande de différentes cascades à l'onduleur à neuf niveaux à diode flottante. L'objectif est de remédier aux problèmes de fluctuation du potentiel du point milieu des tensions de l'onduleur triphasé à neuf niveaux.

L'étude d'une cascade complète se décompose en trois parties principales: la machine asynchrone, l'onduleurs à neuf niveaux à diodes flottantes et l'alimentation de puissance comportant des redresseurs de courant MLI.

Le bon fonctionnement de la cascade dépendra du bon fonctionnement de chacun de ces éléments. Pour que ce soit le cas, il est nécessaire que chaque élément de la cascade soit correctement modélisé afin que la commande puisse prendre en compte leurs caractéristiques, la première partie de ce travail a été consacré à la modélisation d'un onduleur de tension à neuf niveaux à diodes flottantes.

Pour cela, nous avons présenté son modèle de fonctionnement sans à priori sur sa commande en utilisant le réseau de Pétri. Ainsi, on a élaboré son modèle de connaissance et de commande. L'utilisation des fonctions de connexion des demi-bras globales a montré que la structure de l'onduleur à neuf niveaux n'est qu'une mise en série de huit onduleurs à deux niveaux, quatre onduleurs à trois niveaux et de deux onduleurs à cinq niveaux.

Le chapitre deux a été consacré à l'étude de la tension de sortie de l'onduleur à neuf niveaux de tension et les courants de sortie du redresseur à neuf niveaux, pour les différentes valeurs de "m" et "r" et on a montré qu'elle présente de faibles harmoniques, On a aussi vu que plus "m" est grand plus la qualité du signal de sortie sont meilleurs, mais ce dernier dépend de des performances des composants existants. Le taux de modulation "r" permet un réglage linéaire de l'amplitude de fondamentale.

La troisième partie a été l'objet de l'étude de la cascade d'un redresseur de courant à deux et neuf niveaux-filtre-onduleur de tension à neuf niveaux. On a mis en évidence le déséquilibre entre les tensions d'entrée de l'onduleur de tension à neuf niveaux et par conséquent l'instabilité des tensions de sortie de cet onduleur.

Pour remédier à ce problème de l'instabilité des tensions d'entrée de l'onduleur, on a introduit dans le chapitre quatre l'asservissement pour une régulation globale de la tension redressée du filtre intermédiaire. L'utilisation de l'algorithme d'asservissement nous a permis d'obtenir des résultats très satisfaisants que ce soit coté réseau ou coté machine.

Bibliographie

- [1] E.M.Berkouk, `contribution a la commande des machines asynchrone monophasée et triphasée alimentées par des convertisseurs directs et indirects. Application au gradateurs et onduleurs multiniveaux`, Thèse de doctorat de CNAM, 1995 .
- [2] B.Abdessamed, `modélisation des machines électriques`, université, Batna.
- [3] R.Ameur, N.Loirci, E.M.Berkouk, G.Manesse , ` commande de la machine synchrone alimentée par un onduleur NPC`, SNAPSEA, Annaba 1998.
- [4] G.Grellet, `Actionneurs électriques`, novembre 1999.
- [5] Amal.Midoun-Oussedik, `La commande robuste a structure variable et a logique floue appliquée a un moteur asynchrone`, Thèse de Magister de L'E.M.P, Juillet 2000.
- [6] A.Rouabah, L.Saf, `Commande par retour d'état d'une machine asynchrone alimentée en tension`, Mémoire d'ingénieur de l'institut d'électronique de M'sila, 2002.