

5/97

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



D.E.R de GENIE ELECTRIQUE & INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

THEME

COMMANDE DES
REDRESSEURS MULTINIVEAUX
A M.L.I.

Proposé par :

M^r : EM. BERKOUK

Etudié par :

M^r : M.BELAZZOUG
M^r : K.SEBA

Dirigé par :

M^r : EM. BERKOUK

PROMOTION JUILLET 1997

E.N.P. 10, Avenue Hacen-Badi, EL-HARRACH, ALGER

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique



Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère;

Mon très cher père ;

Mes soeurs et frères ;

Ma famille ;

Tous mes amis.

Messaoud

Je dédie ce modeste travail à :

A ma mère ;

A mon père;

A tous mes frères et soeurs;

A toute ma famille ;

A la mémoire de Hacène ;

A tous mes amis. .

Karim

AVANT PROPOS

Les travaux qui font l'objet de ce mémoire ont été effectués au laboratoire d'électronique de puissance et de commande de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur le D^r **BERKOUK.EI Madjid** notre promoteur pour l'aide qu'il nous a donnée, en nous dirigeons.

Nous tenons aussi à remercier tous le personnel enseignant et administratif de l'**ENP** et particulièrement les enseignants du département Génie Electrique et Informatique pour leur aide inestimable.

A travers ce mémoire nous adressons nos reconnaissances à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation de puis la première classe de primaire jusqu'à aujourd'hui. Aussi, nous remercions nos amis chacun avec son nom, particulièrement **Rabah** et **Yacine**.

Enfin, nous ne saurions oublier nos chers pères, chères mères, qui nous ont beaucoup aidés par leur compréhension, leurs sacrifices et leur patience, sans lesquels ce travail n'aurait jamais vu le jour, nous profitons de cette occasion pour leur dire que nous les aimons beaucoup.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I. MODELES DE CONNAISSANCE DES REDRESSEURS A TROIS NIVEAUX

Introduction.	1
I- Modélisation du fonctionnement des redresseurs à trois niveaux.	1
I.1. Structure du redresseur à trois niveaux	1
I-2 . Modélisation du fonctionnement des redresseurs à trois niveaux.	6
I-2-1 Différentes configurations d'un bras du redresseur à trois niveaux.	6
I-2-2 Réseaux de PETRI série d'un bras du redresseur à trois niveaux.	7
I-3 Modélisation des redresseurs monophasés et triphasés à trois niveaux.	9
II - Modèles de connaissance des redresseurs monophasés et triphasés à trois niveaux	11
II-1 Fonction de connexion des interrupteurs	11
*Fonction de connexion des demi bras.	
II-2 Modelés de connaissance des redresseurs monophasés à trois niveaux.	11
II-2-1 Fonction de conversion	12
II-2-2 Modèle de connaissance.	12
II-3 Modèle de connaissance du redresseur triphasé à trois niveaux.	14
II-3-1 Fonction de conversion	15
II-3-2 Modèle de connaissance	19
Conclusion.	20

CHAPITRE II. STRATEGIES DE COMMANDE DES REDRESSEURS A TROIS NIVEAUX.

Introduction.	22
I- Commande par hystérésis en courant.	22
I-1 Redresseurs à trois niveaux.	22
I-1-1 Redresseur monophasé à trois niveaux	23
I-1-2 Redresseur triphasé à trois niveaux	24
II- Commande Triangulo- sinusoïdale à échantillonnage naturel avec une seule porteuse	25
II-1 Redresseurs à trois niveaux.	25
II-1-1 Redresseur monophasé à trois niveaux	26
II-1-2 Redresseur triphasé à trois niveaux	27
III- Commande Triangulo- sinusoïdale à échantillonnage naturel avec deux porteuses.	27
III-1 Redresseurs à trois niveaux.	27
III-1-1 Redresseur monophasé à trois niveaux	28
III-1-2 Redresseur triphasé à trois niveaux	29
IV- Modulation vectorielle type 2.	29
IV-1 Redresseurs triphasé à trois niveaux.	31
Conclusion	31

CHAPITRE III. ASSERVISSEMENT DES REDRESSEURS M.L.I. A TROIS NIVEAUX ET APPLICATION AUX MACHINES A COURANT CONTINU

Introduction.

I- Asservissement du redresseur de courant monophasé à trois niveaux.

I-1 Modèles des boucles de courant et de tension.

I-2 Dimensionnement des régulateurs de courant et de tension.

I-2-1 Boucle de courant

I-2-2 Boucles de tension.

I-3 Applications .

I-3-1 La charge est une résistance.

I-3-2 La charge est un moteur à courant continu .

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

II-1 Modèles des boucles de courant et de tension..

II-2 Dimensionnement des régulateurs de courant et de tension.

II-2-1 Boucle de courant

II-2-2 Boucles de tension.

II-3 Applications .

II-3-1 La charge est une résistance.

II-3-2 La charge est un moteur à courant continu .

Conclusion .

57
 58
 58
 62
 62
 64
 66
 66
 67
 68
 69
 70
 70
 71
 72
 72
 73
 74

CHAPITRE IV. REGLAGE PAR RETOUR D'ETAT DE LA MACHINE A COURANT CONTINU ALIMENTEE PAR LE REDRESSEUR A TROIS NIVEAUX.

Introduction

I- Réglage par retour d'état .

II - Réglage par retour d'état d'un moteur à courant continu alimenté par un redresseur monophasé à trois niveaux.

III- Réglage par retour d'état d'un moteur à courant continu alimenté par un redresseur triphasé à trois niveaux

Conclusion .

81
 81
 82
 82
 83

CONCLUSION GENERALE .

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE. .

INTRODUCTION GENERALE



L'application et le perfectionnement de nouveaux composants de puissance commandables à l'ouverture et à la fermeture tels que les GTO et IGBT ont permis la conception de nouveaux convertisseurs fiables, rapides et puissants. De même les développements effectués dans le domaine de la microinformatique ont permis la synthèse d'algorithmes de contrôle des ensembles convertisseurs-machines plus performants et plus robustes.

Pour des applications nécessitant des hautes tensions et fortes puissances, un nouveau type de convertisseurs alternatif/continu est utilisé : le redresseur multiniveaux.

L'objet de ce mémoire, est l'asservissement du redresseur à trois niveaux permettant d'avoir un facteur de puissance unitaire côté réseau et des tensions continues et réglables.

Ce document, comporte quatre chapitres. Le premier chapitre sera consacré à la modélisation du redresseur à trois niveaux dans lequel nous présenterons les modèles de connaissance, ces modèles sont sans a priori sur la commande.

Le chapitre II sera consacré à la synthèse des différentes stratégies de commande. Différentes stratégies MLI existent pour les redresseurs à deux niveaux, nous allons montrer l'extrapolation de ces stratégies pour les redresseurs à trois niveaux. Nous présenterons surtout les stratégies qui peuvent être utilisées dans des asservissements, pour les appliquer dans le troisième chapitre.

Dans ce chapitre, nous présenterons le problème de la fluctuation du potentiel du point milieu de la source continue. Pour remédier à ce problème, nous allons proposer dans le chapitre suivant des algorithmes d'asservissement de ce redresseur permettant d'avoir également un facteur de puissance, côté réseau, unitaire.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons le réglage par retour d'état d'un moteur à courant continu alimenté par le redresseur à trois niveaux monophasé ou triphasé asservis ; où nous montrerons les performances de l'ensemble redresseur multiniveaux-moteur à courant continu.

CHAPITRE I

MODELES DE CONNAISSANCE DES REDRESSEURS A TROIS NIVEAUX

INTRODUCTION :

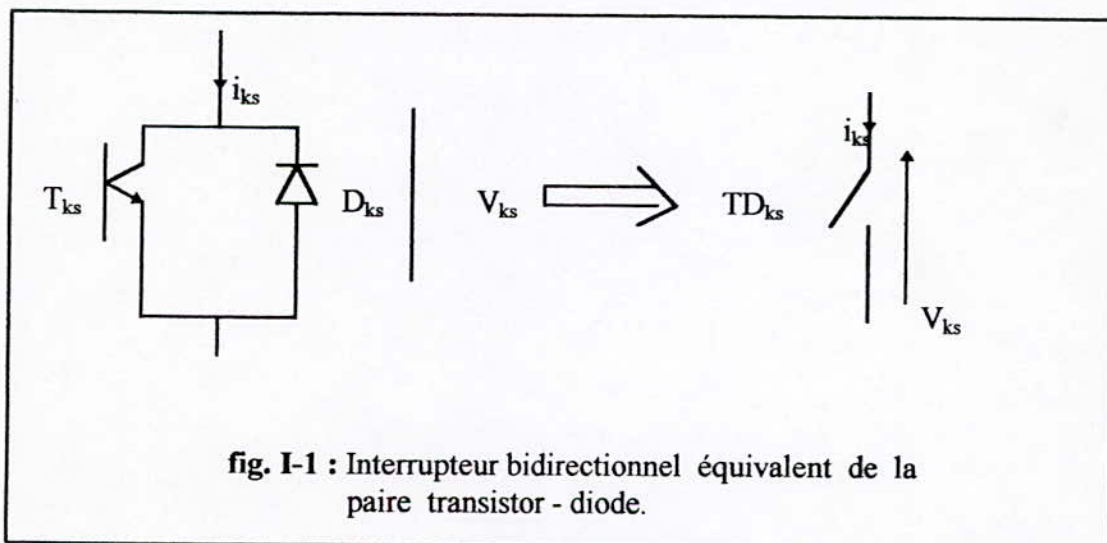
Ce chapitre se compose de deux parties :

- Elaboration des modèles de fonctionnement des redresseurs à trois niveaux sans a priori sur la commande. Ces modèles sont élaborés en utilisant la méthode *DESIGN* associée aux réseaux de **PETRI**.
- Définition des modèles de commande de ces types de redresseurs. L'application de ces redresseurs sera faite dans le **CHAPITRE II** consacré aux stratégies de commande. Ils seront également utilisés au **CHAPITRE III** pour leur asservissement.

Plusieurs études sont faites sur les redresseurs à deux niveaux, aussi bien du point de vue modélisation que stratégie de commande. On va essayer d'approfondir surtout les parties concernant le redresseur multiniveaux.

I - Modélisation du fonctionnement des redresseurs à trois niveaux.

Afin d'élaborer un modèle du fonctionnement de ces redresseurs à trois niveaux sans a priori sur la commande ; et réduire le nombre de place du réseaux de **PETRI** correspondant ; on représente chaque paire *transistor - diode* par un seul interrupteur bidirectionnel (**fig. I-1**) et on procède par bras (grâce à la symétrie de redresseur monophasé et triphasé).



I.1 - Structure de redresseur à trois niveaux.

Plusieurs structures sont possibles pour le redresseurs à trois) niveaux [CHAUVET 90]

[FOCH 93]. Nous avons choisi d'étudier la structure dont un bras est présenté à la figure I-2.

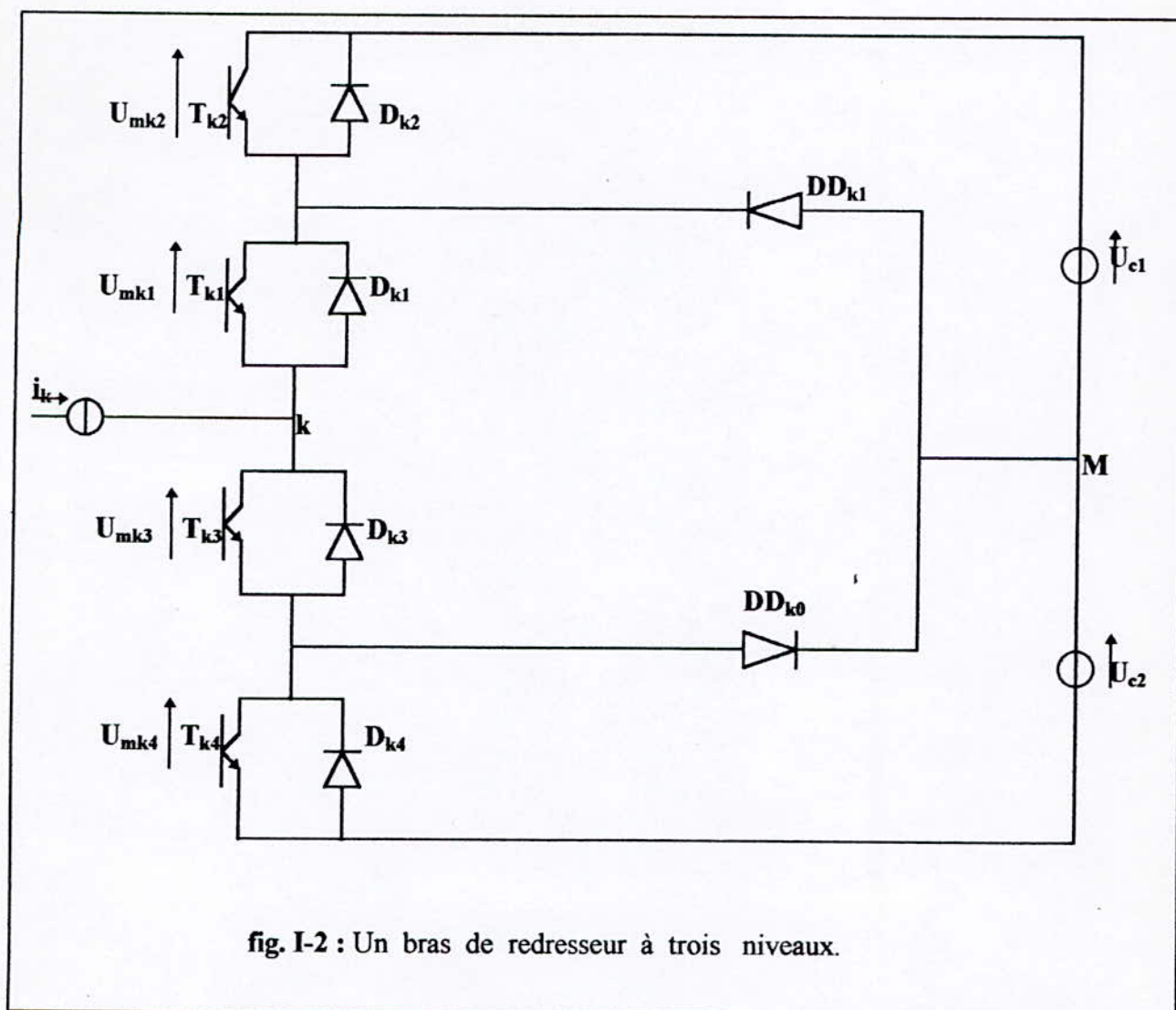


fig. I-2 : Un bras de redresseur à trois niveaux.

Toutes les structures possibles avec le redresseur classique (à deux niveaux) sont aussi réalisables avec la structure multiniveaux (fig. I-3 a à fig. I-3 c) .

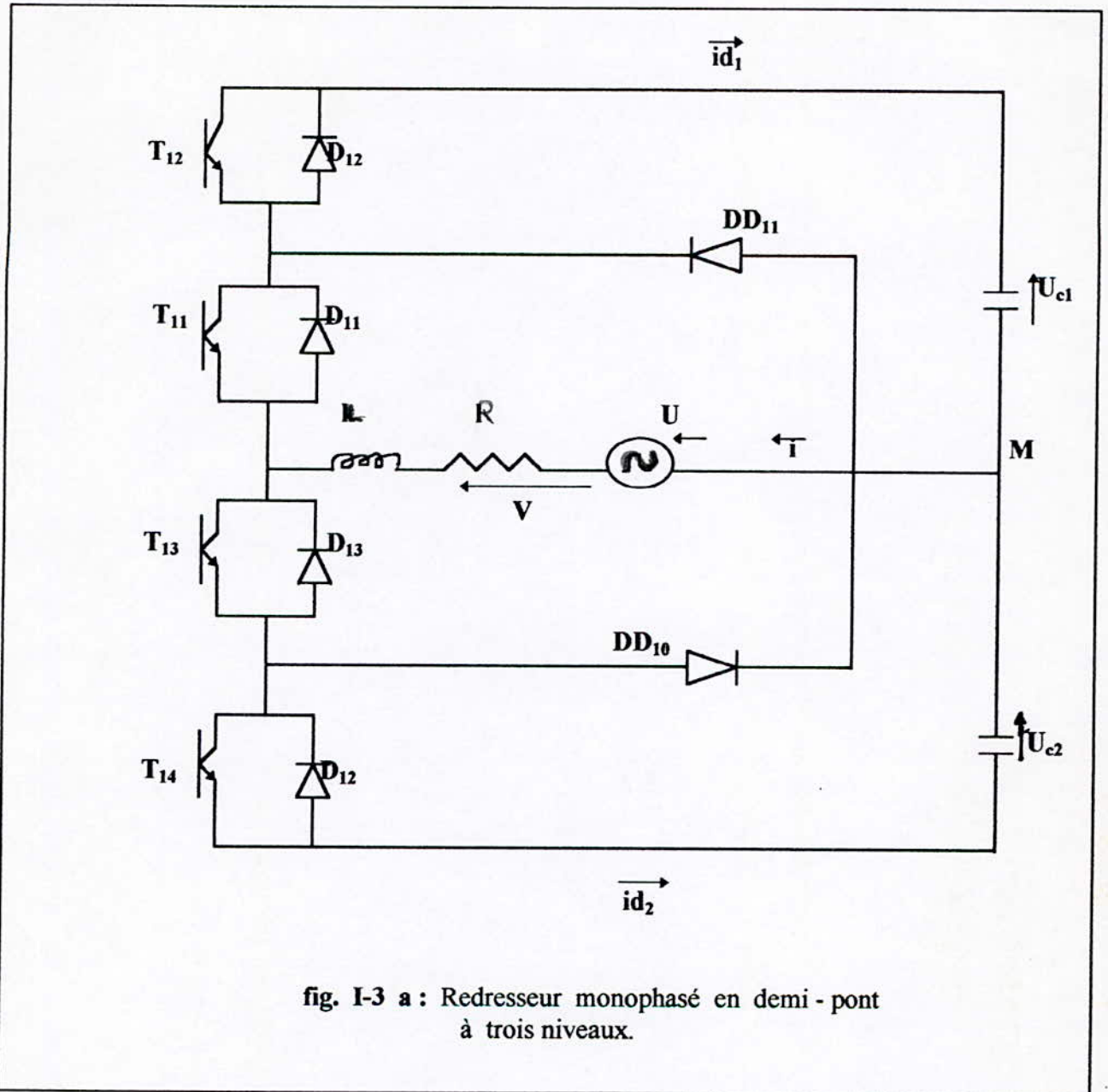
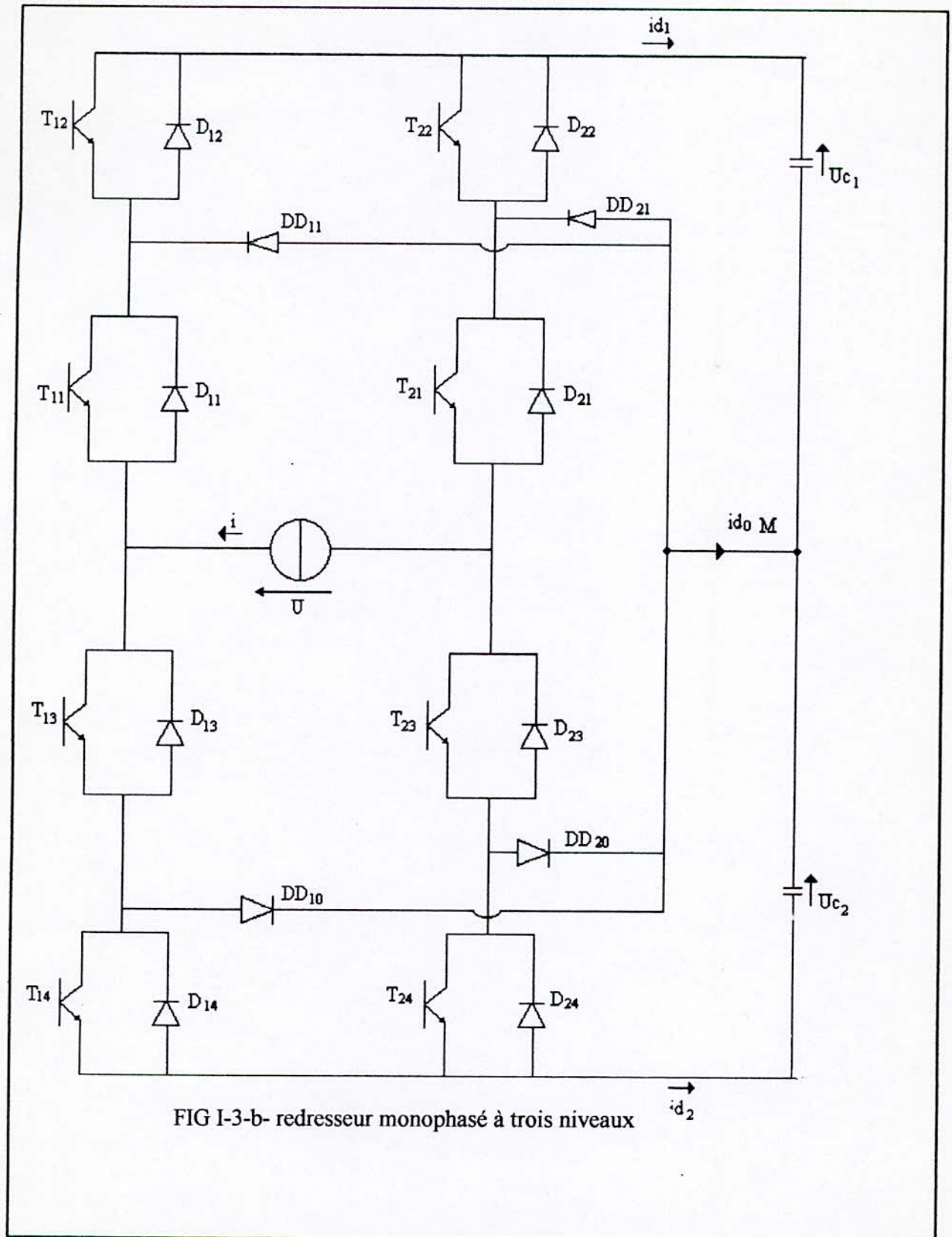


fig. I-3 a : Redresseur monophasé en demi - pont à trois niveaux.



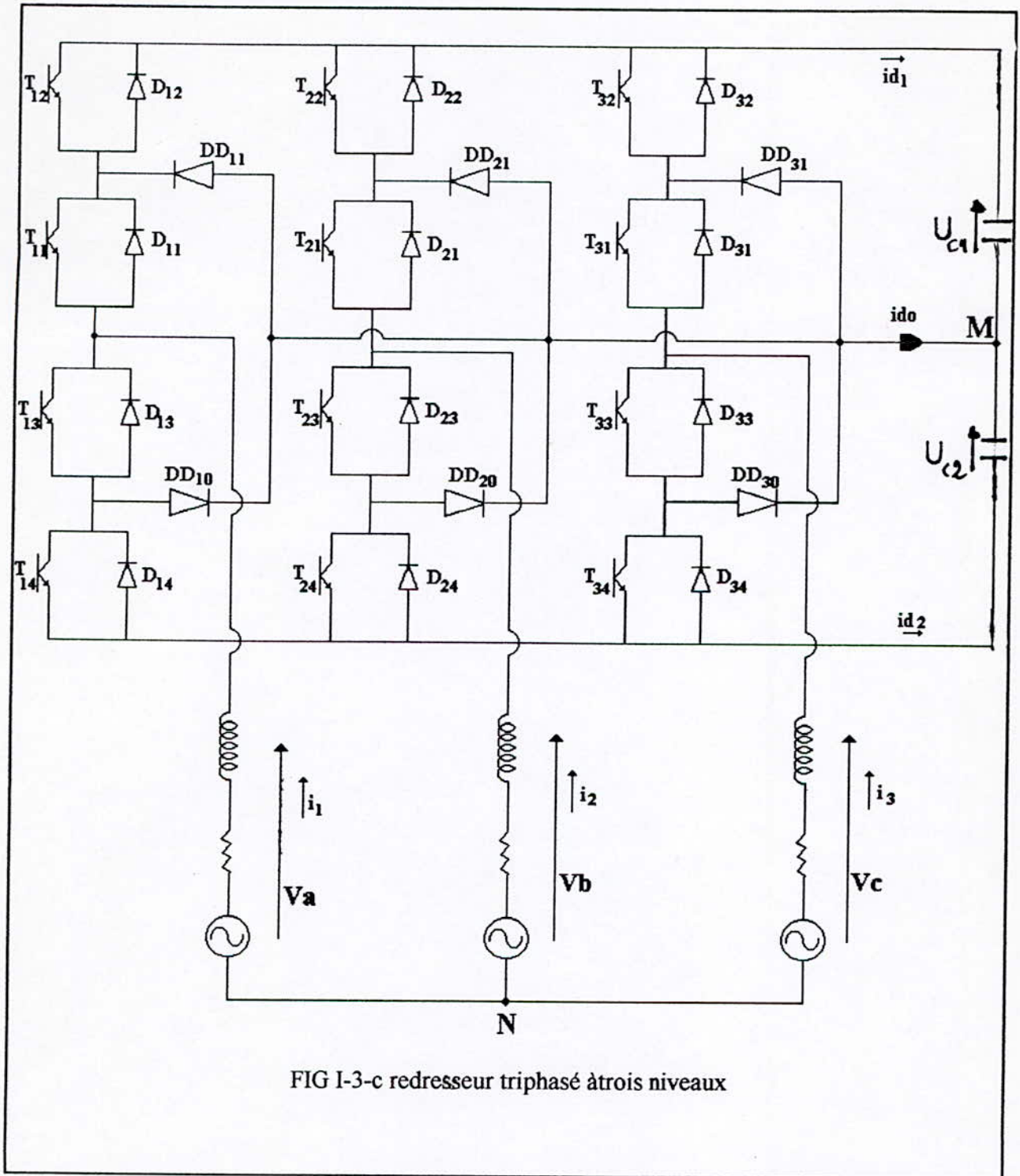


FIG I-3-c redresseur triphasé à trois niveaux

REMARQUE .

- Les tensions U_{c1} et U_{c2} sont deux tensions continues qui sont égales dans le cas idéal .
- Certains auteurs nomment le redresseur à trois niveaux un **redresseur à cinq niveaux**.

I.2 - Modèle du fonctionnement d'un bras de redresseur à trois niveaux.

La symétrie des redresseurs monophasés et triphasés à trois niveaux permet leur modélisation par un bras. Ainsi, on commence par définir un modèle global d'un bras sans a priori sur la commande. On montrera ensuite comment déduire celui d'un redresseur complet.

Dans le but de réduire, tout en considérant toutes les configurations possibles d'un bras; le nombre de place du réseau de **PETRI** décrivant le fonctionnement de ce bras et par suite celui de redresseur; on représente chaque paire transistor (T_{ks}) - diode (D_{ks}) par un seul interrupteur bidirectionnel (TD_{ks}) comme il a déjà été signalé.

I-2.1 - Différentes configurations d'un bras de redresseurs à trois niveaux.

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles pour ce dernier. Ces différentes configurations sont présentées dans la **figure I-4**. Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans le **tableau I-1** (avec M origine des potentiels et V_k le potentiel du noeud k du bras k). Pour la configuration E_0 , le potentiel V_k dépend de la source d'énergie alternative.

E0	$i_k = 0$
E1	$U_{c1} = U_c = V_k$
E2	$V_k = 0$
E3	$U_{c2} = U_c = -V_k$
E4	$V_k = 0$

Tableau I-1 : Grandeurs connues pour chacune des configurations d'un bras k de redresseur à trois niveaux.

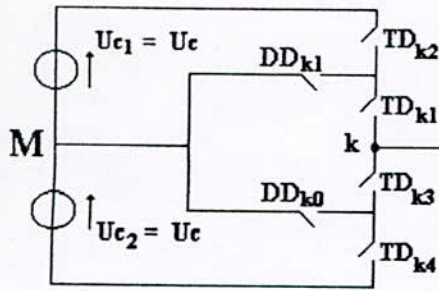


Fig.I-4 a : La configuration E0.

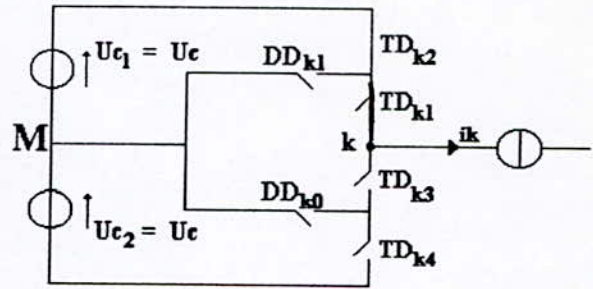


Fig.I-4 b : La configuration E1.

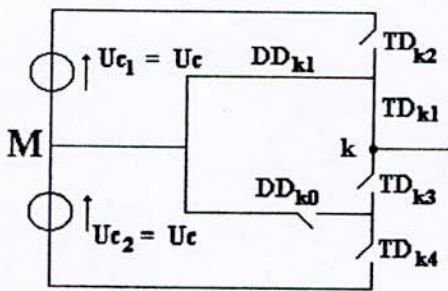


Fig.I-4 c : La configuration E2.

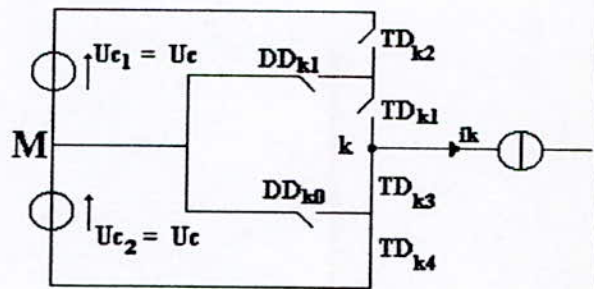


Fig.I-4 d : La configuration E3.

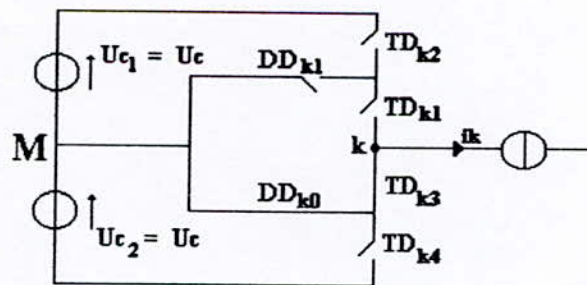


Fig.I-4 e : La configuration E4.

I- 2.2 - Réseau de PETRI d'un bras de redresseur à trois niveaux.

Une fois les cinq configurations du bras sont déterminées, l'analyse des conditions de transition entre elles donnent les réceptivités du réseau de PETRI de fonctionnement de ce bras de redresseur. La figure I-5 montre le réseau PETRI série du fonctionnement de ce bras de redresseur. La variable R_{mn} intervenant dans le réseau de PETRI série (fig. I-5) représente la réceptivité de transition de la configuration E_m à la configuration E_n .

Ces différentes réceptivités de transition R_{mn} sont explicitées ci-dessous :

$$R01 = [\overline{B_{k1}} \text{ et } (U_{mk1} > 0) \text{ et } \overline{B_{k2}} \text{ et } (U_{mk2} > 0)] + [(U_{mk1} < 0) \text{ et } (U_{mk2} < 0)]$$

$$R02 = (U_{mk1} > 0) \text{ et } \overline{B_{k1}} \text{ et } [\overline{B_{k2}} + (U_{mk2} + (U_{mk2} < 0))]$$

$$R03 = [(U_{mk3} > 0) \text{ et } \overline{B_{k3}} \text{ et } (U_{mk4} > 0) \text{ et } \overline{B_{k4}}] + [(U_{mk3} < 0) \text{ et } (U_{mk4} < 0)]$$

$$R04 = (U_{mk3} > 0) \text{ et } \overline{B_{k3}} \text{ et } [\overline{B_{k4}} + (U_{mk4} < 0)]$$

$$R10 = (ik = 0)$$

$$R12 = \overline{B_{k2}} \text{ et } \overline{B_{k1}} \text{ et } (ik < 0)$$

$$R13 = [\overline{B_{k1}} \text{ et } (ik < 0)] + [\overline{B_{k3}} \text{ et } \overline{B_{k4}} \text{ et } (ik > 0)]$$

$$R14 = \overline{B_{k4}} \text{ et } \overline{B_{k3}} \text{ et } (ik > 0)$$

$$R20 = (ik = 0 \uparrow) \text{ et } \overline{B_{k3}} \text{ et } [\overline{B_{k2}} + \overline{B_{k1}}]$$

$$R21 = \overline{B_{k1}} \text{ et } \overline{B_{k2}} \text{ et } (ik < 0)$$

$$R23 = \overline{B_{k1}} \text{ et } (ik < 0)$$

$$R30 = (ik = 0)$$

$$R31 = [\overline{B_{k3}} \text{ et } (ik > 0)] + [\overline{B_{k1}} \text{ et } \overline{B_{k2}} \text{ et } (ik < 0)]$$

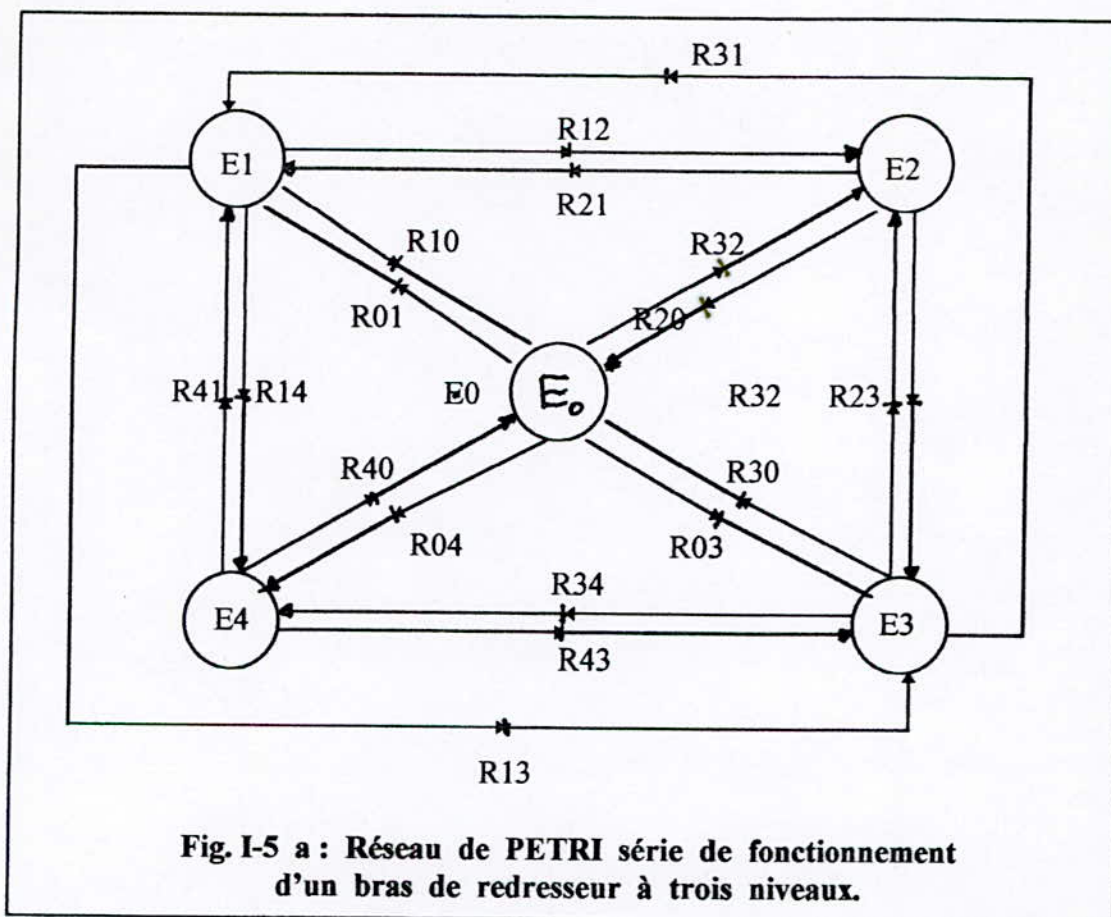
$$R32 = [\overline{B_{k1}} \text{ et } \overline{B_{k2}} \text{ et } ik < 0]$$

$$R34 = [\overline{B_{k3}} \text{ et } \overline{B_{k4}} \text{ et } ik > 0]$$

$$R40 = (ik = 0 \downarrow) \text{ et } \overline{B_{k1}} \text{ et } [\overline{B_{k3}} \text{ et } \overline{B_{k4}}]$$

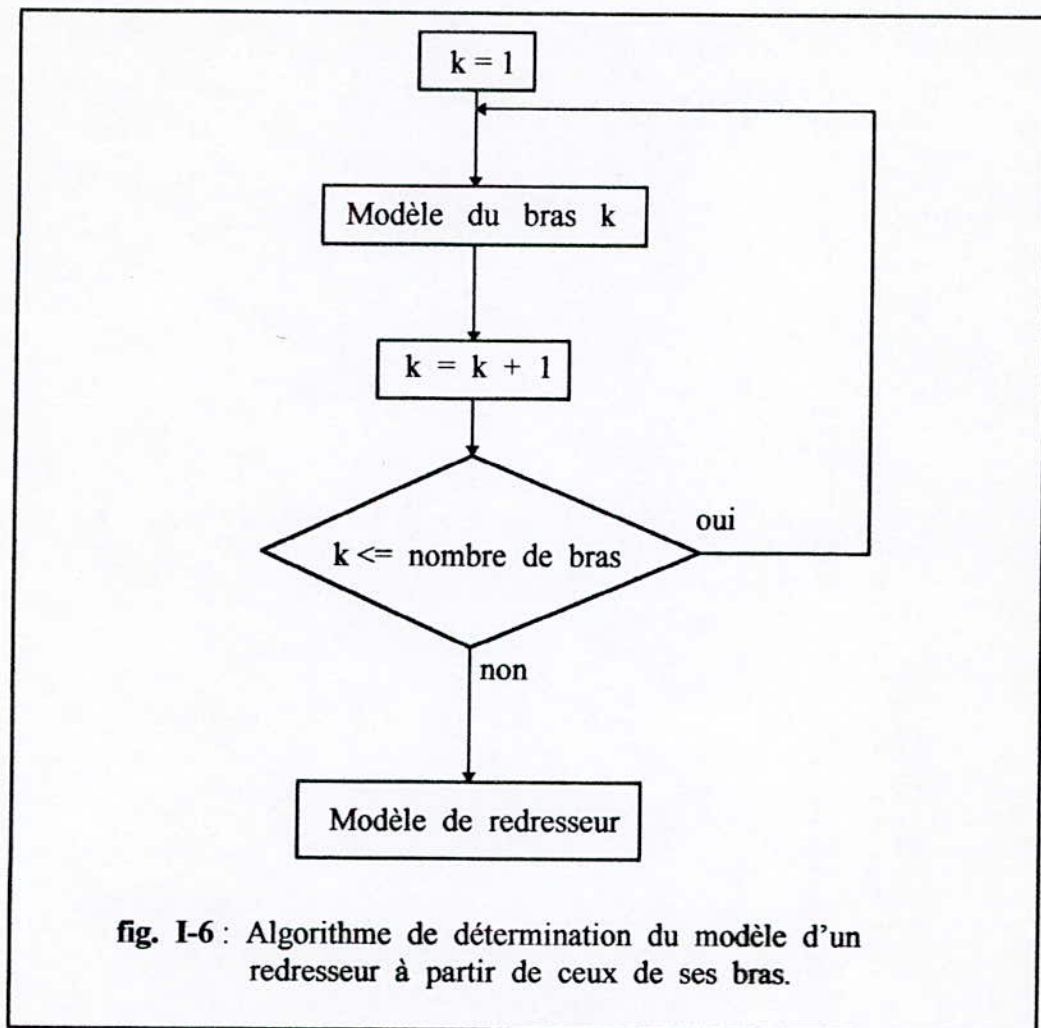
$$R41 = \overline{B_{k3}} \text{ et } (ik > 0)$$

$$R43 = \overline{B_{k3}} \text{ et } \overline{B_{k4}} \text{ et } (ik > 0)$$



I - 3 - Modélisation des redresseurs monophasé et triphasés à trois niveaux.

Les modèles des redresseurs monophasés en pont (fig. I-3 b) et triphasés (fig. I-3 c) à trois niveaux sont déduits à partir de ceux de leurs bras en appliquant l'algorithme de la figure I-6 suivante :



Le type d'alimentation (monophasés, triphasés ou totalement déconnectée) du redresseur est déduit à partir du modèle des bras comme suit :

redresseur monophasé

$(\text{place_bras}[1] \neq E_0) \text{ et } (\text{place_bras}[2] \neq E_0) \Rightarrow \text{modèle} = 1$

dans les autres cas on a $\text{modèle} = 0$ bras_ouvert = 1 et 2 et 3.

REMARQUES.

- **Place_bras** : est un vecteur indiquant pour chaque bras, la place validée de son réseau de **PETRI**.
- **bras_ouvert** : est une variable qui indique les bras totalement ouverts (tous les interrupteurs du bras sont bloqués).
- **modèle** : est une variable qui indique le type d'alimentation de redresseur

- (*modèle* = 3 ; *alimentation triphasée* = 2 ; *alimentation diphasée* = 1 ; *alimentation monophasée* = 0, pas d'alimentation).

II - MODELE DE CONNAISSANCE DES REDRESSEURS A TROIS NIVEAUX.

Un convertisseur statique est dit commandable si les transitions entre ses différentes configurations dépendent des bases de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et par suite une conduction continue de ce convertisseur

[GUILLAUD 92] [PLATEAUX 94]. Pour les convertisseurs à deux ou trois niveaux, cette condition de commandabilité implique que les transitions entre les configurations ne dépendent plus des grandeurs internes (grandeurs électriques), mais uniquement des commandes des transistors (commande externe). Nous supposons dès la suite que cette condition est toujours vérifiée. Dans ces conditions, on peut définir les notions de fonction de connexion, des interrupteur et fonction de connexion de demi - bras.

La structure d'un bras de redresseur à trois niveaux est représentée à la figure I-2. Pour ce redresseur, et en mode commandable, on définit la commande complémentaire pour un bras k est comme suit :

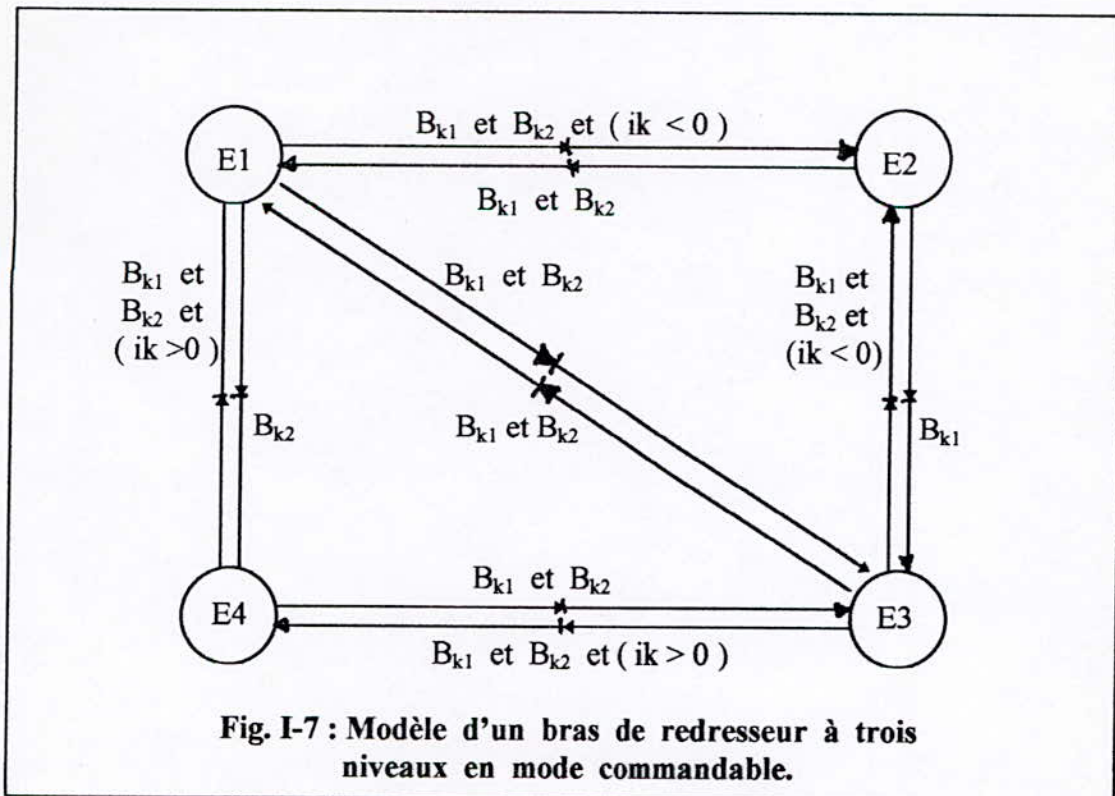
$$\begin{aligned} \overline{B_{k1}} &= \overline{B_{k4}} \\ \overline{B_{k2}} &= \overline{B_{k3}} \end{aligned} \quad (I-1)$$

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

$$\begin{aligned} F_{k1} &= 1 - F_{k4} \\ F_{k2} &= 1 - F_{k3} \end{aligned} \quad (I-2)$$

Avec F_{ks} fonction de connexion liée à l'interrupteur TD_{ks} , cette fonction décrit l'état de ce dernier ; elle vaut un si l'interrupteur est fermé, et zéro dans le cas contraire.

Cette commande complémentaire permet de simplifier le réseau de PETRI de fonctionnement d'un bras de redresseur à trois niveaux, et le réseau de PETRI obtenu dans ces conditions est montré à la figure I-7.



Pour le redresseur à trois niveaux, on définira en plus une fonction de connexion du demi-bras qu'on notera F_{km}^b avec k = numéro du bras, $m = 1$ pour le demi-bras du haut, et $m = 0$ pour l'autre.

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

$$F_{k1}^b = F_{k1} F_{k2} \tag{I-3}$$

$$F_{k0}^b = F_{k3} F_{k4}$$

F_{k1}^b est associée au demi-bras du haut (la paire (T_{k1}, T_{k2})).

F_{k0}^b est associée au demi-bras du bas (la paire (T_{k3}, T_{k4})).

II - 1 - Modèle de connaissance de redresseur monophasé à trois niveaux .

II - 1.1 - Fonction de conversion.

La structure de ce redresseur est donnée à la figure I-3 ; Les tensions des bras de redresseur sont données par les relations suivantes :

$$V_{am} = F_{11} F_{12} U_{c1} - F_{13} F_{14} U_{c2} = (F_{11} F_{12} - F_{13} F_{14}) U_c .$$

$$V_{bm} = F_{21} F_{22} U_{c1} - F_{23} F_{24} U_{c2} = (F_{21} F_{22} - F_{23} F_{24}) U_c \quad (I-4)$$

Ce système d'équations montre bien qu'avec le redresseur à trois niveaux, on a une double modulation de la tension de sortie d'une part, par rapport à U_{c1} , et d'autre part par rapport à U_{c2} .

En introduisant les fonctions de connexion des demi-bras, le système d'équation (I-4) devient :

$$V_{am} = (F_{11}^b - F_{10}^b) U_c \quad (I-5)$$

$$V_{bm} = (F_{21}^b - F_{20}^b) U_c$$

$$V_{ab} = V_{am} - V_{bm} = [(F_{11}^b - F_{10}^b) - (F_{21}^b - F_{20}^b)] U_c$$

En introduisant encore la commande complémentaire des interrupteurs (I-2), le système (I-4) s'écrit :

$$V_{am} = V_a = [(F_{11} - F_{10}) - 1] U_c \quad (I-6)$$

$$V_{bm} = V_b = [(F_{21} - F_{20}) - 1] U_c$$

et en plus on aura :

$$V_{ab} = V_a - V_b = [(F_{11} - F_{10}) + (F_{21} - F_{20})] U_c \quad (I-7)$$

L'équation (I-4) montre que les tensions V_{am} et V_{bm} des deux bras admettent bien trois niveaux de tension possibles $-U_c$; 0 ; U_c .

Pour les courants, on peut écrire la relation (I-8) donnant le courant id de redresseur monophasé en fonction de courant i de réseau en utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs.

$$id_1 = (F_{11} F_{12} - F_{21} F_{22}) i = (F_{11}^b - F_{21}^b) i \quad (I-8)$$

$$id_2 = (F_{13} F_{14} - F_{23} F_{24}) i = (F_{10}^b - F_{20}^b) i$$

$$id_1 = (F_{11}^b - F_{21}^b) i \quad (I-9)$$

$$id_2 = (F_{10}^b - F_{20}^b) i$$

Pour le redresseur monophasé à trois niveaux, les variables d'état de la partie puissance sont le courant i et tensions U_{c1} et U_{c2} .

On définit la matrice de conversion [M(t)] de redresseur qui lie le vecteur des grandeurs de sortie de ce redresseur [V_{ab} id₁ id₂] et ses variables d'état [U_{c1} U_{c2} i]¹.

Cette relation de conversion s'exprime en utilisant les fonctions de connexion de demi-bras et les relations (I-5) et (I-9) comme ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ id_1 \\ id_2 \end{bmatrix} = [M(t)] \cdot \begin{bmatrix} U_{c1} \\ U_{c2} \\ i \end{bmatrix} \quad \text{avec}$$

$$[M(t)] = \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{21}^b & - (F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b - F_{21}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b - F_{20}^b \end{bmatrix} \quad (I-10)$$

Dans l'hypothèse où U_{c1} = U_{c2} = U_c, cette relation de connexion (I-10) peut être réduite et on définit alors la matrice de conversion réduite [M_r(t)]. Dans ce cas, la relation (I-10) devient :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ id_1 \\ id_2 \end{bmatrix} = [M_r(t)] \cdot \begin{bmatrix} U_c \\ i \end{bmatrix}; [M_r(t)] = \begin{bmatrix} (F_{11}^b - F_{20}^b) - (F_{10}^b - F_{21}^b) & 0 \\ 0 & F_{11}^b - F_{21}^b \\ 0 & F_{10}^b - F_{20}^b \end{bmatrix}$$

La figure (I-8) montre le modèle de connaissance global de redresseur monophasé à trois niveaux en mode commandable associé à sa source de tension continue à point milieu, et sa source d'alimentation monophasé. On distingue deux parties : la partie *commande* et la partie *opératrice*. Cette partie présente un bloc discontinu modélisant la fonction de conversion de redresseur, et un bloc continu correspondant au modèle d'état de la source d'alimentation du convertisseur et de sa tension continue à point milieu.

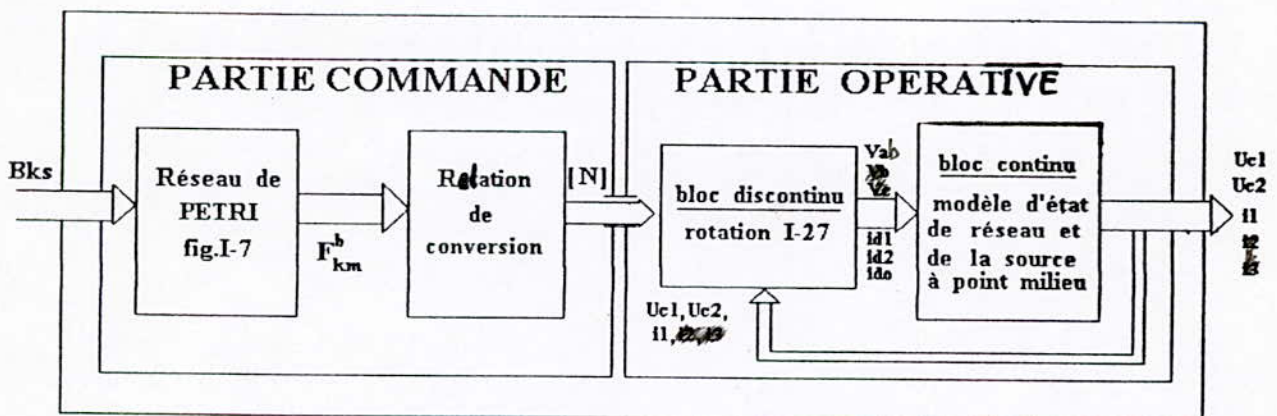


FIG-I-8-Modèle de connaissance du redresseur monophasé à trois niveaux

II - 2 - Modèle de connaissance de redresseur triphasé à trois niveaux.

II - 2.1 - Fonction de conversion.

La structure de redresseur triphasé à trois niveaux est présentée à la **figure I-3** ; et on suppose que $U_{c1} = U_{c2} = U_c$, pour cet redresseur, les relations entre les fonctions de connexion des interrupteurs et avec la commande complémentaire (relation I-1) donne les relations suivantes :

$$\begin{aligned} F_{11} &= 1 - F_{14} & F_{21} &= 1 - F_{24} & F_{31} &= 1 - F_{34} \\ F_{12} &= 1 - F_{13} & F_{22} &= 1 - F_{23} & F_{32} &= 1 - F_{33} \end{aligned} \quad (I - 12)$$

Les potentiels des noeuds **A, B, C** de ce redresseur à trois niveaux, par rapport au point milieu **M** de la source de tension continue ; sont donnés par le système suivant où on utilise les fonctions de connexion des interrupteurs :

$$\begin{aligned} V_{am} &= F_{11}F_{12}U_{c1} - F_{13}F_{14}U_{c2} = (F_{11}F_{12} - F_{13}F_{14}) U_c \\ V_{bm} &= F_{21}F_{22}U_{c1} - F_{23}F_{24}U_{c2} = (F_{21}F_{22} - F_{23}F_{24}) U_c \\ V_{cm} &= F_{31}F_{32}U_{c1} - F_{33}F_{34}U_{c2} = (F_{31}F_{32} - F_{33}F_{34}) U_c \end{aligned} \quad (I - 13)$$

Pour le redresseur triphasé à trois niveaux, les fonctions de connexion des demi-bras définies selon la relation (I-3) sont :

1

$$\begin{aligned} F^b_{11} &= F_{11}F_{12} & F^b_{21} &= F_{21}F_{22} & F^b_{31} &= F_{31}F_{32} \\ F^b_{10} &= F_{13}F_{14} & F^b_{20} &= F_{23}F_{24} & F^b_{30} &= F_{33}F_{34} \end{aligned} \quad (I - 14)$$

En introduisant ces fonctions de connexion des demi-bras dans le système (I-13), on aboutit à :

$$\begin{aligned} V_{am} &= F^b_{11}U_{c1} - F^b_{10}U_{c2} = (F^b_{11} - F^b_{10}) U_c \\ V_{bm} &= F^b_{21}U_{c1} - F^b_{20}U_{c2} = (F^b_{21} - F^b_{20}) U_c \\ V_{cm} &= F^b_{31}U_{c1} - F^b_{30}U_{c2} = (F^b_{31} - F^b_{30}) U_c \end{aligned} \quad (I - 15)$$

Les différentes relations composées de redresseur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{aligned}
 U_{ab} &= V_{am} - V_{bm} = (F_{11}F_{12} - F_{21}F_{22}) U_{c1} - (F_{13}F_{14} - F_{23}F_{24}) U_{c2} \\
 U_{bc} &= V_{bm} - V_{cm} = (F_{21}F_{22} - F_{31}F_{32}) U_{c2} - (F_{23}F_{24} - F_{33}F_{34}) U_{c2} \\
 U_{ca} &= V_{cm} - V_{am} = (F_{31}F_{32} - F_{11}F_{12}) U_{c2} - (F_{33}F_{34} - F_{13}F_{14}) U_{c2}
 \end{aligned} \tag{I-16}$$

Dans le cas où $U_{c1} = U_{c2} = U_c$ la relation (I-16) devient :

$$\begin{aligned}
 U_{ab} &= V_{am} - V_{bm} = [(F_{11}F_{12} - F_{21}F_{22}) - (F_{13}F_{14} - F_{23}F_{24})] U_c \\
 U_{bc} &= V_{bm} - V_{cm} = [(F_{21}F_{22} - F_{31}F_{32}) - (F_{23}F_{24} - F_{33}F_{34})] U_c \\
 U_{ca} &= V_{cm} - V_{am} = [(F_{31}F_{32} - F_{11}F_{12}) - (F_{33}F_{34} - F_{13}F_{14})] U_c
 \end{aligned} \tag{I-17}$$

En introduisant les fonctions de connexion des demi-bras, les relations (I-16) et (I-17) deviennent respectivement (I-18) et (I-19) ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \tag{I-18}$$

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} U_c \tag{I-19}$$

Les tensions simples sont liées aux tensions composées par la relation (I-20) suivante :

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= V_a = (U_{ab} - U_{ca}) / 3 \\
 V_{bn} &= V_b = (U_{bc} - U_{ab}) / 3 \\
 V_{cn} &= V_c = (U_{ca} - U_{bc}) / 3
 \end{aligned}$$

Ces tensions simples pour ce redresseur s'expriment grâce aux fonctions de connexion des demi-bras selon le système (I-21) ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \tag{I-21}$$

Dans le cas où $U_{c1} = U_{c2} = U_c$, cette relation se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} U_c \quad (I-22)$$

Pour les courants, on peut écrire la relation suivante donnant les courant id_1 et id_2 de redresseur triphasé en fonction des courants i_1, i_2, i_3 de sa source triphasé d'alimentation en utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs :

$$id_1 = F_{11}F_{12} i_1 + F_{21}F_{22} i_2 + F_{31}F_{32} i_3 \quad (I-23)$$

$$id_2 = F_{13}F_{14} i_1 + F_{23}F_{24} i_2 + F_{33}F_{34} i_3$$

En utilisant les fonctions de connexion des demi - bras, la relation (I-23) s'écrit :

$$id_1 = F_{11}^b i_1 + F_{21}^b i_2 + F_{31}^b i_3 \quad (I-24)$$

$$id_2 = F_{10}^b i_1 + F_{20}^b i_2 + F_{30}^b i_3$$

Le courant id_0 , dans le cas de la commande complémentaire est lié aux différents courants de redresseur triphasé à trois niveaux par la relation suivante :

$$id_0 = F_{11}F_{13} i_1 + F_{21}F_{23} i_2 + F_{31}F_{33} i_3 \quad (I-25)$$

En introduisant les équations (I-14) et (I-23), la relation (I-25) peut être exprimée comme suit :

$$id_0 = i_1 + i_2 + i_3 - id_1 - id_2 \quad (I-26)$$

La relation (I-25) peut être aussi exprimée, en utilisant les fonctions de connexion des demi - bras comme ci-dessous :

$$id_0 = (i_1 + i_2 + i_3) - (F_{11}^b + F_{10}^b)i_1 - (F_{21}^b + F_{20}^b)i_2 - (F_{31}^b + F_{30}^b)i_3 \quad (I-27)$$

Pour le redresseur triphasé à trois niveaux, le vecteur des grandeurs d'état est

$$\left[U_{c1}, U_{c2}, i_1, i_2, i_3 \right]^t \text{ et ses entrées internes sont } \left[V_a, V_b, V_c, id_1, id_2, id_0 \right]^t$$

$$\text{ou } \left[U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}, id_1, id_2, id_0 \right]^t.$$

Comme pour le redresseur monophasé à trois niveaux, on définit des relations de conversion ; qui peuvent être dans ce cas simple ou bien composé.

a - Relation de conversion simple :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ id_1 \\ id_2 \\ id_0 \end{bmatrix} = [N(t)] \begin{bmatrix} U_{c1} \\ U_{c2} \\ U_{c3} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (I-27)$$

$$N(t) = \begin{bmatrix} -(2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b) / 3 & -(2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b) / 3 & 0 & 0 & 0 \\ -(F_{11}^b + 2F_{21}^b + F_{31}^b) / 3 & -(F_{10}^b + 2F_{20}^b + F_{30}^b) / 3 & 0 & 0 & 0 \\ (-F_{11}^b - F_{21}^b - 2F_{31}^b) / 3 & -(F_{10}^b - F_{20}^b + 2F_{30}^b) / 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{b11}, F_{b21}, F_{b31} \\ 0 & 0 & F_{b10}, F_{b20}, F_{b30} \\ 0 & 0 & 1 - F_{11}^b - F_{10}^b, 1 - F_{21}^b - F_{20}^b, \\ & & 1 - F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix}$$

On appellera $[N(t)]$ la *matrice de conversion simple*.

b - Relation de conversion composée.

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \\ id_1 \\ id_2 \\ id_0 \end{bmatrix} = [M(t)] \begin{bmatrix} U_{c1} \\ U_{c2} \\ U_{c3} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (I-28)$$

$$[M(t)] = \begin{bmatrix} (F_{11}^b - F_{21}^b) & -(F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{21}^b - F_{31}^b) & -(F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{31}^b - F_{11}^b) & -(F_{30}^b - F_{10}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{10}^b \\ 0 & 0 & (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) & (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) & (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix}$$

On appellera $[M(t)]$ la *matrice de conversion composée*.

La figure I-9 montre le modèle de connaissance globale de redresseur triphasé à trois niveaux en mode commandable associé à sa tension continue a point milieu et son réseau triphasé.

On distingue toujours pour la partie opératrice du système, un bloc discontinu, qui représente la fonction de redresseur, et un bloc continu le réseau d'alimentation.

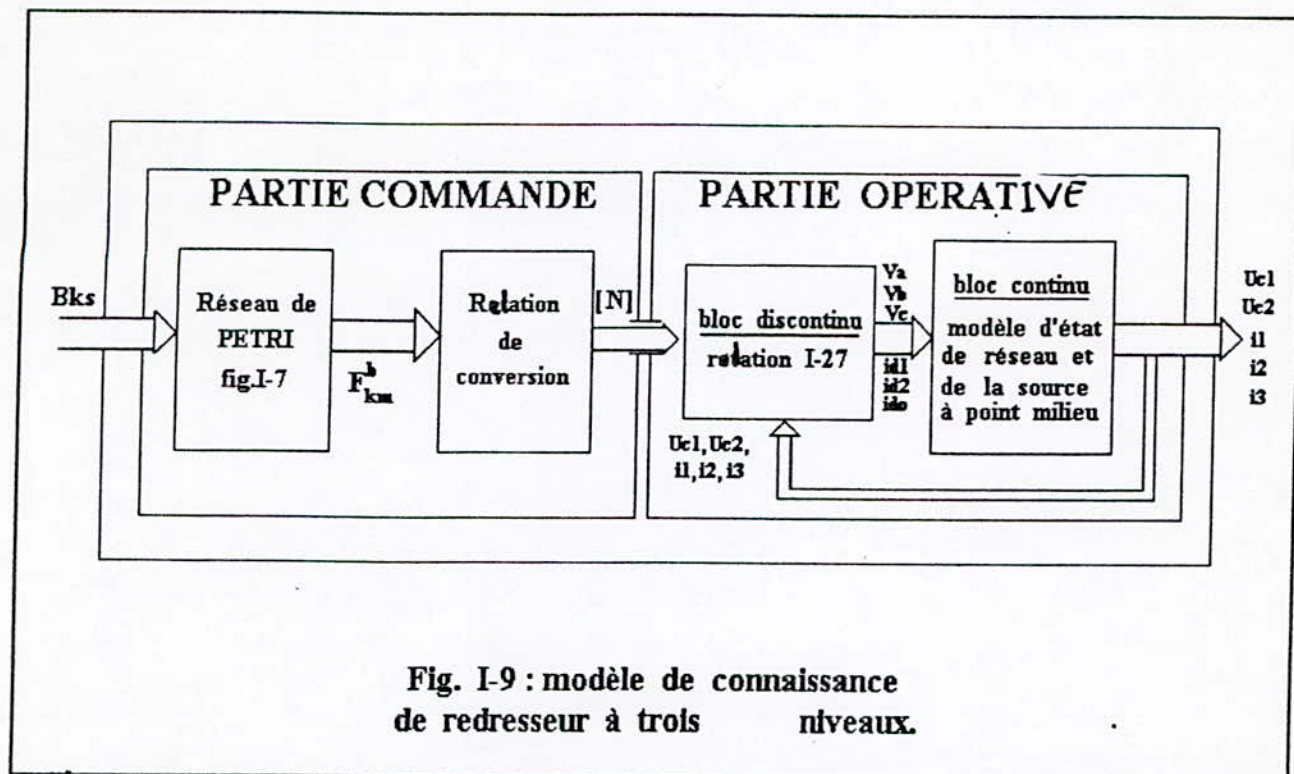


Fig. I-9 : modèle de connaissance de redresseur à trois niveaux.

$$[M_v(t)] = \begin{bmatrix} (F_{11}^b - F_{10}^b) - (F_{21}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 \\ (F_{21}^b - F_{20}^b) - (F_{31}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 \\ 0 & F_{11}^b - F_{31}^b & F_{21}^b - F_{31}^b \\ 0 & F_{10}^b - F_{30}^b & F_{10}^b - F_{30}^b \end{bmatrix}$$

On appellera $[N_r(t)]$ et $[M_r(t)]$ respectivement la *matrice réduite de conversion simple et composée*.

REMARQUE :

Les fonctions définies dans ce chapitre sont bien adaptées à la simulation, et donc la validation des stratégies de commande. Pour la synthèse des algorithmes de commande, il est indispensable de transformer ces fonctions pour obtenir des relations biunivoques entre les différentes grandeurs mises en jeu. Pour ce faire, et dans l'hypothèse d'un fonctionnement du convertisseur en mode commandable, on introduit la notion de fonction génératrice. Une fonction génératrice F_g est une fonction continue qui représente la valeur moyenne de la fonction F sur une période de commutation T_e . Cette période est supposée infiniment petite.

CONCLUSION.

Dans ce chapitre, on a présenté les modèles de fonctionnement des redresseurs monophasé et triphasé à trois niveaux sans a priori sur la commande en utilisant les réseaux de **PETRI**. Ainsi on a présenté les différentes configurations de ce redresseur.

En vue de la commande des redresseurs à trois niveaux, on a élaboré les modèles de commande de ces différents redresseurs sans a priori, sur leur source de tension et de courant, on a commencé par présenter l'hypothèse de commandabilité.

Ensuite, on a présenté la notion de fonction de connexion des interrupteurs et fonction de connexion des demi - bras, et on a défini pour le redresseur multiniveaux les conditions de sa commandabilité et aussi , son unique commande complémentaire possible pour avoir un fonctionnement totalement commandable.

L'utilisation de ces différents modèles sera effectués particulièrement au cours du **CHAPITRE II** suivant relatif aux stratégies de commande de ces redresseurs, et au **CHAPITRE III** consacré à l'asservissement des redresseurs **MLI** à trois niveaux.

CHAPITRE II

STRATEGIES DE COMMANDE DES REDRESSEURS A TROIS NIVEAUX

INTRODUCTION :

Après avoir fait la modélisation de notre convertisseur, nous allons maintenant nous intéresser à la commande des interrupteurs supposés idéals (temps de commutation nul, pertes négligeables). Plusieurs auteurs ont proposé de différentes stratégies de modulation de largeur d'impulsion chacune d'elles doit obéir à un algorithme bien défini, mais toutes sont conçues pour générer une source de tension d'entrée de redresseur à trois niveaux la plus sinusoïdale possible.

L'idée de mettre en évidence ces stratégies est venue après extrapolation de la méthodologie conçue pour les convertisseurs à deux niveaux.

Toujours avec le même objectif que pour les convertisseurs classiques (tension, fréquence variables avec un minimum d'harmoniques), nous allons étudier quelques stratégies, seulement nous n'allons pas supposer que les tensions de sortie du convertisseur sont égales mais des variables d'état évoluant selon notre processus (redresseur, réseau et charge).

Ce chapitre sera composé de quatre parties :

- commande par hystérésis en courant.
- commande triangulo-sinusoïdale à une seule porteuse.
- commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses.
- modulation vectorielle type 2.

Pour ces redresseurs à trois niveaux, on utilise leur commande complémentaire définie au **Chapitre I**.

I - Commande par hystérésis en courant :

La commande en courant est surtout utilisée en mode onduleur alimentant des machines à courant alternatif; elle peut être réalisée en utilisant un commutateur de courant ou un convertisseur de tension régulé en courant au moyen de régulateurs linéaires classiques (P, PI), ou à hystérésis [**BUHLER 87**].

Dans cette partie nous allons présenter la commande par hystérésis dont le principe général est de comparer le courant référentiel I_{ref} au courant réel (du réseau), et à partir de l'écart entre ces deux courants on déduit la commande des interrupteurs du convertisseur.

Ce type de commande contrôle la puissance fournie par le réseau (active et/ou réactive).

Nous montrerons que les performances de cette stratégie sont fortement liées à l'hystérèse Δi . D'une manière générale, cette stratégie permet une réaction rapide à des variations de la consigne ou des paramètres de la partie puissance (charge par exemple).

Pour les redresseurs à trois niveaux l'algorithme de la commande par hystérésis en courant se résume pour un bras k par le système suivant sachant que $\epsilon_k = i_{ref_k} - i_k$.

$$\begin{aligned}
 \Delta i \leq |\varepsilon_k| \leq 2.\Delta i &\Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 0 \\
 \varepsilon_k > 2.\Delta i &\Rightarrow B_{k1} = 0, B_{k2} = 0 \\
 \varepsilon_k < -2.\Delta i &\Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 1
 \end{aligned}
 \tag{II-1}$$

I.1 - Redresseur monophasé à trois niveaux (en pont) :

Les courants de référence pour ce redresseur sont définis comme suit :

$$\begin{aligned}
 I_{ref1} &= \sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\omega.t) \\
 I_{ref2} &= -\sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\omega.t)
 \end{aligned}
 \tag{II-2}$$

avec

$$i_{res} = i_1 = -i_2.$$

Les figures II-1-* et II-2-* montrent les résultats du comportement de l'association réseau monophasé et redresseur à trois niveaux commandé par hystérésis en courant ; pour une charge résistive à point milieu et aussi pour une machine à courant continu.

Pour un redresseur monophasé à trois niveaux commandé par hystérésis en courant ($\Delta i = 0,5A$, $I_{eff} = 72A$) alimenté par un réseau monophasé ($V_{res} = 210V$, $f = 50Hz$, $R_{res} = 0,25\Omega$, $L_{res} = 0,01H$), et avec une charge à point milieu $R_1 = R_2 = 12,5\Omega$, nous remarquons que le taux d'harmoniques de la tension d'entrée du redresseur V_{ab} est grand mais les harmoniques les plus importants en amplitude sont ceux de rang élevé et donc facilement lissés par l'inductance du réseau (filtre). Le courant suit bien la référence, et les tensions U_{c1} et U_{c2} oscillent à une fréquence deux fois celle du réseau à cause de l'existence de la puissance fluctuante en monophasé.

Si on augmente la valeur de l'hystérèse Δi ($\Delta i = 2,5A$), nous remarquons que le courant du réseau suit la référence mais pas autant qu'au premier cas, là on voit clairement que le courant du réseau oscille autour du courant référentiel ce qui nous amène à dire que plus Δi est faible, plus le courant du réseau devient pratiquement sinusoïdal (confondu avec sa valeur de référence) ; Il faut noter que si Δi est plus faible qu'une valeur critique les interrupteurs ne pouvant pas réagir à tous les coups et les pertes par commutation des interrupteurs deviendront plus importantes.

Lors de la simulation nous avons constaté que trois paramètres influent directement sur la commandabilité de notre stratégie ; l'inductance du réseau, l'hystérèse Δi et la valeur du courant de référence.

Pour le même redresseur alimenté par un réseau ($V_{res} = 40V$, $f = 50Hz$, $R_{res} = 0,25\Omega$, $L_{res} = 0,003H$), et commandé par la même stratégie avec $\Delta i = 0,5A$ et $I_{res} = 13,75A$ qui alimente une machine à courant continu dont la plaque signalétique est donnée à l'Annexe I.

Les figures II-2-* montrent la conduite de la machine avec un couple résistant $C_r = 4N.m$ et $U = U_n = 110V$; après un régime transitoire les tensions U_{c1} et U_{c2} tendent vers des grandeurs permanentes et fluctuantes comme pour le cas de la résistance.

Ainsi le courant du réseau suit bien le courant de référence ; la vitesse de la machine subit un régime transitoire opposé à celui des tensions U_{c1} et U_{c2} ensuite tend vers la vitesse nominale

où elle se stabilise. Ce régime transitoire est du au fait que : étant donné que le courant de référence est imposé et fixé au départ et par suite le courant du réseau et que la machine à courant continu démarre à couple fort donc à un courant (de charge) important et ce courant ne peut pas provenir que par le réseau (c'est-à-dire en égalisant les puissances fournies par le réseau et dissipées par la charge) et sachant encore que les condensateurs sont préchargés à une tension bien définie (valeurs initiales des tensions U_{c1} et U_{c2}), il est obligatoire que U_{c1} descend à une valeur pour que le courant augmente à une autre. En essayant d'amorcer le moteur on doit lui fournir une puissance importante au démarrage.

En monophasé et quelque soit la charge ; pour la stratégie à hystérésis, les deux tensions U_{c1} et U_{c2} sont égales.

I. 2 - Redresseur triphasé à trois niveaux :

Les courants de référence pour alimenter le redresseur sont définis réseau ci-dessous :

$$\begin{aligned} I_{ref1} &= I_{eff} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \\ I_{ref2} &= I_{eff} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ I_{ref3} &= I_{eff} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (II-3)$$

Les figures II-3-* représentent les résultats obtenus d'un redresseur triphasé à trois niveaux alimenté par un réseau ($V = 210V$, $f = 50Hz$, $R_{res} = 0,25\Omega$, $L_{res} = 0,001H$) commandé par la stratégie hystérésis avec $\Delta i = 0,5A$ et $I_{ref} = 24A$ qui alimente les charges suivantes :

- $R_{ch} = 25\Omega$ résistance pure.
- $R_1 = R_2 = R_{ch}/2 = 12,5\Omega$ résistance à point milieu.

Ces figures montrent que les harmoniques de la tension sont pratiquement négligeables par rapport au fondamentale, c'est là un des points positifs des redresseurs à trois niveaux triphasés, et que les courants de réseau suivent bien leurs références ; ils sont pratiquement sinusoïdaux.

Les tensions U_{c1} et U_{c2} dans les deux cas (soit $R_{ch} = 25\Omega$ pure ou $R_1 = R_2 = 12,5\Omega$ résistance à point milieu) sont bien lissées car la puissance fluctuante en triphasé est nulle (la puissance du réseau), la différence $U_{c1} - U_{c2}$ existe toujours mais elle est pratiquement négligeable devant U_{c1} .

Pour la charge résistive à point milieu la différence $U_{c1} - U_{c2}$ est plus améliorée que pour une charge résistive pure c'est à cause du courant $i_{ch1} - i_{ch2}$ qui compense le courant i_{d0} .

Dans certains cas et pour certaines valeurs de l'hystérèse Δi , le redresseur de courant à trois niveaux (monophasé ou triphasé) fonctionne plus en deux niveaux qu'en trois niveaux.

Les figures II-4-* montrent la conduite de la machine à courant continu (la même machine) alimentée par un réseau monophasé ($V_{res} = 13,33V$, $f = 50Hz$, $R_{res} = 0,25\Omega$, $L_{res} = 0,003H$ avec

$C_r = 3 N.m$ le couple résistant du moteur à courant continu et $U = U_n = 110V$).

Les courants du réseau suivent bien leurs références, et les tensions U_{c1} , U_{c2} sont pratiquement constantes (après un régime transitoire) pour la même cause que pour le monophasé, la vitesse traverse ce régime et se stabilise ensuite à une valeur constante.

II - Commande triangulo-sinusoïdale à échantillonnage naturel avec une seule porteuse :

Cette stratégie est très connue, nous rappellerons son principe et nous donnerons l'algorithme correspondant aux redresseurs à trois niveaux. Son principe général est de comparer une tension de référence à une porteuse triangulaire ou en dent de scie. Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres : l'indice de modulation m et le taux de modulation r .

On définit l'**indice de modulation** m comme le rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f de la tension de référence [$m = f_p / f$], Le **taux de modulation** r est le rapport des amplitudes des tensions [$r = V_m / U_{pm}$].

On parle de modulation *synchrone* quand m est entier, et *asynchrone* dans le cas contraire.

II.1 - Redresseur à trois niveaux : (AnnexeIII)

Pour les redresseurs de ce type, la porteuse la plus adaptée afin de donner des meilleurs performances est la porteuse unipolaire triangulaire. L'algorithme de la commande triangulo-sinusoïdale pour le redresseur à trois niveaux se résume pour un bras k comme suit :

$$\begin{aligned} (|V_{refk}| \leq U_p) &\Rightarrow B_{k1} = 1 ; B_{k2} = 2 \\ (|V_{refk}| > U_p) \text{ et } (V_{refk} > 0) &\Rightarrow B_{k1} = 1 ; B_{k2} = 1 \\ (|V_{refk}| > U_p) \text{ et } (V_{refk} < 0) &\Rightarrow B_{k1} = 0 ; B_{k2} = 0 \end{aligned} \quad (\text{II} - 4)$$

Avec cet algorithme et pour des tensions de référence sinusoïdales, nous avons pour la phase une :

- pour $0 < \omega.t \leq \pi$, nous avons $B_{11} = 1$; et module la tension d'entrée du redresseur en jouant sur B_{12} .
- Pour $\pi \leq \omega.t \leq 2\pi$, nous avons $B_{12} = 0$; et nous pouvons moduler la tension d'entrée du redresseur en jouant sur B_{11} .

La figure II-5 montre la génération des impulsions de commande des interrupteurs du bras k en utilisant cette stratégie.

II. 1 - Redresseur monophasé à trois niveaux :

Les tensions de référence du réseau permettant de générer une tension monophasé sont définies par le système suivant :

$$V_{ref1} = (V_m/2) \cdot \sin(\omega.t) \quad (II-5)$$

$$V_{ref2} = (V_m/2) \cdot \sin(\omega.t - \pi)$$

Avec un réseau monophasé ($V_{res} = 210V$, $f = 50Hz$, $L_{res} = 0,001H$, $R_{res} = 0,25\Omega$ et des capacités $C_1 = C_2 = 20mF$ et avec une charge résistance à point milieu $R_1 = R_2 = 12,5\Omega$. Nous présentons la porteuse unipolaire et les deux tensions de références de la stratégie triangulo-sinusoidale pour $m = 12$ et $V_{pm} = 300V$. Nous remarquons que le nombre d'impulsions p de la tension d'entrée du redresseur par alternance vaut :

$$\begin{aligned} p &= (m/2) - 1 && \text{si } m \text{ est pair} \\ p &= (m - 1)/2 && \text{si } m \text{ est impair} \end{aligned} \quad (II-6)$$

et le nombre de commutation par période d'un interrupteur de redresseur à trois niveaux est $2.p$.

Pour m pair, nous avons une symétrie par rapport à $(\pi/2)$ et π , et donc seuls les harmoniques impairs existent. Pour m impair, nous n'avons pas de symétrie par rapport à $\pi/2$ et donc en plus des harmoniques impairs, il y aura toujours des harmoniques pairs.

Nous constatons que les harmoniques de tension se regroupent en familles centrées des fréquences multiples de celle de la porteuse $f_p = m.f$, donc l'augmentation de l'indice m permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevés et donc facilement filtrés.

La figure II-6-b montre le courant du réseau ires où on remarque les $2.p$ commutations par période d'un bras du redresseur.

La figures II-7-* montrent que les tensions U_{c1} et U_{c2} oscillent avec une fréquence deux fois celle du réseau, mais pour une capacité de valeur ≥ 0 mF supérieure à 2 mF la fluctuation devient moins importante.

La différence $U_{c1} - U_{c2}$ est nulle comme pour la commande par hystérésis en monophasé.

Les figures II-8-* représentent la conduite de la même machine à courant continu avec ($V_{res} = 60V$, $f = 50Hz$, $L_{res} = 0,003H$, $R_{res} = 0,25\Omega$ avec un couple résistant de la machine $C_r = 0,04N.m$ et $U = U_n = 110V$), on voit clairement que les tensions U_{c1} et U_{c2} après un régime transitoire tendent à se stabiliser vers une valeur oscillante à une fréquence deux fois celle du réseau comme au (I-1), ainsi pour le régime transitoire au départ les tensions U_{c1} et U_{c2} sont grandes (55 V) donc V_{ab} aussi, alors I_{res} sera faible, il est de même pour la puissance de la machine qui tend à augmenter au départ. La tension doit diminuer pour satisfaire l'égalité des puissances; cependant il y aura un échange d'énergie réactive entre la source et les condensateurs.

II. 2 - Redresseur triphasé à trois niveaux :

Les tensions de références du réseau triphasé alimentant le redresseur triphasé à trois niveaux, sont :

$$\begin{aligned} V_{ref1} &= V_m \cdot \sin(\omega.t) \\ V_{ref2} &= V_m \cdot \sin(\omega.t - 2\pi/3) \\ V_{ref3} &= V_m \cdot \sin(\omega.t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (II-7)$$

La figure II-9-a montre la porteuse unipolaire et les tensions de référence pour $m = 12$, $V_{pm} = 300V$ où nous pouvons remarquer aussi que le nombre de commutations d'un interrupteur par période vaut aussi $2.p$ comme le cas du monophasé.

La figure II-9-b représente le courant d'une phase du réseau is_1 où on remarque les $2.p$ commutations par période. Les figures II-10-* montrent la tension simple de l'entrée d'un bras du redresseur pour différentes valeurs de $m = 9, 12$ et 36 , nous remarquons toujours la présence des harmoniques pairs pour des valeurs impaires de m ; et pour $m = 12$ les harmoniques 3 et 7 sont faibles et que les harmoniques multiples de trois sont nuls.

Comme pour le monophasé nous avons remarqué aussi que les harmoniques de la tension se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de celle de la porteuse $f_p = m.f$, donc en augmentant m nous facilitons le filtrage des harmoniques de courant.

Les figures II-11-* montrent les tensions de sorties des redresseurs pour les deux cas où $C_1 = C_2 = 20mF$ et $C_1 = C_2 = 2 mF$. Nous remarquons que plus la valeur C_1 de la capacité augmente plus la tension de sortie devient plus lissée, donc nous avons une nette amélioration sur U_{c1} (ou U_{c2}) car, plus C croît plus le temps de décharge des capacités augmente et l'amplitude des ondulations sera plus faible.

Les figures II-12-* montrent la conduite de la même machine alimentée par un redresseur triphasé à trois niveaux avec un couple résistant ($C_r = 4N.m$, $U = U_n = 110V$), rappelant que le réseau triphasé a une tension efficace $V_{res} = 50V$ et les capacités des valeurs $C_1 = C_2 = 20mF$.

Nous remarquons que U_{c1} et U_{c2} suivent les mêmes évolutions que pour le premier cas, seulement les ondulations sont un peu moins faibles à cause de l'inexistence de la puissance fluctuante en triphasé. Il est important de signaler qu'il est très difficile de maintenir les tensions U_{c1} et U_{c2} stables au départ pour la simple raison que n'importe quel système physique cherche son équilibre et dans notre cas il tend à égaliser pour chaque moment les puissances fournies par la source et dissipées par la charge.

III - Commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses à échantillonnage naturel :

Pour les redresseurs à trois niveaux, nous pouvons utiliser deux porteuses identiques, déphasées d'une demi-période de hachage ($T_p/2$) l'une de l'autre afin d'améliorer le taux d'harmoniques des tensions de sortie. Différentes porteuses sont possibles : Porteuse triangulaire unipolaire ; Porteuse en dent de scie unipolaire ou bipolaire.

La porteuse en dent de scie bipolaire permet d'avoir un taux d'harmoniques le plus faible mais avec des harmoniques pairs et impairs. Les porteuses triangulaires permettent des tensions de sorties ayant la symétrie par rapport au quart et à la demi période. Dans cette partie, nous présenterons le cas de deux porteuses en dents de scie bipolaires.

La figure II-12 représente le principe de cette stratégie pour un bras k du redresseur à trois niveaux, qui peut être résumé en deux étapes :

Etape 1 : détermination des signaux intermédiaires V_{k1} , V_{k0} :

$$\begin{aligned} (V_{refk} \geq U_{p1}) &\Rightarrow V_{k1} = U_{c1} & (V_{refk} \geq U_{p2}) &\Rightarrow V_{k0} = 0 \\ (V_{refk} < U_{p1}) &\Rightarrow V_{k1} = 0 & (V_{refk} < U_{p2}) &\Rightarrow V_{k0} = -U_{c2} \end{aligned} \quad (II-8)$$

Etape 2 : détermination du signal V_{k2} et des ordres de commande B_{kx} des interrupteurs :

$$\begin{aligned} V_{k2} = U_{c1} &\Rightarrow B_{k1} = 1 ; B_{k2} = 1 & V_{k2} = V_{k1} + V_{k0} \\ V_{k2} = -U_{c2} &\Rightarrow B_{k1} = 0 ; B_{k2} = 0 & \text{avec } B_{k3} = \underline{B_{k2}} \\ V_{k2} = 0 &\Rightarrow B_{k1} = 1 ; B_{k2} = 0 & B_{k4} = \underline{B_{k1}} \end{aligned} \quad (II-9)$$

Comme la stratégie triangulo-sinusoïdale à une porteuse, cette stratégie est caractérisé aussi par l'indice de modulation m et le taux de modulation r , l'Annexe III donne le développement mathématique d'une autre stratégie utilisant deux porteuses unipolaires en dents de scie.

II.1-Redresseur monophasé à trois niveaux :

Les tensions de référence du redresseur monophasé à trois niveaux, permettant de générer une tension monophasée, sont données par le système (II-5).

La figure II-13-a montre les deux porteuses bipolaires en dents de scie pour $V_{eff} = 250V$; $r = 0.8$; les figures de la tension d'entrée du redresseur pour différentes valeurs de l'indice de modulation m . Nous remarquons que :

- Le nombre d'impulsion p de cette tension par alternance vaut : $m - 1$.
- Le nombre de commutations par période d'un interrupteur du redresseur à trois niveaux est $2.p$.
- Pour toutes les valeurs de l'indice de modulation m , on n'a aucune symétrie et donc en plus des harmoniques impairs, des harmoniques pairs existent.

On constate que les harmoniques de tension se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de la fréquence f_p' telle que $f_p' = 2.m.f = 2.f_p$ et non f_p comme pour la même stratégie à une seule porteuse ; la première famille est centrée autour de la fréquences $2.m.f$ est la plus importante du point de vue amplitude. L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevées et donc facilement filtrées.

Nous pouvons considérer cette stratégie à deux porteuses analogue à la stratégie à une seule porteuse mais de fréquence $f_p' = 2.f_p$.

La figure II-13-b montre l'allure du courant i_{res} où nous remarquons les 2.p commutations par période d'un bras du redresseur.

La figure II-13-c et II-13-d montrent que les deux tensions U_{c1} et U_{c2} oscillent avec une fréquence $2.f$ à cause de la faible valeur des deux capacités C_1 et C_2 qui est $C_1 = C_2 = 20mF$.

Remarque :

Ces graphes sont présentés pour les cas d'une charge résistive en pont avec :

$$R_1 = R_2 = 12,5\Omega.$$

Dans le cas d'une machine à courant continu avec une valeur efficace de V_{res} égale à 60V et $m = 6$, $r = 0.8$. Les figures II-15-* montrent le comportement de la machine (sa vitesse et son alimentation) vis à vis de notre stratégie, dans ces figures, nous observons que la tension oscille à une fréquence deux fois celle du réseau après un passage par un régime transitoire pour les mêmes raisons citées auparavant. Ainsi, pour la vitesse qui après un moment tend vers une valeur constante.

II 2-Redresseur triphasé à trois niveaux :

Un système de référence de tensions est toujours défini par les équations (II-7). Les figures II-16-* montrent les courants et les tensions d'entrée du redresseur alimentant une charge résistive en pont (la même charge), le nombre de commutation par période d'un interrupteur du redresseur triphasé vaut, comme pour le redresseur monophasé à trois niveaux 2.p.

On remarque toujours la présence des harmoniques pairs pour trois cas $m = 3 ; 9 ; 12$, et comme pour toutes les stratégies appliquées sur les redresseurs à trois niveaux triphasés, les harmoniques multiples sont nuls.

Les tensions U_{c1} et U_{c2} sont presque constantes et la différence entre ces deux tensions est pratiquement négligeables. Pour le cas du moteur à courant continu avec $U=U_n=110V$ et $C_r=4 N.m$; et avec un réseau de tension simple 50V ; $L_{res} = 0,25\Omega$; Les figures II-17-* montrent la conduite de cette machine qui est alimentée par un redresseur triphasé à trois niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à deux porteuses avec $m = 6$; $V_{mp}=55V$.

les tensions U_{c1} et U_{c2} suivent les mêmes évolutions que dans les autres cas ; ainsi la machine réagit de la même façon du point de vue vitesse, la différence $U_{c1} - U_{c2}$ est négligeable ($|U_{c1} - U_{c2}| < 5 V$)

VI - Modulation vectorielle type deux :

VI 1-Principe.

Cette nouvelle modulation vectorielle peut utiliser aussi bien une ou deux porteuses. Nous nous contenterons de présenter l'algorithme utilisant deux porteuses en dent de scie (comme a été déjà fait avec la stratégie III). Cette stratégie utilise la propriété que le redresseur à trois niveaux est une association en série de deux redresseurs à deux niveaux.

On définit à partir du vecteur de référence $V_{ref} = (V_{ref1}, V_{ref2}, V_{ref3})^t$ pour le triphasé, deux nouveaux vecteurs de référence V_{sref1} et V_{sref0} . Le vecteur de référence V_{sref1} (resp V_{sref0}) est associé au redresseur à deux niveaux constitué des demi-bras du haut (resp du bas) du redresseur multiniveaux. Les composantes du vecteur de référence V_{sref} sont définies par le système d'équations (II-7). Ces vecteurs de références sont définis comme suit :

$$V_{sref1}[i] = V_{sref}[i] - V_0 \quad (II-10)$$

$$V_{sref0}[i] = V_{sref}[i] + V_0$$

Avec $i = 1 ; 2 ; 3$. La tension V_0 est donnée par l'expression II.

$$V_0 = - \{ \max (v_{sref}) + \min (v_{sref}) \} / 2 \quad (II-11)$$

l'algorithme de la génération des ordres de commande des interrupteurs avec cette stratégie se résume aux deux étapes suivantes :

Etape 1 : détermination des tensions intermédiaires $V_{1m}(i)$ et $V_{0m}(i)$ (images des tensions d'entrée des deux redresseurs à trois niveaux équivalentes à celles du redresseur multiniveaux.) :

$$\begin{aligned} V_{sref1}[i] \geq U_{p1} & \Rightarrow V_{1m}[i] = U_{C1}. \\ V_{sref1}[i] < U_{p1} & \Rightarrow V_{1m}[i] = 0 \\ \text{et} & \\ V_{sref0}[i] \geq U_{p2} & \Rightarrow V_{0m}[i] = 0. \\ V_{sref0}[i] < U_{p2} & \Rightarrow V_{0m}[i] = -U_{C2}. \end{aligned} \quad (II-13)$$

Etape 2 : détermination de la variable intermédiaire $V_{2m}[i]$; image de la tension d'entrée du redresseur à trois niveaux, et des ordres de commande. :

$$\begin{aligned} V_{2m}[i] &= V_{1m}[i] + V_{0m}[i]. \\ V_{2m}[i] = 0 & \Rightarrow B_{i1} = 1 ; B_{i2} = 0 \\ V_{2m}[i] = U_{c1} & \Rightarrow B_{i1} = 1 ; B_{i2} = 1 \\ V_{2m}[i] = -U_{c2} & \Rightarrow B_{i1} = 0 ; B_{i2} = 0 \end{aligned} \quad (II-14)$$

avec $i = 1 ; 2 ; 3$. Pour le triphasé. U_{p1} ; U_{p2} sont deux porteuses en dents de scie. La tension V_0 est de fréquence $3.f$ pour le redresseur triphasé.

Remarque.

Pour le monophasé cette caractéristique est identique à celle triangulo-sinusoïdale à deux porteuses car $V_0 = 0$.

IV 2-Redresseur triphasé à trois niveaux :

Les figures II-18-* présentent le courant d'une phase du réseau et les tensions et de sortie du redresseur triphasé à trois niveaux commandé par la modulation vectorielle type 2 † ($m = 12$, $V_{pm} = 300V$) ; aussi les tensions de référence et les deux porteuses déphasées de $Tp/2$; avec une charge résistive à point milieu.

Nous remarquons que la tension admet des harmoniques paires et impairs. Les harmoniques 2, 4, 5 et 7 sont des amplitudes comparables. Les tensions d'entrée du redresseur triphasé ont le même nombre d'impulsions que dans le cas d'une triangulo-sinusoïdale à deux porteuse. Certaines propriétés sont communes de ces deux stratégies, nous pouvons dire que les harmoniques se regroupent en famille autour des fréquences multiples de $2.m.f$.

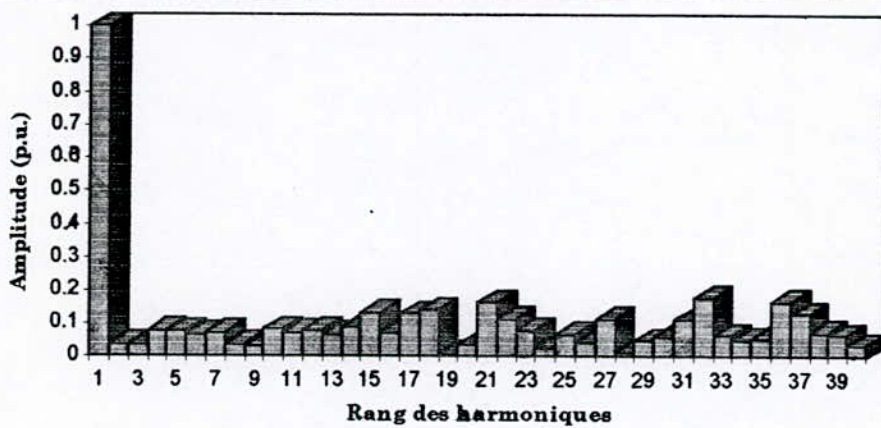
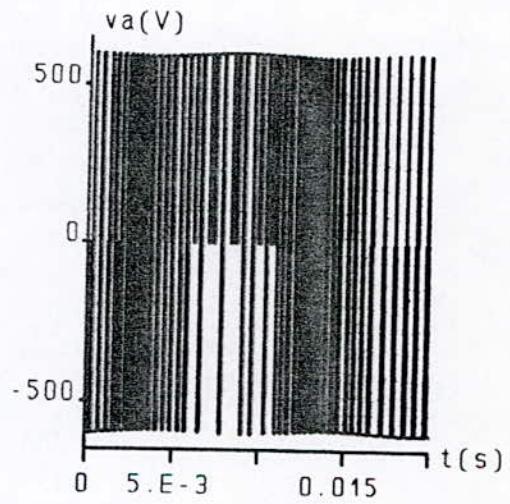
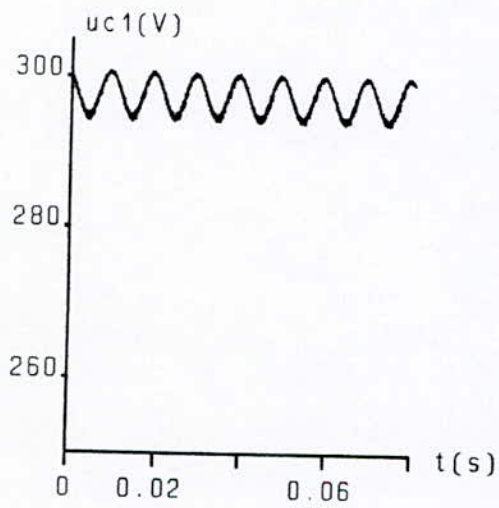
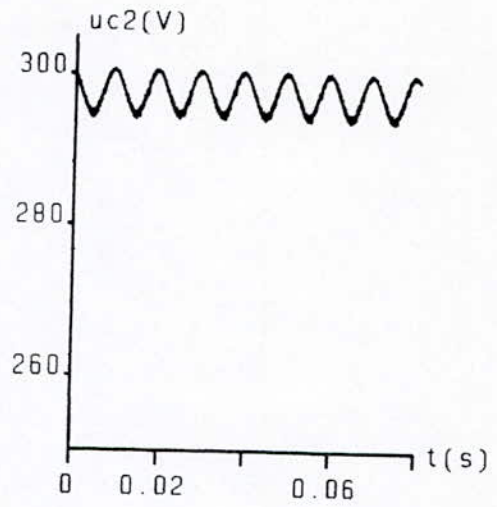
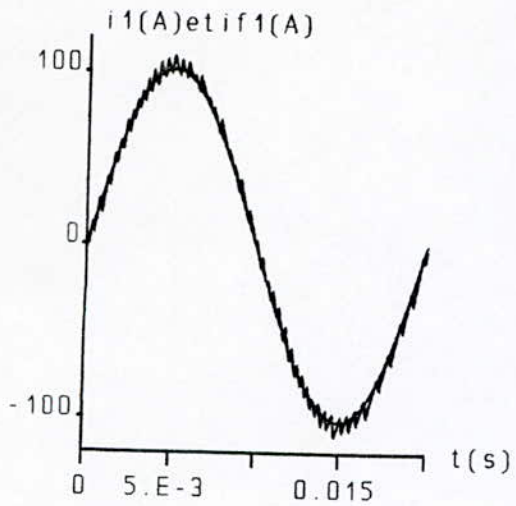
Les tensions U_{c1} et U_{c2} varient avec des ondulations plus au moins petites à cause de la non symétrie de la stratégie (utilisation de la porteuse en dents de scie). La figure II-8-a montre la position des tensions de référence vis à vis des deux porteuses. Dans le cas d'une machine à courant continu (la même machine avec $C_r = 2N.m$) alimenté par le système (réseau, redresseur) avec $V_{eff} = 50V$; nous pouvons voir dans les figures II-15-* que les tensions U_{c1} , U_{c2} et la vitesse du moteur varient de la même façon que dans les autres cas (triphase) pour les mêmes causes.

CONCLUSION :

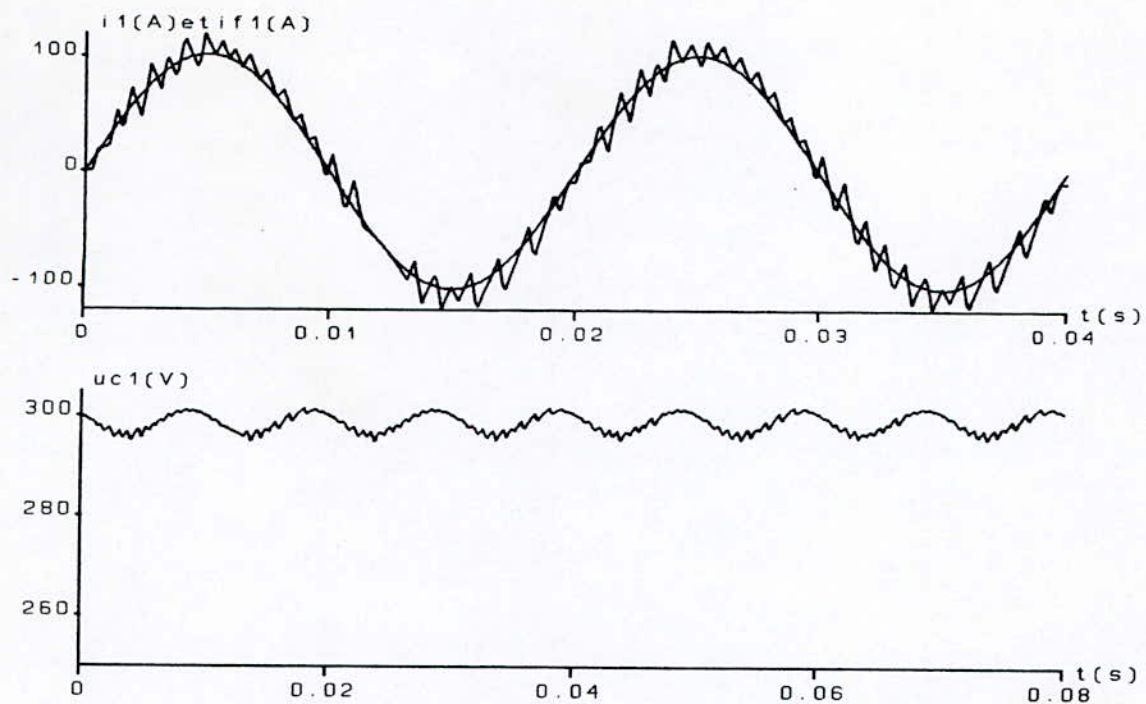
Dans ce chapitre, nous avons étudié différentes stratégies de commande des redresseurs à trois niveaux qui sont adaptées à une utilisation dans des asservissements. La stratégie triangulo-sinusoïdale à une et à deux porteuses et la modulation vectorielle type 2, peuvent être réalisées en analogique (continu) ou en numérique (avec échantillonnage régulier des tensions de référence) ou hybrides.

Nous pouvons déduire que ces trois stratégies ont pour but de générer une source de tension d'entrée du redresseur la plus sinusoïdale possible sans se préoccuper de l'allure du courant ou des tensions de sortie, tandis que la commande par hystérésis en courant donne des résultats plus au moins meilleurs surtout qu'elle assure un courant en phase avec la tension du réseau.

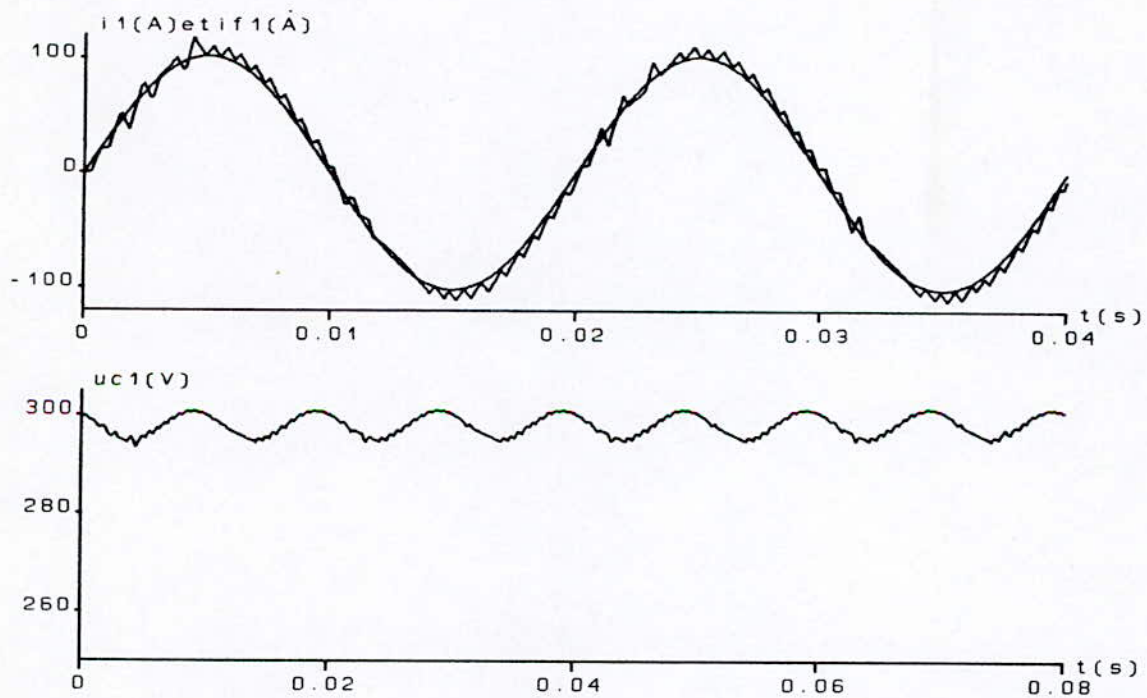
Nous pouvons conclure qu'il y a toujours de petites fluctuations au point m (en triphasé, triangulo-sinusoïdale à deux porteuses, modulation vectorielle type 2), dans le prochain chapitre , nous montrerons que l'asservissement règle ce problème.



Analyse harmonique de la tension V du redresseur monophasé à trois niveaux commandés par hystérésis en courant $D_i = 0.5$ A



(F)



(G)

Fig-II-2-* Comportement du redresseur monophasé commandé par hystérésis en courant alimentant une charge résistive,
 F- Pour $D_i=2.5A$ et $L=0.007H$.
 G- Pour $D_i=2.5A$ et $L=0.01H$.

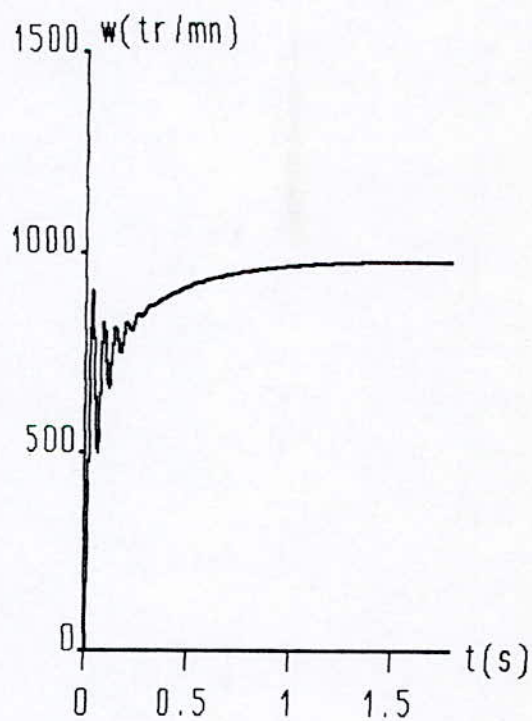
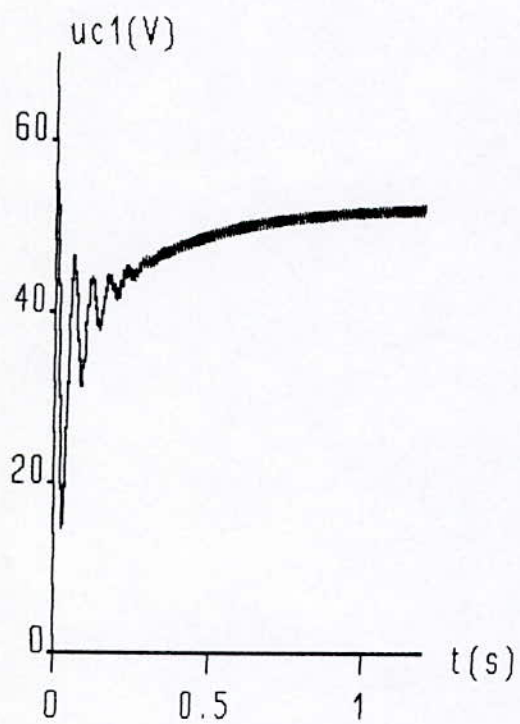
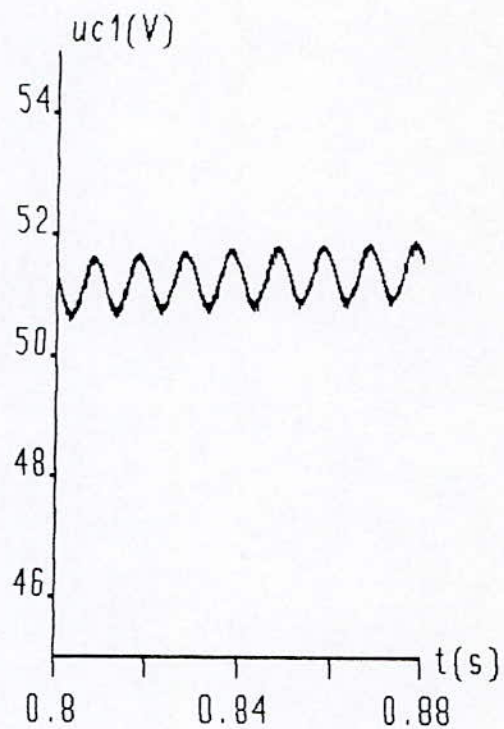
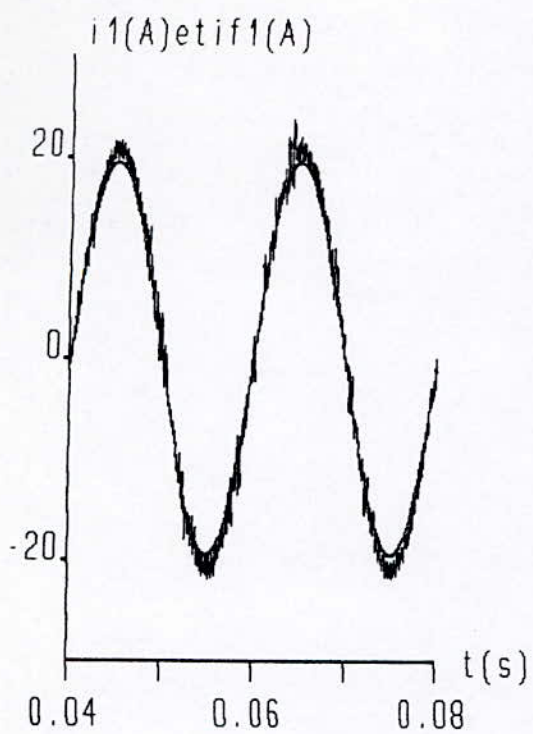
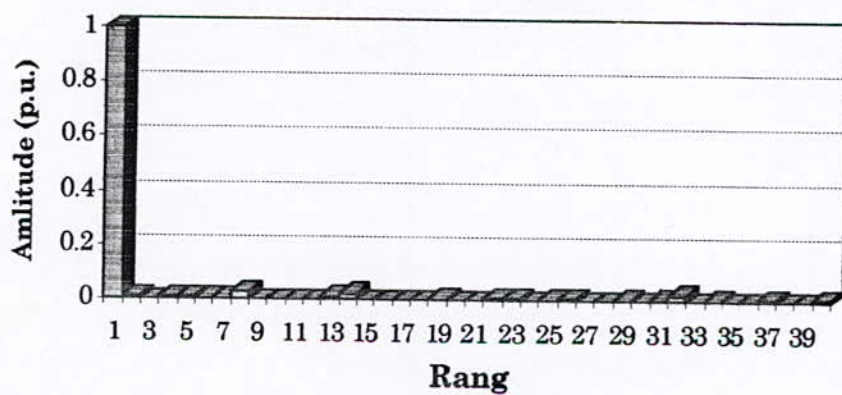
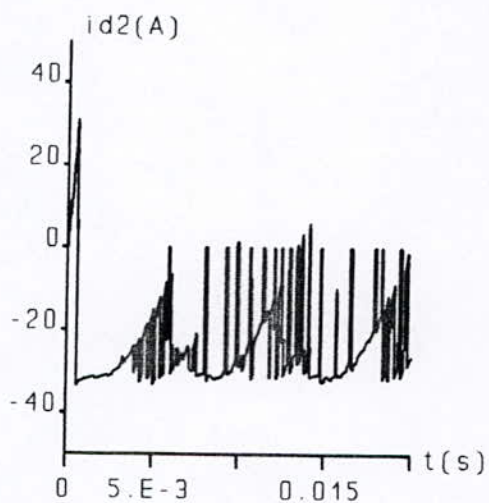
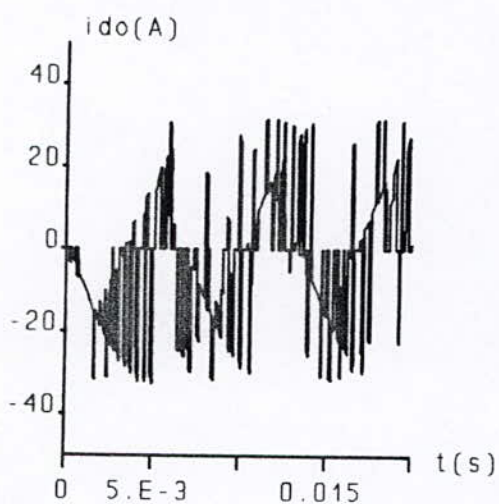
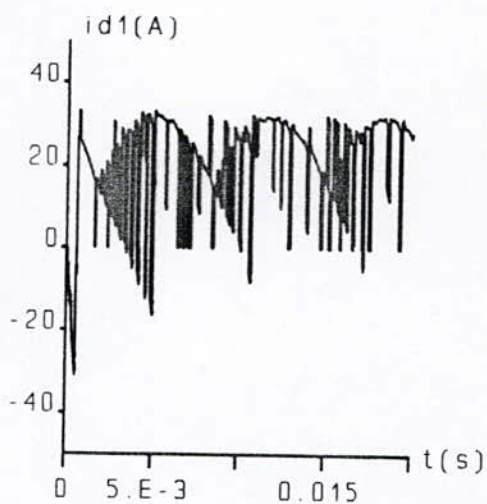
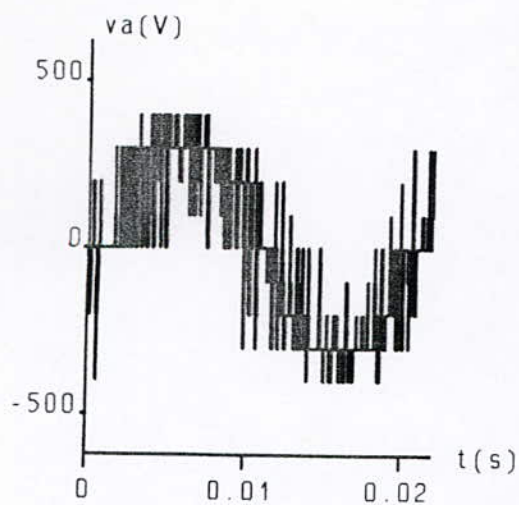


Fig-II-2-* Comportement du redresseur monophasé commandé par hystérésis alimentant un moteur à courant continu avec $D_i=0.5A$.



Analyse harmonique de la tension V du redresseur triphasé à trois niveaux commandés par hystérésis en courant $D_i = 0.5$ A

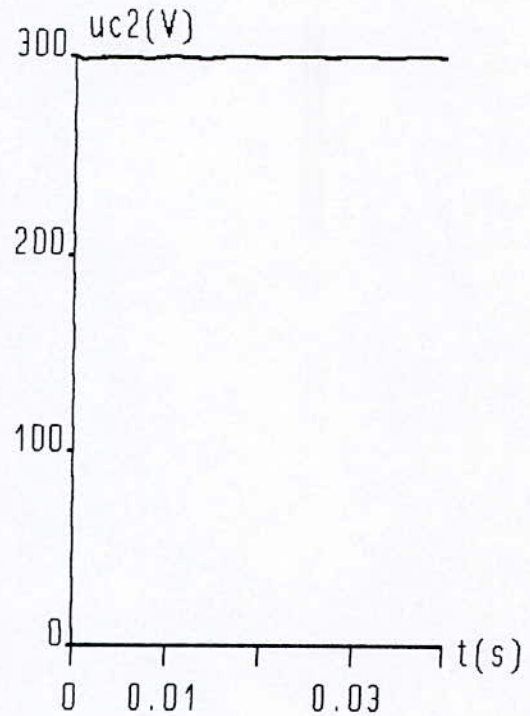
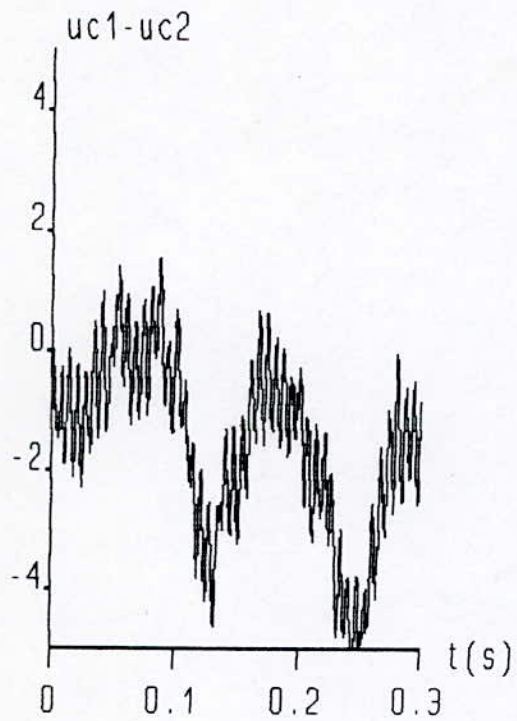
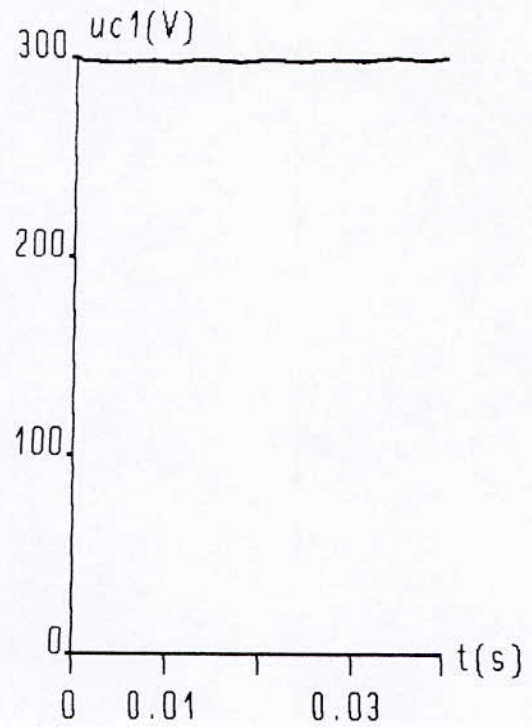
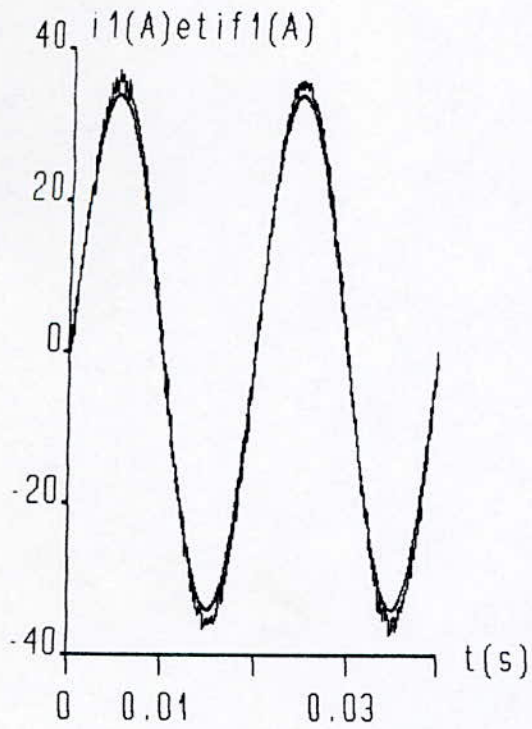


Fig-II-3-* Comportement du redresseur triphasé commandé par hystérésis alimentant une charge résistive ($D_i=0.5A$).

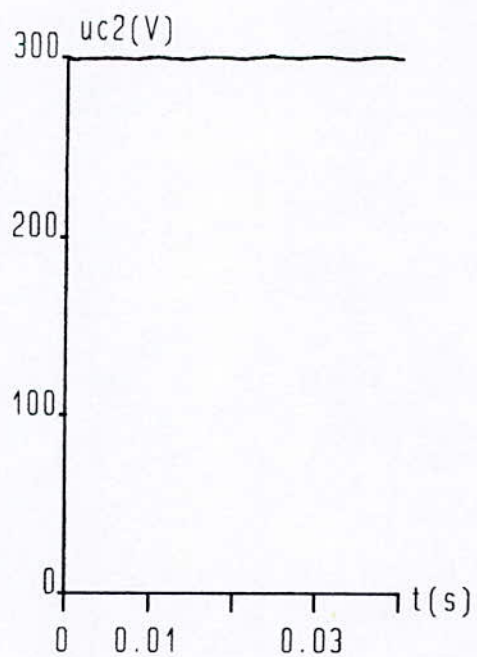
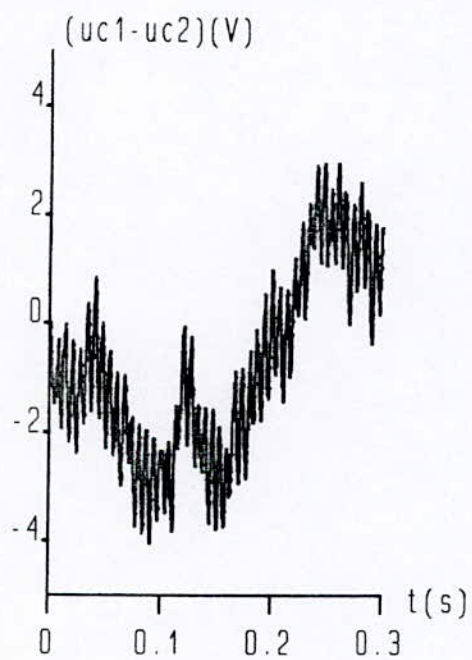
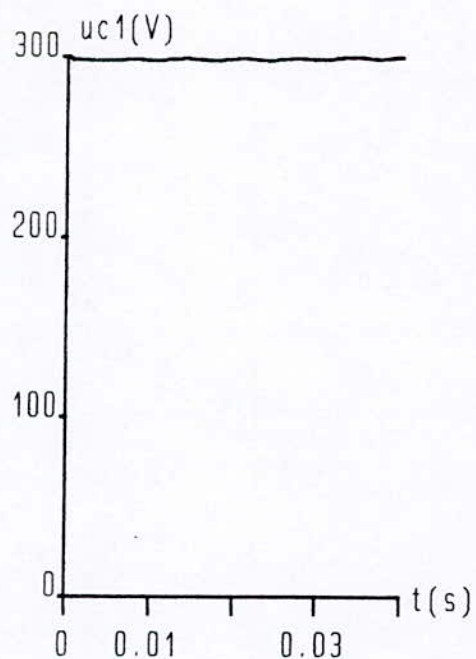
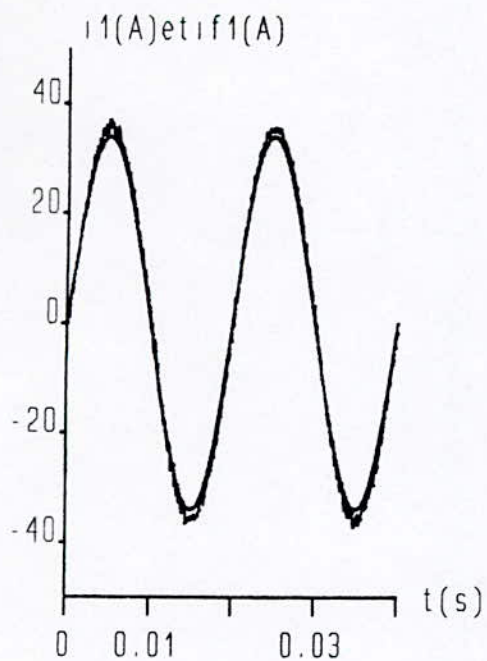


Fig-II-3-* Signaux de l'ensemble réseau-redresseur triphasé commandé par hystérésis alimentant une résistance pure.

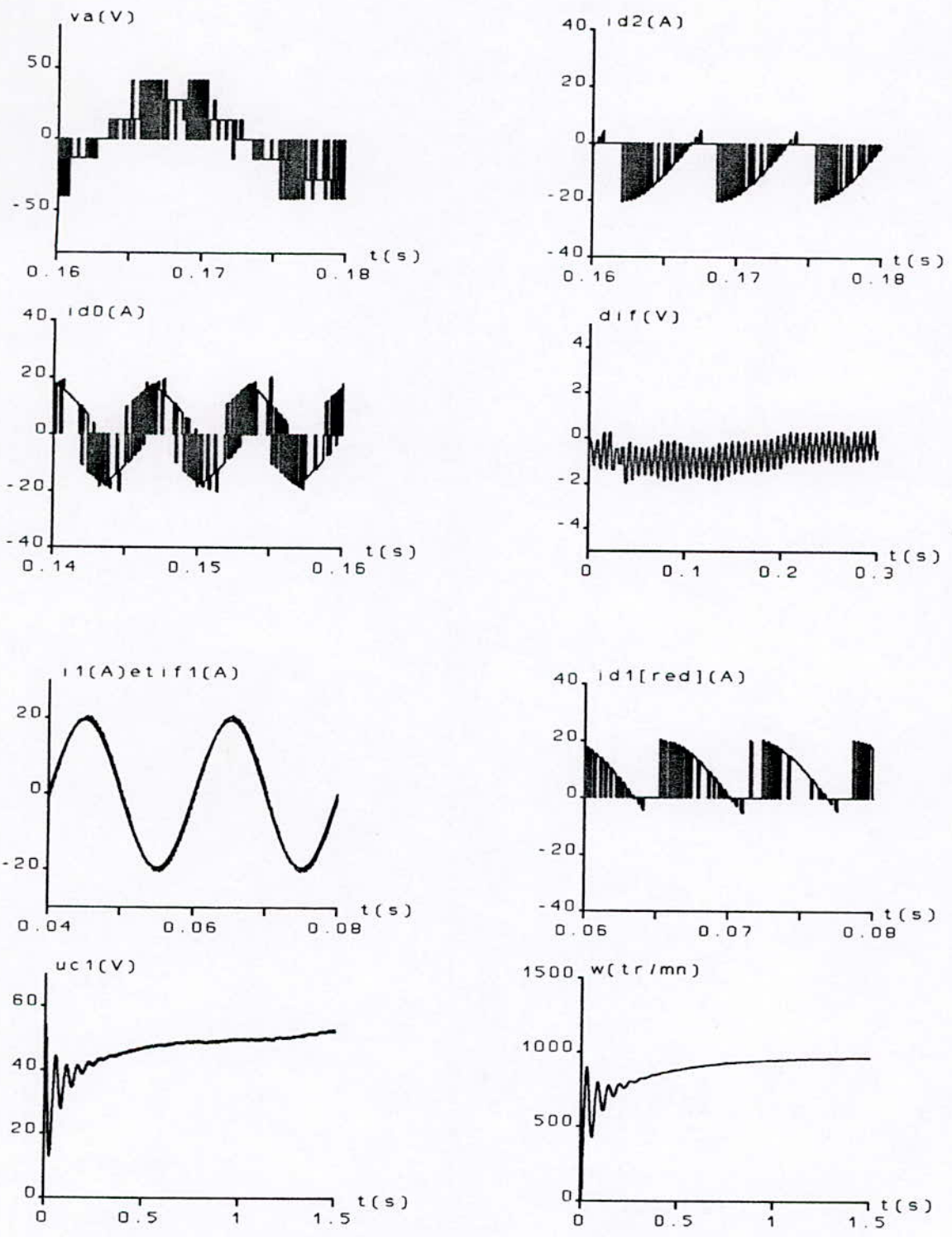


Fig-II-4-* Comportement du redresseur triphasé alimentant un moteur à courant continu avec $D_i=0.5A$.

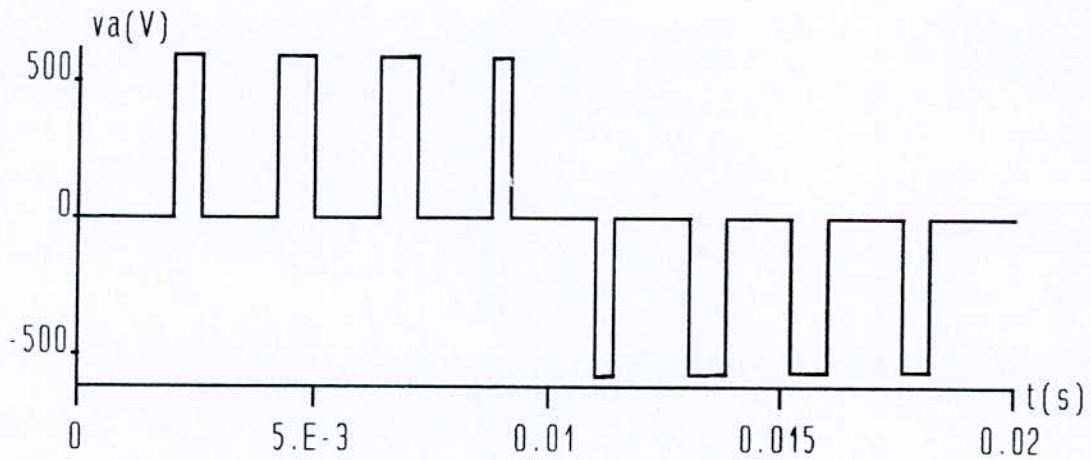
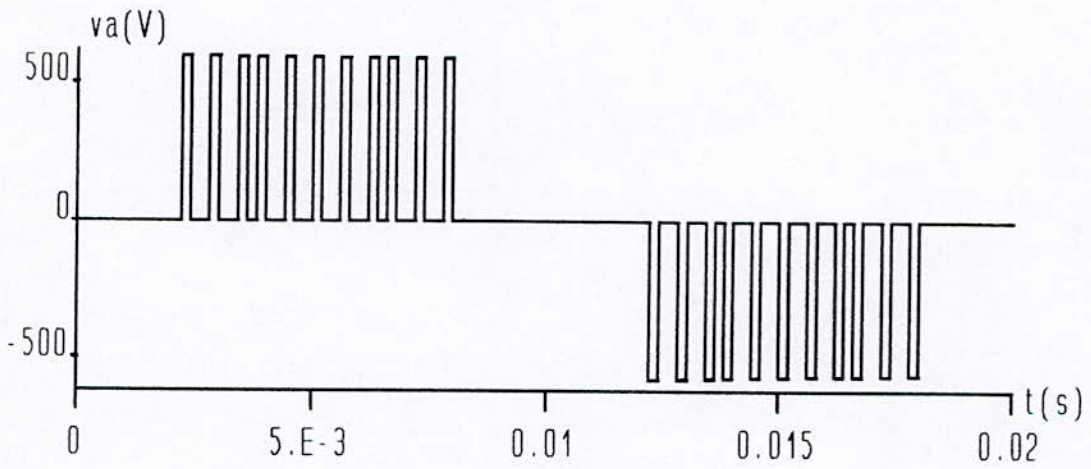
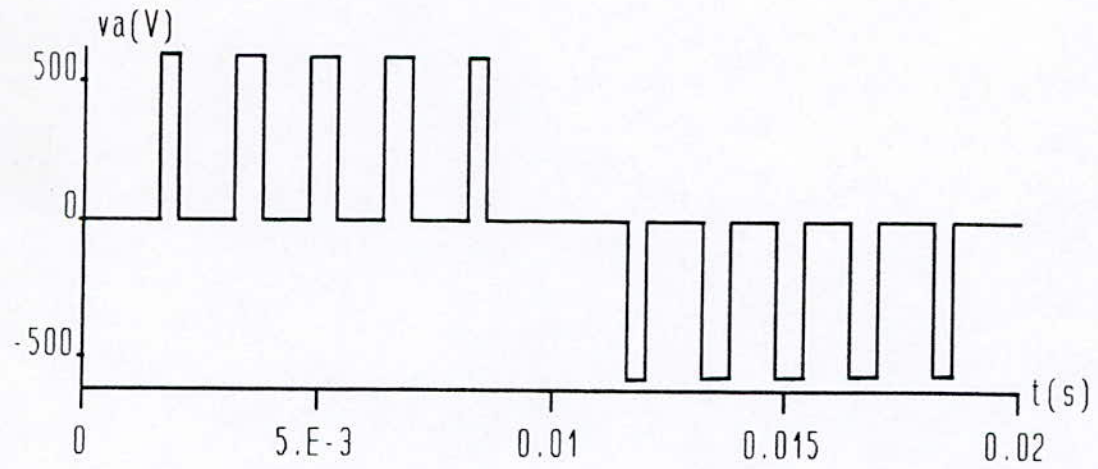
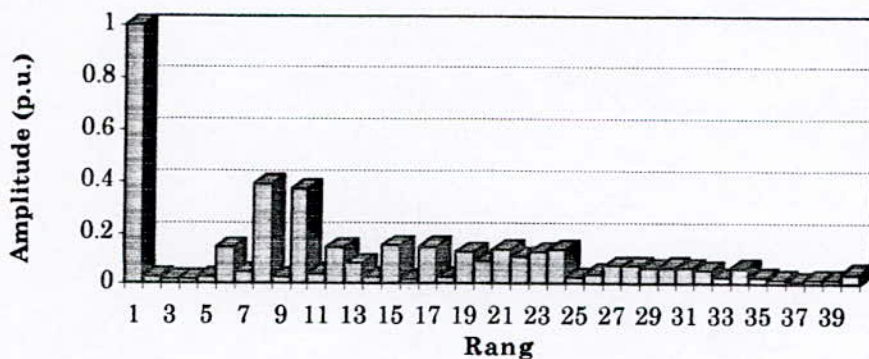
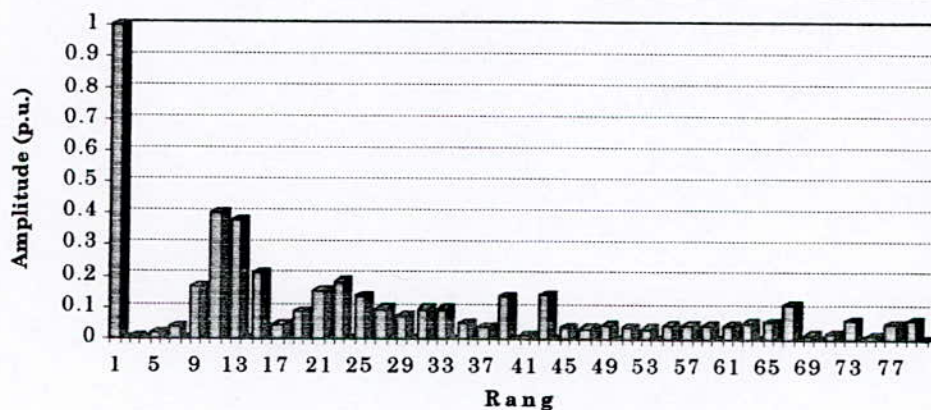


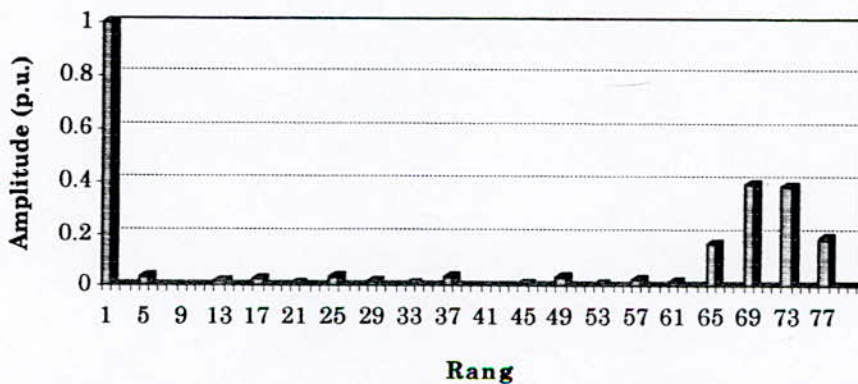
Fig-II.6.* Tensions d'entrées du redresseur monophasé commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale (1) pour $m=12,36$ et 9.



Analyse harmonique de la tension V du redresseur monophasé commandé par la stratégie triangulo- sinusoïdale à une seule porteuse avec $m=9$, $r= 0.8$



Analyse harmonique de la tension V du redresseur monophasé commandé par la stratégie triangulo- sinusoïdale à une seule porteuse avec $m=12$, $r= 0.8$



Analyse harmonique de la tension V du redresseur monophasé commandé par la stratégie triangulo- sinusoïdale à une seule porteuse avec $m=36$, $r= 0.8$

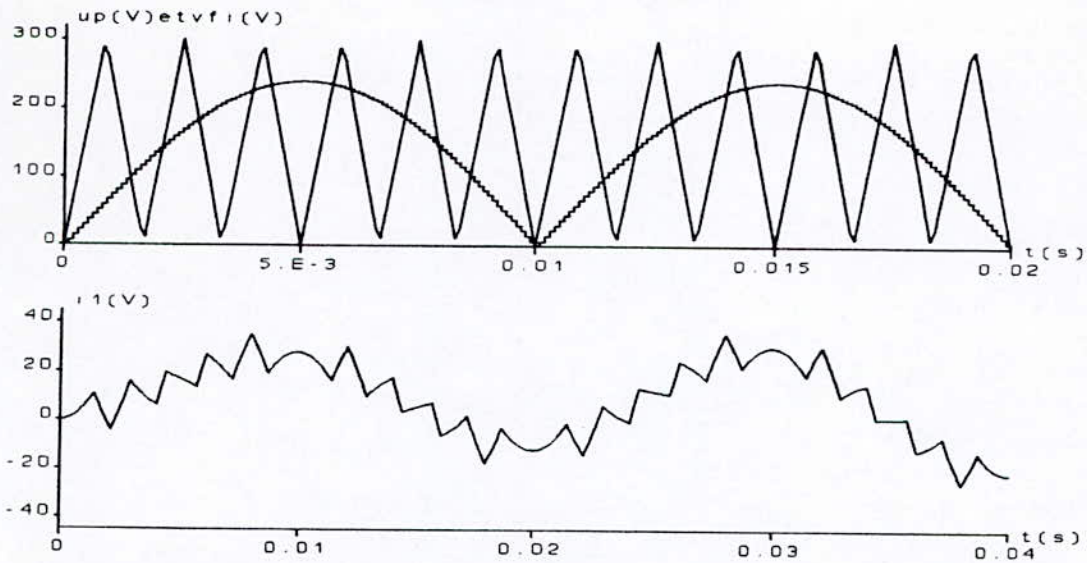


Fig-II-6-* Stratégie triangulo-sinusoïdale (1) appliquée à un redresseur monophasé.

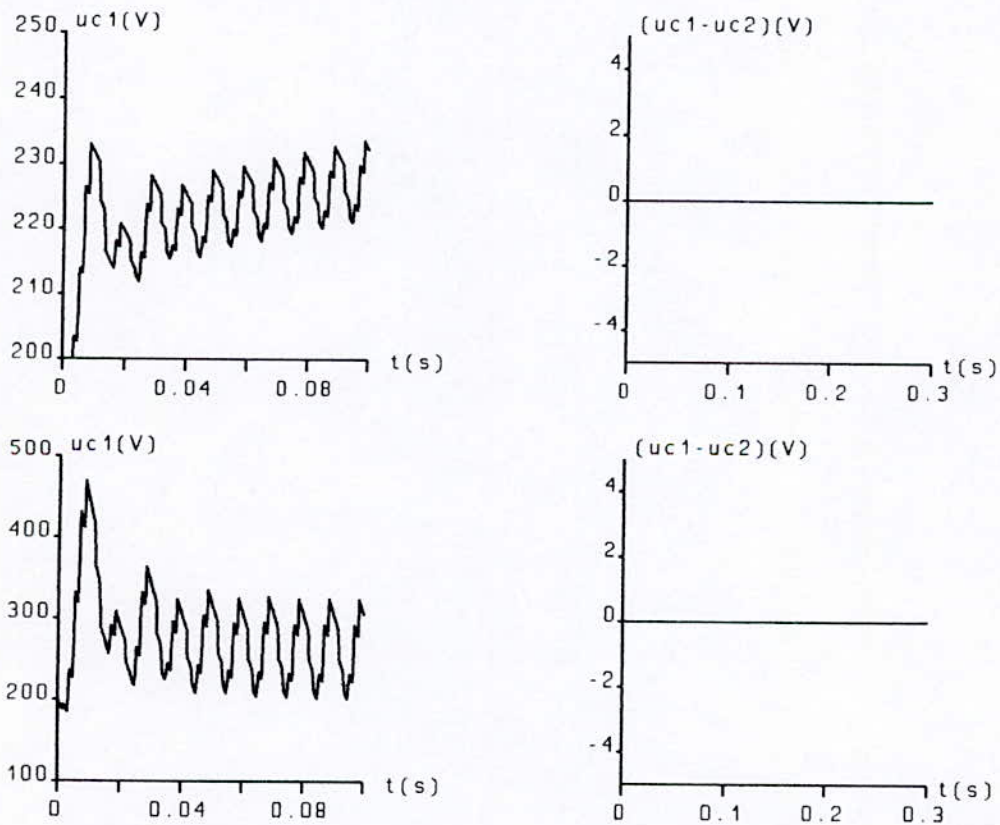


Fig-II-7-* Tension de sortie du redresseur monophasé commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale (1) pour:
 C1 & C2 égales à 20mF,
 C1 & C2 égales à 2mF.

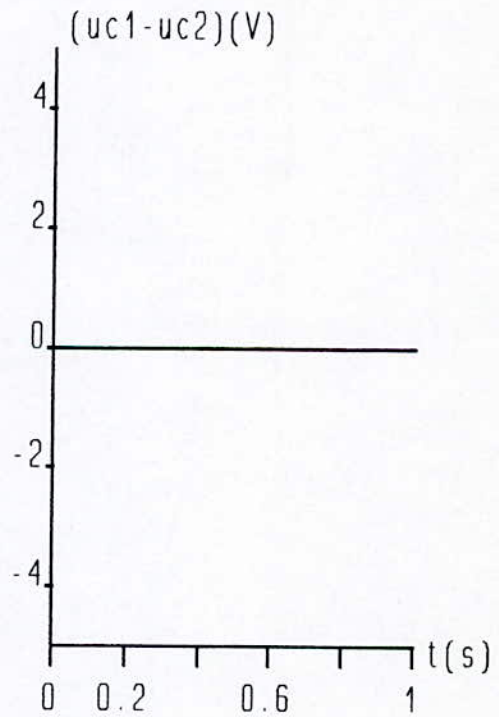
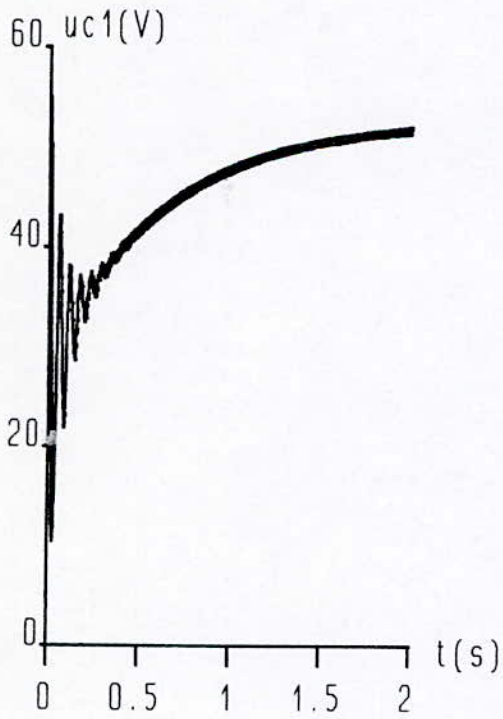
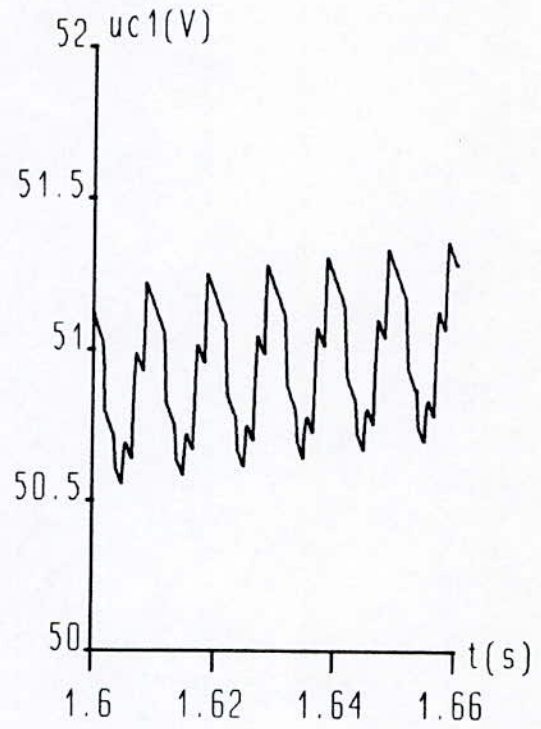
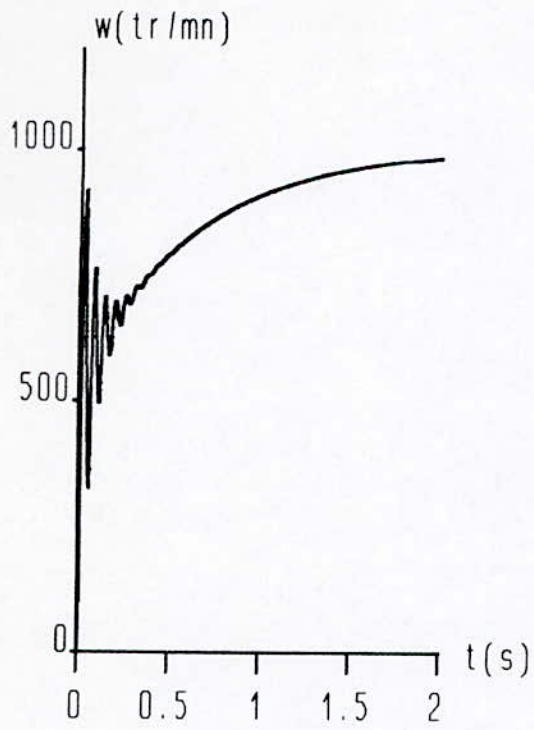


Fig-II-8-* Signaux de l'ensemble redresseur monophasé-MCC avec la technique triangulo-sinusoidale(1).

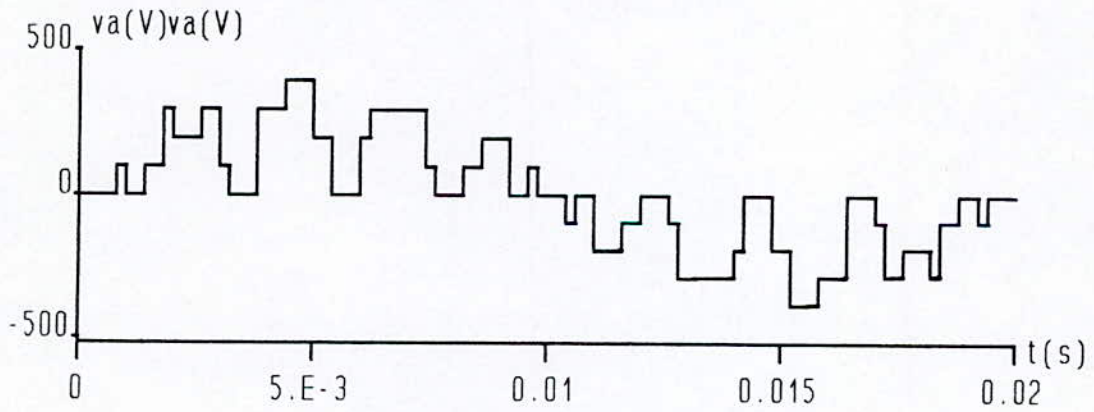
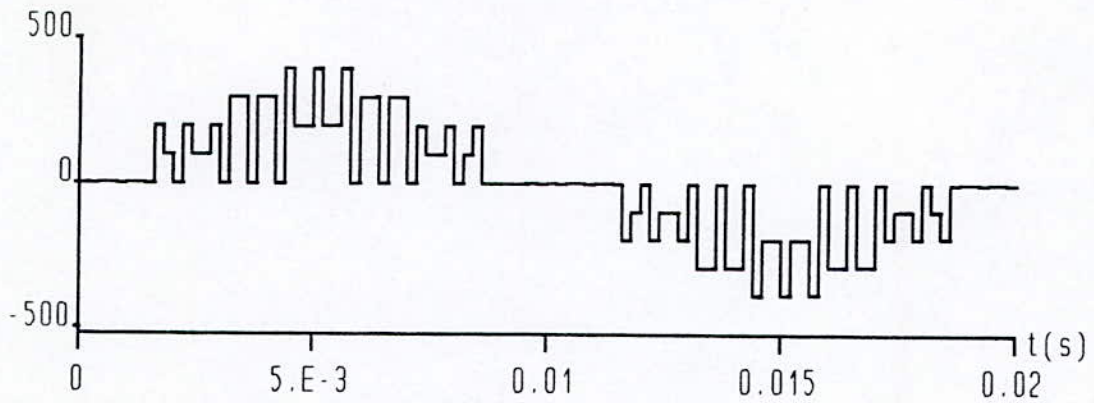
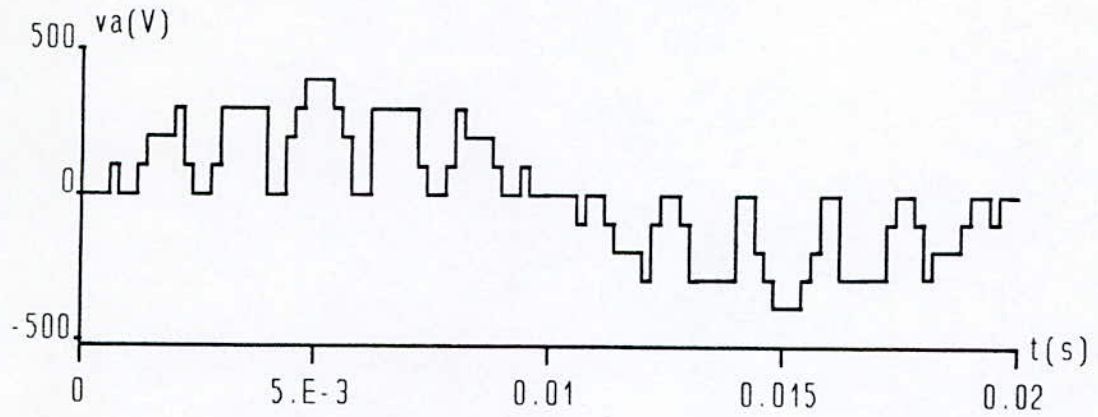
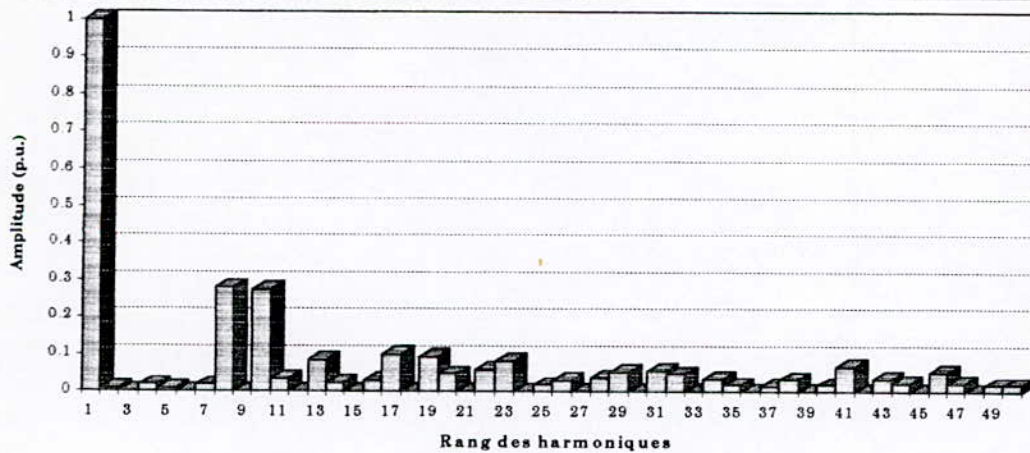
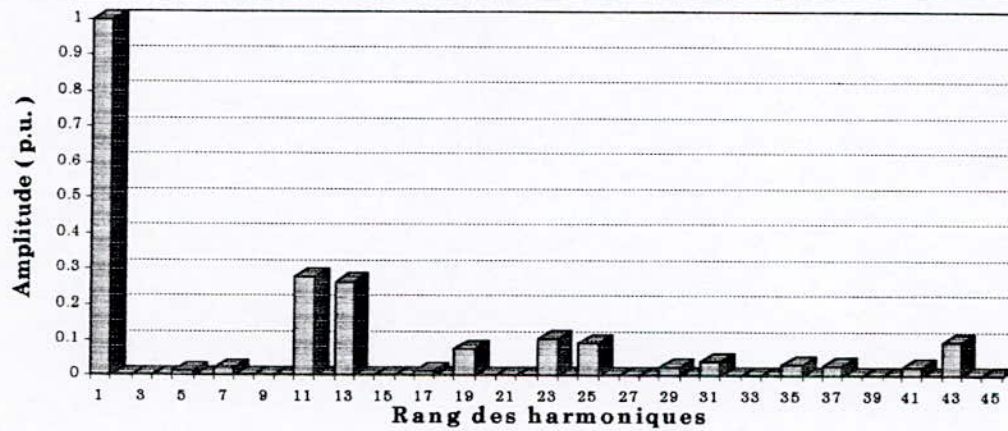


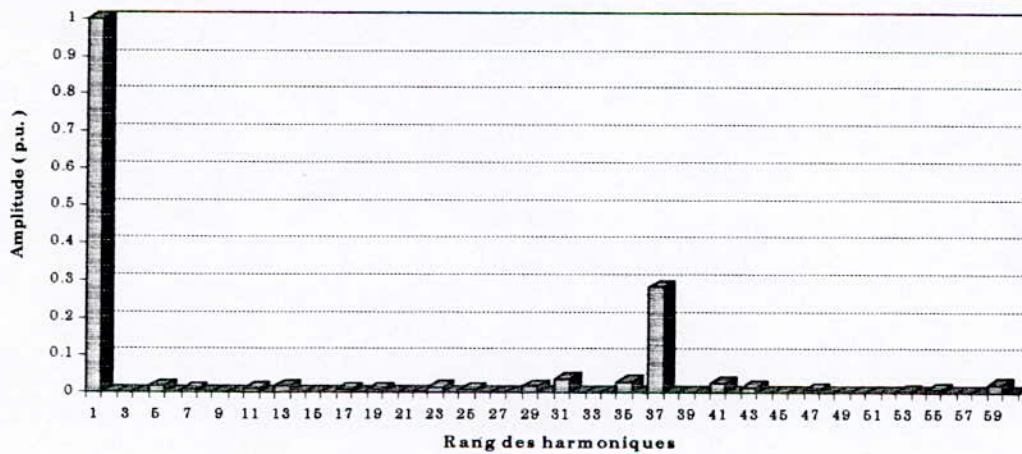
Fig-II.10.* Tensions d'entrées du redresseur triphasé commandé par la technique triangulo-sinusoïdale $m=12, 36$ et 9 .



Analyse harmonique de la tension V du redresseur triphasé commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à une porteuse avec ($m = 9$ et $r = 0.8$)



Analyse harmonique de la tension V du redresseur triphasé commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à une porteuse avec ($m = 12$ et $r = 0.8$)



Analyse harmonique de la tension V du redresseur triphasé commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à une porteuse avec ($m = 36$ et $r = 0.8$)

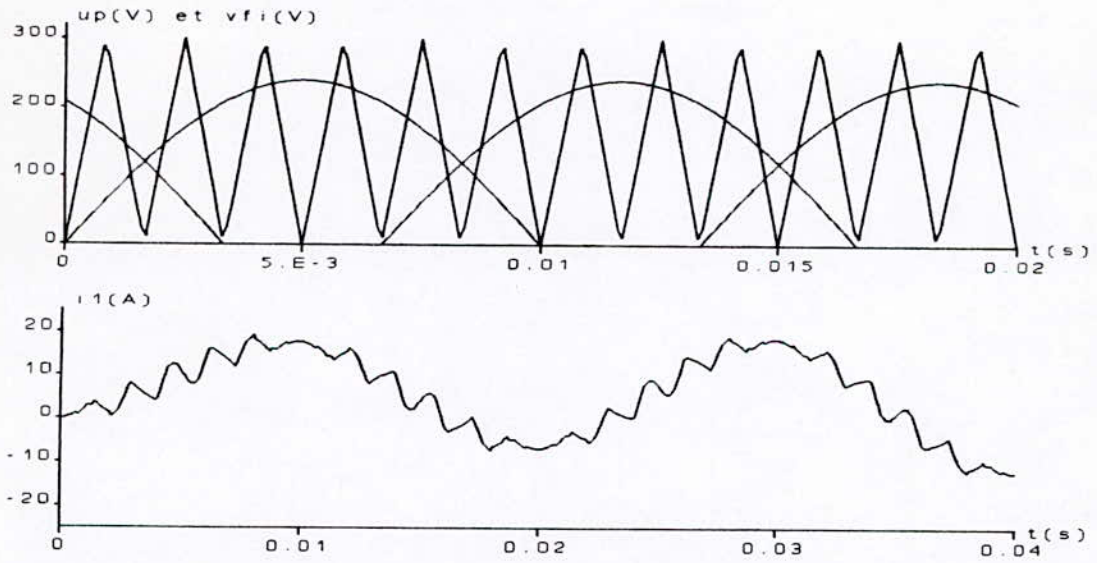


Fig-II-10-* Stratégie de commande triangulo-sinusoïdale (1) appliquée à un redresseur triphasé.

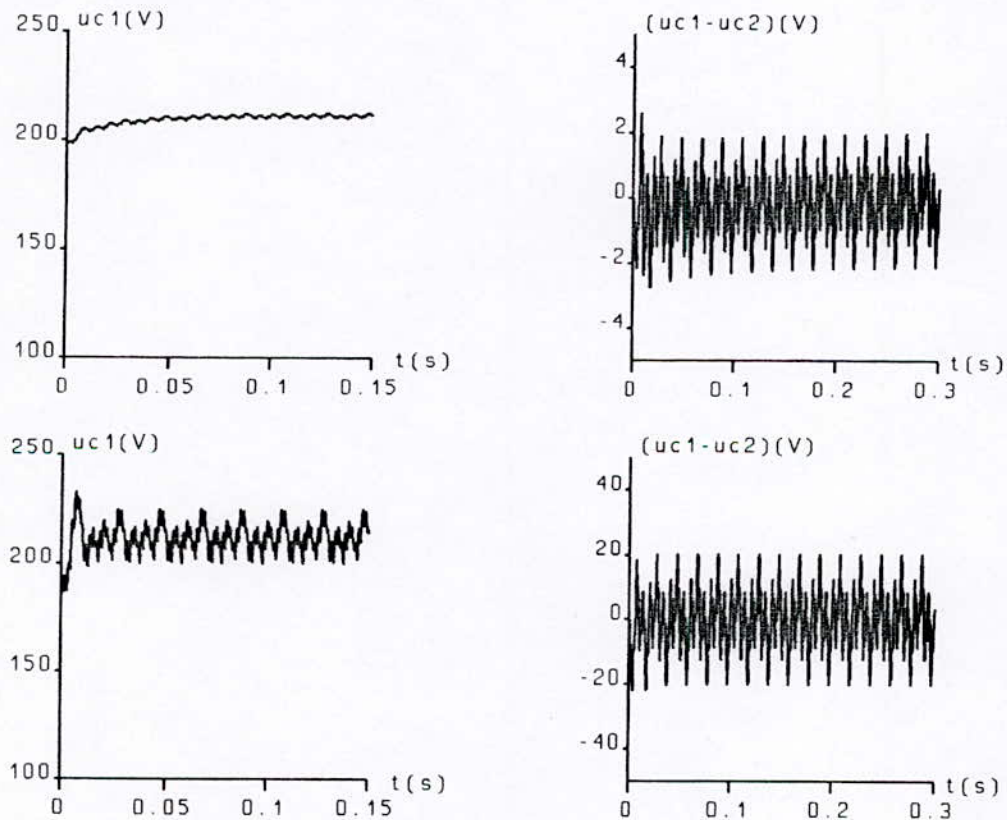


Fig-II-11-* Tension de sortie du redresseur triphasé commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale (1) pour:
 C1 & C2 égales à 20mF,
 C1 & C2 égales à 2mF.

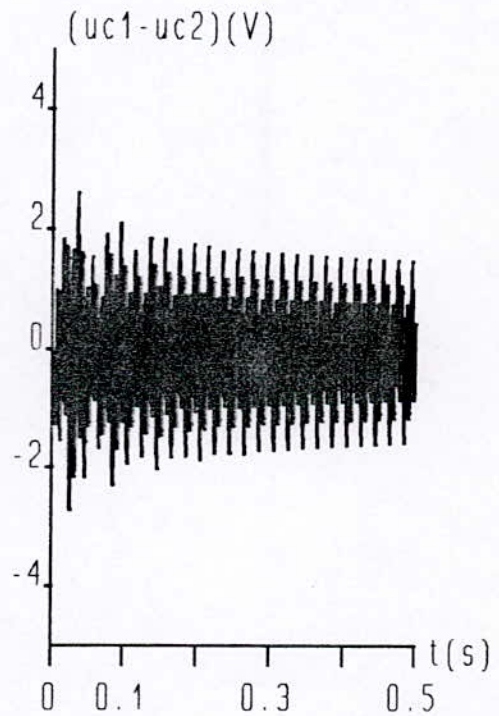
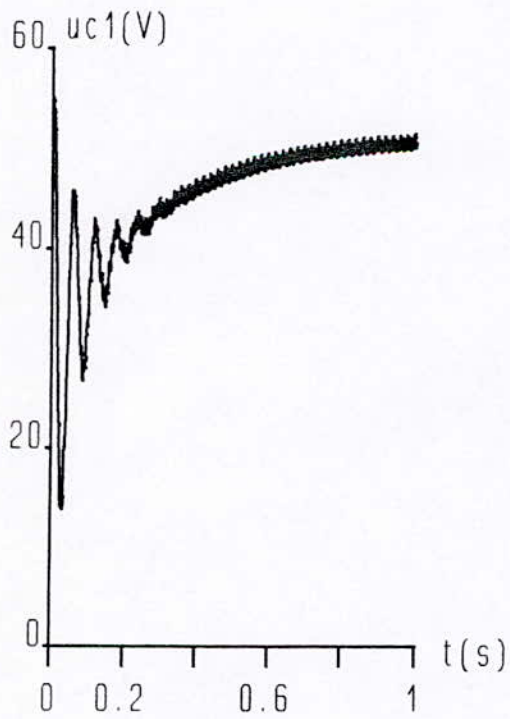
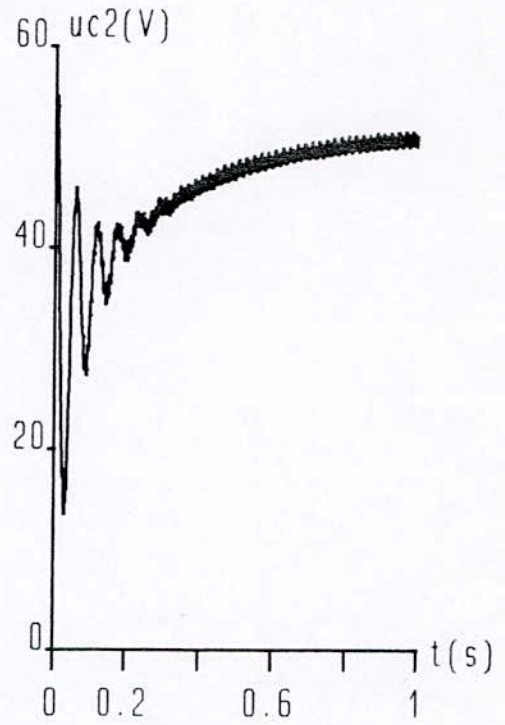
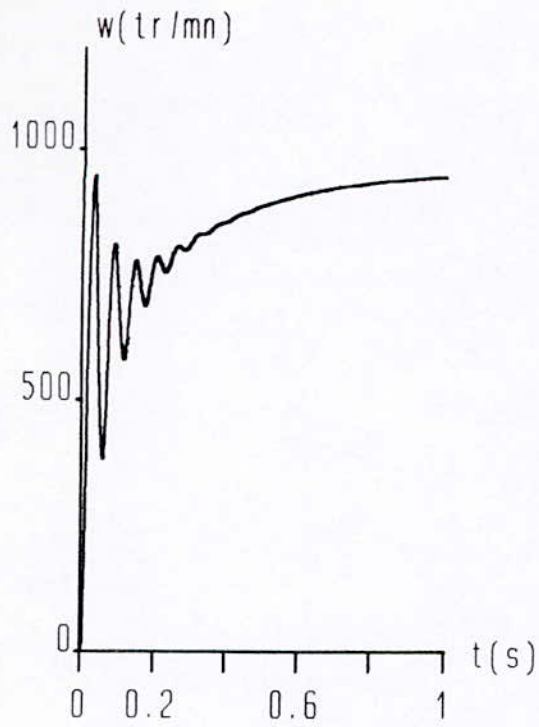


Fig-II-12-* Signaux de l'ensemble redresseur triphasé-MCC avec la commande triangulo-sinusoidale (1).

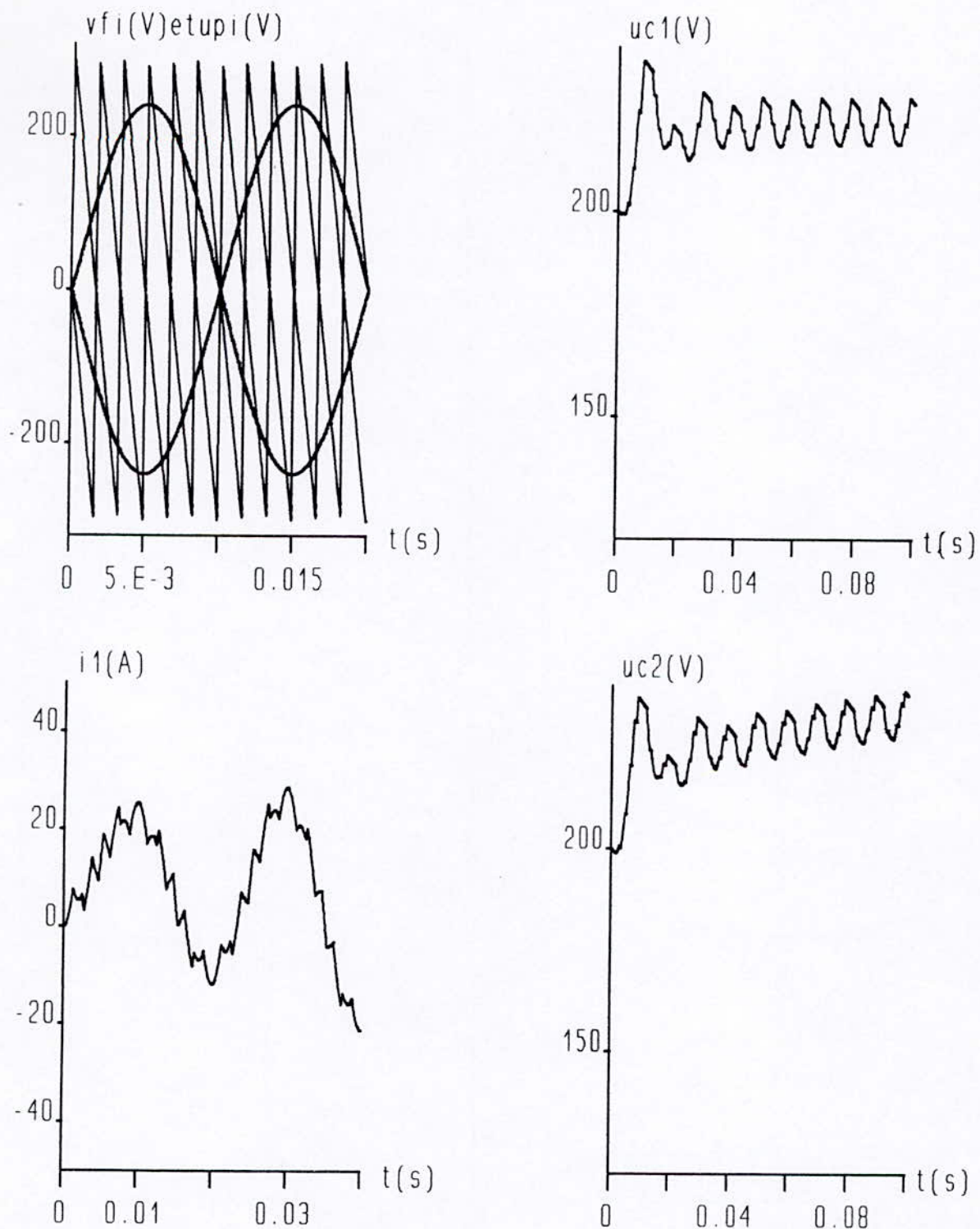


Fig-II-13-* Signaux de l'ensemble redresseur monophasé-charge résistive avec la commande triangulo-sinusoidale (2).

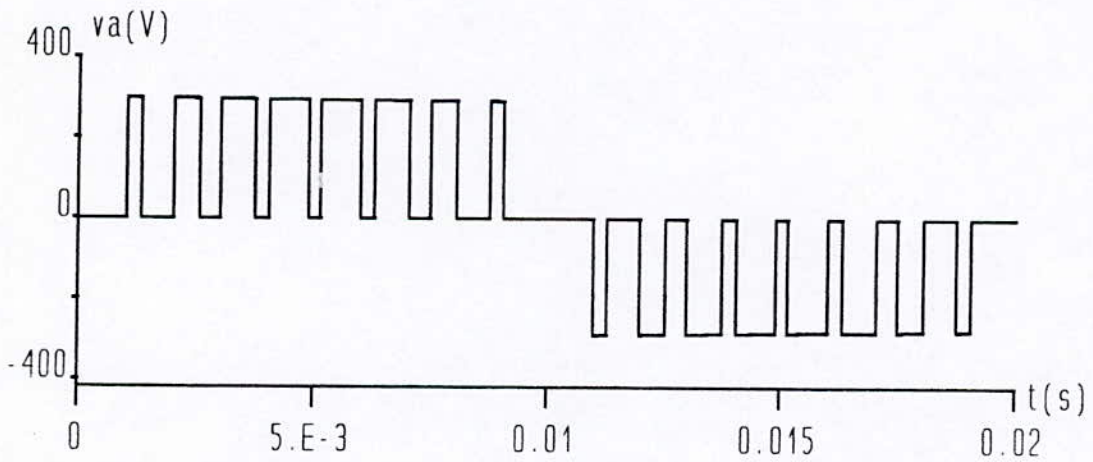
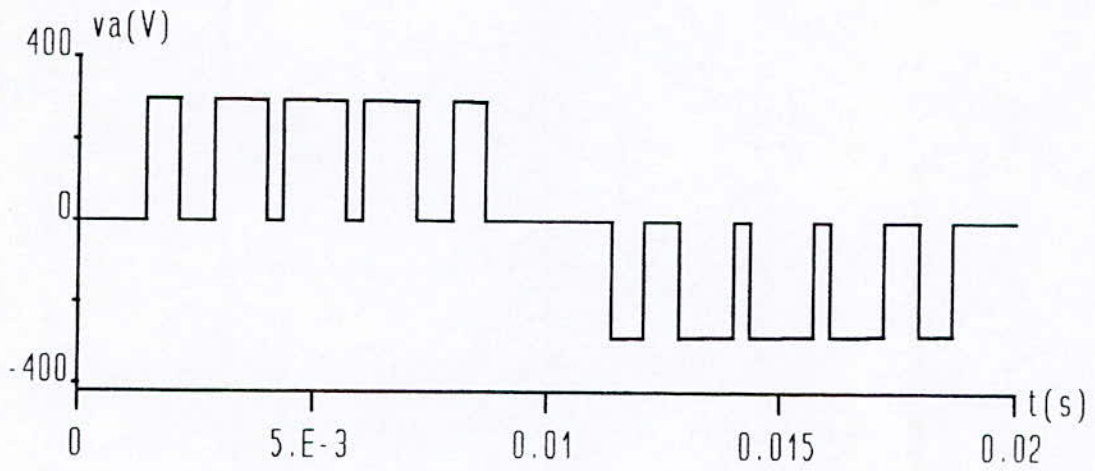
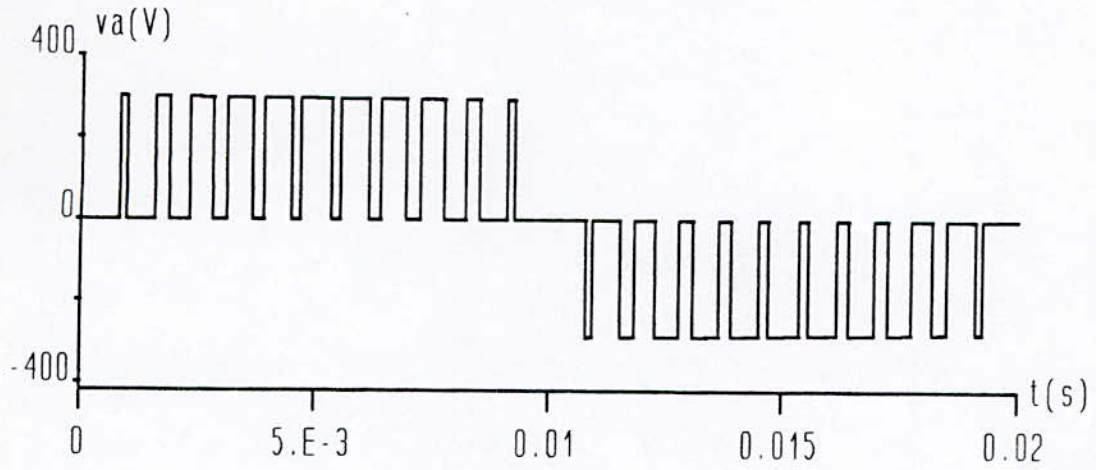
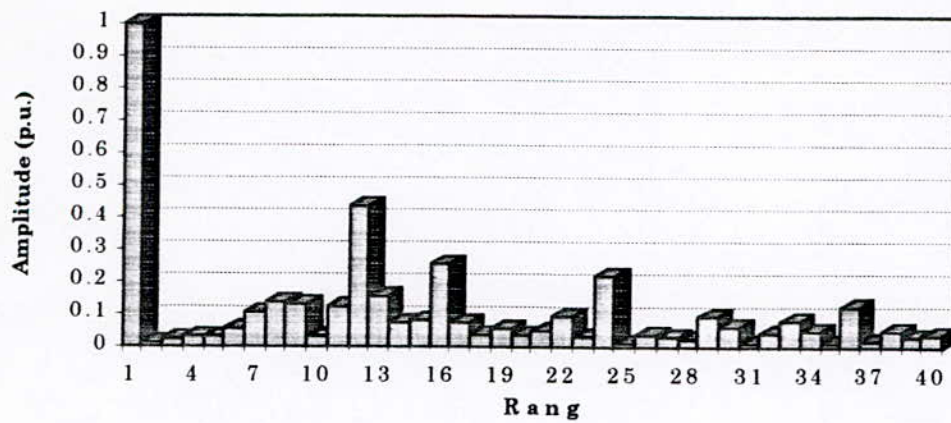
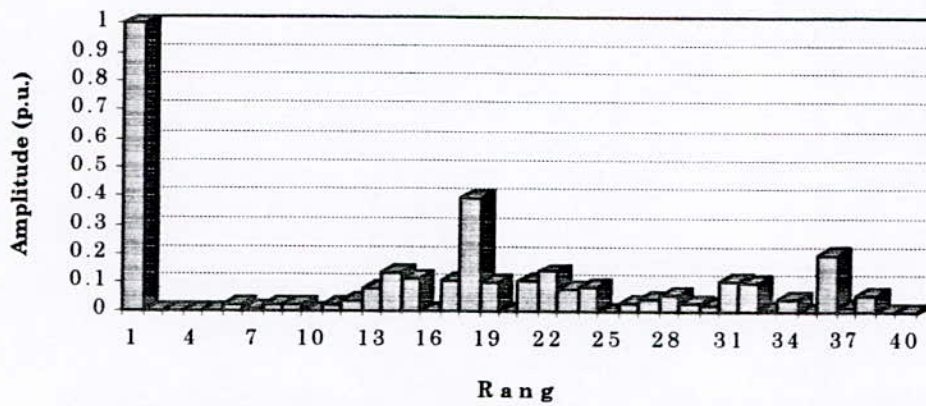


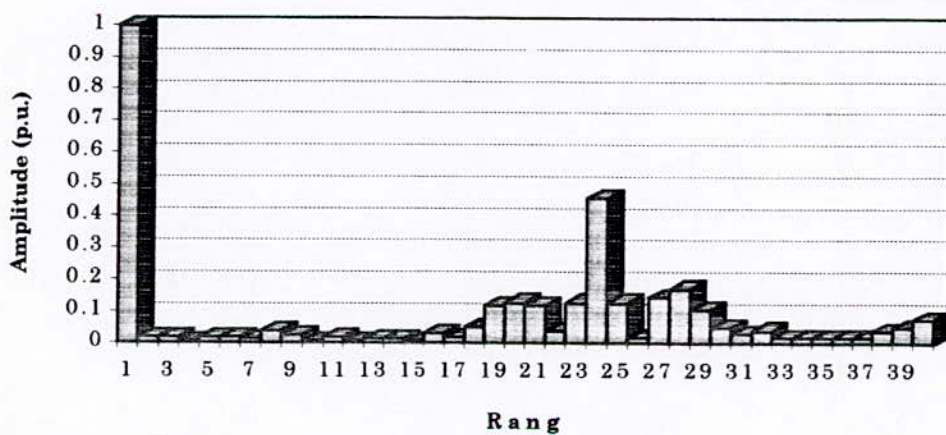
Fig-II.13.* Tensions d'entrées d'un redresseur monophasé commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale (2), $m=12, 6$ et 9 .



Analyse harmonique de la tension V du redresseur à trois niveaux monophasé commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses avec $m = 6$, $r = 0.8$



Analyse harmonique de la tension V du redresseur à trois niveaux monophasé commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses avec $m = 9$, $r = 0.8$



Analyse harmonique de la tension V du redresseur à trois niveaux monophasé commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses avec $m = 12$, $r = 0.8$

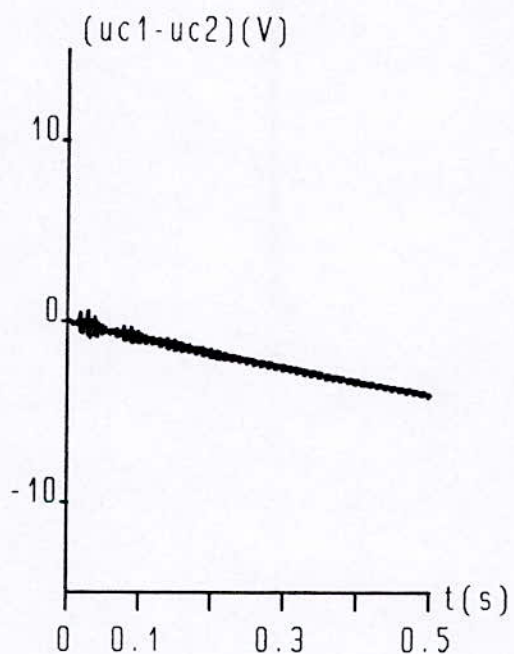
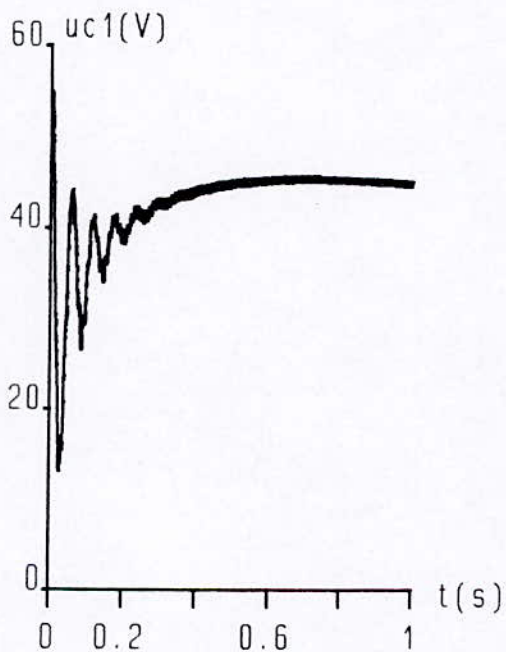
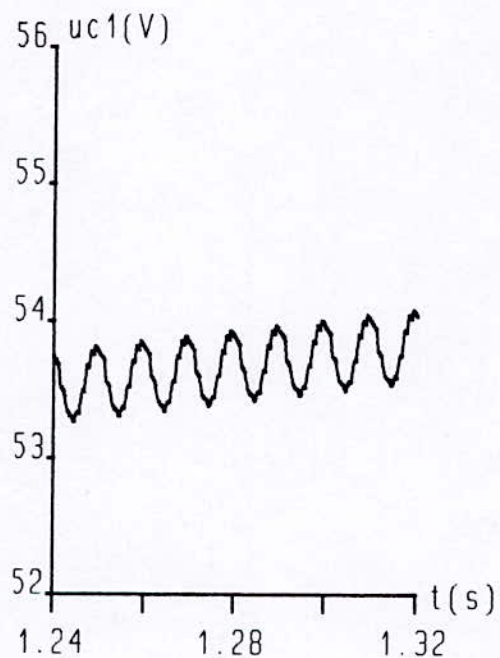
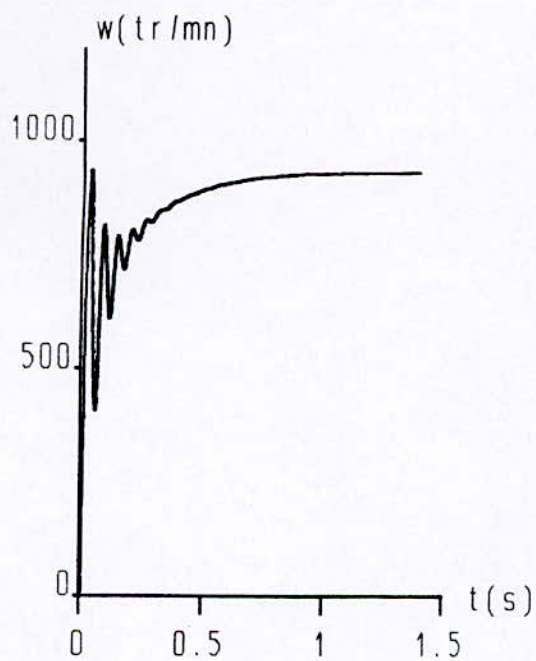


Fig-II-15-* Signaux de l'ensemble redresseur monophasé-MCC avec la commande triangulo-sinusoidale (2).

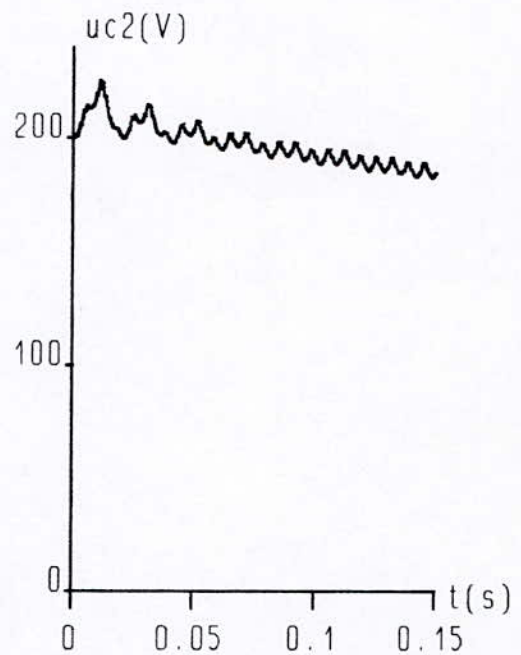
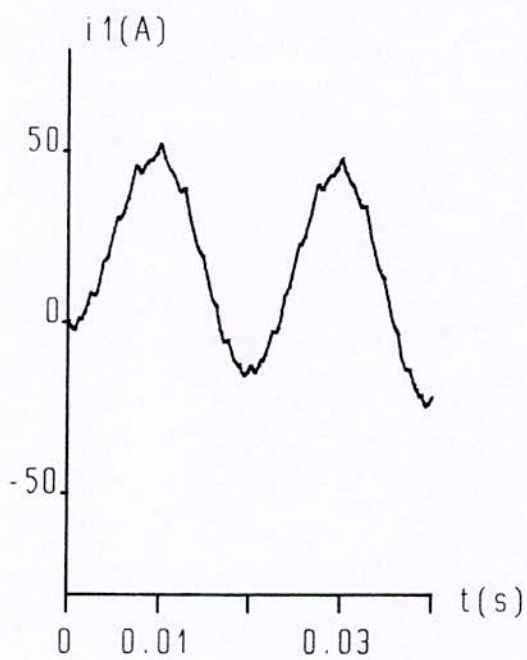
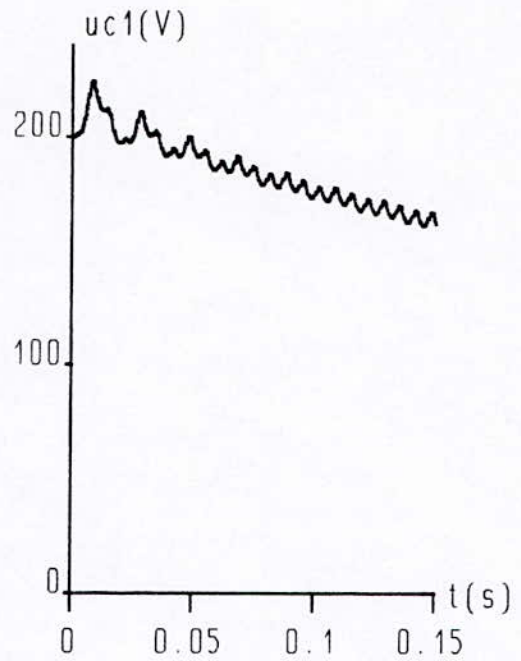
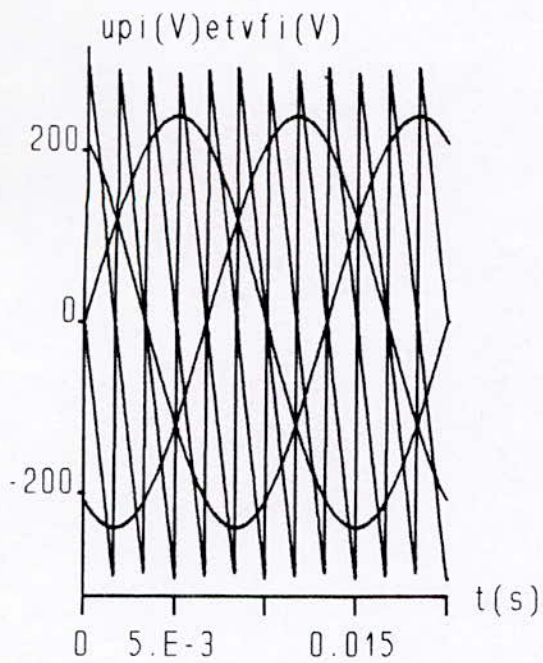
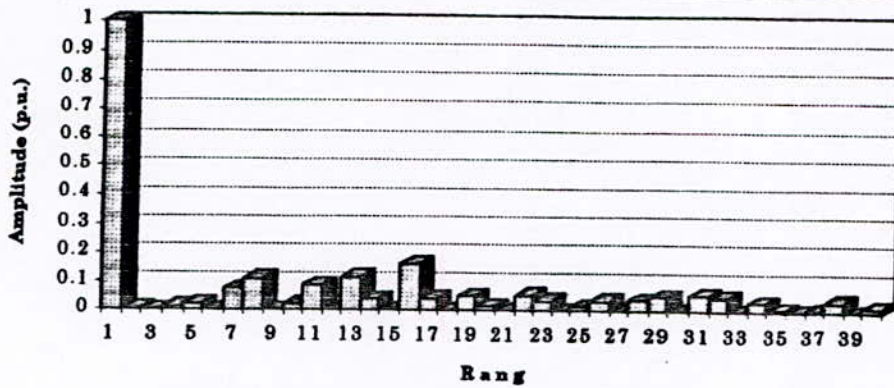
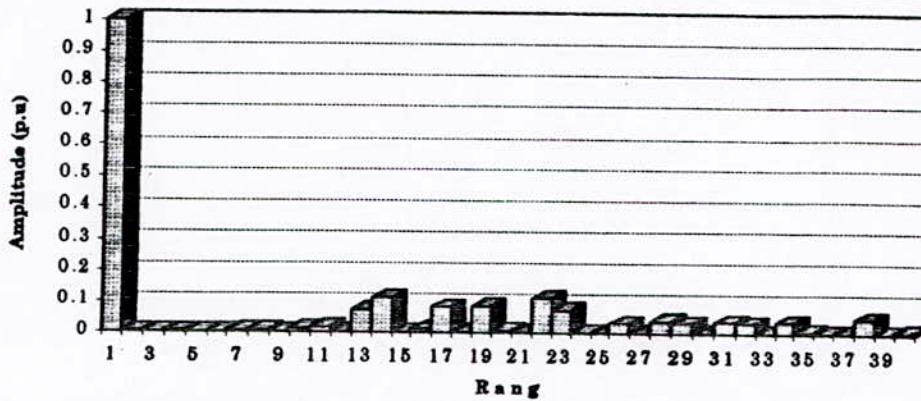


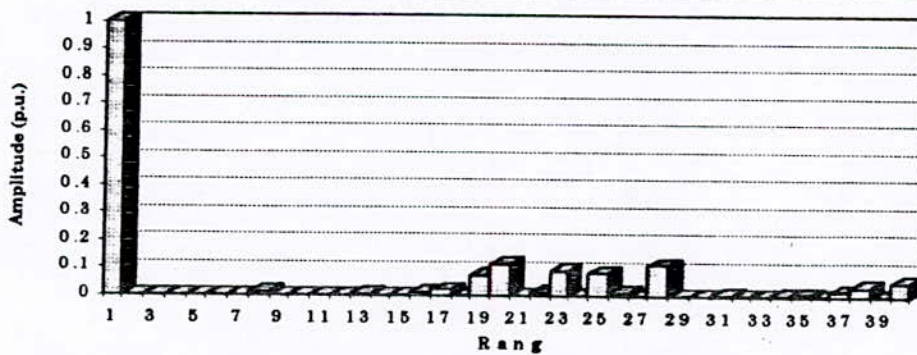
Fig-II-16-* Signaux de l'ensemble redresseur triphasé-charge résistive avec la commande triangulo-sinusoïdale (2).



Analyse harmonique de la tension V du redresseur triphasé à trois niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses $m = 6, r = 0.8$



Analyse harmonique de la tension V du redresseur triphasé à trois niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses $m = 9, r = 0.8$



Analyse harmonique de la tension V du redresseur triphasé à trois niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses $m = 12, r = 0.8$

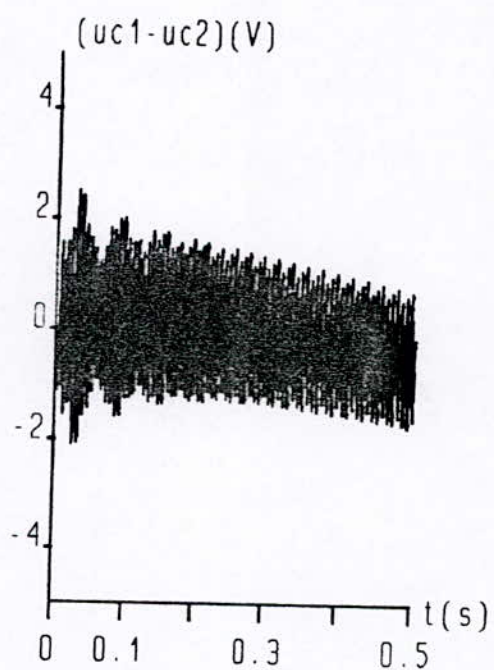
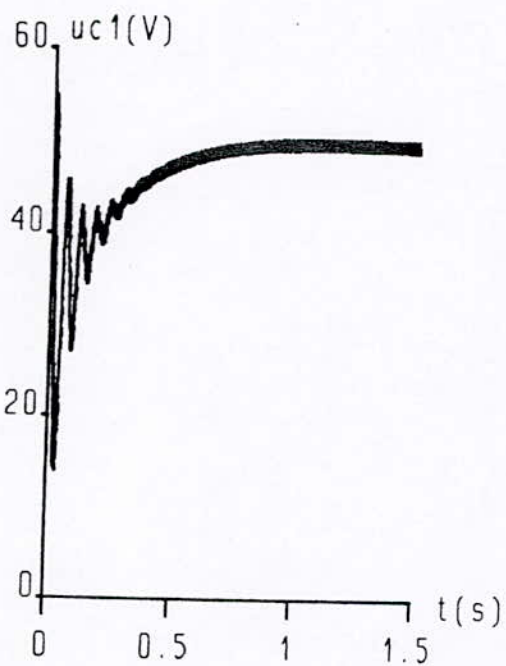
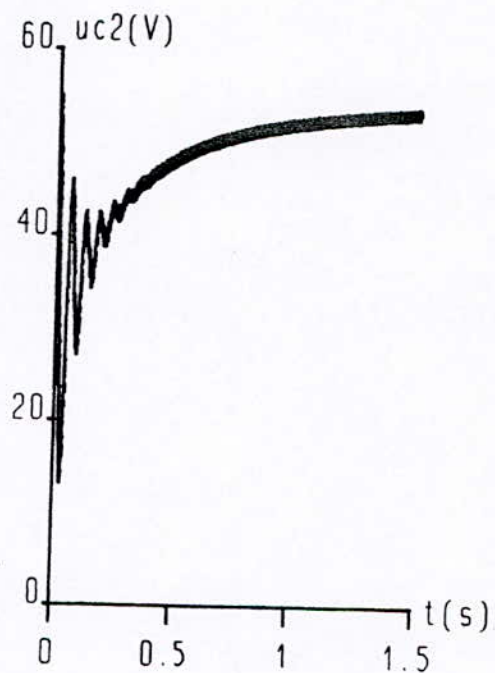
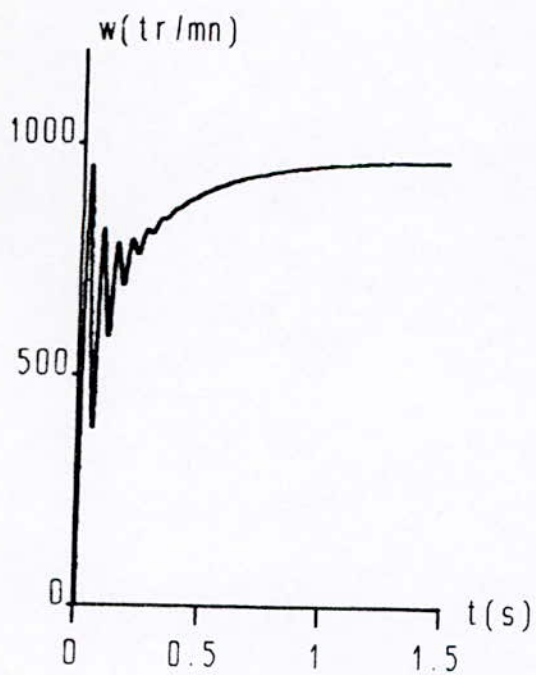


Fig-II-17-* Signaux de l'ensemble redresseur triphasé-MCC avec la commande triangulo-sinusoidale (2).

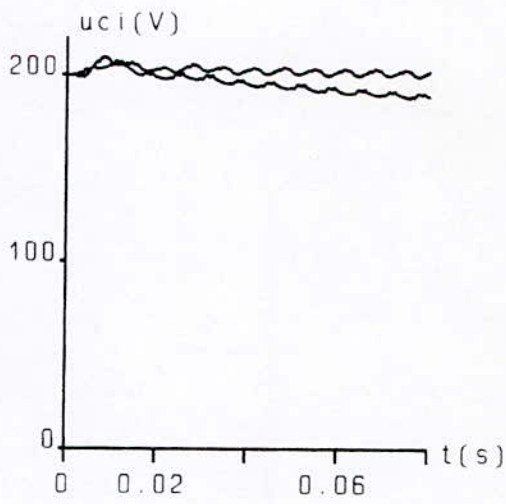
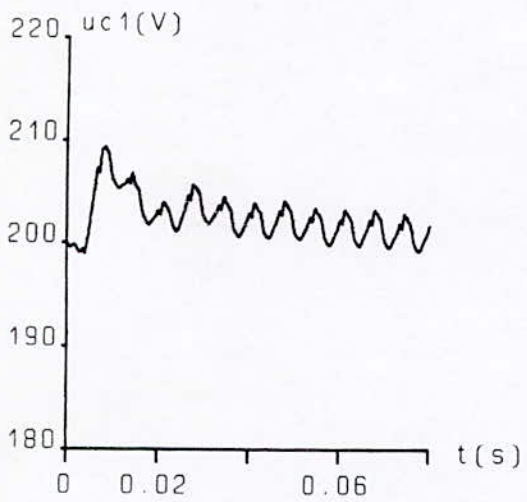
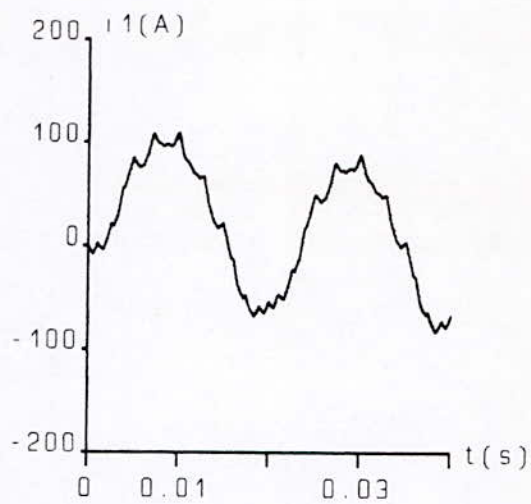
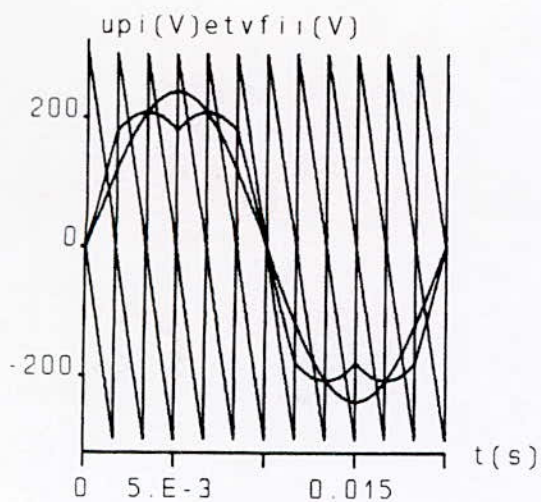


Fig-II-18-* Signaux de l'ensemble redresseur triphasé-charge résistive avec la modulation vectorielle type 2.

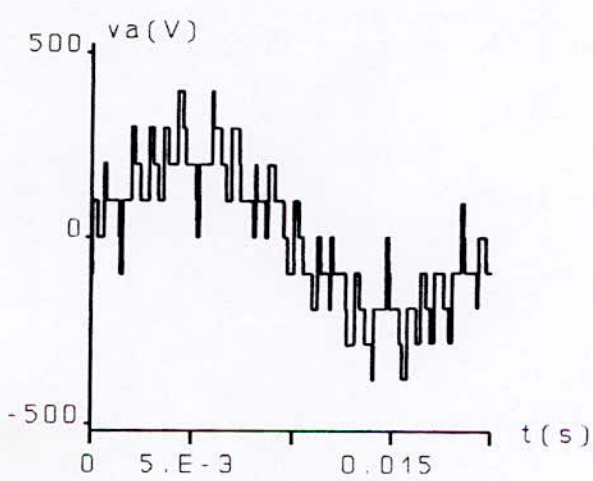
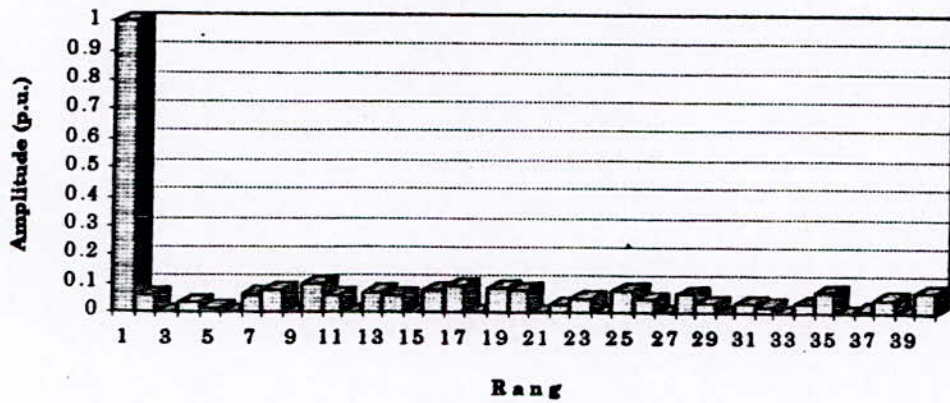


Fig-II-18-e Tension d'entrée



Analyse harmonique de la tension V du redresseur triphasé à trois niveaux commandé par la modulation vectorielle type 2 porteuses $m = 12$, $r = 0.8$

CHAPITRE III

ASSERVISSEMENT DES REDRESSEURS M.L.I A TROIS NIVEAUX

INTRODUCTION :

L'étude des changeurs de fréquences à pont de sortie multiniveaux met en évidence le problème de fluctuation du potentiel du point milieu M due à la dérivée des deux tensions U_{e1} et U_{e2} . Pour résoudre ce problème, on peut proposer les trois solutions suivantes qui donnent des performances plus ou moins comparables pour la stabilité du point M .

- Utilisation d'une alimentation continue d'entrée a point milieu (deux ponts redresseurs à deux niveaux ou un pont redresseur à trois niveaux).
- Utilisation de capacité C_1 et C_2 de valeurs importantes.
- Régulation de U_{e1} et U_{e2} .

Pour obtenir coté réseau un faible taux d'harmoniques des courants et un facteur de puissance le plus proche possible de l'unité, nous avons choisi au chapitre II une commande par hystérésis des courants appelés par l'*étage redresseur*.

Dans le cadre de ce chapitre, nous proposons :

- D'asservir les courants d'alimentation des redresseurs **MLI** à trois niveaux , afin d'avoir un taux d'harmoniques le plus faible possible et un facteur de puissance unitaire.
- De réguler ou asservir les tensions U_{e1} et U_{e2} de sortie de redresseur multiniveaux. Aussi, comme on le montrera, la ou les boucle(s) de tension imposent les valeurs efficaces des courants de référence des boucles d'asservissement des courants.

Ces asservissements permettent en ordre d'utiliser des inductances et surtout des capacités C_1 et C_2 de valeurs raisonnables. Ce dernier point est très important surtout dans le domaine de grandes puissances.

Des études ont déjà été faites sur les asservissements des redresseurs **MLI** monophasé et triphasé à deux niveaux [KULKARNY 87] [GUILLAUD 97] [HUJEUX 92]. Dans ce chapitre, on présentera les asservissements de courant d'entrée et tensions de sortie des redresseurs **MLI** monophasé et triphasé à trois niveaux, on se basant sur l'extrapolation de la méthodologie utilisée pour les redresseurs à deux niveaux

et le document [BERKOUK 95 . 1], ainsi on présentera un modèle général de la boucle de tension utilisable dans tous les cas.

Il faut noter que ce chapitre se base sur les modèles de commande des redresseurs à trois niveaux. Comme application de cette étude, on présentera les performances de ces asservissements utilisés avec les cas de charges suivants :

- Résistance à point milieu en pont.
- Moteur à courant continu.

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

I - Asservissement du redresseur de courant monophasé à trois niveau [BERKOUK 95].

I.1 - Modèles des boucles de courant et de tension.

La partie alternative d'entrée du redresseur à trois niveaux (fig. III-1.a) peut être modélisé par un circuit RL monophasé comme le montre la figure (III - 1 b). La tension V_{res} est la tension du réseau monophasé et U la tension d'entrée du pont redresseur. Pour l'asservissement des redresseurs à trois niveaux ; on suppose que $U_{c1} = U_{c2} = U_c$; Dans ce cas, le modèle de commande est donné à la figure (III - 2).

C'est la boucle qui impose toujours la valeur efficace du courant de référence du réseau. Correspondant à la puissance que doit échanger le réseau avec la charge continue. Pour modéliser cette boucle de tension, on utilise le principe de la conservation de la puissance instantané, et on néglige les pertes dans le redresseur. Le système (II - 1) exprime les puissances d'entrée et de sortie du redresseur P_e, P_s , respectivement.

$$P_e = (V_{res} - R I_{res} - L (dI_{res}/dt)) I_{res} = V_{res} I_{res} - R I_{res}^2 - \frac{1}{2} L (dI_{res}^2/dt). \quad (III - 1)$$

$$P_s = U_{c1} (i_{o1} + i_{ch1}) + U_{c2} (i_{o2} + i_{ch2}) = U_{o1} i_{d1} - U_{o2} i_{d2}$$

En négligeant la puissance dissipée par effet de *JOULE* dans la résistance **R** du réseau, on peut écrire alors :

$$P = V_{res} I_{res} = \frac{1}{2} L \left(\frac{dI_{res}^2}{dt} \right) + U_{c1} id_1 - U_{c2} id_2. \quad (III - 2)$$

En supposons le courant du réseau monophasé sinusoïdale et en phase avec la tension V_{res} du réseau alors, la puissance instantanée **P** est :

$$P = V_r I_e - V_r I_e \cos(2.w_{res}.t) = LI_e^2 \sin(2.w_{res}.t) + U_{c1} id_1 - U_{c2} id_2$$

$$\text{avec} \quad V_{res} = V_r \sqrt{2} \cdot \sin(w_{res}.t) \quad (III - 3)$$

$$I_{res} = I_e \sqrt{2} \cdot \sin(w_{res}.t) \quad \text{et} \quad w_{res} = 2\pi.F_{res}.$$

On suppose dans la suite que $C_1 = C_2 = C$. Définissons les grandeurs i_c , i_{ch} et U_c comme suit :

$$i_c = (i_{c1} + i_{c2}) / 2 ; \quad i_{ch} = (i_{ch1} + i_{ch2}) / 2 ; \quad U_c = (U_{c1} + U_{c2}) / 2.$$

$$\text{Et } I_{red} = i_c + i_{ch}$$

donc la relation (III - 3) peut être écrite sous la forme suivante :

$$P = V_r I_e (1 - \cos(2.w.t)) = L i_e^2 \cdot \sin(2.wt) + 2.U_c (i_c + i_{ch}) \quad (III - 4)$$

Ainsi, en monophasé, en plus de la puissance moyenne, on a une puissance fluctuante de fréquence deux fois celle du réseau. En prenant pour la boucle de tension une période d'échantillonnage T_ψ multiple de $1 / 2.F_{res}$; on aboutit au modèle moyen suivant :

$$\overline{P} = V_r I_e = 2 \overline{U_c} \overline{i_{red}} \quad (III - 5)$$

$\overline{U_c}$ $\overline{i_{red}}$: valeurs moyennes échantillonnées sur T_ψ respectivement de la tension U_c et du courant I_{red} .

Pour notre cas, on a pris l'hypothèse supplémentaire qui consiste à confondre \bar{U}_c avec $(U_{c1} + U_{c2})/2$ d'une part, et \bar{I}_{red} avec $(I_{red1} + I_{red2})/2$ d'autre part. Ainsi la boucle de tension peut être représentée par le modèle de la figure (III - 3). La tension U_c représente une non linéarité pour le système.

Le schéma de principe de l'asservissement global (courant et tension) du redresseur monophasé à trois niveau est montré à la figure (III - 4).

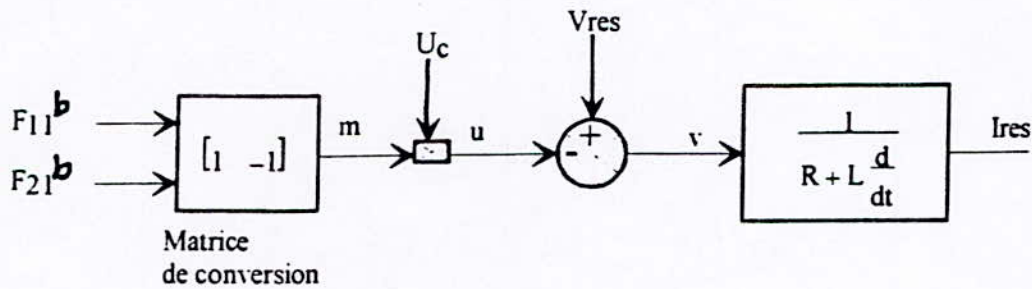


Fig III-2 Modèle de commande du redresseur monophasé à trois niveaux

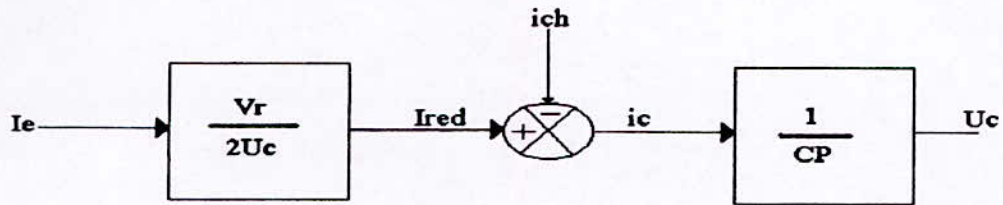


Fig. III-3 : Modèle de la boucle de tension du redresseur monophasé à trois niveaux.

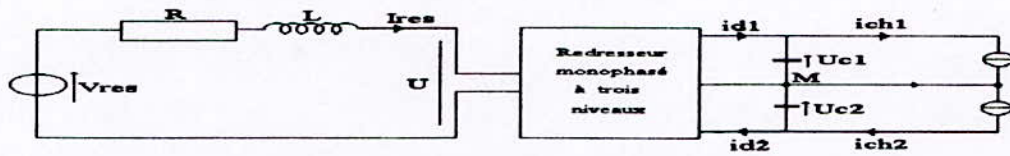


fig. III-1-a : Redresseur de courant monophasé en pont à MLI à trois niveaux.

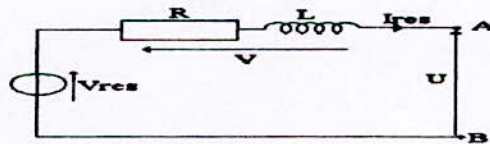


fig. III-1-b : Modèle de la boucle de courant du redresseur monophasé à MLI à trois niveaux.

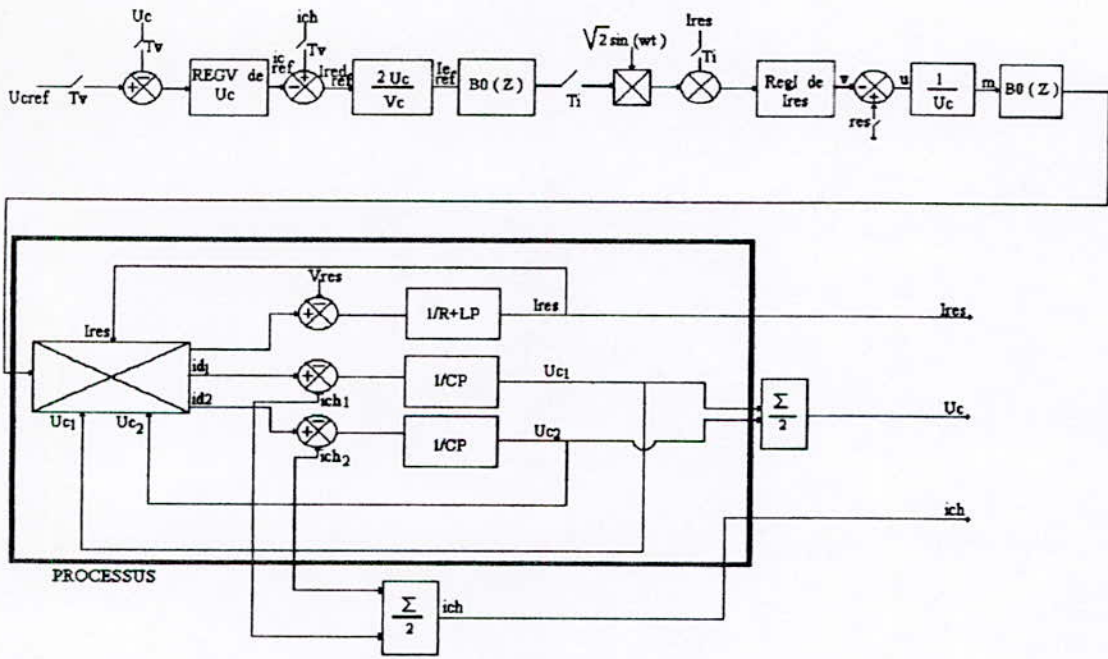


Fig III-4 : Schéma global des deux boucles d'asservissement du redresseur monophasé à trois niveaux

I. 2 - Dimensionnement des régulateurs de courant et de tension .

I. 2.1 - Boucle de courant.

La fonction de transfert $G(p)$ de la partie du système intervenant dans la boucle de courant (fig. III - 5a) s'exprime comme suit :

$$G_i(p) = I_{res}/V = 1/(R + L_p) = K_1/P + w_0 \quad \text{avec} \quad K_1 = 1/L; \quad w_0 = K/L \quad (III - 6)$$

En passant du domaine continu au domaine discret (en Z); et en considérant une période d'échantillonnage T_b , on obtient la fonction de transfert (avec bloqueur) $G(Z)$, tout en suivant la relation suivante :

$$G_i(Z) = ((Z-1)/Z) . Z [G(p)/P] \quad (III - 7)$$

donc on obtient la fonction $G_i(Z)$

$$G_i(Z) = 1/k . (1 - e^{-w_0 T_i}) / (Z - e^{-w_0 T_i}) \quad (III - 8)$$

On a choisit un PI pour réguler le courant du réseau qui a pour expression dans le domaine tempore l'expression (III - 7). Tout le travail qui sera faire considérer la compensation de la boucle de courant de la figure (III - 5 a) qui devient la boucle représentée à la figure (III - 5 b).

$$G_i(p) = K_{pi} + K_{ii} \cdot 1/p \quad (\text{III - 9})$$

or la fonction $1/p$ est équivalente en discret à la fonction $Z / (Z - 1)$ d'où :

$$G_i(Z) = K_{pi} + K_{ii} \cdot (Z / Z - 1) \quad (\text{III - 10})$$

En boucle ouverte, notre fonction de transfert devient :

$$\text{FTBO}_i = A \cdot (Z - B) / (Z^2 - (1 + e^{-w_0 T_i})Z + e^{-w_0 T_i}) \quad (\text{III - 11})$$

$$\text{avec } A = (K_{pi} + K_{ii}) \cdot (1 - e^{-w_0 T_i}) / R$$

$$B = K_{pi} / (K_{pi} + K_{ii})$$

De là, on peut écrire la fonction de transfert la fonction de transfert en boucle fermée comme suit :

$$\text{FTBF}_i = A(Z - B) / (Z^2 + (A - 1 - e^{-w_0 T_i})Z + 1 - e^{-w_0 T_i} - AB) \quad (\text{III - 12})$$

On veut avoir une fonction de transfert en boucle fermée qui a pour dénomination $P^2 + 2 \xi w_i p + w_i^2$, donc on doit se rendre à la table des fonctions de transfert équivalente en Z , où on trouve l'expression du dénominateur suivante :

$$Z^2 - (1 - e^{-w_i \xi T_i}) \cdot \cos(w_i T_i (1 - \xi^2)^{1/2}) \cdot Z + e^{-2\xi w_i T_i}$$

par analogie avec (III - 12) on obtient :

$$A = 1 - e^{-w_0.T_i} - 2.e^{-w_i \cdot \xi.T_i} \cdot \cos(w_i.T_i (1 - \xi^2)^{1/2}) \quad (III - 13)$$

$$AB = e^{-w_0.T_i} - e^{-2.w_i.T_i}$$

De l'expression (III - 13) et (III - 11) on peut déduire les valeurs de K_{pi} et K_{ii} comme suit :

$$K_{pi} = A.B \cdot R / (1 - e^{-w_0.T_i}) \quad (III - 14)$$

$$K_{ii} = K_{pi} \cdot (1/B) - 1$$

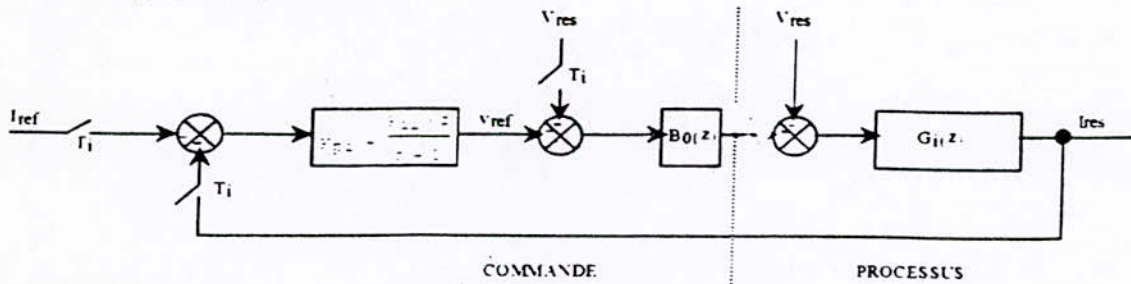


Fig. III-5-a Algorithme de réglage du courant du redresseur à trois niveaux

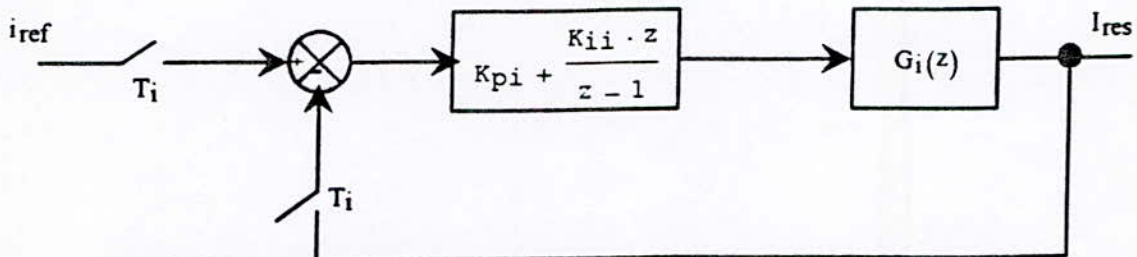


Fig. III-5-b Modèle équivalent de la boucle de courant du redresseur

On calcule les paramètres K_{pi} et K_{ii} du régulateur PI pour avoir un système du deuxième ordre avec une pulsation propre w_i tel que $w_i.T_i = 1$ et un amortisseur unitaire ($\xi=1$) (réponse en pile).

I. 2.2 - BOUCLE DE TENSION.

La fonction de transfert $G_v(p)$ de la partie du système concernant la boucle de tension s'exprime par :

$$G_v(p) = U_c / I_c = 1 / CP \quad (III - 15)$$

En suivant la même procédure que dans la boucle de courant, on obtient d'abord $1 / CP^2$; cherchons son équivalent en discret, on trouve $(Z.T_v) / C(Z - 1)^2$ (avec T_v : temps d'échantillonnage de la boucle de tension). Pour tenir compte du bloqueur, donc on peut écrire que :

$$G_v(Z) = T_v / C(Z - 1) \tag{III - 16}$$

Le correcteur proportionnel (P) associé à notre fonction de transfert nous permet d'écrire la fonction interne en boucle ouverte comme suit :

$$FTBO_{Iv} = K_{pv} \cdot T_v / C(Z - 1) \tag{III - 17}$$

et en boucle fermée :

$$FTBF_{Iv} = K_{pv} \cdot T_v / K_{pv} \cdot T_v + C(Z - 1) \tag{III 18}$$

Lorsqu'on ajoute un integrateur (I) ($K_{iv} \cdot Z / Z - 1$) on peut écrire la fonction du transfert en boucle ouverte comme suit :

$$FTBO_v = (K_{iv} \cdot Z / Z - 1) \cdot (K_{pv} \cdot T_v / K_{pv} \cdot T_v + C(Z - 1)) \tag{III - 19}$$

et en boucle fermée :

$$FTBF_v = (K_{pv} \cdot H_{iv} \cdot T_v \cdot Z) / (CZ^2 + (K_{pv} \cdot K_{iv} \cdot T_v + K_{pv} \cdot T_v - 2C) \cdot Z + C - K_{pc} \cdot T_v) \tag{III - 20}$$

Et comme pour la boucle de courant; on suivra de la même façon, on imposant $w_v \cdot T_v = 1$ et $\xi = 1$ donc on trouvera les valeurs des constantes de régulateurs (IP) (K_{pv}).

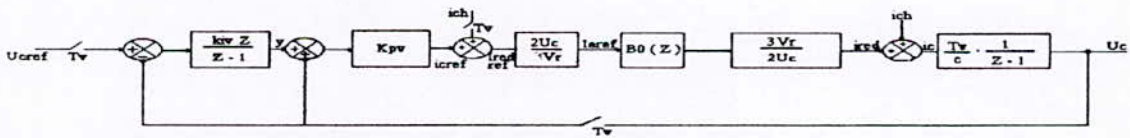


Fig. III- 6-a : Algorithme de réglage de la tension redressée U_o (moyenne) du redresseur : A trois niveaux monophasé

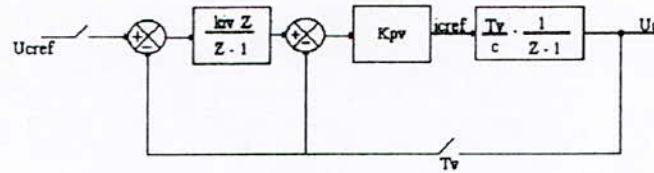


Fig III-6-b : Modèle équivalent de la boucle de tension

REMARQUE :

1 - Pour les blocs de linéarisation de la boucle de tension, on peut soit utiliser la valeur échantillonnée de la tension U_c ($(U_{c1} + U_{c2}) / 2$); c'est-à-dire faire une linéarisation dynamique ou bien prendre sa valeur référentielle U_{cref} (linéarisation statique) [**GUILLARD 92**]. Pour notre cas, nous utilisons une linéarisation dynamique.

2 - Afin que le modèle de la boucle de tension soit valide, il faut utiliser une période T_v multiple de $(1 / Z_{fres})$.

I. 3 - APPLICATIONS.**I. 3.1 - La charge du redresseur est une résistance en pont.**

La charge du redresseur est une résistance en pont dont la valeur est 25Ω ; le réseau à une tension efficace $V_{eff} = 150 \text{ V}$, une inductance $L_{res} = 1 \text{ mH}$ et une résistance $R_{res} = 0,25 \Omega$, les capacités du filtre de sortie intermédiaire valent 20 mF .

Les périodes d'échantillonnage sont respectivement $T_i = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ et $T_v = 2 \cdot 10^{-2} \text{ s}$; et les paramètres des différents correcteurs sont :

Régulateur PI de courant : $K_{pi} = 1,5897 \text{ V/A}$; $K_{ii} = 0,85 \text{ V/A}$.

Régulateur IP de tension : $K_{pv} = 0,8647 \text{ A/V}$; $K_{iv} = 0,462 \text{ V/A}$

Le bloc qui donne les fonctions de connexion triangulo-sinusoidale à une seule porteuse ($V^{pm} = 200 \text{ V}$ et $m = 36$).

Les graphes (III -7*) représentent la forme de la tension U_{c1} avec la tension de référence U_{ref} ; l'allure du courant du réseau vis à vis du courant de référence et de la tension du réseau, et bien sur $U_{c1} - U_{c2}$ qui représente la fluctuation du point M.

On remarque que le courant du réseau suit bien le référence et qu'il est en phase avec la tension du réseau, et que les tensions U_{c1} et U_{c2} suivent la tension de référence U_{ref} . Au départ, elles décroissent rapidement car entre $[0, T_v]$ la valeur efficace du courant de référence est nulle, et ensuite elles croient pour rejoindre leurs références U_{ref} .

On remarque aussi que la différence $U_{c1} - U_{c2}$ est évidemment nulle à cause du choix de la stratégie de commande en plus de l'asservissement.

I.3.2 - La charge du redresseur monophasé à trois niveaux est un moteur à courant continu.

Au chapitre II, on a montré qu'il est difficile d'avoir une tension et une vitesse de rotation normales d'un moteur à courant continu; sauf si on agit sur la puissance. Dans cette partie on applique notre asservissement à la même machine avec $V_{res} = 40\text{V}$, et un couple résistant de 1 N.m , $V_{pm} = 55\text{V}$ et $m = 24$. Le dimensionnement des régulateurs est le même que pour la résistance puisqu'on a pris le même réseau et les mêmes capacités (filtre d'entrée et de sortie).

Dans la figure (III -8*), on voit que le courant du réseau oscille autour du courant de référence et qu'il est en phase avec la tension du réseau, donc un facteur de puissance pratiquement unitaire.

La vitesse de rotation du moteur à courant continu augmente jusqu'à atteindre une valeur où elle se maintient, ensuite elle descend vers une autre valeur ce qui reflète comme c'est présenté dans la figure (III -8-d) l'augmentation de la vitesse différentes à celle en boucle ouverte à cause du courant qui varie selon l'asservissement et par suite la puissance ce qui permet au moteur de s'amorcer normalement.

II - ASSERVISSEMENT DU REDRESSEUR DE COURANT TRIPHASE

A TROIS NIVEAUX.

Chaque phase k ($k = 1 ; 2$ ou 3) du réseau triphasé alimentant le pont redresseur triphasé à trois niveaux (**fig. III-10a**) peut être modélisé par un circuit **RL** monophasé comme montre en figure (**III - 10b**). La tension V_{resk} est celle de la phase k du réseau triphasé, et V_k la tension liée au bras k du redresseur. Etant donné les composantes homopolaires des courants et tensions d'entrées du redresseur triphasé à trois niveaux sont nulles ; on asservira alors uniquement les courants de deux phases du réseaux. Le modèle de commande réduit de ce redresseur triphasé est donné à la figure (**III-10c**) ; les fonctions N_{r1} et N_{r2} sont les fonctions de connexion simples.

Comme pour le redresseur à trois niveaux monophasé ; la boucle de tension impose la valeur efficace I_e des courants de référence du réseau. Pour modéliser cette boucle de tension, on utilise le principe de la conservation de la puissance instantanée avec l'hypothèse d'un redresseur sans pertes.

$$P_e = V_1 I_{res1} + V_2 I_{res2} + V_3 I_{res3} = \sum_{k=1}^3 [V_{resk} \cdot I_{resk} - R I_{resk}^2 - \frac{1}{2} L \frac{d}{dt} (I_{resk}^2)] \quad (III - 21)$$

$$P_s = - U_{c1} i_{d1} + U_{c2} i_{d2}$$

En négligeant comme pour le redresseur monophasé ; la puissance dissipée par effet de JOULE dans les résistances **R**, on aboutit a :

$$P = \sum_{k=1}^3 V_{resk} \cdot I_{resk} = \frac{1}{2} L \sum \frac{d i_{resk}^2}{dt} + 2 U_c (i_c + i_{ch}) \quad (III - 22)$$

En supposons des systèmes de tensions et courant du réseau triphasé sinusoïdaux et en phase, on peut écrire alors :

$$P = 3 V_r I_e = 2 U_c \cdot I_{red} \quad (III - 23)$$

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

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

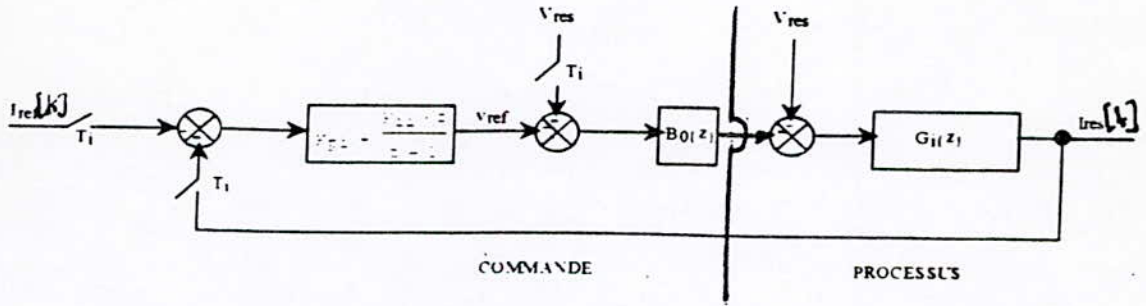


Fig (III.12) Algorithme de réglage de courant du réseau triphasé.

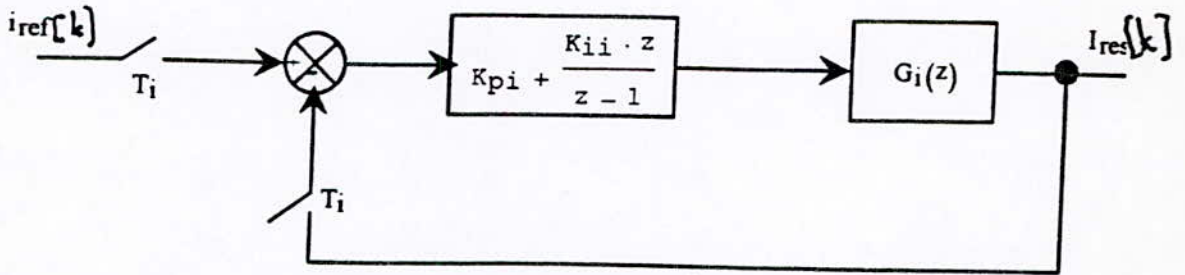


Fig (III.13) Algorithme de réglage de courant du réseau triphasé.

On calcule K_{pi} et K_{ii} des régulateurs PI du courant de façon a avoir en boucle fermée $w_{mi}T_i = 1$ et $\xi_i = 1$.

II. 2. 2 - La boucle de tension.

Un algorithme d'asservissement de la tension U_c en moyenne de U_{c1} et U_{c2} est montrée à la figure (III - 14), après compensation du courant i_{ch} et linéarisation, on aboutit au même modèle équivalent que pour le redresseur monophasé ; on calcule K_{pv} et K_{iv} du IP de tension afin d'avoir un système équivalent en boucle fermée du second ordre avec une pulsation propre w_{nv} tel que $w_{nv} \cdot T_v = 1$ et un amortissement $\xi_v = 1$ unitaire.

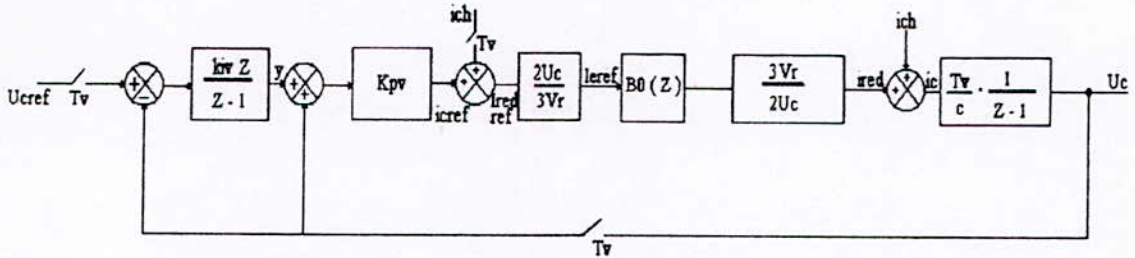


Fig III.3.1a : Algorithme de réglage de la tension redrèssée U_c (moyenne) du redresseur triphasé à trois niveaux.

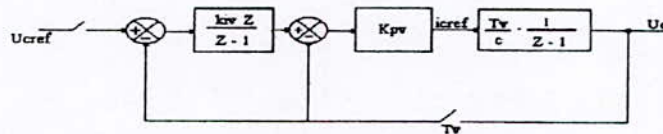


Fig III.3.1b : Modèle équivalent de la boucle de tension

II. 3 - APPLICATIONS :

II. 3.1 - La charge du redresseur triphasé à trois niveaux est une résistance en pont.

La charge du redresseur est un pont de deux résistances dont la valeur de chacune est $12,5 \Omega$, le réseau a une tension efficace $V_{eff} = 100 \text{ V}$, une inductance $L = 1\text{mH}$ et une résistance $R_{res} = 0,25\Omega$, les capacités du filtres de sortie valent 20mf , les périodes d'échantillonnage sont respectivement $T_i = 5.10^{-4}\text{s}$ et $T_v = 2.10^{-2}\text{s}$; et les paramètres des différents correcteurs sont :

Régulateur PI de courant : $K_{pi} = 1,5897 \text{ V/A}$; $K_{ii} = 0,85 \text{ V/A}$

Régulateur IP de tension : $K_{pv} = 0,8647 \text{ A/V}$; $K_{iv} = 0,462 \text{ V/A}$

On choisit $m = 36$ et $V_{pm} = 200 \text{ V}$ pour la stratégie utilisée (triangulo-sinusoïdale à une porteuse) . Les graphes (III - 15) donnent les résultats de l'application de l'asservissement sur notre système. On voit clairement que le courant du réseau suit le courant de référence, et il est en phase avec la tension du réseau. La tension U_{c1} rejoint la valeur de référence dans les trois cas ($U_{ref} = 200 ; 140 ; 170 \text{ V}$) une fois qu'elle a dépassée le régime transitoire, lors de ce régime la différence ($U_{c1} - U_{c2}$) augment et puis elle a tendance à s'annuler des que ce régime soit achevé.

II.2.3 - La charge du redresseur triphasé à trois niveaux est un moteur à courant continu.

Appliquons l'asservissement à la même machine avec $V_{res} = 30 \text{ V}$ et un couple résistant de 1 N.m $V_{pm} = 55 \text{ V}$ et $m = 24$. Le dimensionnement des correcteurs est le même. Les résultats sont présentés sur la figure (III - 16), ils représentent des grandeurs de sorties (d'états) vis à vis de leurs grandeurs de référence, on remarque aussi en régime transitoire que juste avant de la suivre il y' a une légère diminution ; qu'on retrouve dans l'évolution de la vitesse de rotation.

Cette vitesse retrouve son accroissement normal vers une valeur fixe ensuite elle réagit au changement de la tension de référence c'est-à-dire elle descend si la tension U_{ref} le fait et vis versa. La différence ($U_{c1} - U_{c2}$) est pratiquement nulle.

REMARQUE ET RAPPEL :

Pour les redresseurs classiques (à deux niveaux) il est claire que les boucles de courant reste les mêmes que celui des redresseurs à trois niveaux, mais dans les boucles de tension pour les redresseurs monophasé (V_{res} triphasé) change à cause de la conservation de la puissance instantanée et donne les équations suivantes :

$$I_e V_r = U_c I_{red} \dots\dots\dots \text{ en monophasé}$$

$$3I_e V_r = U_c I_{red} \dots\dots\dots \text{en triphasé}$$

Et en plus en règle la tension U_c au biais des fonctions de connexion des interrupteurs, au lieu de réguler pour les redresseurs à trois niveaux la moyenne $(U_{c1}+U_{c2})/2$ au ~~biais~~ ^{biais} des fonctions de connexions des demi bras.

CONCLUSION :

Dans ce chapitre on a étudié les algorithmes d'asservissement (courant et tension) des redresseurs monophasé et triphasé à trois niveaux. On a particulièrement montré :

- l'analogie des modèles de commande des redresseurs monophasé (resp triphasé) à trois niveaux avec les redresseurs monophasé à deux niveaux. Cette analogie est possible grâce à l'utilisation pour le redresseur à trois niveaux, des fonctions de connexion de demi bras F_{ks}^b au lieu des fonctions de connexion des interrupteurs pour les redresseurs à deux niveaux.
- L'isomorphisme des modèles des boucles de tension des redresseurs à trois niveaux avec ceux à deux niveaux rendu possible par l'asservissement de la tension moyenne U_c des deux tensions U_{c1} et U_{c2} du redresseur à trois niveaux ($U_c = U_{c1} + U_{c2} / 2$), et par la définition des grandeurs équivalentes suivantes $i_c = (i_{c1}+i_{c2}) / 2$ et $i_{ch} = (i_{ch1}+i_{ch2}) / 2$, on arrive ainsi à modéliser le redresseur à trois niveaux par un redresseur à deux niveaux équivalent. La figure (III - 16) montre le modèle général de la boucle de tension d'un redresseur multiniveaux où a désigne le nombre de phases (monophasé ou triphasé) et le nombre de niveaux (deux ou trois niveaux) du redresseur.

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent bien :

* La possibilité de réaliser une alimentation en continu absorbant un courant réseau le moins pollué possible avec un facteur de puissance pratiquement unitaire coté réseau.

* L'asservissement des tensions U_{c1} et U_{c2} de sortie du redresseur à trois niveaux permet d'avoir un faible décalage (déséquilibre) entre ces deux tensions uniquement pendant les régimes transitoires. En régime établi, la différence $U_{c1} - U_{c2}$ est pratiquement nulle.

* Avec cet asservissement, on peut réguler U_{c1} et U_{c2} . Cette propriété est particulièrement intéressante pour les asservissements des machines à courant continu.

* L'efficacité pour les redresseurs à trois niveaux de l'asservissement unique de la tension U_c moyenne au lieu de l'asservissement des deux tensions U_{c1} et U_{c2} séparément.

Dans le dernier chapitre, on déduira la commande classique en cascade de la MLI et celle à retour d'état. On montrera particulièrement la conception de variation de position et de vitesse a courant continu. Ces variations ont la caractéristique d'absorber un courant ^{du} réseau le plus sinusoïdale possible avec un facteur de puissance coté réseau pratiquement unitaire.

- La vitesse du moteur à courant continu régit normalement dans le cas ou la tension de référence est asservie. *reçoit*
- L'asservissement a tendance à garder les tensions U_{c1} et U_{c2} constantes, réglables et égales et en plus à assurer un facteur de puissance pratiquement unitaire.

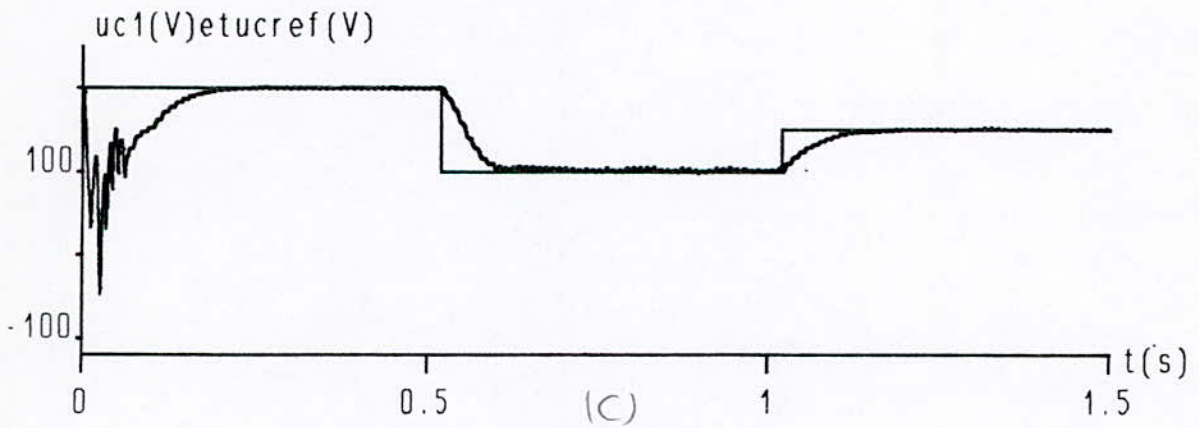
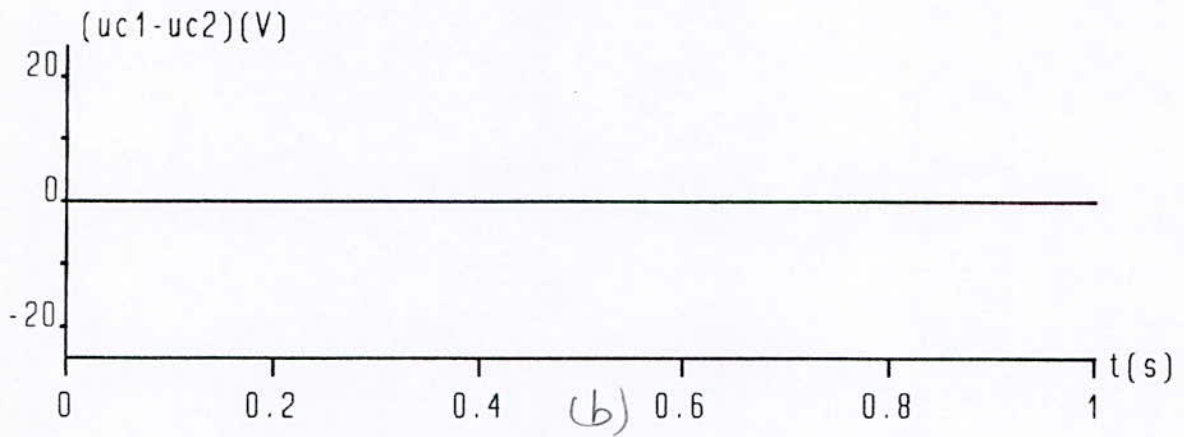
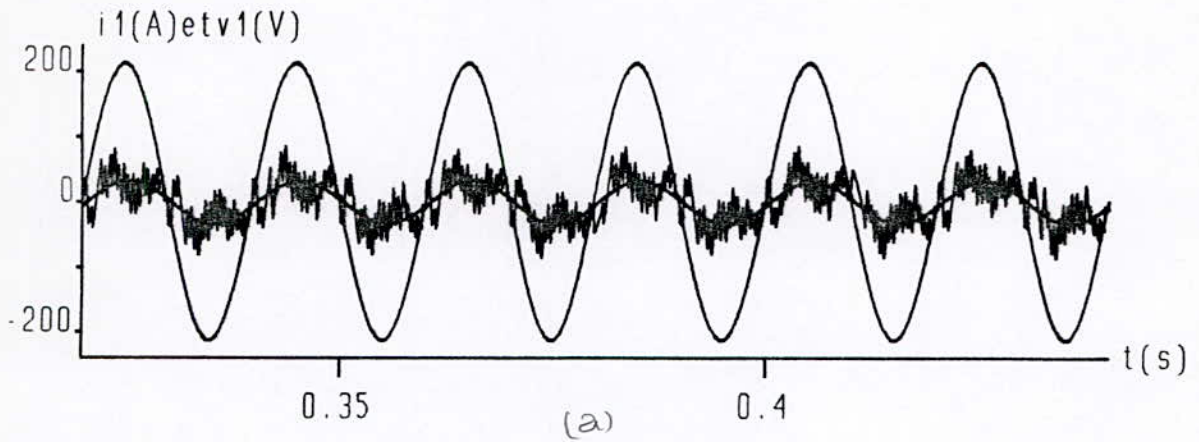
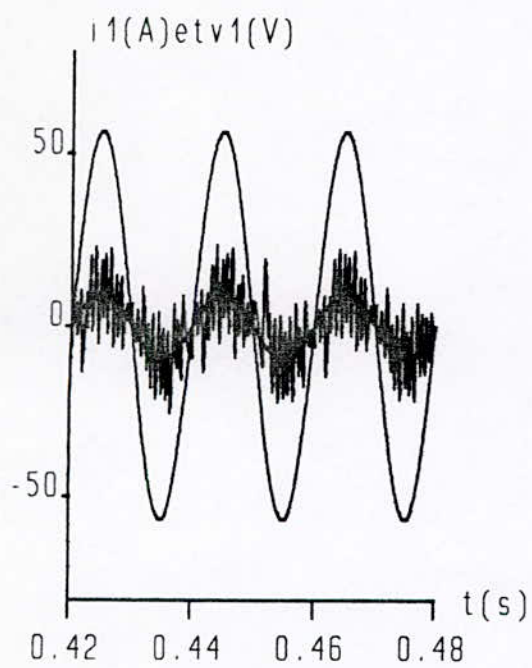
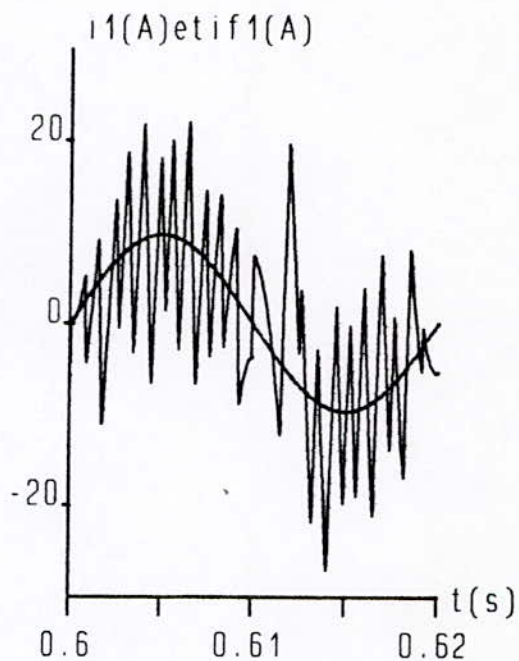


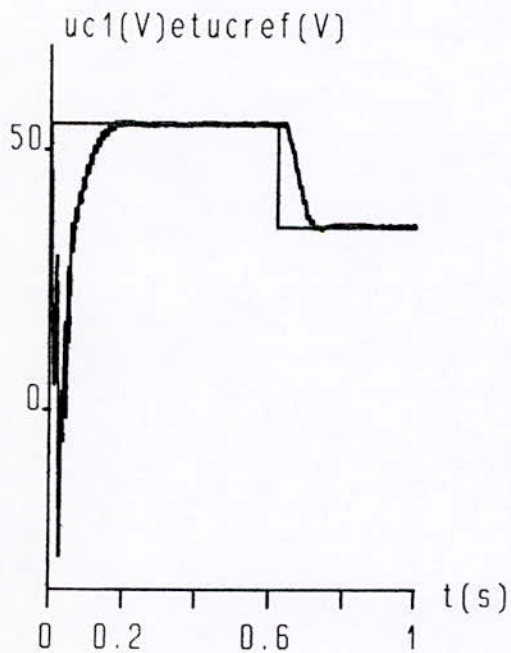
Fig-III-7-* Signaux de l'ensemble reseau monophasé-redresseur asservis alimentant une charge résistive.



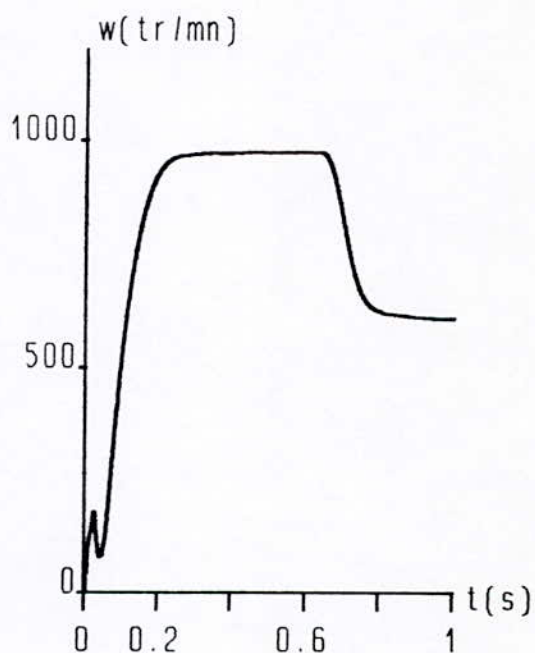
a



b



c



d

Fig-III-8-* Signaux de l'ensemble réseau monophasé-redresseur asservis alimentant un moteur à courant continu.

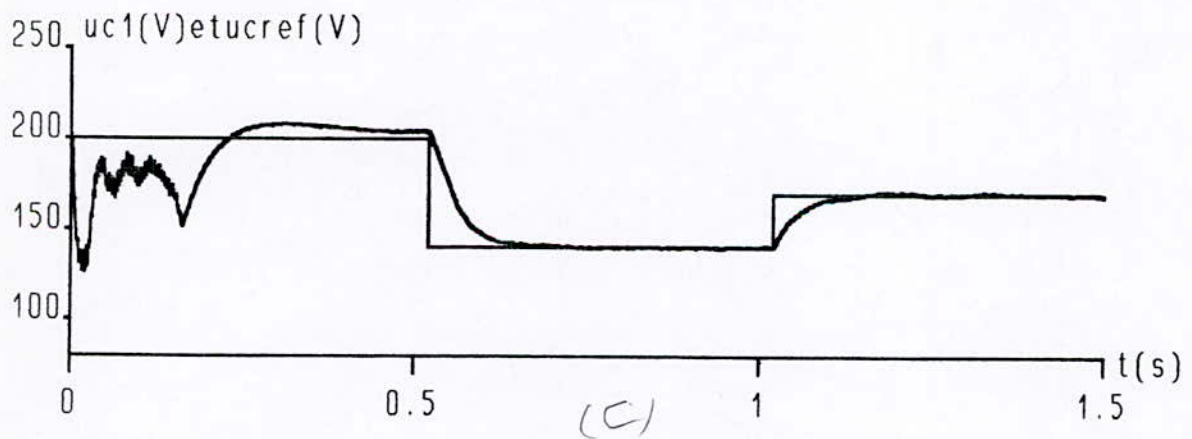
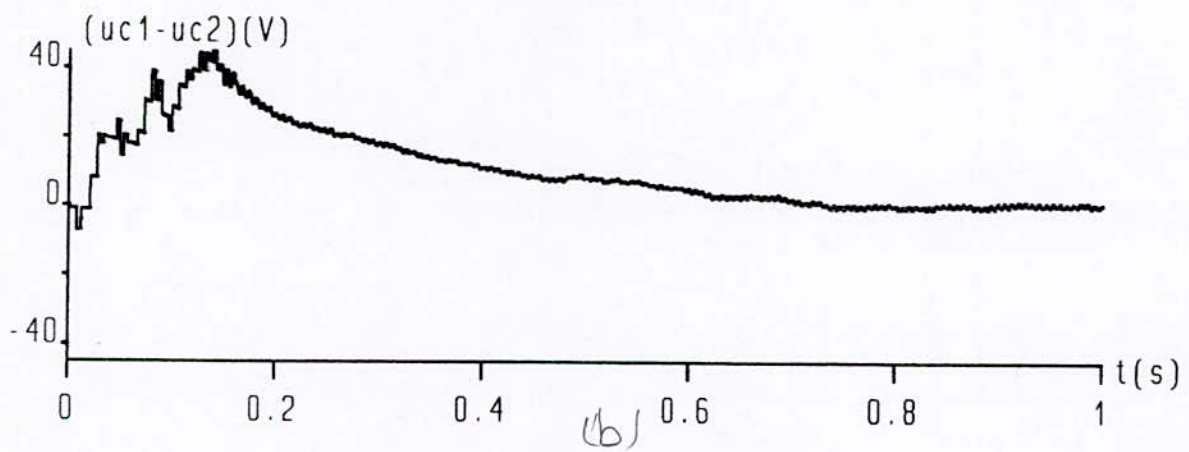
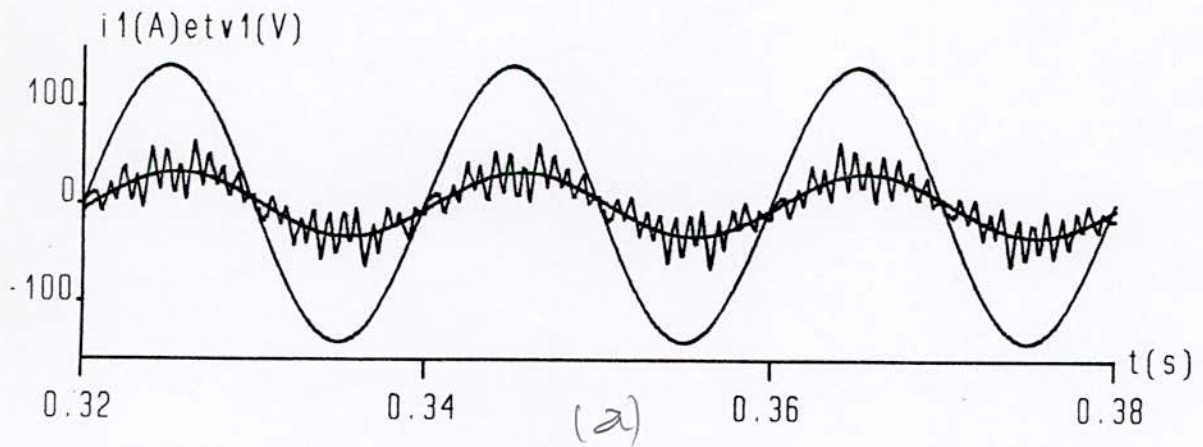
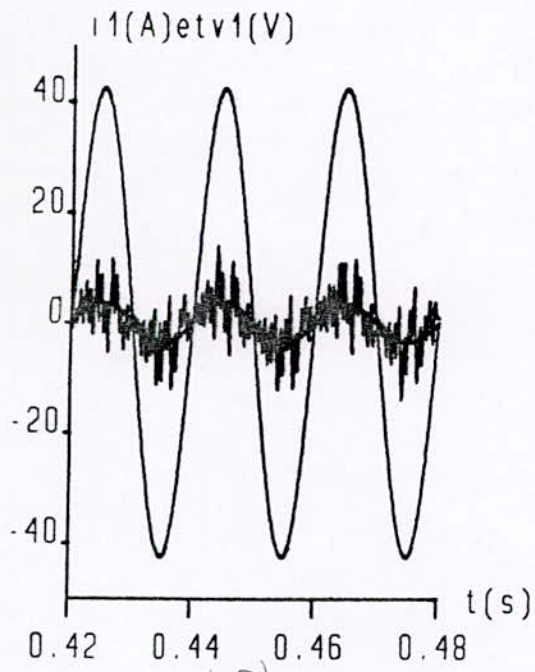
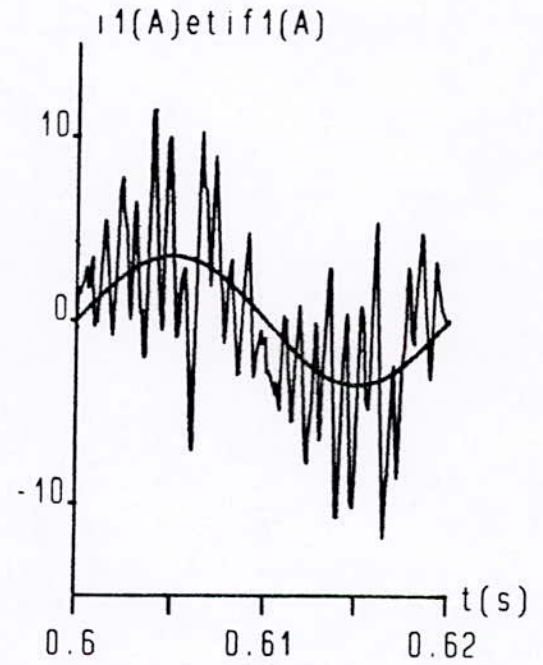


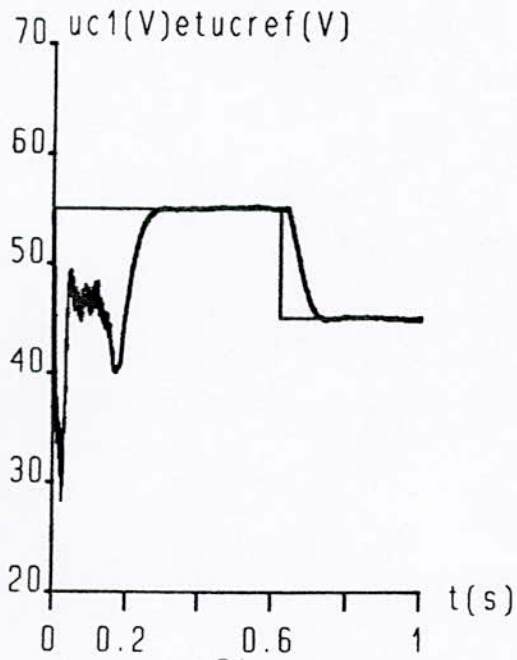
Fig-III-15* Signaux de l'ensemble réseau triphasé-redresseur asservis alimentant une charge résistive.



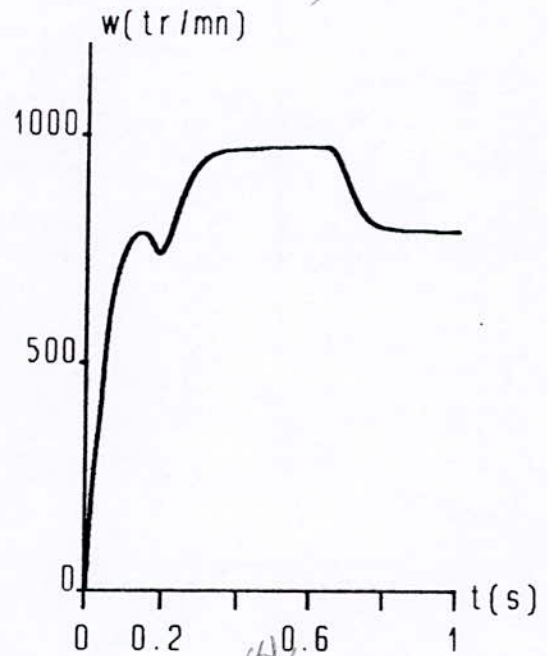
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig-III-16.* Signaux de l'ensemble réseau triphasé-redresseur asservis alimentant un moteur à courant continu.

CHAPITRE IV

REGLAGE PAR RETOUR D'ETAT DE LA MACHINE A COURANT CONTINU ALIMENTEE PAR LE REDRESSEUR A TROIS NIVEAUX

INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents , nous avons considéré la charge comme étant une perturbation intervenant dans le système d'état concernant les capacités, et ainsi dans l'asservissement au chapitre III .

Maintenant nous allons introduire le réglage par retour d'état d'un moteur à courant continu dans le but d'asservir sa vitesse de rotation .

Dans cette période, on va imposer un temps de réponse du moteur très grand devant celui du système (redresseur et réseau) .

On démontrera que l'association des deux réglages donnent des performances plus au moins considérables .

I- Réglage par retour d'état :

le principe général du réglage par retour d'état est présenté dans la figure IV-1 . Le calcul des correcteurs se fait de la façon explicite au document [BUHLER 86] .

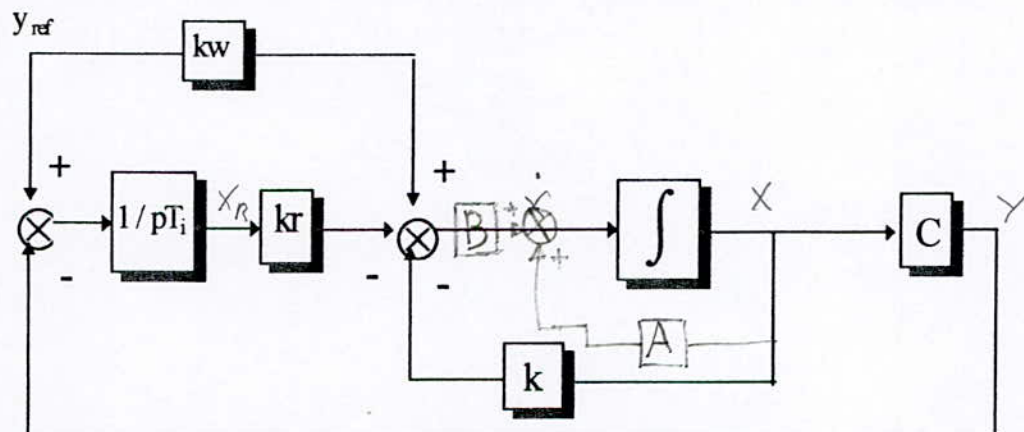


Fig IV 1 Principe du réglage par retour d'état

Après compensation de la constante dominante de notre système qui est du troisième ordre (2 ordres du moteur plus l'ordre du correcteur K_R^o , est après un choix des pôles de notre nouveau système (en boucle fermée). On aboutit aux résultats suivants :

$$K_1 = L_m \cdot (-p_1 - p_2 - p_3 - f_m / J_m) - R_m.$$

$$K_2 = (L_m \cdot J_m \cdot (p_1 \cdot p_2 + p_2 \cdot p_3 + p_1 \cdot p_3) - f_m \cdot (K_1 + R_m)) / H_m - H_m.$$

$$K_r = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot L_m \cdot J_m \cdot T_i / H_m.$$

$$K_w = H_m \cdot K_r / p_4 / T_i.$$

$$p_4 = \max(p_1, p_2, p_3) \text{ c'est le p\^ole qu'on doit compenser.}$$

II- Réglage par retour d'état d'un moteur à courant continu associé à un redresseur asservi monophasé à trois niveaux :

On veut régler la vitesse de rotation du même moteur à la vitesse nominale ,en appliquant l'asservissement du CHAPITRE III à un réseau monophasé de valeur efficace 40 V , $R=0,25$ et $L=1\text{mH}$,les capacités valent 20 mF et les paramètres de la commande triangulo-sinusoïdale sont $m=24$ et $v_{pm}=55\text{V}$, le couple résistant du moteur est 1N.m après calcul des correcteurs on aboutit à : $K_1 \cdot K_2 \cdot K_w \cdot K_r \cdot T_i$.

Les figures (IV-2-*) représentent le comportement du réseau, des capacités et du moteur vis à vis de sa vitesse nominale .

On remarque très bien que toutes les grandeurs suivent leurs références et que le courant est pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau .

On remarque qu'il y a un dépassement de la vitesse et de la tension , il est du au choix des pôles et du couple résistant. Il faut noter que notre système ne peut pas être commandable sauf si la valeur de U_{ref} vérifie la relation entre les tensions dans la maille du filtre d'entrée impliquant la condition ou l'objectif de rendre le facteur de puissance unitaire donc il faut agir sur la valeur initiale de X_r pour avoir une valeur initiale de U_{ref} raisonnable et par suite un système commandable .

III- Réglage par retour d'état d'un moteur à courant continu associé à un redresseur régulé triphasé à trois niveaux :

Comme le monophasé ,il en est de même pour le triphasé ,notre objectif est de régler la vitesse de rotation du moteur en gardant les performances de l'asservissement du redresseur .

Le redresseur triphasé est associé à un réseau dont la valeur efficace de la tension est 30 V ; $m=24$ et $v_{pm}=55\text{V}$ sont les paramètres caractérisant la stratégie de commande utilisée (celle appliquée dans chaque asservissement dans ce document).le moteur est le même avec un couple résistant égale à 1N.m le calcul des correcteur à donné les valeurs suivantes :

$$K_1 = 0.1$$

$$K_2 = 0.0258$$

$$K_w = 0.125$$

$$K_r = 0.12635$$

$$T_1 = 0,1$$

Les figures (IV-3-*) représentent les performances du système du point de vue atteinte des objectifs des deux asservissements .

Ce qui est le cas car la tension u_{c1} suit sa valeur de référence ,ainsi pour la vitesse de rotation du moteur ,elle rejoint sa valeur nominale .

Le courant du réseau est pratiquement sinusoïde ~~est~~ en phase avec la tension du réseau donc il n'y a pratiquement d'énergie réactive échangée avec le réseau .

pas

CONCLUSION :

Avec un asservissement du redresseur à trois niveaux ,on peut assurer des tensions de sortie constantes , égales et réglables ,des courants du réseau pratiquement sinusoïdaux donc des puissances fournies purement actives .

En introduisant le réglage par retour d'état on a amélioré la réponse du moteur à courant continu du point de vue vitesse ,et on a gardé les performances de l'asservissement du redresseur citées auparavant .

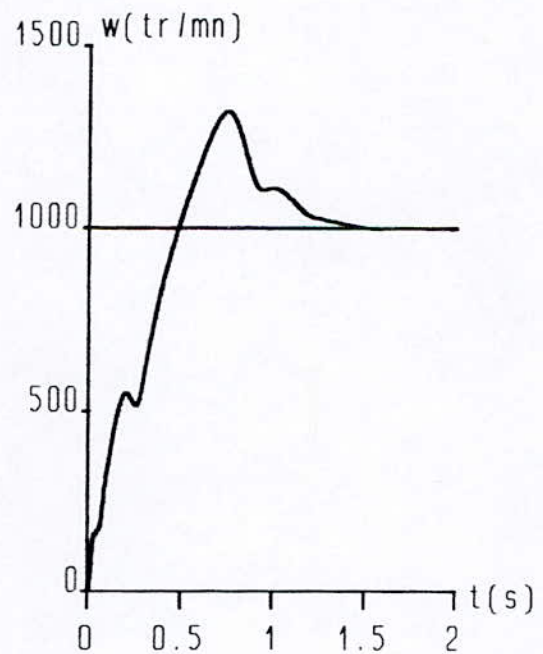
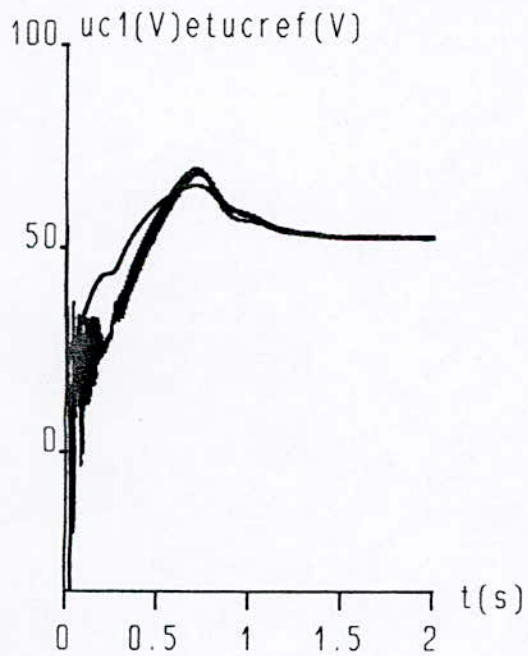
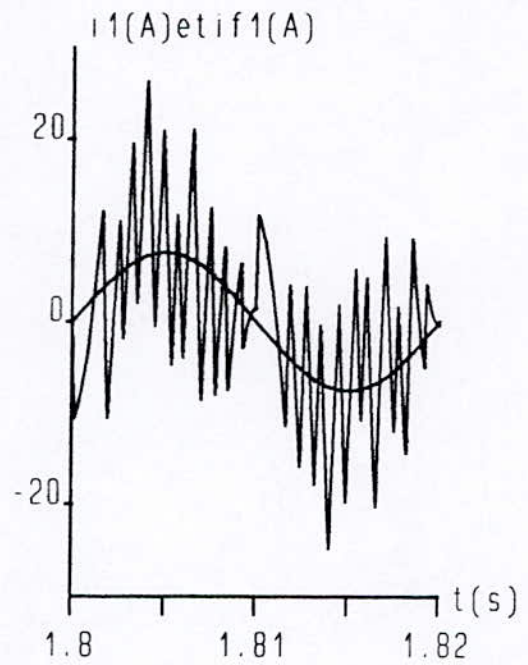
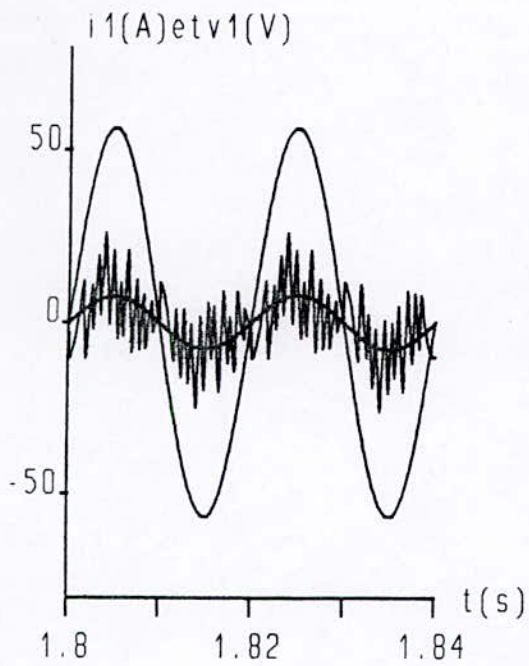


Fig-IV-2-* Signaux de l'ensemble réseau monophasé-redresseur-MCC asservis.

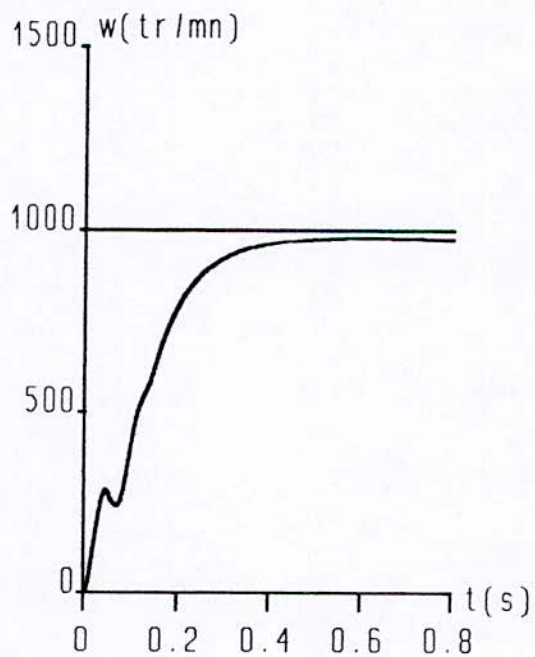
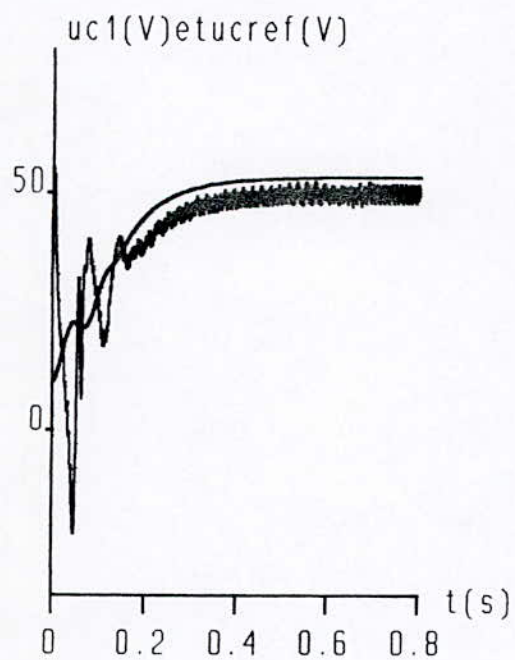
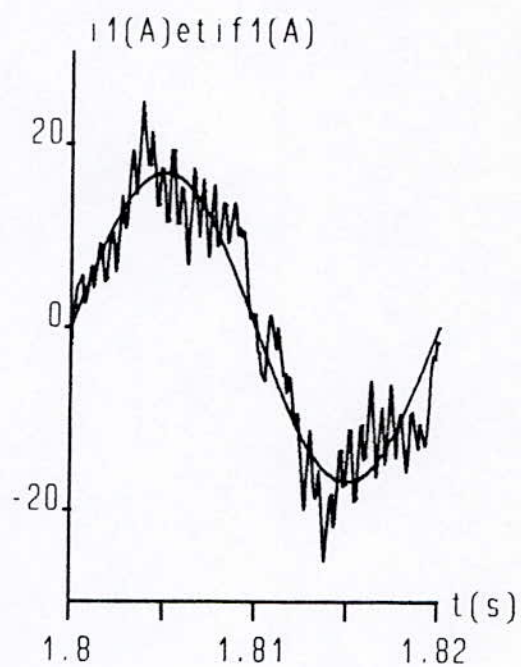
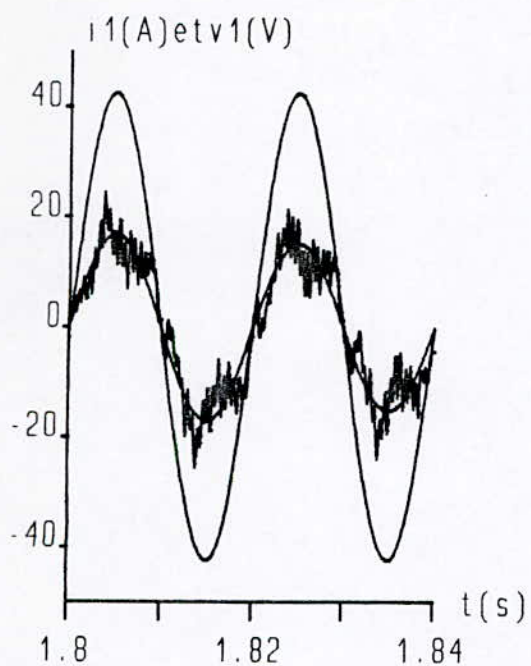


Fig-IV-3-* Signaux de l'ensemble réseau triphasé-redresseur-MCC asservis.

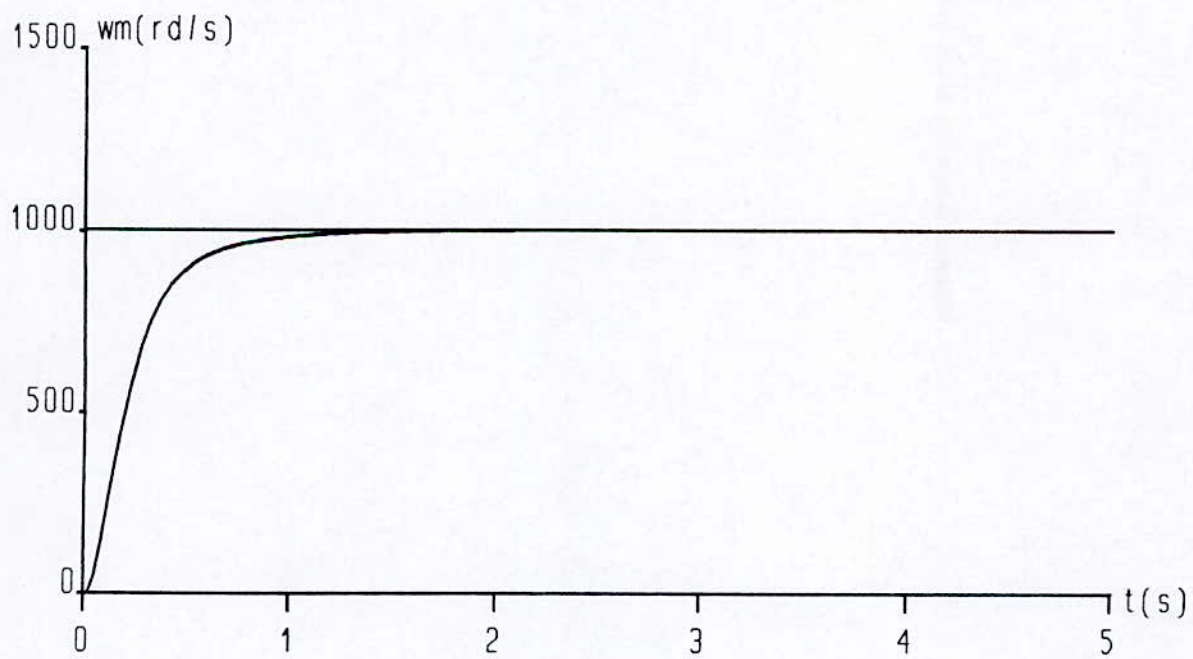
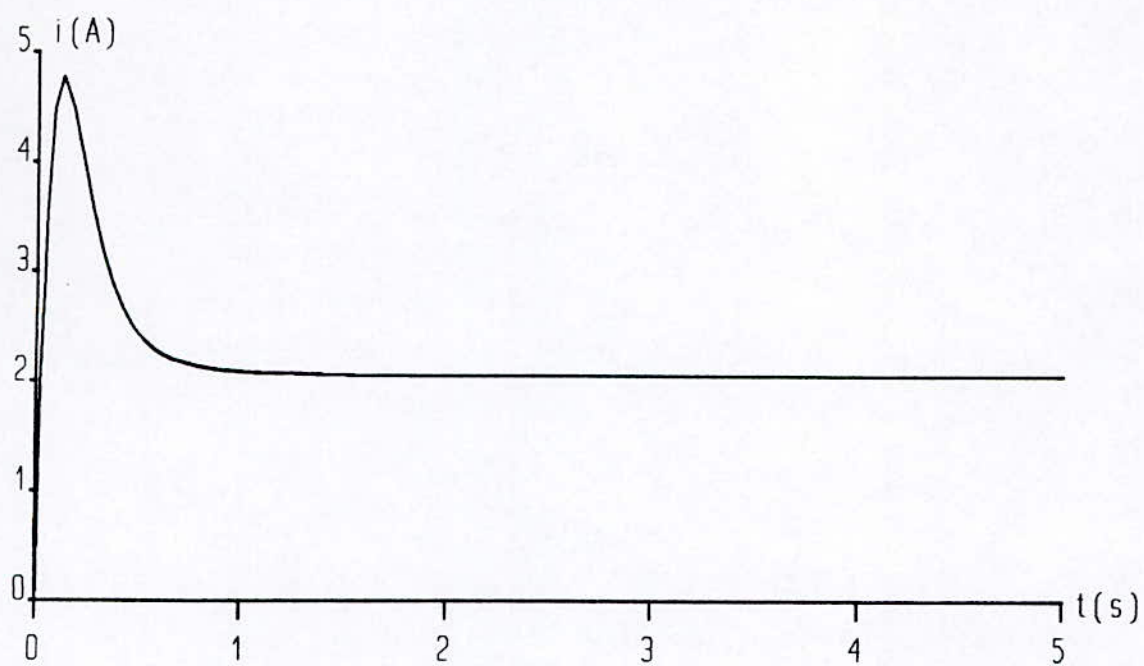


Fig-IV-4-* Réglage par retour d'état d'un moteur à courant continu

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire est l'élaboration des algorithmes d'asservissement des redresseurs multiniveaux à Modulation de Largeur d'Impulsions.

Nous avons commencé par présenter les modèles de connaissance des redresseurs à trois niveaux sans a priori sur leur commande, nous avons défini la notion de fonction de connexion des demi-bras qui permet d'aboutir à des modèles des redresseurs à trois niveaux analogues à ceux à deux niveaux. Cette étude a permis une généralisation des modèles déjà élaborés pour les redresseurs classiques (à deux niveaux).

Le deuxième chapitre a été consacré aux différents algorithmes possibles de l'automate de commande rapprochée des redresseurs à trois niveaux. Nous avons étudié les stratégies suivantes :

- commande par hystérésis en courant.
- commande triangulo-sinusoïdale à une ou deux porteuses à échantillonnage naturel.
- modulation vectorielle type-2.

Toutes ces stratégies peuvent être utilisées dans des asservissements permettant d'avoir un courant i_{d0} du redresseur de valeur moyenne nulle, ce qui permet de réduire le problème du déséquilibre entre les deux tensions de sortie U_{C1} et U_{C2} .

L'étape suivante était, d'asservir les redresseurs à trois niveaux afin d'améliorer les tensions U_{C1} , U_{C2} et d'avoir, pour une stratégie donnée, un meilleur taux d'harmoniques et un facteur de puissance proche de l'unité côté réseau, et également réduire considérablement les capacités C_1 et C_2 nécessaires. Les algorithmes d'asservissement sont utilisables aussi bien pour les redresseurs à MLI à deux niveaux qu'à trois niveaux.

Le dernier chaînon de cette étude est le réglage par retour d'état du moteur à courant continu à excitation séparée, alimenté par un redresseur à trois niveaux monophasé ou triphasé asservis, ainsi nous avons montré la robustesse de cette commande par l'obtention des résultats cités ci-dessous :

- facteur de puissance unitaire coté réseau.
- la vitesse atteint sa valeur de référence.
- la différence U_{C1} et U_{C2} est pratiquement nulle.

Plusieurs travaux restent à effectuer sur les convertisseurs multiniveaux, par exemple :

- généralisation des modèles de connaissances élaborés pour les convertisseurs à trois niveaux aux convertisseurs à cinq, sept niveaux ou plus (multiniveaux)
- recherche d'autres solutions permettant de remédier au problème de fluctuation du point milieu de la source de tension des convertisseurs multiniveaux, en particulier pour le cas du convertisseur à trois niveaux.

ANNEXE I

**PRESENTATION DE LA MACHINE A COURANT
CONTINU**

ANNEXE I

Etant donné qu'on travaille sous la vitesse nominale, on fait une commande à champ constant, d'où l'expression de la force électromotrice E .

$$E = h \cdot \Omega \cdot ?$$

Le système d'état qui représente notre moteur à courant continu est le suivant :

$$di/dt = (U - r \cdot i - E) / l$$

$$d\omega/dt = (h \cdot i - f \cdot \omega - Cr) / j$$

La machine utilisée est celle qui a les caractéristiques suivantes :

$$r = 0.4 \Omega$$

$$l = 0.016 \text{H}$$

$$F = 0.01 \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}$$

$$j = .01 \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$U_n = 110 \text{V}$$

$$U_e = 110 \text{V}$$

$$\Omega_n = 1000 \text{tr/mn}$$

ANNEXE II

**COMMANDABILITE ET COMMANDE
COMPLEMENTAIRE DES ONDULEURS A TROIS
NIVEAUX**

I- Réflexion sur les différentes commandes complémentaires possibles pour les onduleurs à trois niveaux

Soit le bras k d'un onduleur à trois niveaux (Fig.III.3.a). Pour une première vue, l'interrupteur T_{k1} par exemple peut être commandé d'une façon complémentaire avec chacun des trois autres interrupteurs du bras. Ainsi, on remarque que trois commandes complémentaires sont possibles pour chaque bras de l'onduleur à trois niveaux.

Commande n°1:

Soit la commande complémentaire suivante:
$$\begin{cases} B_{k3} = \overline{B_{k1}} \\ B_{k4} = \overline{B_{k2}} \end{cases}$$

Le tableau logique correspondant à cette commande est défini ci-dessous:

B_{k1}	B_{k2}	$B_{k3} = \overline{B_{k1}}$	$B_{k4} = \overline{B_{k2}}$	Tension de sortie du bras k par rapport à M
0	0	1	1	$-U_{c2}$
0	1	1	0	pas connue
1	0	0	1	pas connue
1	1	0	0	U_{c1}

Tableau A2.1

Le tableau A2.1 montre que cette commande complémentaire rend le système pratiquement commandable uniquement en deux niveaux, en interdisant les cas correspondants aux lignes 2 et 3 de ce tableau où la configuration du bras dépend en plus des grandeurs électriques du système (commande interne).

Commande n°2:

Soit la commande complémentaire suivante:
$$\begin{cases} B_{k2} = \overline{B_{k1}} \\ B_{k4} = \overline{B_{k3}} \end{cases}$$

Le tableau logique correspondant à cette commande est donné ci-dessous:

B_{k1}	$B_{k2} = \overline{B_{k1}}$	B_{k3}	$B_{k4} = \overline{B_{k3}}$	Tension de sortie du bras k par rapport à M
0	1	0	1	pas connue
0	1	1	0	$V=0$ ou $i=0$ (pas connue)
1	0	0	1	$V=0$ ou $i=0$ (pas connue)
1	0	1	0	$V=0$

Tableau A2.2

Le tableau A2.2 montre que cette commande complémentaire rend le système pratiquement incommandable. Pour trois de ses cas possibles, on ne connaît pas au préalable la tension qu'aura le bras puisque sa configuration dépend, dans ces cas, en plus des grandeurs électriques du système (commande interne).

Commande n°3:

Soit la commande complémentaire suivante:
$$\begin{cases} B_{k4} = \overline{B_{k1}} \\ B_{k3} = \overline{B_{k2}} \end{cases}$$

Le tableau logique associé à cette commande est montré ci-dessous:

B_{k1}	B_{k2}	$B_{k3} = \overline{B_{k2}}$	$B_{k4} = \overline{B_{k1}}$	Tension de sortie du bras k par rapport à M
0	0	1	1	-Uc2
0	1	0	1	pas connue
1	0	1	0	V=0
1	1	0	0	Uc1

Tableau A2.3

Ce tableau A2.3 montre que cette commande complémentaire rend le système commandable en trois niveaux, en interdisant le cas correspondant à la ligne 2 du tableau où la configuration du bras dépend en plus des grandeurs électriques du système (commande interne).

Ainsi, cette analyse des trois cas de commande complémentaire possibles, montre que seule la commande n°3 permet d'exploiter les trois niveaux de tension de sortie possibles pour un bras (Uc1,0,-Uc1). Afin d'avoir la commandabilité totale des onduleurs à trois niveaux, on doit éliminer le cas correspondant à la ligne 2 du tableau A2.3.

On peut donc conclure que la commande n°3, utilisée lors de l'élaboration des modèles de commande des onduleurs multiniveaux (chapitre III), est la seule commande complémentaire possible pour un fonctionnement en mode commandable des onduleurs à trois niveaux.

Pour les différentes stratégies de commande des onduleurs à trois niveaux, on utilise cette commande complémentaire en éliminant le cas de la ligne 2 du tableau A2.3 où $B_{k1} = 0, B_{k2} = 1, B_{k3} = 0, B_{k4} = 1$. Donc lorsqu'on parlera de commande complémentaire pour l'onduleur à trois niveaux, on sous-entendra toujours ce cas de commande.

II- Domaine de définition des fonctions de connexion des demi-bras dans le cas de la commande complémentaire:

Dans le chapitre III, on a défini les fonctions de connexion des demi-bras pour un bras k comme suit:

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases}$$

Le tableau A2.4 montre les valeurs prises par les fonctions de connexion des demi-bras pour les différentes valeurs des fonctions de connexion des interrupteurs .

F_{k1}	F_{k2}	$F_{k3} = \overline{F_{k2}}$	$F_{k4} = \overline{F_{k1}}$	F_{k1}^b	F_{k0}^b	Remarques
0	0	1	1	0	1	Permis
0	1	0	1	0	0	Interdit
1	0	1	0	0	0	Permis
1	1	0	0	1	0	Permis

Tableau A2.4

ANNEXE III

LA COMMANDE TRIANGULO-SINUSOIDALE A UNE OU DEUX PORTEUSES DES ONDULEURS A TROIS NIVEAUX

I- La commande triangulo-sinusoidale avec une seule porteuse unipolaire

On explique dans cette partie le principe de cette stratégie en se basant sur une phase k de l'onduleur à trois niveaux (diphase ou triphase). L'équation de la porteuse utilisée (Fig.A3.1) est définie par le système suivant:

$$\begin{cases} 0 \leq t \leq \frac{T_h}{2} \Rightarrow U_p = \frac{2 V_e}{T_h} \cdot t \\ \frac{T_h}{2} < t \leq T_h \Rightarrow U_p = V_e - \frac{2 V_e}{T_h} \cdot \left(t - \frac{T_h}{2} \right) \end{cases} \quad (\text{A3.1})$$

L'algorithme de cette stratégie est :

$$\begin{cases} |V_{sref}[k]| \geq U_p \Rightarrow V_{kM} = \text{signe}(V_{sref}[k]) \cdot V_e \\ |V_{sref}[k]| < U_p \Rightarrow V_{kM} = 0 \end{cases} \quad (\text{A3.2})$$

V_{kM} étant la tension de sortie de la phase k de l'onduleur par rapport au point milieu M de la source de tension d'entrée.

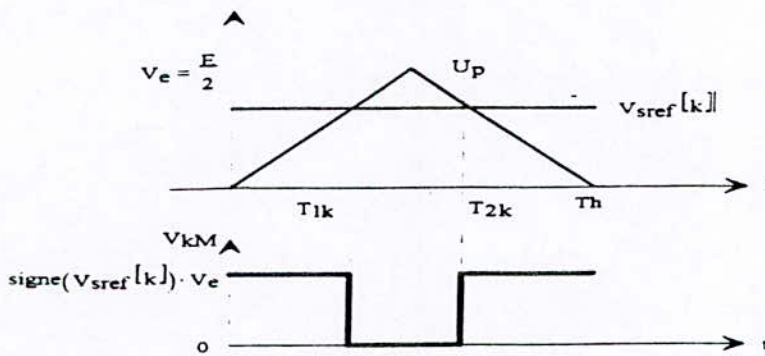


Fig.A3.1

I-1-Calcul des instants de commutation:

Les instants de commutation T_{1k} et T_{2k} correspondent respectivement à la première et la deuxième intersection de la porteuse U_p avec la valeur absolue de la tension de référence $|V_{sref}[k]|$. Ces instants sont donnés par le système (A3.3) ci dessous.

$$\begin{cases} T_{1k} = \frac{T_h}{2} \cdot \frac{|V_{sref}[k]|}{V_e} \\ T_{2k} = \frac{T_h}{2} \cdot \frac{2 V_e - |V_{sref}[k]|}{V_e} \end{cases} \quad (\text{A3.3})$$

I-2- La valeur moyenne instantanée du vecteur de tension de sortie de l'onduleur

La valeur moyenne de la tension V_{kM} est donnée par la relation suivante:

$$\langle V_{kM} \rangle = \frac{T_{1k} + (T_h - T_{2k})}{T_h} \cdot \text{signe}(V_{sref}[k]) \cdot V_e \quad (A3.4)$$

En associant les relations (A3.3) et (A3.4), on aboutit à

$$\langle V_{kM} \rangle = \text{signe}(V_{sref}[k]) \cdot |V_{sref}[k]| = V_{sref}[k] \quad (A3.5)$$

Ainsi, cette équation (A3.5) montre que cette stratégie triangulo-sinusoidale à une seule porteuse permet bien de suivre les tensions de référence. L'amplitude des tensions de référence est limitée par celle de la porteuse $\left(\frac{E}{2}\right)$. La zone linéaire de la caractéristique de réglage de cette stratégie est comprise entre 0 et $\frac{E}{2}$.

I-3- La modulation algébrique utilisant cette stratégie

Pour la modulation calculée, et afin d'avoir un meilleur taux d'harmonique, on centre l'impulsion d'amplitude $\pm \frac{E}{2}$ sur la période T_h . La durée Δt de cette impulsion est

$$\Delta t = T_{1k} + (T_h - T_{2k}) = T_h \cdot \frac{|V_{sref}[k]|}{V_e} \quad (A3.6)$$

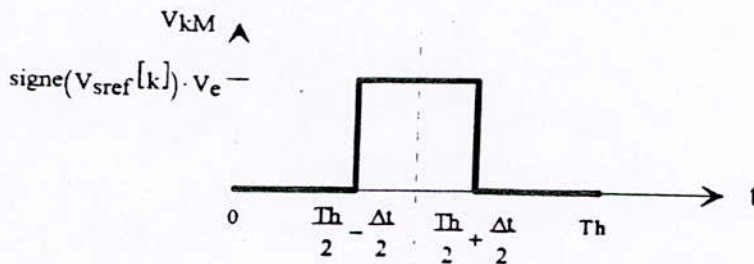


Fig.A3.2

II- La stratégie triangulo-sinusoidale utilisant deux porteuses en dents de scie unipolaires

Cette stratégie exploite le fait qu'un onduleur à trois niveaux est équivalent à deux onduleurs à deux niveaux en série commandés chacun avec une porteuse déphasée de 180° (c'est à dire T_h

$\frac{T_h}{2}$) par rapport à l'autre porteuse. Cette stratégie utilise les deux références intermédiaires suivantes:

$$\begin{cases} V_{\text{ref}1}[k] = \frac{V_{\text{sref}}[k]}{2} \\ V_{\text{ref}0}[k] = -\frac{V_{\text{sref}}[k]}{2} \end{cases} \quad (\text{A3.7})$$

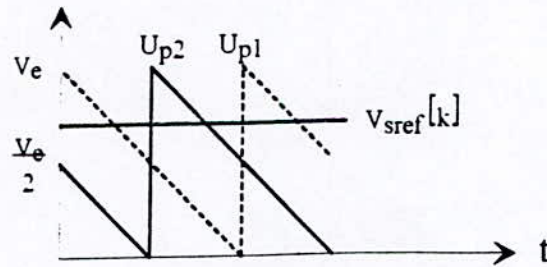


Fig.A3.3

II-1- Première porteuse U_{p1}

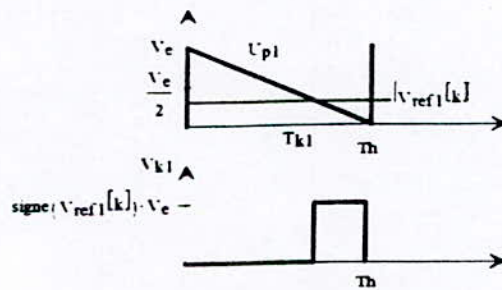


Fig.A3.4

T_{k1} est l'instant d'intersection de la porteuse U_{p1} avec la tension $|V_{\text{ref}1}[k]|$. Il est donné par

la relation suivante:

$$T_{k1} = Th \cdot \left(1 - \frac{|V_{\text{ref}1}[k]|}{V_e} \right) \quad (\text{A3.8})$$

L'algorithme de cette stratégie permet d'écrire:

$$\begin{cases} t \in [T_{k1}, Th] \Rightarrow V_{k1} = V_e \cdot \text{signe}(V_{\text{ref}1}[k]) \\ t \in [0, T_{k1}] \Rightarrow V_{k1} = 0 \end{cases} \quad (\text{A3.9})$$

La valeur moyenne instantannée de la tension V_{k1} sur une période Th de la porteuse est

$$\langle V_{k1} \rangle = \frac{V_e \cdot \text{signe}(V_{\text{ref}1}[k])}{Th} \cdot \left\{ Th - \left(Th - Th \cdot \frac{|V_{\text{ref}1}[k]|}{V_e} \right) \right\} = V_{\text{ref}1}[k] \quad (\text{A3.10})$$

II-2- Deuxième porteuse U_{p2}

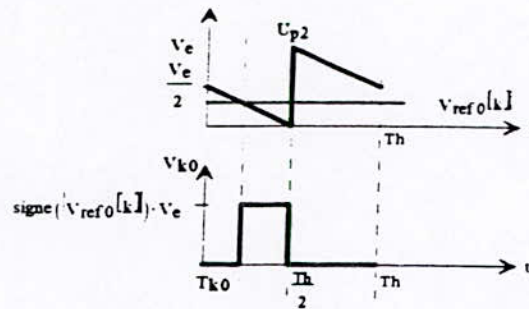


Fig.A3.5

T_{k0} est l'instant d'intersection de la porteuse U_{p2} avec la tension $|V_{ref0}[k]|$. Il est donné

par la relation suivante:

$$T_{k0} = Th \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{|V_{ref0}[k]|}{V_e} \right) \quad (A3.11)$$

L'algorithme de cette stratégie permet d'écrire:

$$\begin{cases} t \in \left[T_{k0}, \frac{Th}{2} \right] \Rightarrow V_{k0} = V_e \cdot \text{signe}(V_{ref0}[k]) \\ t \in \left[0, T_{k0} \right] \cup \left[\frac{Th}{2}, Th \right] \Rightarrow V_{k0} = 0 \end{cases} \quad (A3.12)$$

La valeur moyenne instantannée de la tension V_{k0} sur une période Th de la porteuse est

$$\langle V_{k0} \rangle = \frac{V_e \cdot \text{signe}(V_{ref0}[k])}{Th} \cdot \left\{ \frac{Th}{2} - \left(\frac{Th}{2} - Th \cdot \frac{|V_{ref0}[k]|}{V_e} \right) \right\} = V_{ref0}[k] \quad (A3.13)$$

II-3- La tension de sortie de l'onduleur à trois niveaux

La tension V_{k2} à avoir à la sortie de l'onduleur à trois niveaux est $V_{k2} = V_{k1} - V_{k0}$

Du point de vue moyenne instantannée, et en utilisant les relations (A3.7), (A3.10) et (A3.13) on aboutit à :

$$\langle V_{k2} \rangle = \langle V_{k1} \rangle - \langle V_{k0} \rangle \Rightarrow \langle V_{k2} \rangle = V_{ref1}[k] - V_{ref0}[k] \Rightarrow \langle V_{k2} \rangle = V_{sref}[k] \quad (A3.14)$$

Cette relation montre bien que cette stratégie permet à un onduleur à trois niveaux de suivre le vecteur de tension de référence V_{sref} .

BIBLIOGRAPHIE

[Bauer 89]

F.Bauer, H.D.Heining , « *Quick response vector control for a high power threelevel drive system.* », EPM'89, ALLEMAGNE 1989.

[Ben Ammar 93]

F.Ben Ammar, « *Variateurs de vitesse de hautes performances pour machine asynchrone de grande puissance.* », Thèse de Doctorat INP Toulouse, 1993.

[Ben Romdhane 94.1]

Y.B.Ben Romdhane, E.M.Berkouk, G.Manesse, « *PWM control of single phase converter with five-level voltage feeding inductive load.* », IASTED MIC'94, SUISSE 1994.

[Berkouk 94.1]

E.M.Berkouk, Y.B.Romdhane, A.L.EL Idrissi, G.Manesse, « *New control strategy of three-voltage AC regulator in frequency division. Application to starting control of three-phase induction machine.* », IASTED MIC'94, SUISSE 1994.

[Berkouk 94.2]

E.M.Berkouk, Y.B.Romdhane, A.L.EL Idrissi, G.Manesse, « *The principle of a frequency division. Using AC regulators. Application to the speed control of single phase and three phase induction motors in open end close loops.* », EPE'94, SUISSE 1994.

[Berkouk 94.3]

E.M.Berkouk, Y.B.Romdhane, A.L.EL Idrissi, G.Manesse, « *Etat de l'art de la division de fréquence par gradateurs. Généralisation et application au contrôle de la vitesse des machines asynchrones monophasées et triphasées.* », CEA'94, ALGERIE 1994.

[Berkouk 95]

E.M.Berkouk, « *Contribution a la conduite des machines asynchrones monophasées et triphasées alimentées par des convertisseurs directs et indirects. Application aux gradateurs et onduleurs multiniveaux* », Thèse de Doctorat CNAM Paris, 1995.

[Bühler 86]

H.Bühler, « *Réglages échantillonnés.* », Vol 1 et 2, Presses Polytechniques Romandes, 1986.

[Bühler 87]

H.Bühler, « *Electronique de réglage et de commande.* », Dunod, Paris, 1986.

[Capolino 87]

G.Capolino, « *Contribution à la modélisation et à la simulation des machines asynchrones monophasée à condensateurs.* », Thèse de Doctorat ès sciences, IMPG, Septembre 1987.

[Faucher 93]

J.Faucher, « *Quelques aspects de la modulation de largeur d'impulsions.* », France, 1993.

[Foch 93]

H.Foche, « *Meynard imbricated cells multi-level voltage source inverters for high voltage applications.* », EPE Journal, Vol 3, N°2, JUIN 1993.

* **[Gillaud 92]**

X.Gillaud, « *Sur la modélisation et la commande des redresseurs à courant à interrupteurs bicommandables.* », Thèse de Doctorat Lille, 1992.

[Gillaud 94]

X.Gillaud, J.P.Hautier, « *Modèle de commande d'un convertisseur monophasé.* », Journée SEE, Lille 1994.

[Hasnaoui 85]

O.Hasnaoui, G.Capolino, « *Survey of PWM techniques for single phase transistor inverters.* », EPE'85, BELGIQUE 1985.

[Hautire 84]

J.P.Hautier, « *Sur la description fonctionnelle et la simulation numérique d'un onduleur à transistors. Application au contrôle de la dynamique d'une machine asynchrone.* », Thèse de Docteur-Ingénieur, Université des Sciences et Techniques, Lille 1984.

* **[Hujeux 92]**

J.A.Hujeux, « *Conception et réalisation d'un redresseur à modulation de largeurs d'impulsion.* », Mémoire CNAM, Lille 1992.

[Kulkarny 87]

A.B.kulkarny, J.W.Dixon, M.Nishimoto, B.Ooi, « *Transient tests on voltage-regulated-controlled-current PWM converter.* », IEEE trans on Industrial Electronics, Vol IE 34 n°3, Aout 1987.

[Marseille 87]

P.Marseille, « *Modèle numérique pour l'étude du comportement transitoire des onduleurs à transistors.* », Rapport de DEA, USTLFA, Lille 1987.

[Marseille 92]

P.Marseille, « *Modèles pour onduleurs en pont monophasés et triphasés.* », Journées EEA-Electrotechnique, CNAM Paris 1992.

* **[Plateaux 94]**

J.P.Plateaux, « *Sur la conception et la réalisation d'un redresseur triphasé à modulation de largeur d'impulsions à faible pollution harmonique.* », Mémoire CNAM, Paris 1994.

[Rabbouch 93]

F.Rabbouch, « *Modélisation des convertisseurs en pont bidirectionnels en courant. Applications au redressement et au filtrage.* », Thèse de Doctorat, Paris VI, Paris 1993.

[Rioula 93]

P.Rioula, « *Modélisation et commande d'un redresseur à MLI alimenté par un réseau déséquilibré.* », Thèse de Doctorat, ENS Cachan 1993.

[Seguier 89]

G.Seguier, F.Labrique, « *Les convertisseurs de l'électronique de puissance. Tome 4 : la conversion continu-alternatif* », Ed Lavoisier Tec & Doc, 1989.

[Seixas 88]

P.Seixas, « *Commande numérique d'une machine synchrone autopilotée.* », Thèse de Doctorat INP Toulouse, 1988.

[Yao 94]

K.P.Yao, « *Contribution à la modélisation et la simulation automatique des systèmes électrotechniques. Application à la conception d'un logiciel évolutif (SIPNET)* », Thèse de Doctorat, Paris VI, Paris 1994.