

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

9/94

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT *Genie Electrique*

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Etude comparative entre l'alimentation en courant
et l'alimentation en tension d'une machine
synchrone autopilotée.*

Proposé par :

M^r A. MAAZI
M^r R. IBTIOUEN

Etudié par :

N. CHOUAI
K. LAYADI

Dirigé par

M^r A. MAAZI
M^r R. IBTIOUEN

PROMOTION

juin 1994

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT *Genie Electrique*

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Étude comparative entre l'alimentation
en courant et l'alimentation en tension
d'une machine synchrone autoexcitée*

Proposé par :

M^r A. MAAZI
M^r R. IBTIOUEN

Étudié par :

N. CHOUAÏ
K. LAYADI

Dirigé par

M^r A. MAAZI
M^r R. IBTIOUEN

PROMOTION

Juin 1994



SOMMAIRE :

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE - I - PRESENTATION DE LA MACHINE SYNCHRONE AUTOPILOTEE	
I - 1 - Analogie avec la machine à courant continu	3
I - 2 - Description de la machine synchrone autopilotée	4
I - 3 - Commutation électrique	
I - 3 - 1 - Commutation de courant	5
I - 3 - 2 - Commutation de tension	5
I - 3 - 3 - Comparaison des deux types de commutations	6
I - 4 - Types d'alimentation	7
I - 5 - Convertisseur de fréquence	9
I - 5 - 1 - Cas d'un onduleur de courant	9
I - 5 - 2 - Cas d'un onduleur de tension	11
I - 6 - Etude de la machine synchrone autopilotée	12
I - 6 - 1 - Les stratégies de commande	15
I - 6 - 2 - Freinage et réversibilité	18
I - 6 - 3 - Principe de fonctionnement	19
CHAPITRE - II - CAPTEUR DE POSITION	
II - 1 - Capteur de position	22
II - 1 - 1 - Position du capteur de position / machine synchrone	24
II - 2 - Commande	24
II - 2 - 1 - Signaux délivrés par le capteur	24
CHAPITRE - III - PRINCIPE DE DUALITE	
III - 1 - Types de dipôles	30
III - 1 - 1 - Dipôles courants	30
III - 1 - 2 - Dipôles tensions	31
III - 2 - Association des dipôles	31

III - 3 - Dipôles réels	32
III - 4 - Conclusion	34

CHAPITRE - IV - ETUDE DE LA COMMUTATION ET SES CONSEQUENCES

IV 1 - Etude de la commutation	36
IV - 1 - 1 - Phénomène d'empiètement	36
IV - 2 - Tension continue pendant l'empiètement	38
IV - 3 - Influence d'empiètement sur les courants	38
IV - 4 - Influence d'empiètement sur les tensions de la machine	38
IV - 5 - Fonctionnement de l'onduleur	39
IV - 6 - Autres conséquences du phénomène d'empiètement	41
IV - 7 - Démarrage et commutation aux basses vitesses	41
IV - 7 - 1 - Commutation forcée par des circuits auxiliaires	42
IV - 7 - 2 - principe de démarrage sans thyristor auxillaire	43
IV - 7 - 3 - Principe de démarrage avec thyristor de roue libre	44
IV - 8 - Déplacement des flux statorique et rotorique lors d'une commutation	44

CHAPITRE - V - INFLUENCE DES PARAMETRES DE LA MACHINE SUR LA COMMUTATION

V - 1 - Détermination des réactances subtransitoires	54
V - 2 - Choix du type de bobinage	59
V - 2 - 1 - Bobinage à une couche à pas diamétral	59
V - 2 - 2 - Bobinage à une couche à pas raccourci	61
V - 2 - 3 - Bobinage à deux couches	62
V - 3 - Choix du type d'encoche	62
V - 4 - Influence du raccourcissement	65
V - 5 - perméance des parties frontales	66
V - 6 - Influence du nombre de paires de pôles	67
V - 7 - Influence du nombre d'encoche par pôle et par phase	67
V - 8 - Influence des dimensions d'encoche	67

V - 9 - Influence du pas de bobinage	67
V -10 - Influence de l'épaisseur de l'entrefer	68
V -11 - Influence du diamètre de la machine	68
V -12 - Influence de la longueur de la machine	68
V -13 - Conclusion	68
CONCLUSION GENERALE	77
BIBLIOGRAPHIE	78

المدرسة الوطنية المتعددة الفتيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEDICACES

Nous dedions ce travail à :

***nos parents
nos freres et soeurs
tous nos amies***

N.C ETK.L

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

REMERCIEMENTS -

REMERCIEMENTS

Nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a aidé à terminer ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à messieurs A. MAAZI et R. IBTIOUEN d'avoir proposé et dirigé ce travail et pour tous les conseils qu'ils nous ont prodigués.

Nos remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.

Nous souhaitons ainsi que Messieurs M.SAMET et M.OSMANI trouvent ici l'expression de notre reconnaissance.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE :

L'emploi des machines à courant continu présente des limitations provoquées par la présence du collecteur mécanique, notamment dans les environnements explosifs, corrosifs et poussiéreux.

En plus l'usure des balais et du collecteur nécessite un niveau d'entretien élevé.

L'utilisation du moteur synchrone autopiloté alimenté en courant se révèle très intéressante pour la réalisation d'entraînement de forte puissance et de grande vitesse qu'on ne peut réaliser avec des machines à courant continu.

Le moteur asynchrone est généralement employé pour la basse et moyenne puissance à cause de sa robustesse mécanique et de son coût réduit.

Par contre, le moteur synchrone présente le grand avantage par la simplicité du convertisseur (onduleur de courant en commutation naturelle) qui l'alimente, en plus de son rendement et de son facteur de puissance élevé.

Actuellement, il y a aussi un grand intérêt à utiliser les moteurs synchrones à aimants permanents (alimentés en tension), dans les entraînements à vitesse variable pour des faibles puissances.

Ces types d'entraînements ont été déjà implantés avec succès dans plusieurs applications qui vont des voitures électriques aux machines outils et aux actionneurs de robotique.

Ce travail a pour but d'établir un cahier de charge contenant des caractéristiques de paramètres de la machines selon qu'elle doit être alimentée en courant ou en tension.

Le premier chapitre est consacré à la description des montages étudiés.

Le second est une brève présentation du capteur de position.

Le troisième donne un aperçu sur le principe de dualité.

Le quatrième est une étude de la commutation et son influence sur les performances du convertisseur électro-mécanique.

Le dernier chapitre présente les effets de certains paramètres de la machine sur l'angle d'empiètement.

CHAPITRE I

PRESENTATION DE LA MACHINE SYNCHROME AUTOPILOTEE

I.1 -ANALOGIE AVEC LA MACHINE A COURANT CONTINU :

L'autopilotage de la machine synchrone et la commande du couple à vitesse variable permettent d'obtenir des fonctionnements analogues à ceux de la machine à courant continu avec tous ses avantages spécifiques.

Les diverses fonctions assumées par le collecteur de cette dernière sont à l'origine de ses performances à vitesse variable.

Dans une machine à courant continu, le collecteur mécanique assure la fonction du changement de fréquence de manière à maintenir l'égalité des fréquence de rotation mécanique et des courants de l'induit. (aux paires de pôles près).

Il assure deux fonctions : conversion de la fréquence de la source en fréquence des courants d'induit et asservissement entre les fréquences du champ induit et du champ inducteur.[6]

Le dispositif électronique qui remplacera l'ensemble collecteur-balais de façon équivalente, devra remplir les conditions suivantes :

- Alimentation des phases dans l'induit de la machine à une vitesse asservie à la vitesse de rotation,
- Détection de la position relative du rotor et du stator, de manière à imposer la détection de la f.m.m. de réaction d'induit par rapport à celle du flux Inducteur,
- Commutation des grandeurs électriques aux bornes des enroulements de la machine.[9]

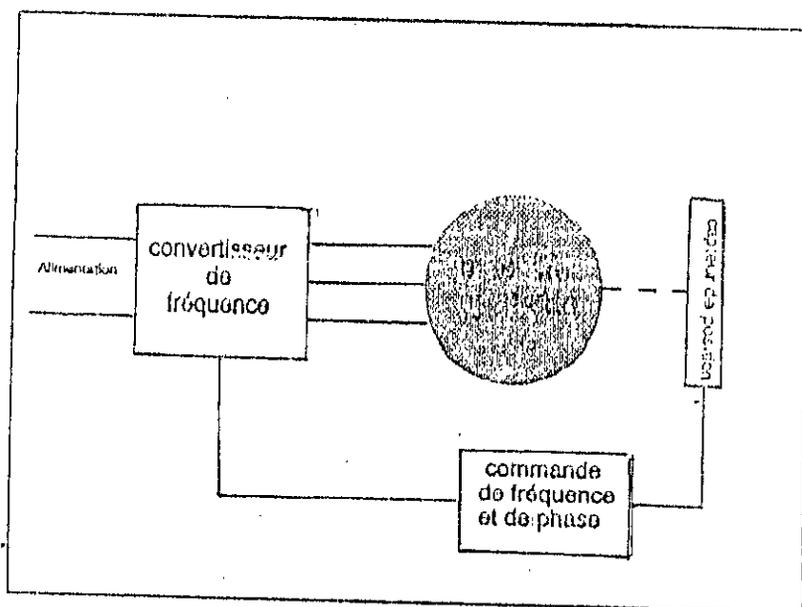
Cet organe statique appelé collecteur électronique est constitué d'un dispositif de détection de la position du rotor, qui permet d'assurer la fonction de détection du collecteur mécanique, associé à un dispositif déphaseur, s'il est nécessaire de faire varier le déphasage des f.m.m., et à un convertisseur statique qui assure la commutation des grandeurs électriques aux bornes de l'induit.

I-2-DESCRIPTION DE LA MACHINE SYNCHROME AUTOPILOTEE :

La machine synchrone autopilotée se compose d'une machine synchrone, d'un capteur de position et d'un convertisseur électrique.

La machine synchrone est alimentée par un convertisseur de fréquence constitué de deux montages triphasés en pont à semi-conducteurs, couplés en cascade par un circuit intermédiaire à tension, ou à courant continu.

Les signaux issus du capteur sont traités et aiguillés vers les semi-conducteurs commandés du pont coté machine par un bloc logique.



Fig(1.1): Schéma de principe

I-3-COMMUTATION ELECTRONIQUE :

Le collecteur électronique à différentes structures :

- Commutateur de courant qui assure la commutation d'un courant ,
- Onduleur de tension qui assure la commutation de tension.

I-3-1- Commutateur de courant :

L'alimentation à fréquence variable par l'intermédiaire d'un collecteur électronique à commutation de courant s'effectue à partir d'une source de courant continu par modification du sens d'aiguillage de ce courant dans l'enroulement au moyen d'interrupteurs électroniques unidirectionnels.

L'inversion du courant I dans l'enroulement, ne peut pas se produire instantanément en raison du caractère inductif de la machine. Il faut distinguer deux cas :

- La machine fonctionne avec un courant déphasé en avance sur la F.E.M, dans ce cas, le signe et l'amplitude de la F.E.M sont tels qu'ils favorisent l'annulation du courant dans l'enroulement à la fin de celle-ci, la F..E.M. peut être, en outre, utilisée pour polariser en inverse les interrupteurs. Le convertisseur peut dans ce cas, être constitué de thyristors fonctionnant en commutation assistée (par la tension de la machine).

- La machine fonctionne avec un courant déphasé en arrière sur la F.E.M., il faut insérer dans le circuit un condensateur pour transférer l'énergie stockée dans l'inductance.

I-3-2- Commutation de tension :

Dans ce cas l'alimentation à fréquence variable de la machine s'effectue à partir d'une source de tension continue et par modification périodique de la tension aux bornes de la machine.

Les interrupteurs électroniques utilisés sont alors des interrupteurs bidirectionnels en courant et unidirectionnels en tension, réalisés en associant un interrupteur commandé à une diode de roue libre qui assure la continuité du courant dans l'enroulement de la machine au cours de l'inversion de tension .

L'inversion de tension et le renversement éventuel du courant dans la machine se produisent sans mise en court circuit de l'enroulement de la machine.

Dans le collecteur électronique à commutation de tension, les interrupteurs doivent seulement assurer l'ouverture des branches dans lesquelles ils se trouvent, indépendamment de l'énergie magnétique emmagasinée dans l'inductance de la machine, puisque, avec ce mécanisme de commutation, la continuité du courant est assurée. Dans cette configuration il n'est pas utile de prévoir un dispositif particulier pour transférer l'énergie stockée dans l'impédance interne de la machine.

1-3-3- Comparaison des deux types de commutation :

Les caractéristiques spécifiques de la commutation de courant et de la commutation de tension peuvent se résumer de la manière qui suit :

- Pour la commutation de courant, l'impédance interne de la machine et les circuits de commutation associés aux interrupteurs interviennent en même temps au cours du phénomène de commutation.

Quelle que soit la rapidité des interrupteurs, la durée de commutation et les surtensions aux bornes des enroulements sont liées à l'impédance interne de la machine et aux capacités de commutation.

Il est nécessaire de trouver un compromis entre la surtension et la durée de la commutation pour dimensionner l'ensemble convertisseur-machine.

Ce type de commutation utilise des interrupteurs à fermeture commandée.

Dans le cas de la commutation de tension, l'impédance interne de la machine n'intervient pas directement dans la commutation, qui se limite à l'intervention des interrupteurs et de leurs circuits de commande associés.

Il est possible d'effectuer la commutation de tension à fréquence élevée. Ce type de commutation n'est possible qu'avec des interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture, associés à des diodes montées en antiparallèle.

I-4- TYPES D'ALIMENTATION :

Les convertisseurs statiques alimentant la machine peuvent se partager en deux groupes principaux :

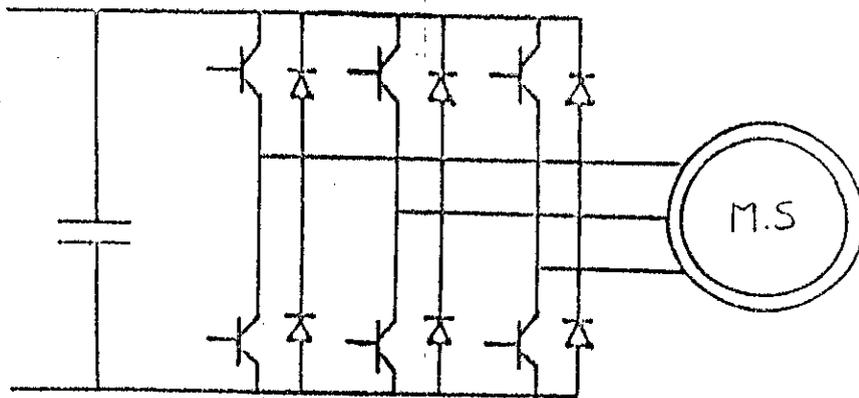
- Convertisseurs directs,
- Convertisseurs indirects.

Le principal inconvénient des convertisseurs directs (cyclo-convertisseur) provient du fait que la fréquence de sortie est inférieure au tiers de celle du réseau, ceci limite la gamme de fréquence du moteur alimenté, ce qui repercute sur la vitesse.

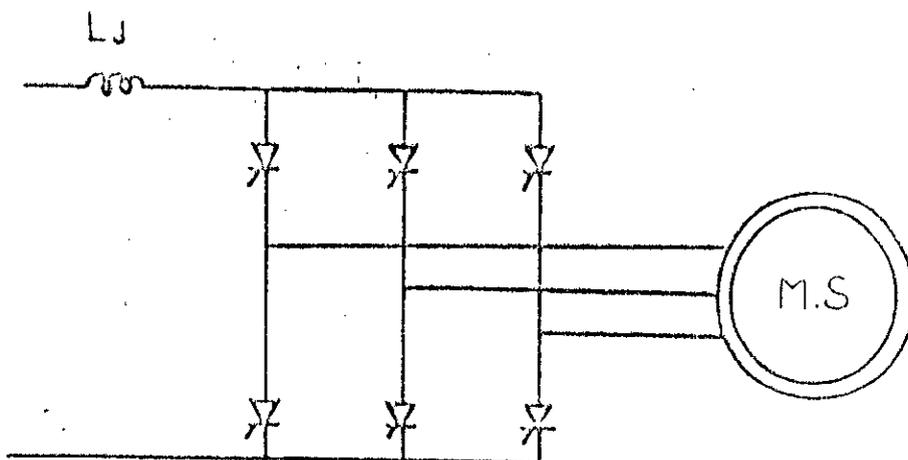
L'alimentation par convertisseurs indirects est soit :

- Une alimentation en tension,
- Une alimentation en courant.

Les deux structures de convertisseurs indirects pour le cas du triphasé sont :



a/ Onduleur de tension .



b/ Onduleur de courant .

fig.(I-2) types d'alimentation

- L'onduleur impose en sortie des créneaux de tensions à sa fréquence de travail,

- Le commutateur commute le courant de l'inductance de lissage L_d dans chaque phase de la machine et impose donc des créneaux de courant.

I-5- LE CONVERTISSEUR DE FREQUENCE :

I-5-1- Cas d'un onduleur de courant :

Le convertisseur de fréquence est composé de deux ponts de graetz triphasés à thyristors, reliés par un circuit intermédiaire à courant continu comprenant une inductance de lissage.

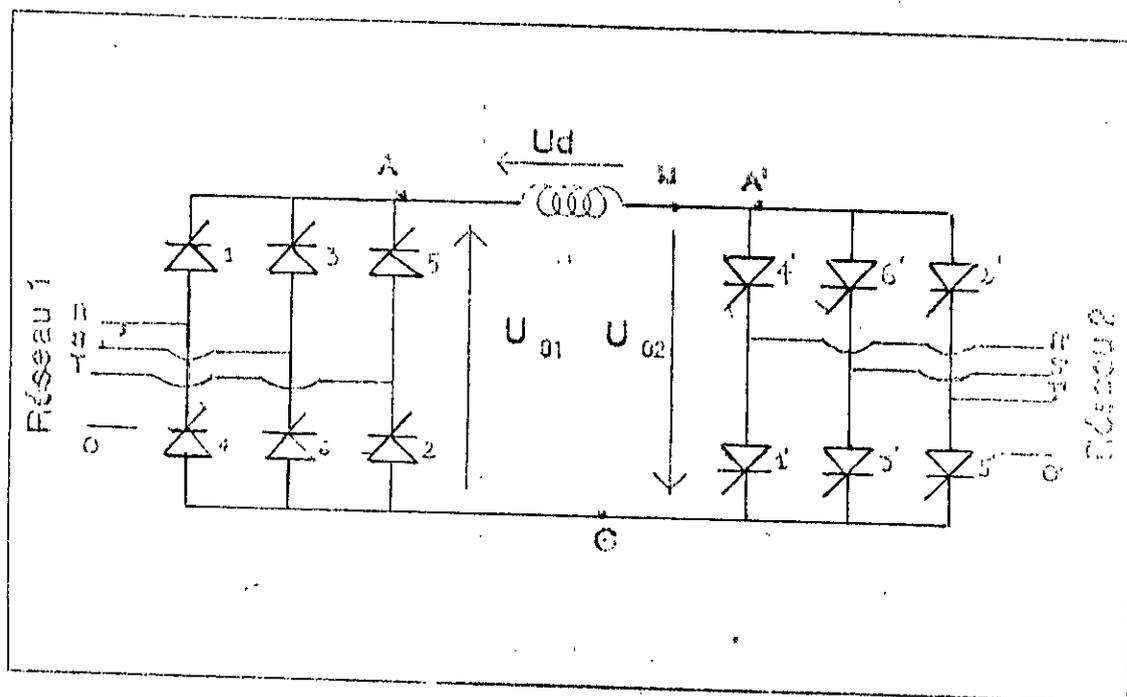


fig. (I-3) convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire à courant continu

Les tensions produites par le pont (1) et (2) sont respectivement:

$$U_1 = 3 \sqrt{6} V_1 \cos \alpha_1$$

$$U_2 = 3 \sqrt{6} V_2 \cos \alpha_2$$

en négligeant la chute de tension résistive aux bornes de la bobine de lissage, on aura donc au régime permanent (Id constant)

$$U_1 = -U_2$$

donc :

$$V_1 \cos \alpha_1 = -V_2 \cos \alpha_2$$

Les valeurs efficaces V_1 et V_2 étant positives, il découle de cette relation que les valeurs de $\cos \alpha_1$ et $\cos \alpha_2$ sont de signes opposés.

Les puissances actives et réactives fournies par le réseau et la machine aux pont (1) et (2) sont celles transportées par les ondes fondamentales de courant, en considérant que les tensions fournies sont sinusoïdales.

$$P_1 = 3 V_1 I_{R1} \cos \alpha_1 \quad P_2 = 3 V_2 I_{R2} \cos \alpha_2$$

$$Q_1 = 3 V_1 I_{R1} \sin \alpha_1 \quad Q_2 = 3 V_2 I_{R2} \sin \alpha_2$$

Les puissances P_1 et P_2 étant de signes opposés, l'un des ponts reçoit donc de la puissance active et fonctionne en redresseur, l'autre fournit de la puissance active et fonctionne en onduleur.

La nature du fonctionnement de chaque pont dépend des valeurs des angles α_1, α_2 . Le montage est donc réversible [5].

Les commutations du pont (1) sont assurées par les tensions du réseau alors que la commutation du pont (2) peut être assurée par la machine.

1-5-2- Cas d'un onduleur de tension :

Le convertisseur de fréquence est composé de deux ponts de Graetz triphasés, le premier est à thyristors, le second est à transistors shuntés par des diodes de roue libre. Les deux ponts sont rellés par un circuit intermédiaire à tension continue comprenant un condensateur de lissage.

L'onduleur de tension permet d'appliquer de façon séquentielle la tension de la source aux bornes des enroulements de la machine suivant les ordres du dispositif d'autopilotage.

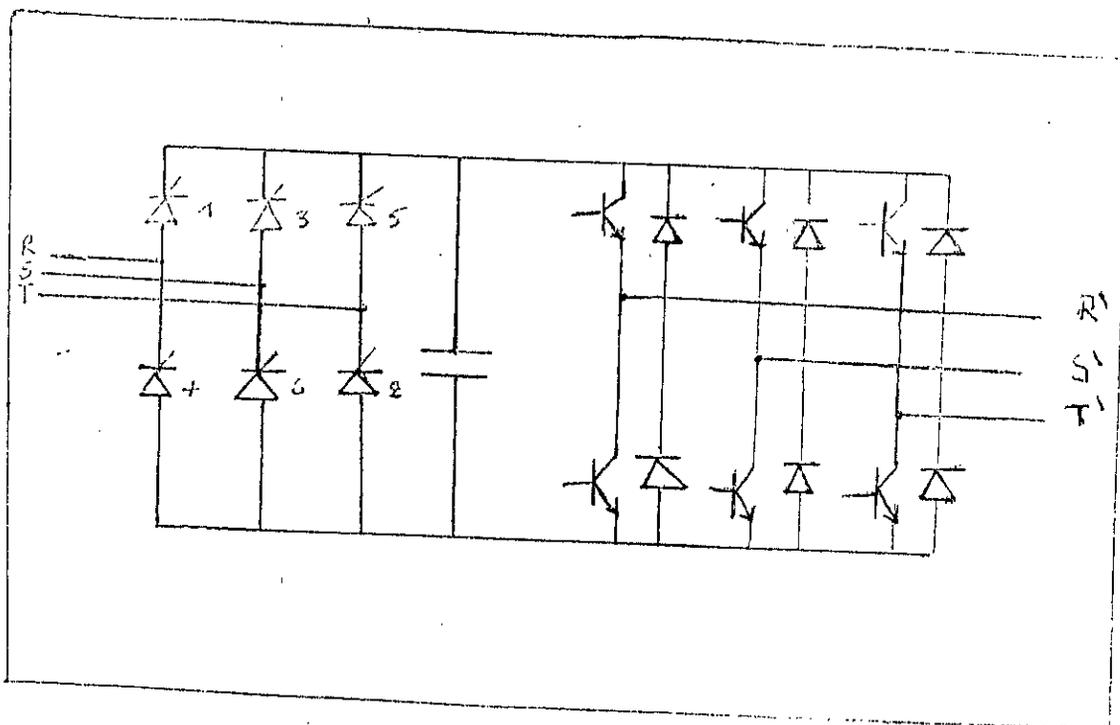


fig. (I-4) convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire à tension continue

Les diodes montées en antiparallèle sur les transistors, autorisent le retour du courant vers la source, c'est à dire, dans le cas particulier, vers le condensateur C, puisque le pont redresseur d'alimentation est unidirectionnel. L'onduleur fonctionne en commutation forcée, et délivre trois ondes de tension rectangulaires déphasées entre elles de 120° .

I-6- ETUDE DE LA MSA ALIMENTEE EN COURANT :

Pour faire l'étude de la MSA, nous adoptons les hypothèses suivantes :

a - La machine tourne à vitesse constante, pendant la période, en raison d'un moment d'inertie J important,

b - La force électromotrice de la machine est sinusoïdale,

c - Les résistances sont négligeables,

d - Chaque phase de la machine peut être représentée par un circuit équivalent composé d'une source de tension sinusoïdale, de valeur efficace E, en série avec une inductance L. Cette inductance est la résultante, pour chaque phase de l'inductance propre et des couplages mutuels avec l'inducteur et avec les amortisseurs dans les deux axes d et q suivant la nature de la machine, cette inductance peut prendre des valeurs différentes suivant les zones de fonctionnement,

e - Les thyristors sont des interrupteurs idéaux,

f - Le courant d'excitation est constant,

g - La machine est linéaire.

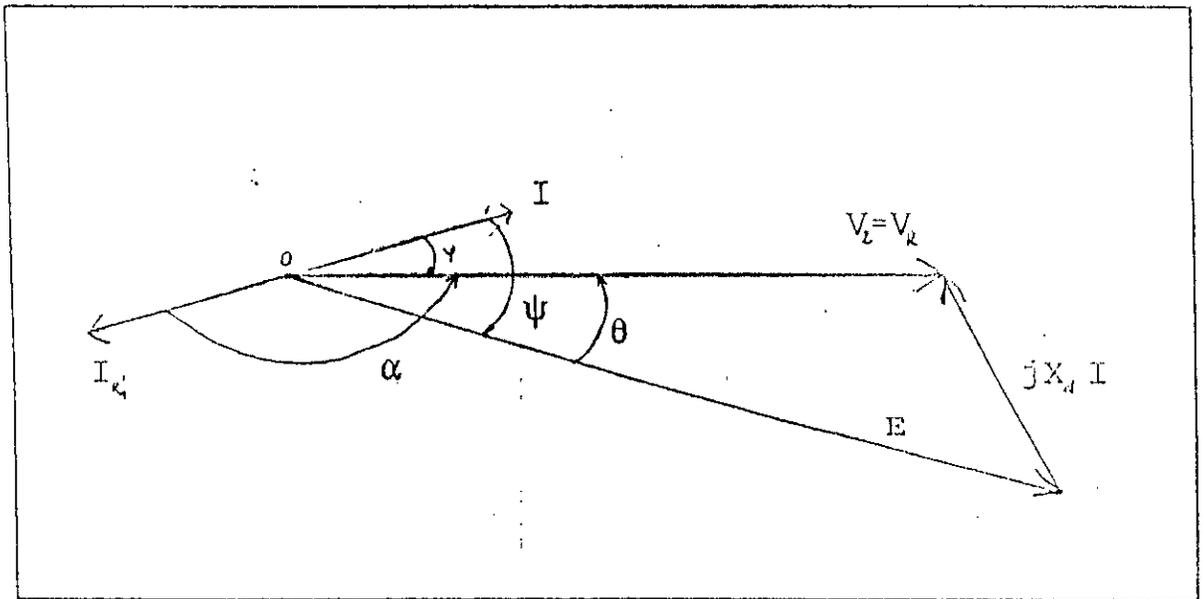


fig.(I-5) diagramme vectoriel d'une MSA

Si on note I l'intensité du courant sinusoïdal dans la phase R du moteur synchrone (conversion de signe des récepteurs pour le moteur) et I_{R1} le fondamental de i (courant absorbé par le pont (2)) en retard sur $V_R = V$ de α_2 , nous obtenons le schéma de la figure(1-5).

En pratique, les thyristors ne sont pas commandés avec un retard fixe sur les tensions simples, mais par des signaux délivrés par le capteur, lequel est lié à la position de la roue polaire, donc associé à la phase de la F.e.m.E. pour un angle d'amorçage donné, les courants I_R , I_S , I_T , ont un retard constant sur les f.e.m. à vide dans les enroulements correspondants.

La commande introduit donc un retard ψ (constant) (mais réglable en faisant varier α_2) entre E et I.

(car on travaille à $\alpha_2 - \theta = \text{Cte}$, et comme $\alpha_2 - \theta = \pi + \psi$, on travaille à $\psi = \text{cte}$).

On remarque que ψ est négatif, c'est à dire que I est toujours en avance sur V et E, ce qui découle du fait que α_2 est compris entre 90° et 180° lors du fonctionnement du pont (2) en onduleur assisté.

La tension moyenne U_2 qui apparaît aux bornes du pont (2) s'exprime par :

$$U_2 = 3\sqrt{6} V_2 \cos \varphi_2$$

or

$$V_2 \cos \varphi = E \cos \psi$$

d'ou

$$U_2 = 3\sqrt{6} \rho \phi \omega \cos \psi \quad (\text{car } E = \omega \phi)$$

on sait que :

$$E = K I_f \Omega \quad (\text{machine non saturée})$$

d'où :

$$U_2 = 3\sqrt{6} K I_f \Omega \cos \psi$$

or on déduit que :

$$\Omega = \frac{U_2}{3\sqrt{6} P \phi \cos \psi}$$

Le moment du couple moteur s'exprime , en négligeant les pertes autres que celles de l'inducteur :

$$\Gamma = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{P_a}{\Omega} = \frac{U_2 I_d}{\Omega} = \frac{3\sqrt{6} p \phi \cos \psi I_d}{\pi}$$

Le couple moteur est maximal pour $\psi = 0$ (cas du démarrage) et faiblit à mesure que ψ augmente pour des raisons de commutations naturelles.

Il est impossible de garder $\psi = 0$ en fonctionnement normal. (la commutation naturelle n'est possible que pour $\psi > 0$). La machine synchrone autopilotée alimentée en courant fonctionne donc toujours en dessous du couple maximal.

1-6-1- Les stratégies de commande :

Dans le système considéré, en fonctionnement moteur, les variables de sortie sont :

- Le couple moteur moyen,
- La vitesse angulaire.

Nous disposons de trois variables :

- Le courant continu I_d , dont le réglage s'effectue par l'angle d'allumage du pont redresseur coté réseau,
- L'angle d'amorçage du commutateur,
- Le courant d'excitation I_f .

Avec l'autopilotage, la fréquence d'alimentation de la machine n'est pas une grandeur de réglage car elle est une conséquence de la vitesse de rotation. Le réglage des MSA consiste plutôt à contrôler le couple moteur dans une certaine plage de vitesse.

Il existe plusieurs stratégies de commande, on va examiner quelques unes.

- Fonctionnement à ω et I_f constants, I_d variable :

de l'expression simplifiée du couple moyen :

$$\Gamma = \frac{3\sqrt{6}}{\Omega\pi} E I_d \cos \psi$$

et de celle de la vitesse

$$\Omega = \frac{\pi}{3\sqrt{6} p \phi \cos \psi} U_2$$

on peut voir que si ψ et I_f sont constants, le couple moyen est directement proportionnel à I_d (I_d n'a aucune influence sur la tension U_2 si le réseau, le pont (1) et la bobine de lissage ne provoquent pas de chute de tension en charge).

Ainsi le réglage de la vitesse consiste à faire varier la tension redressée U du pont (1), tandis que la charge impose par son couple résistant, la valeur de l'intensité du courant I_d .

D'où des caractéristiques $\Gamma(I_d)$ linéaires et des caractéristiques mécaniques constantes (fig I-6)

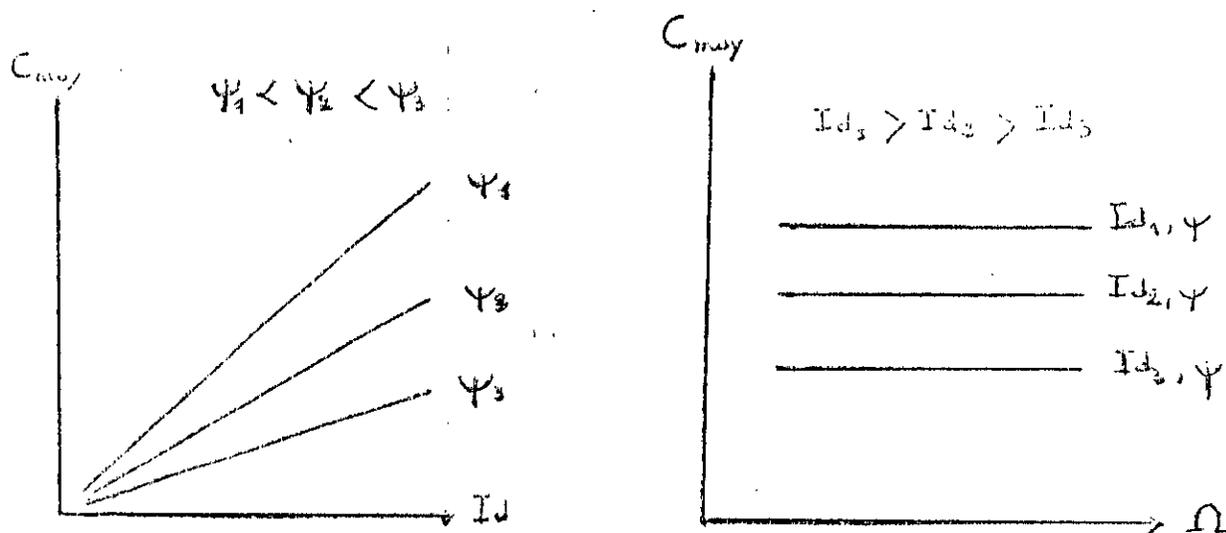


fig. (I-6) fonctionnement à ψ et I_d constants

Cette stratégie de commande, permet à la machine synchrone autopilotée de se comporter comme une machine à courant continu à excitation indépendante. Dans le cas de l'alimentation en tension, le couple s'exprime par :

$$C = \frac{3P}{\omega} \frac{V}{L} \phi \sin \delta$$

L : inductance synchrone

V : valeur efficace de la tension par phase

δ : angle interne entre E et V.

Cette expression montre que le couple n'est pas dans ce cas indépendant de la fréquence d'alimentation. Pour imposer le couple dans une certaine gamme de vitesse, il est nécessaire de lier la tension appliquée à la fréquence d'alimentation.

1-6-2- Freinage et réversibilité :

Le moteur fonctionne en alternateur, le convertisseur onduleur en redresseur et le redresseur en onduleur débitant sur le réseau, il suffit d'agir sur les angles de commande α_1 et α_2 [6]

Pour l'alimentation en tension, l'action au niveau de la commande des interrupteurs permet le passage en générateur qui se traduit par une conduction des diodes de récupération plus importante que la conduction des interrupteurs commandés. Il y a inversion du courant moyen à l'entrée de l'onduleur par rapport au fonctionnement en moteur. Pour que le freinage soit effectif, il faut assurer la circulation de ce courant à l'entrée de l'onduleur.

Pour inverser le sens de rotation, il suffit d'inverser le sens du champ tournant en changeant le sens de distribution des signaux de commande de l'onduleur un tel entraînement est donc capable de fonctionner dans les quadrants du plan couple-vitesse.

1-6-3- Principe de fonctionnement :

Pour l'explication du principe de fonctionnement d'une machine synchrone autopilotée nous considérons le cas d'une machine à deux poles.

Le capteur de position assure la séquence d'aiguillage du courant dans les phases de la machine de façon à obtenir un courant triphasé.

Ce courant créera un champ tournant dans l'entrefer, par conséquent, un couple moteur.

En supposant que la commutation est instantanée et que les courants de phase ont l'allure montrée fig(I-3), le champ tournant varie par pas de $\frac{2\pi}{6}$ et ne prend que 6 positions fixes qui dépendent des thyristors qui conduisent.

($6p$ positions dans le cas de p paires de poles). [7]

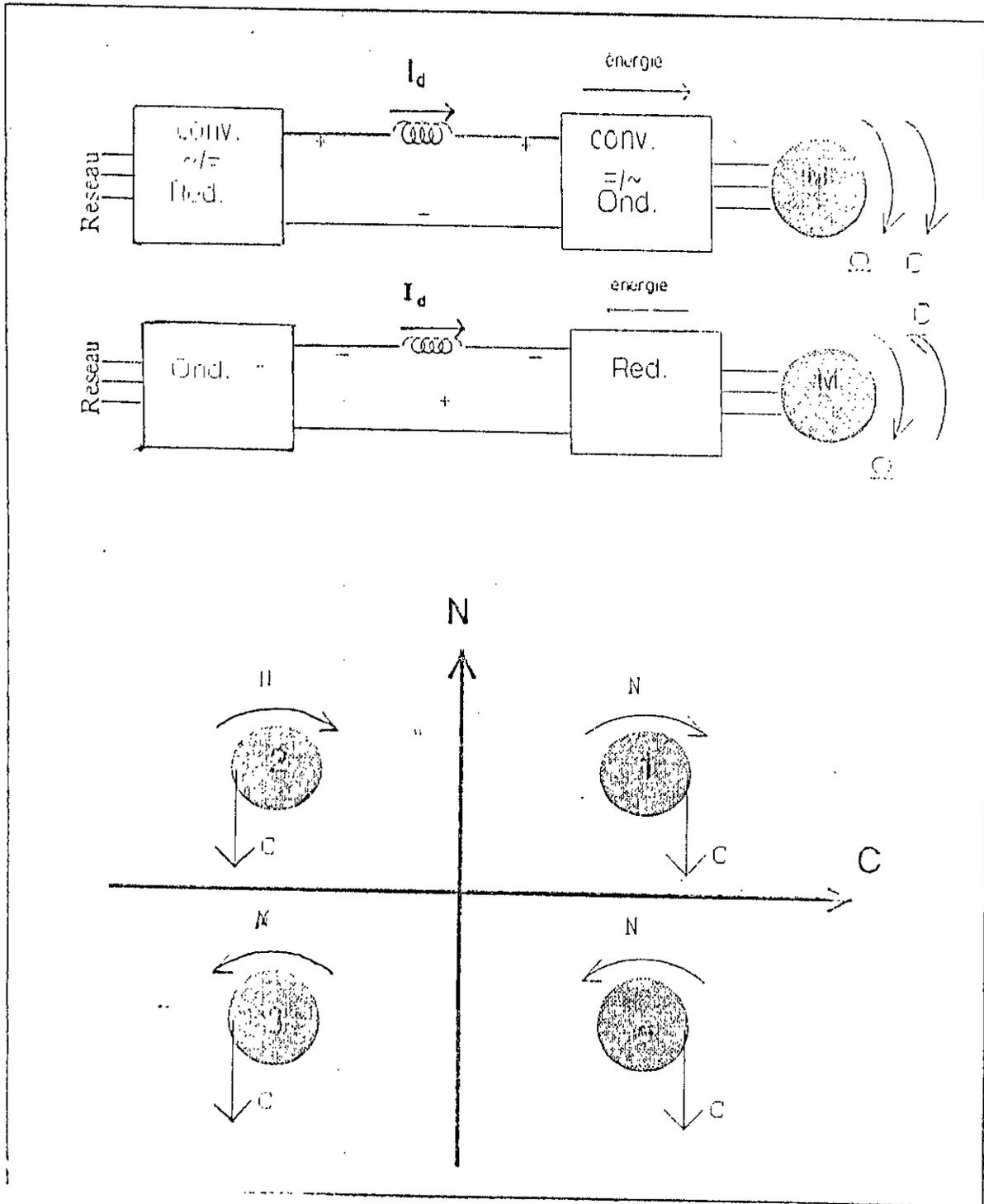


fig. (I-7) fonctionnement en moteur et en génératrice d'un redresseur_onduleur

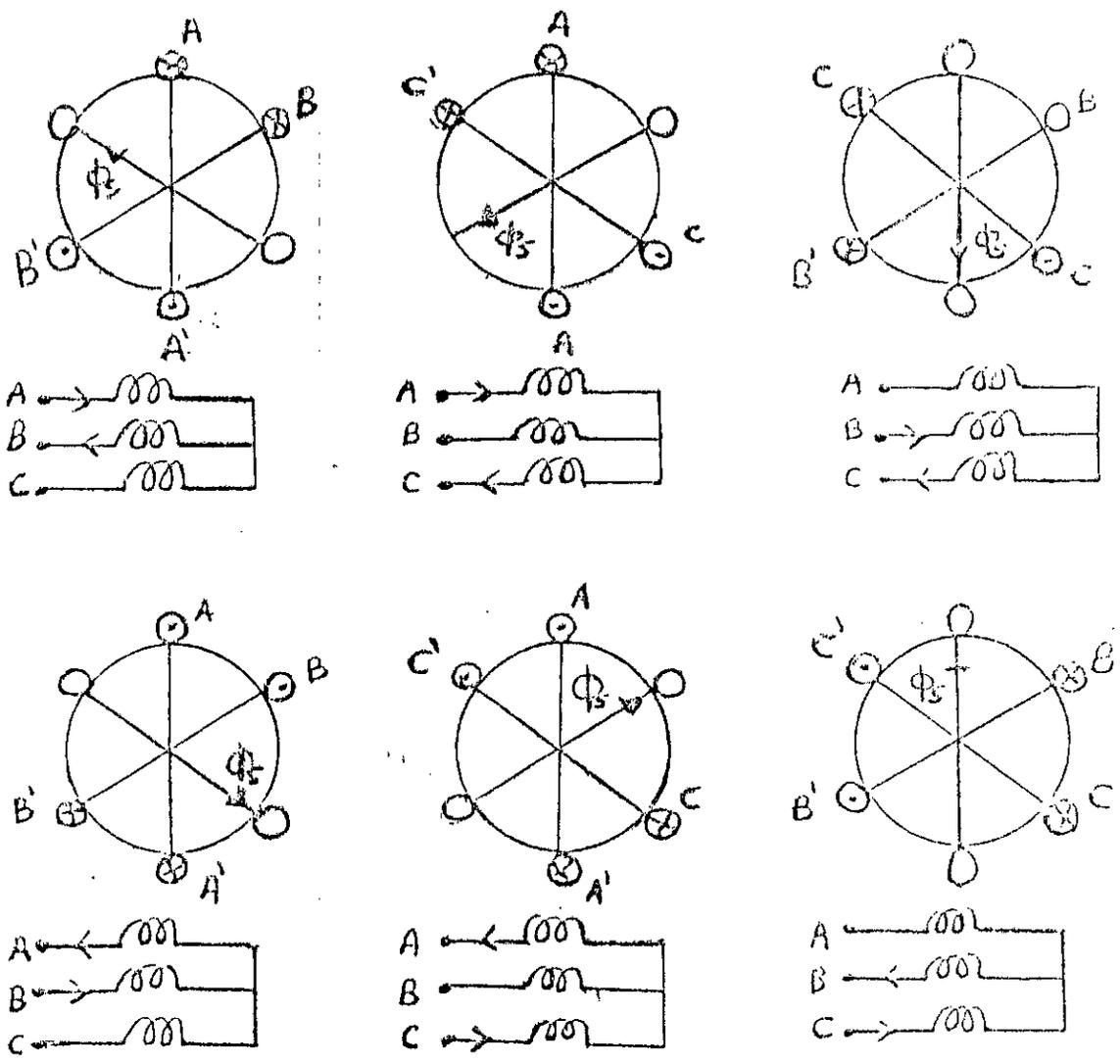


fig.(I-8) principe de fonctionnement d'une MAS

CHAPITRE II
CAPTEUR DE POSITION

II-1-CAPTEUR DE POSITION :

Le capteur de position est l'élément de base pour l'autopilotage, il est disposé en bout d'arbre et il est composé de deux parties :

- Une partie fixe solidaire du stator, constitué de deux disques, l'un comportant des sources lumineuses (émettrices) l'autre des photodétecteurs (phototransistors) receptrices.

- Une partie mobile : solidaire du rotor, constitué d'un seul disque intercalé entre les deux disques fixes, celui-ci contient des fentes ou des trous.

Le principe du capteur de position est basé sur le passage des faisceaux lumineux (émis par les sources lumineuses) à travers les fentes ou les trous du disque perforé, le faisceau reçu par le photodétecteur sera converti en créneau de tension.

La conception du capteur dépend du nombre de paires de pôles P et du nombre de phases de la machine synchrone.

On pratique sur le disque mobile P fentes de π/p mécaniques, décalées l'une par rapport à la suivante de π/p mécaniques.

On placera sur les disques fixes trois sources lumineuses et trois photodétecteurs, l'angle de décalage entre deux sources consécutives (respectivement détecteurs) est de $\frac{2\pi}{3p}$ mécanique.

Chaque source et détecteur correspondant à une des trois phases.

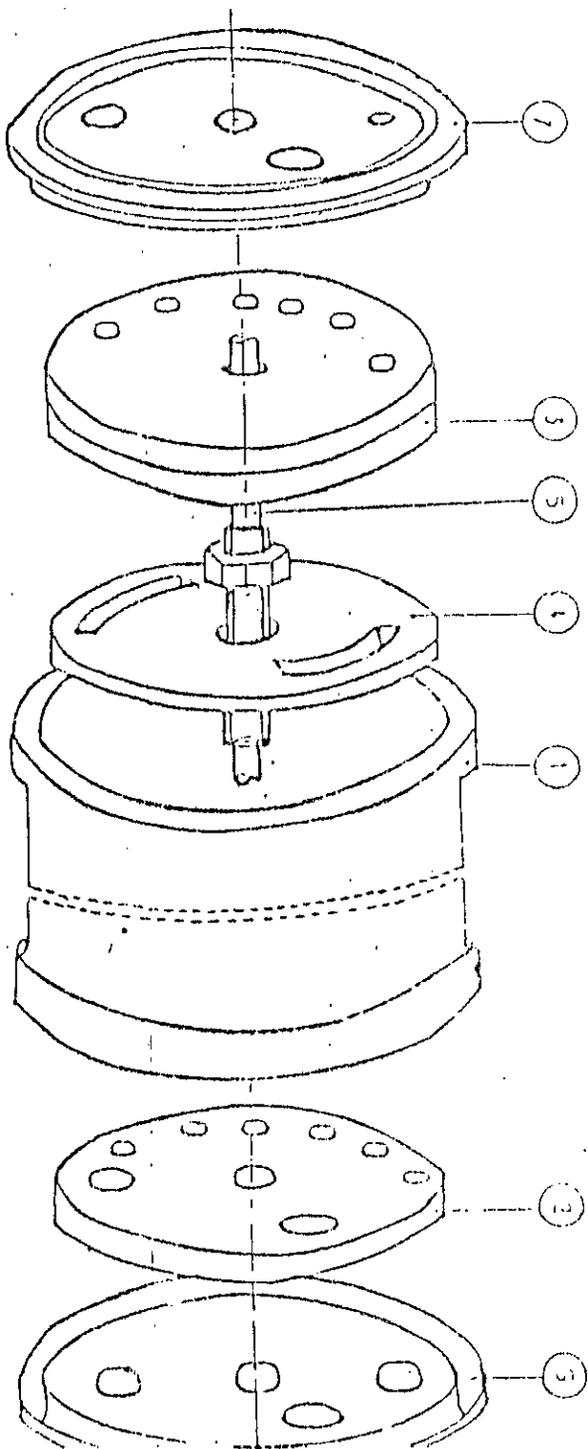


Fig. (II-1) capteur de position

1 cylindre métallique

4 disque mobile

7 couvercle côté des lampes

2 masque pour photodiodes

5 couvercle côté des photodiodes

3 masque pour lampes

6 arbre

II-1-1- Position du capteur de position par rapport à la machine synchrone.

L'utilisation d'un oscilloscope, permet de visualiser la f.e.m. induite.

Le phototransistor lié au stator délivre une impulsion chaque fois que le rotor est dans une position telle que la f.e.m. soit en retard d'un angle ψ par rapport au début de l'impulsion délivrée.

L'impulsion doit arriver avec un retard α pour que le commutateur fonctionne en onduleur en commutation naturelle.

II-2- Commande.

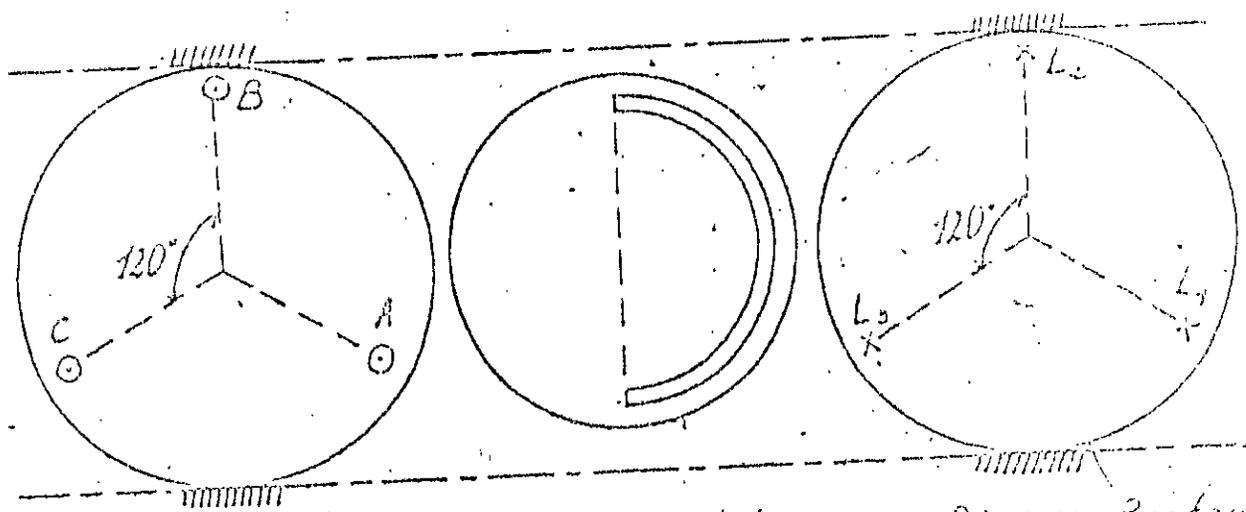
II-2-1- Signaux délivrés par le capteur.

Le fonctionnement du convertisseur nécessite six signaux, de durée 120° électrique, décalés l'un par rapport à l'autre de 60° .

Le capteur de position fournit trois signaux, un pour chaque phase de durée 180° électrique, décalés l'un par rapport à l'autre de 120° fig.(II-2).

En utilisant un bloc logique, on peut avoir ces signaux en cycle direct fig.(II-5) ou en cycle inverse fig.(II-6).

Sur 2x électriques, on a :



Disque Portant
à Photodiodes

Disque Mobile
Avec une Fente de 180°

Disque Portant
3 Lampes

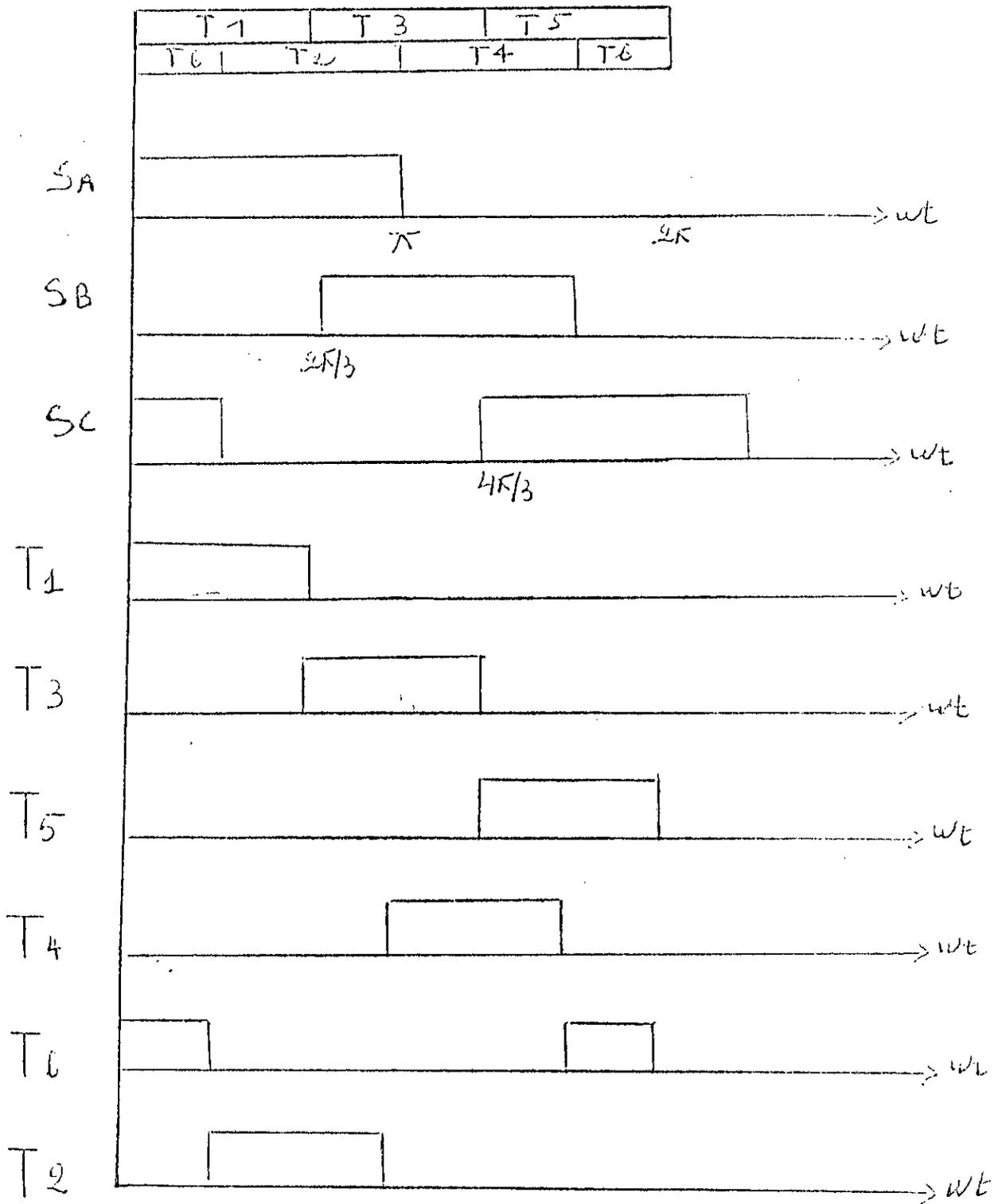


fig.(II-2) signaux issus du capteur dans le sens direct

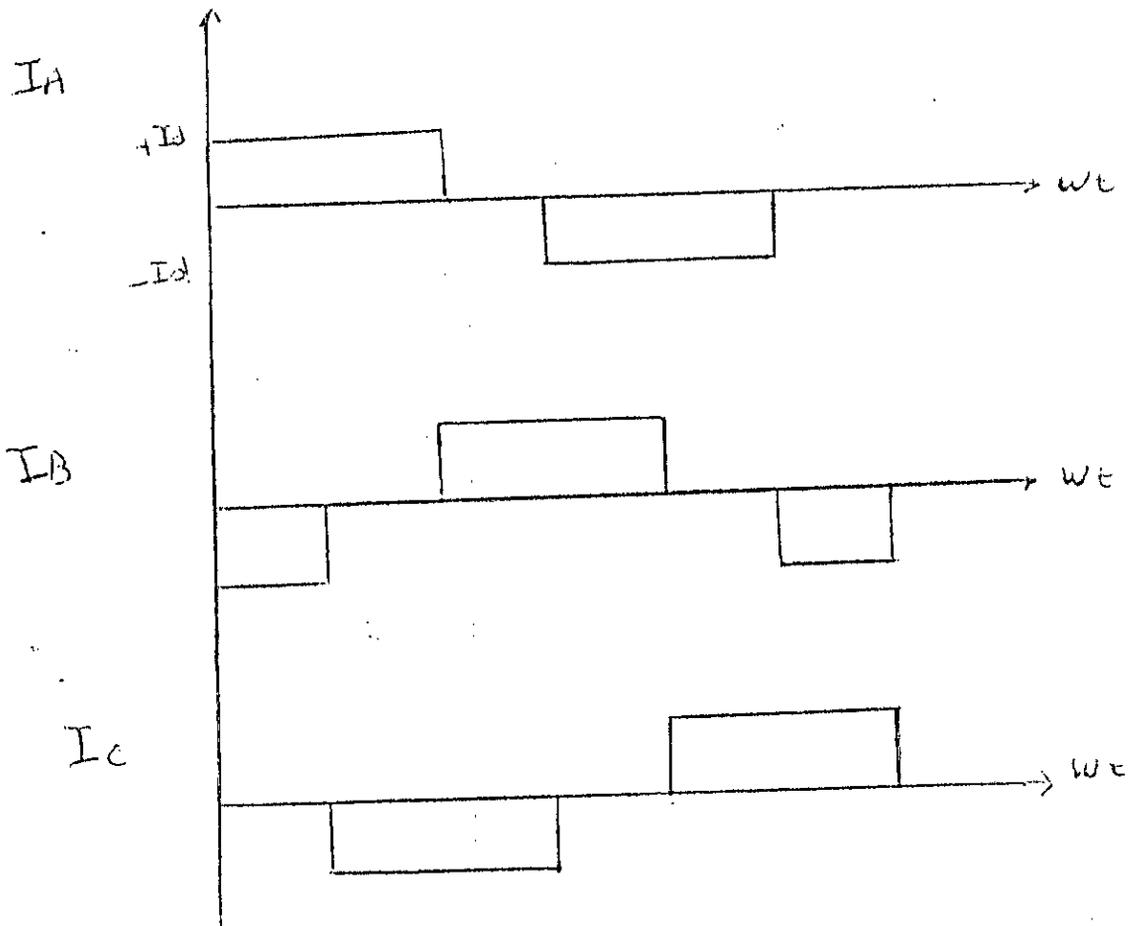


fig.(II-3) formes d'ondes des courants

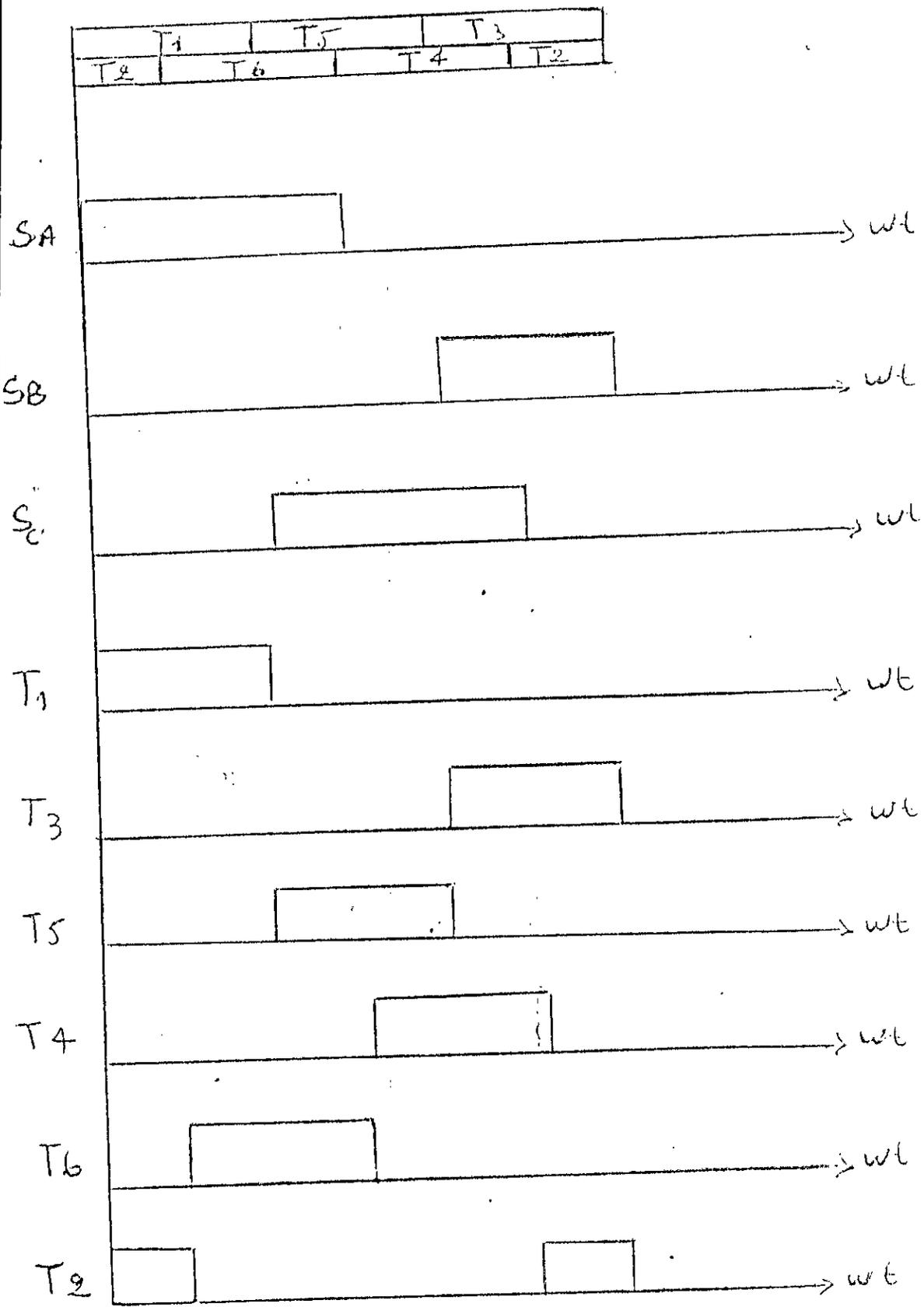


fig.(II-4) signaux issus du capteur dans le sens inverse

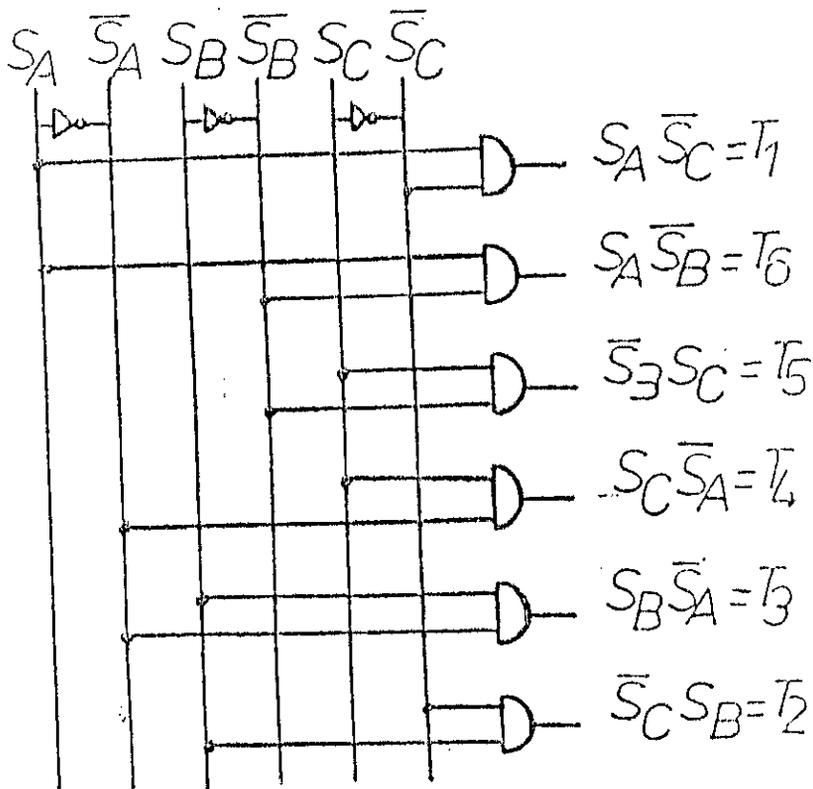


fig. (II-5) bloc logique pour le cycle direct

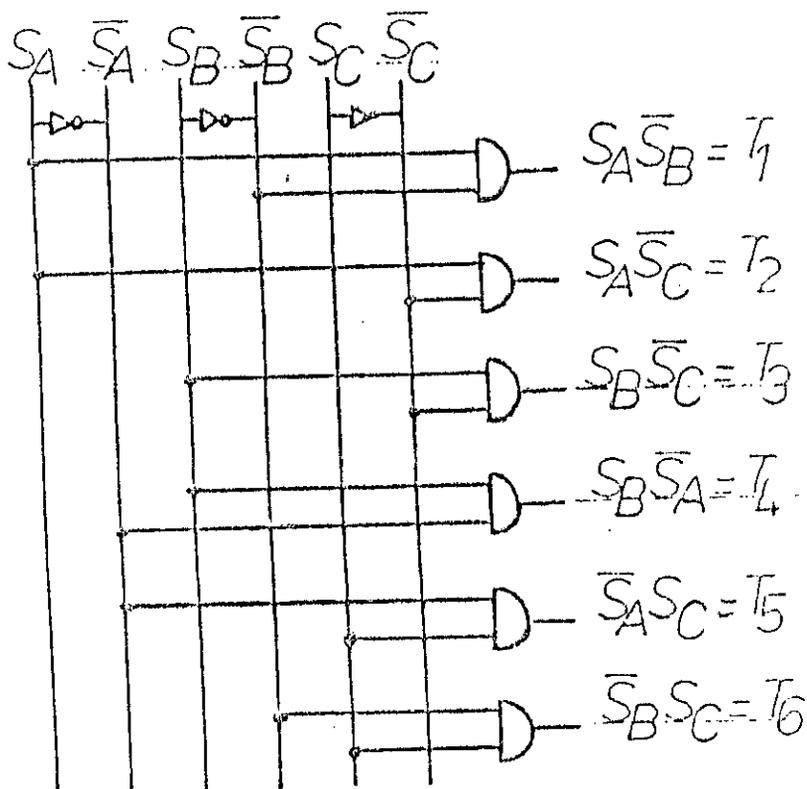


fig. (II-6) bloc logique pour le cycle inverse

CHAPITRE III

PRINCIPE DE DUALITE

III-1-2- Dipôles tension

III-1-Types de dipôles

Su sont les dipôles capacitifs. Ils imposent la continuité de la tension à leurs bornes.

On distingue deux types de dipôles :

La forme d'onde de la tension à leurs bornes ne peut être modifiée par le circuit auquel

III-1-1- Dipôles courants :

Ils sont appelés dipôles inductifs, ils imposent la continuité du courant qui les traverse

c'est-à-dire :

La forme d'onde du courant qui les traverse ne peut être modifiée par le circuit auquel ils

sont reliés.

- 1 - Dipôle tension - dipôle courant
- 2 - Dipôle courant - dipôle tension
- 3 - Dipôle courant - dipôle courant
- 4 - Dipôle tension - dipôle tension

Le dipôle tension est associé à un circuit dont l'impédance est une constante, et le dipôle courant est associé à un circuit dont l'impédance est une constante.

Le dipôle tension est associé à un dipôle tension et présente une tension continue, et le dipôle courant est associé à un dipôle courant et présente un courant continu.

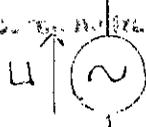
Si l'impédance de la charge est infinie, le courant est nul et la tension est maximale.

Si l'impédance de la charge est nulle, la tension est nulle et le courant est maximal.

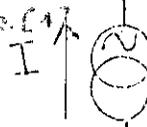
Pour les combiner (4) si l'impédance de la charge est nulle, le courant est maximal et la tension est nulle.

Si l'impédance de la charge est infinie, le courant est nul et la tension est maximale.

Le dipôle tension alternatif est associé à un circuit dont l'impédance est infinie.



b- dipôle de tension alternative



d- dipôle de courant alternatif

fig. (III-1) types de dipôles

III-3- Dipôles réels :

Dans notre cas, si on prend la première combinaison, on aura un onduleur de tension connecté à un dipôle de courant caractérisé par une machine dont la réactance de fuite est très grande.

Dans les fortes puissances, il est délicat d'utiliser un onduleur de tension, qui est constitué par un convertisseur à thyristors fonctionnant si possible en commutation naturelle.

Dans ces dispositifs, on ne maîtrise pas le courant donc, suivant la valeur des inductances de la machine on peut avoir conduction de la diode ou du thyristor fig.(III-2) ce qui rend incertain le blocage des thyristors par les tensions de la machine.

Mais, si on prend la combinaison (2) on aura un onduleur de courant, qui commute le courant de l'inductance de lissage L_d dans chaque phase de la machine, et impose donc en sortie des créneaux de courant, comme dipôle de tension, il faut qu'on ait une machine qui a des réactances de fuites les plus faibles possibles.

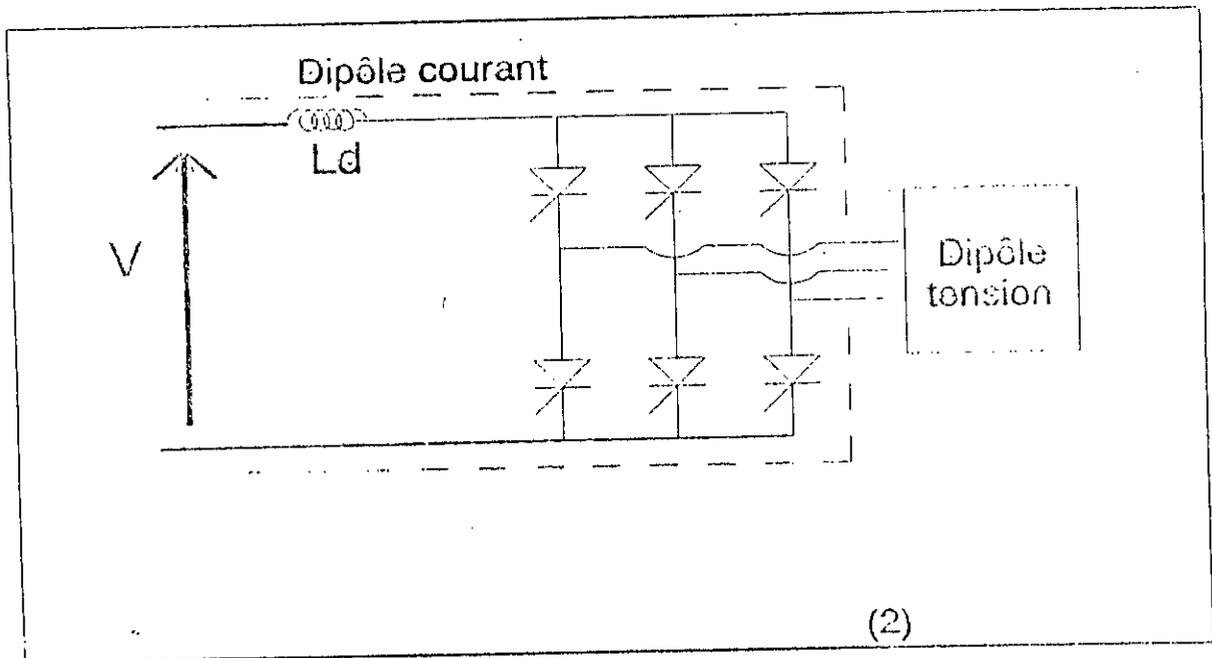
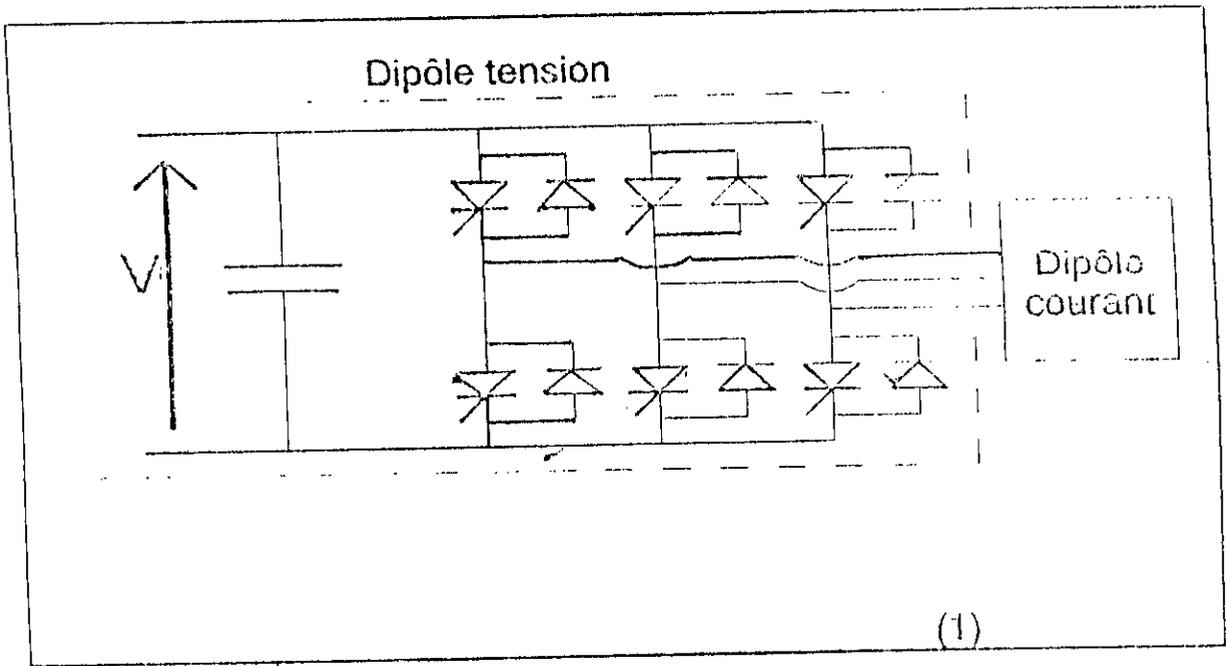


fig.(IIF2) association des dipôles

III-4- Conclusion :

Il faut noter que :

- Une inductance, s'opposant aux discontinuités du courant qui la traverse, joue le rôle d'une source de courant,

- Une capacité, s'opposant aux discontinuités de la tension à ses bornes, joue le rôle d'une source de tension.

On ne peut donc relier directement un dipôle de tension à un autre de tension différente.

On peut le mettre en circuit ouvert.

Il faut éviter sa mise en court-circuit, sinon son courant serait très fort.

De même, on ne peut réunir directement un dipôle de courant à un autre de courant différent.

On peut le mettre en court-circuit.

Il faut éviter sa mise en circuit ouvert qui entrainerait une surtension très forte.

Les effets les plus gênants dans un onduleur de tension sont dûs à l'inductance de la branche où le courant s'inverse brusquement.

- Inductance de la source continue dans un onduleur de tension, celle de la charge dans un onduleur de courant.

Dans un onduleur de tension, la capacité C supprime les brusques variations de la tension U et réduit ses ondulations durant les intervalles de commutation fig.(I-4)

Les transferts de courant se font entre bras de pont en série sous la tension continue U.

C'est à travers la source continue que le courant doit varier rapidement.

La réactance de fuite de la charge placée à la sortie d'un onduleur de courant allonge la durée des commutations et provoque des pointes ou des creux de tension fig.(IV-4)

Dans un onduleur de courant, les commutations sont différentes de celles rencontrées dans un onduleur de tension, car le courant s'inverse dans la charge alternative et non plus dans la source continue.[8]

Comme l'alimentation par un onduleur de courant présente des problèmes de commutations nous nous intéresserons particulièrement à l'étude de cette dernière et à ses conséquences.

CHAPITRE IV

**ETUDE DE LA COMMUTATION ET
SES CONSEQUENCES**

IV-1- ETUDE DE LA COMMUTATION :

Dans ce chapitre nous examinerons le principe de fonctionnement d'une association convertisseur statique - machine synchrone.

Deux régimes y sont considérés :

- Régime en commutation naturelle,
- Régime en commutation forcée.

IV-1-1- Phénomène d'empîement :

La commutation provoque un empîement des courants circulants dans les thyristors, elle n'est pas donc instantanée.

Pour l'étude de l'empîement nous faisons appel à la fig.(IV-1) qui représente le schéma équivalent d'un convertisseur de courant en montage étoile triphasé.

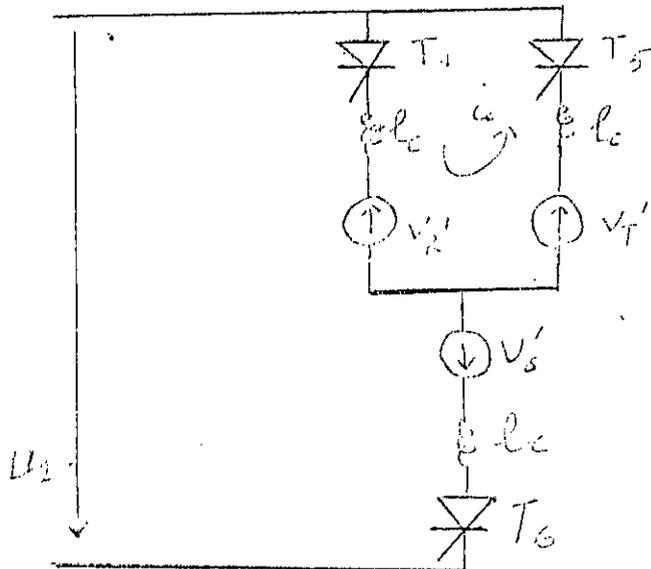


fig. (IV-1) schéma équivalent lors de la commutation

$$i_R' = i_c$$

$$i_{T1}' = I_d - i_c$$

$$i_{S1}' = - I_d$$

Pendant un certain laps de temps, il y a empiètement des courants dans les deux phases. T et R du stator.

La commutation est terminée lorsque, simultanément, le courant iR atteint Id et le courant iT atteint 0

La durée de commutation est exprimée par l'angle d'empiètement μ donné par l'équation suivante :

$$\mu = \text{Arc cos} (\cos \alpha - I_d / I_c) - \alpha$$

Il découle de cette équation que l'angle d'empiètement dépend de l'angle de retard d'allumage, ainsi que du courant continu Id à commuter.

En notant I_c : La valeur de crête du courant de court-circuit, définie par :

$$I_c = \frac{E \sqrt{6}}{2 L_c \omega}$$

On aura :

$$\mu = \text{Arc cos} \left(\cos \alpha - \frac{2 L_c \omega I_d}{E \sqrt{6}} \right) - \alpha$$

L'angle d'empiètement augmente avec Id/Ic, il devient maximal pour $\alpha = 0^\circ$. Ceci correspond au fonctionnement en redresseur pur, respectivement aux convertisseurs de courant équipés de simples diodes.

Si α augmente, l'angle d'empiètement μ diminue, pour atteindre une valeur minimale pour $\alpha = 90^\circ - \text{Arc sin} (I_d / 2 I_c)$ pour $\alpha > 90^\circ$ (domaine onduleur) μ augmente de nouveau. Une limite de fonctionnement existe par le fait que $(\alpha + \mu) < 180^\circ$. μ doit être inférieur à 60° .

IV-2- TENSION CONTINUE PENDANT L'EMPIETEMENT :

La fig.(IV-2) représente l'allure de la tension continue en tenant compte de l'effet de commutation.

L'allure de U est déterminée à partir de celles des tensions partielles u_1 et u_2 qui, pendant la commutation sont égales à la moitié de la somme des valeurs instantanées des tensions simples correspondantes aux phases qui sont en train de commuter [4], car pendant la durée de commutation les deux inductances L_c parcourues par le courant de court-circuit i_c fonctionnant comme un diviseur de tension inductif.

Il découle de la fig.(IV-2) que pendant toute la durée de la commutation la tension continue U est inférieure à la valeur idéale.

IV-3- INFLUENCE DE L'EMPIETEMENT SUR LES COURANTS :

La fig.(IV-3) représente l'allure des courants circulants dans les thyristors, leur forme n'est plus rectangulaire mais presque trapézoïdale, c'est une autre conséquence des phénomènes de commutation.

IV-4- INFLUENCE DE L'EMPIETEMENT SUR LES TENSIONS DE LA MACHINE :

Le phénomène d'empiètement influe également sur les tensions de la machine fig.(IV-4) en les déformant.

Plus l'angle de commutation est grand plus la distorsion est importante.

IV-5- FONCTIONNEMENT DE L'ONDULEUR :

L'allure de la tension u_t aux bornes des thyristors T1 et T5 est illustrée à la fig.(IV-5).

Après extinction du courant traversant le thyristor se trouvant en fin de conducteur, la tension u_t passe rapidement à une valeur négative. La durée pendant laquelle la tension u_t est négative doit être suffisante pour assurer un blocage parfait du thyristor pendant le temps de recouvrement t_q . On remarque que plus μ tend vers 180° plus la durée pendant laquelle la tension u_t est négative diminue.

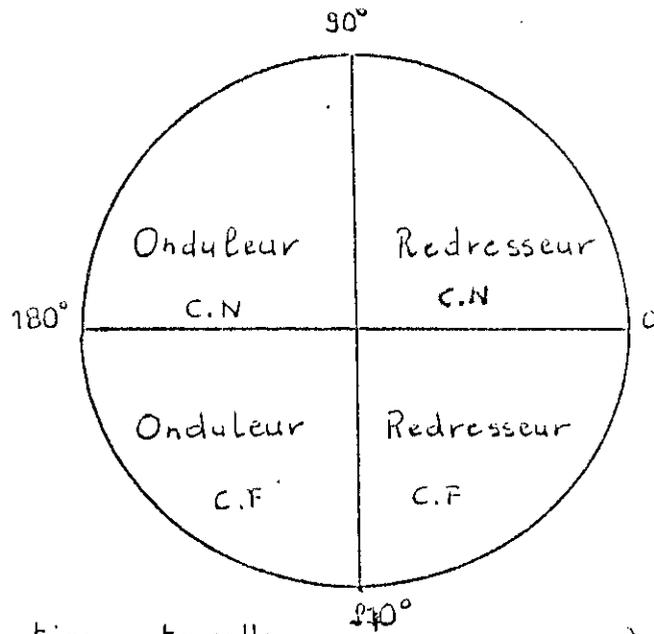
Cette durée correspond à un $\omega t = \delta$ δ : angle de garde

Le phénomène d'empiètement impose une limitation du domaine admissible de la variation de l'angle μ tel que :

$$\alpha + \mu = 180^\circ - \delta$$

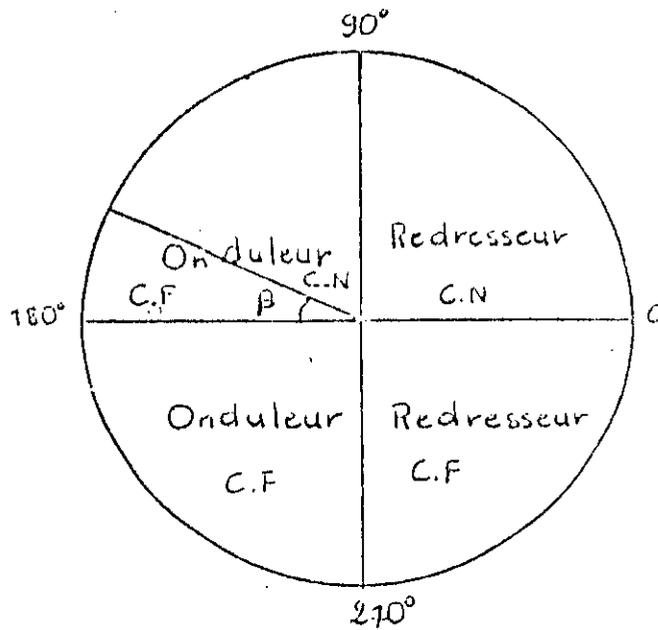
on prend généralement $\delta = 10^\circ$

La commutation provoque une limitation dans le domaine de fonctionnement en onduleur en commutation naturelle fig.(IV-6-b)



C.N: Commutation naturelle.
 C.F: Commutation forcée.

(a)



(b)

fig. (IV-6) fonctionnement du convertisseur de fréquence suivant la valeur de l'angle d'amorçage

IV-6-AUTRES CONSEQUENCES DU PHENOMENE D'EMPIETEMENT :

Le phénomène d'empiètement modifie l'allure des tensions inverses aux bornes des thyristors fig.(IV-5)

La durée de conduction des thyristors est augmentée d'un angle μ par rapport à la valeur idéale de $2/3$, cependant le temps d'application de la tension inverse est diminué d'un temps égal à w/μ

Au delà d'un angle α_{\max} tel que :

$$\alpha_{\max} = \pi - \beta$$

La tension aux bornes du thyristor, est strictement positive lors du désamorçage, donc la commutation naturelle n'est plus possible. C'est le domaine d'utilisation des onduleurs de tension à transistors qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture avec des temps de commutation et d'extinction très réduits.

IV-7-DEMARRAGE ET COMMUTATION AUX BASSES VITESSES :

En dessous d'une certaine vitesse (environ 10 % de la vitesse nominale) les f.e.m. de la machine sont insuffisantes pour assurer la commutation des thyristors.

Cette impossibilité de commuter à faible vitesse est due à une augmentation excessive de l'angle d'empiètement, les résistances n'étant plus négligeables devant les réactances de fuite, et à une décroissance, en fonction de la vitesse, du courant que peut commuter la machine.

Pour palier à ce problème, différentes solutions sont utilisables.

IV-7-1- Commutation forcée par des circuits auxiliaires :

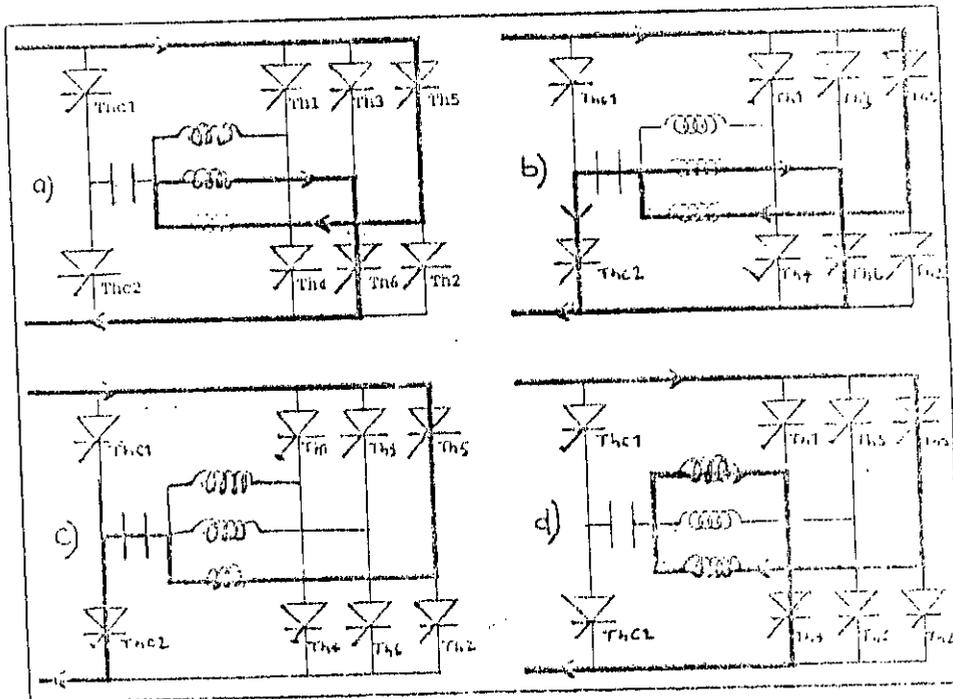


fig. (IV-7) principe du blocage en tension

Ce montage permet un démarrage rapide et sans annulation du courant dans la self de lissage fig.(IV-7).

La commutation est exclue, dès que la machine peut assurer elle même la commutation.

Cette solution mixte est peu séduisante vu que le dimensionnement de la capacité, uniquement pour le démarrage, nous limite en puissance et l'utilisation de deux thyristors rend la commutation et la commande plus complexes. mais cette technique ne doit pas être écartée [3].

IV-7-2- Principe de démarrage sans thyristor auxiliaire :

Cette technique consiste à annuler le courant continu à chaque commutation par la mise en onduleur, pendant une courte durée, du pont redresseur fig.(IV-8).

Lorsque le courant s'annule, les thyristors du pont côté machine se désamorcent et en amorçant une nouvelle paire de thyristors, on aiguille le courant vers la phase suivante du moteur par le rétablissement du fonctionnement en redresseur du pont côté réseau.

La dynamique du pont redresseur en onduleur et les inductances du circuit déterminent la durée de l'annulation du courant.

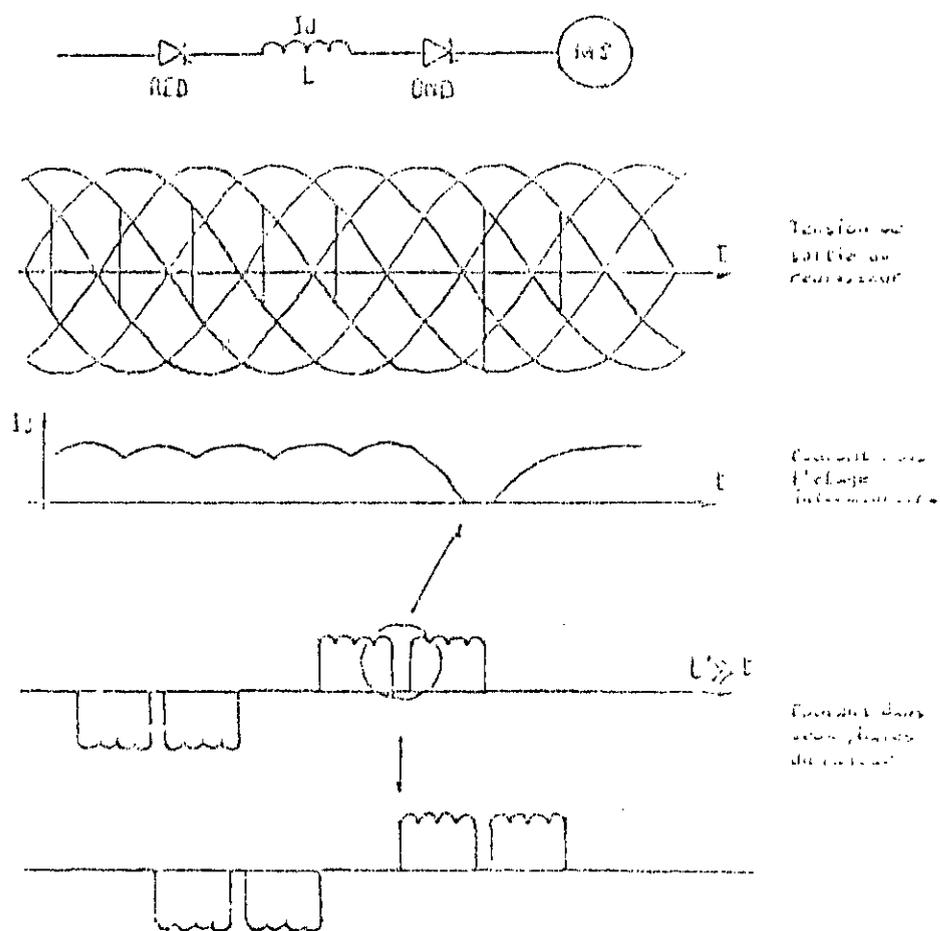


fig.(IV-8) commutation forcée sans thyristor auxiliaire

IV-7-3 Principe du démarrage avec thyristor de roue libre :

Dans la technique précédemment citée, les temps de commutation peuvent de venir très importants

Pour palier à ce défaut on shunte l'inductance avec un thyristor de roue libre à chaque changement de position du rotor pour permettre l'annulation du courant dans l'onduleur fig.(IV-9).

En combinant les deux dernières méthodes, on améliore la durée de l'annulation du courant et la montée en vitesse est alors plus rapide.

IV-8-DEPLACEMENT DES FLUX STATORIQUES ET ROTORIQUES LORS D'UNE COMMUTATION :

Un tour complet du flux tournant nécessite six étapes, chaque étape est composée de deux intervalles :

- Intervalle de commutation où trois thyristors fonctionnent en même temps,
- Intervalle de conduction où deux thyristors fonctionnent en même temps.

Dans le premier intervalle, le vecteur ϕ_s se déplace d'un angle 60° . Dans le deuxième intervalle, deux phases sont alimentées; ce qui impose un vecteur ϕ_s stationnaire.

Le vecteur ϕ_r tourne à une vitesse de synchronisme et son déplacement est :

- d'un angle égal à l'angle de commutation pendant le premier intervalle
- d'un angle égal à $(60^\circ - \mu)$ durant le deuxième intervalle fig.IV-10)

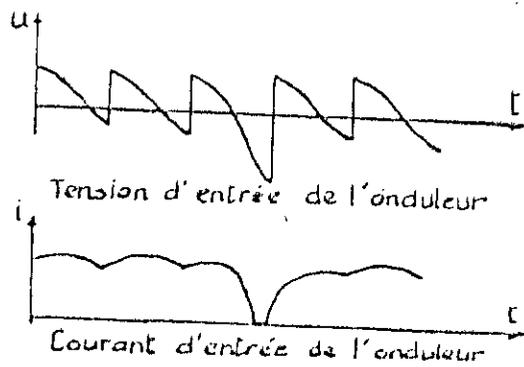
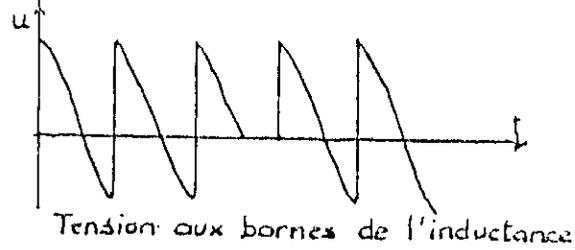
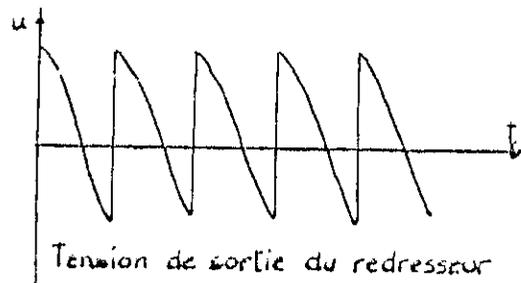
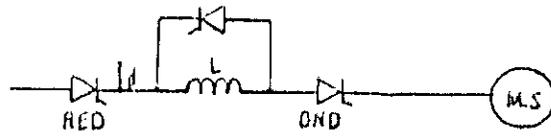


fig. (IV-9) principe de la commutation forcée par un thyristor auxiliaire

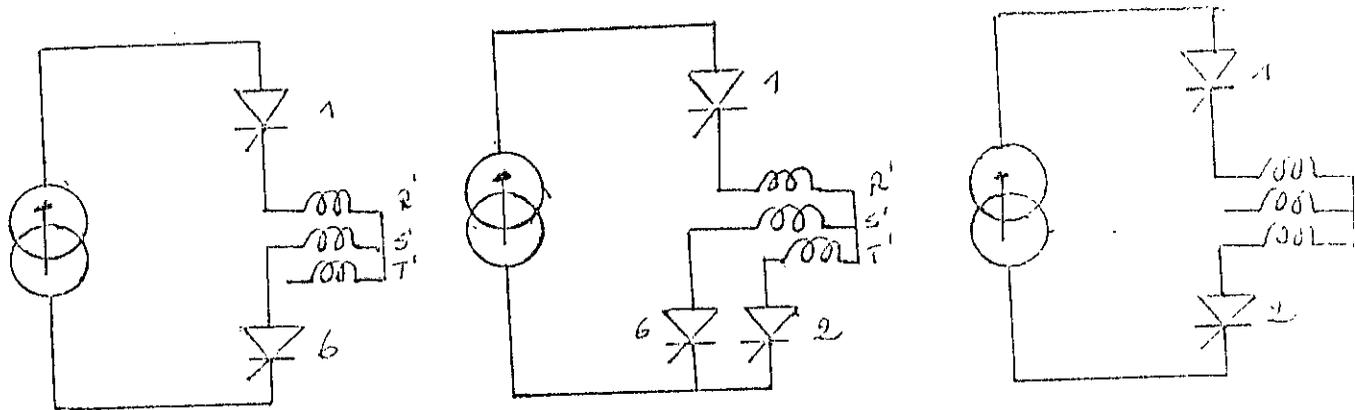
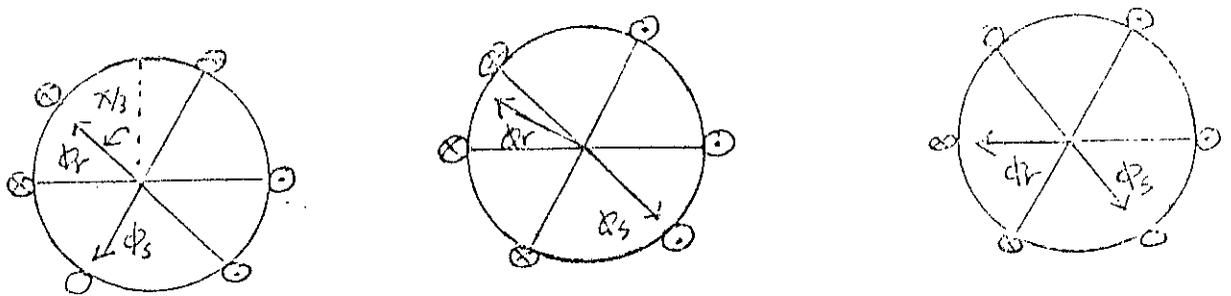


fig. (IV-10) déplacement des flux statoriques et rotiques lors d'une commutation

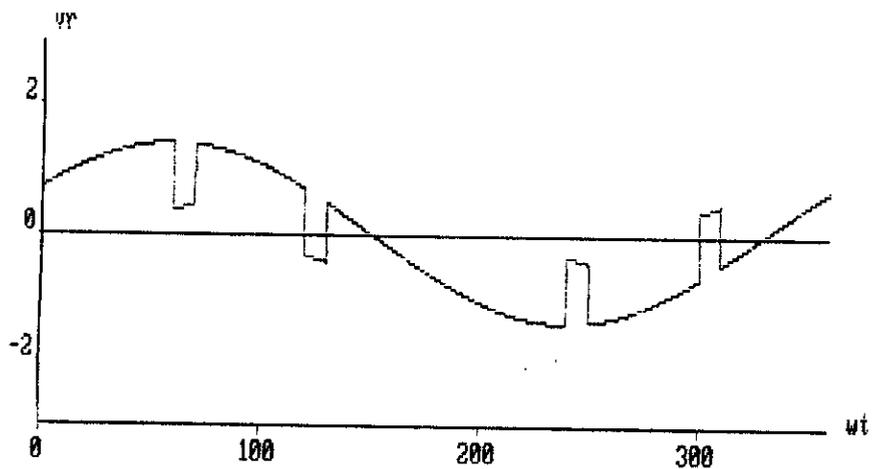


fig. (IV-4) tension simple aux bornes du stator

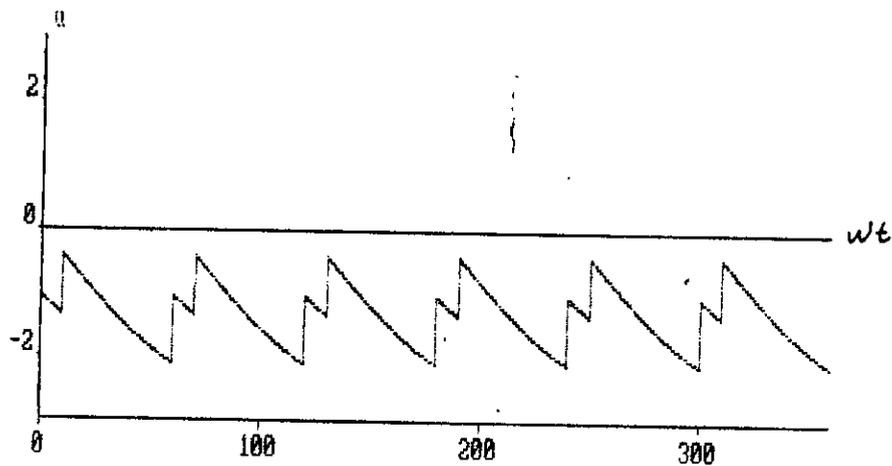


fig.(IV-2) influence de la commutation sur l'allure de la tension redressée

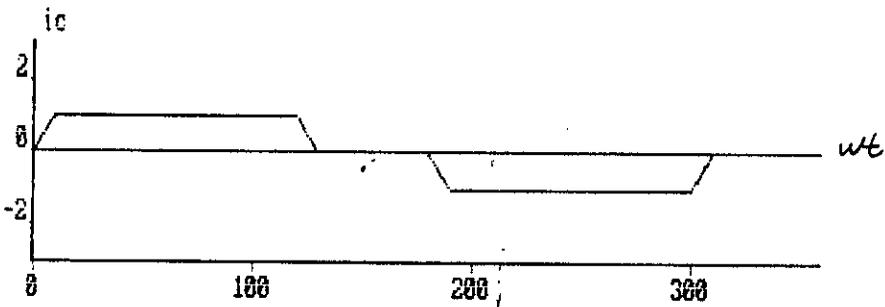
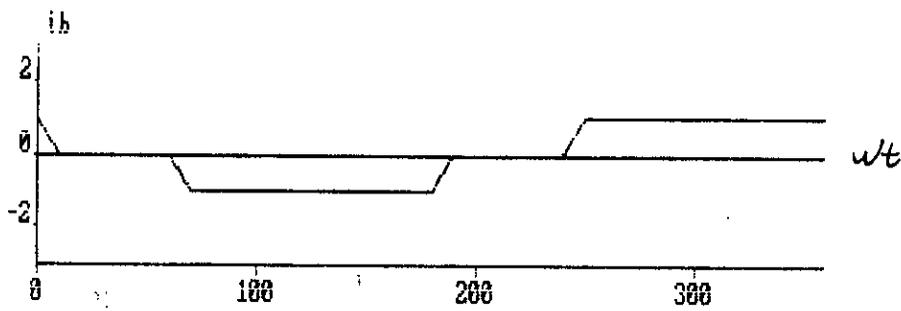
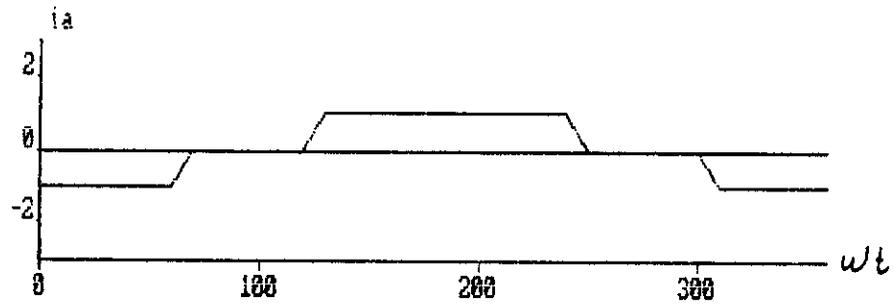


fig. (IV-3) influence de la commutation sur l'allure des courants de phases

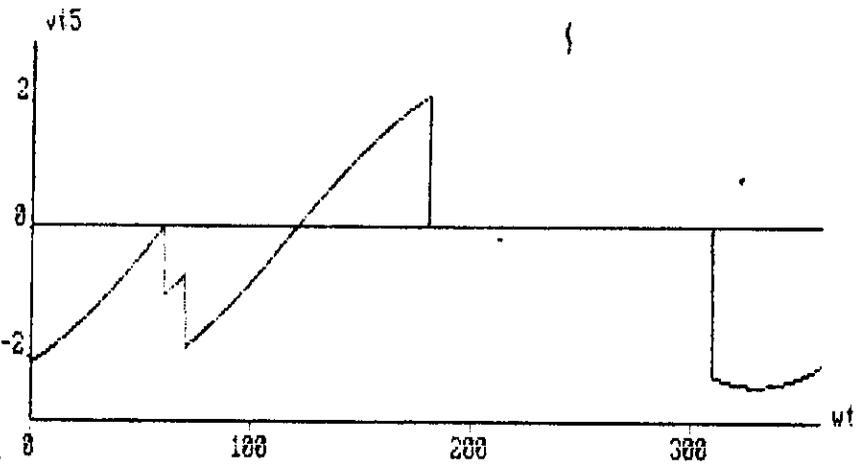
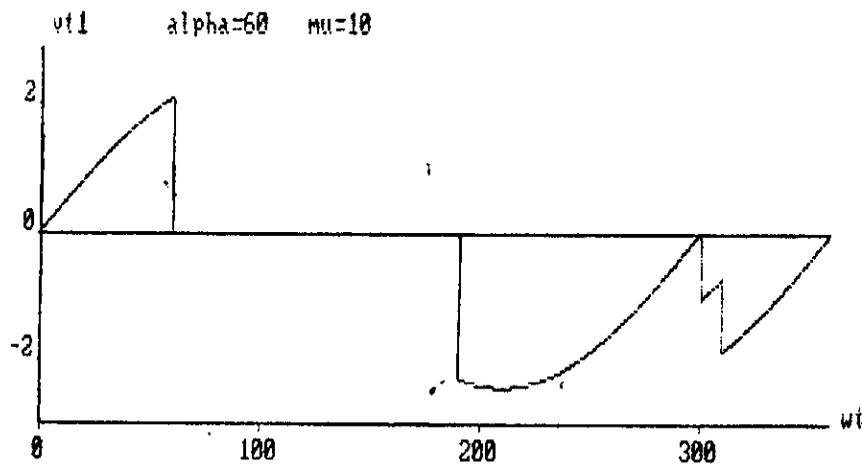
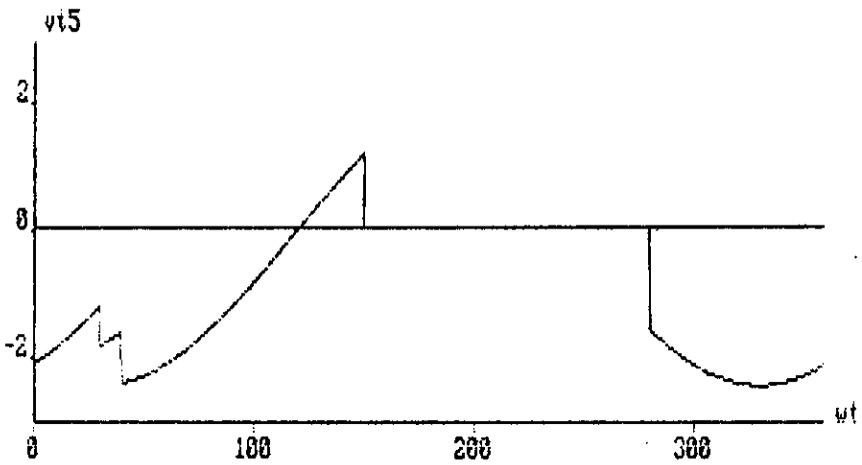
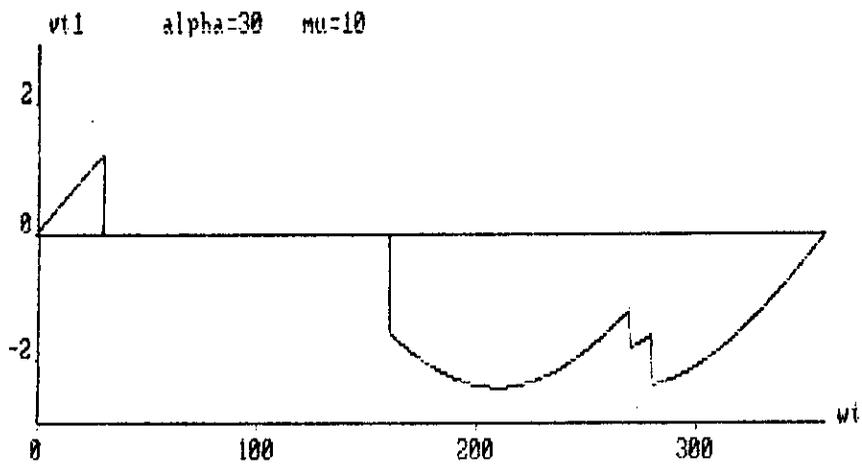


fig.(IV-5) tensions inverses aux bornes des thyristors th1 et th5

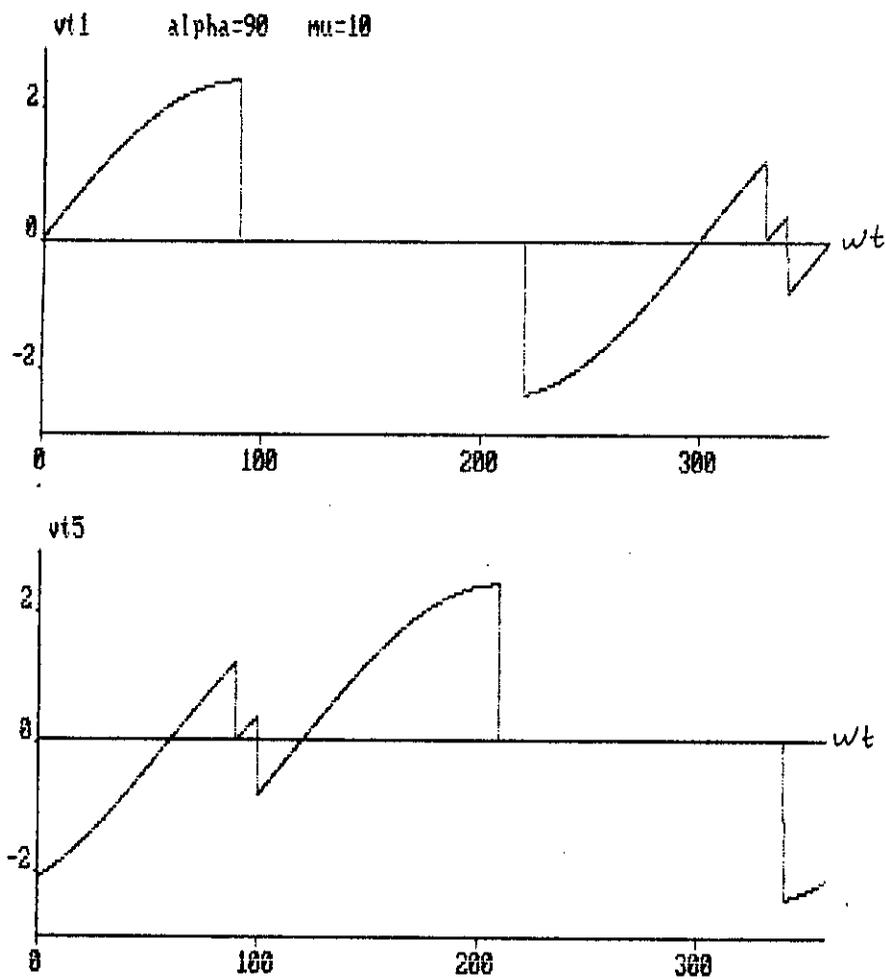


fig.(IV-5) tensions inverses aux bornes des thyristors $th1$ et $th5$

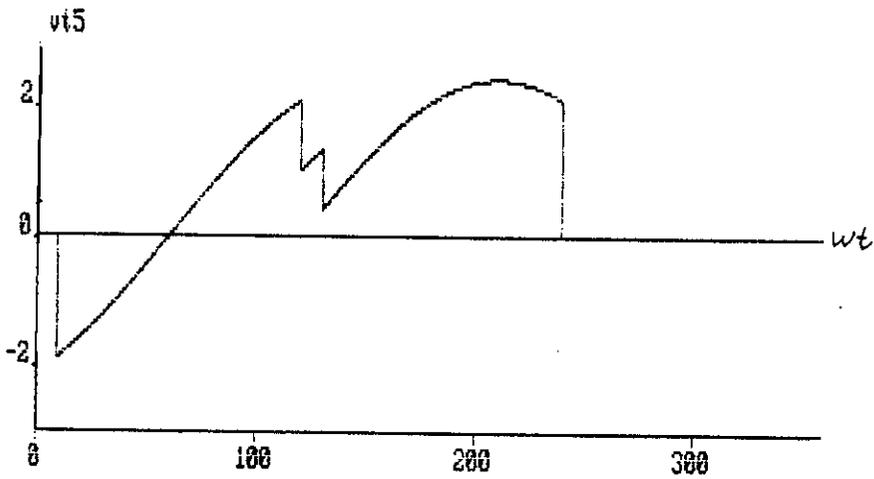
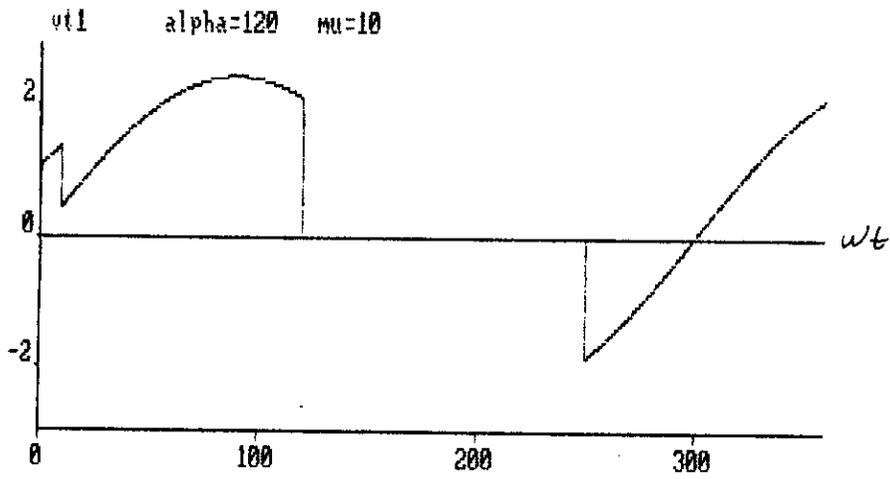


fig:(VI-5) tensions inverses aux bornes des thyristors th1 et th5

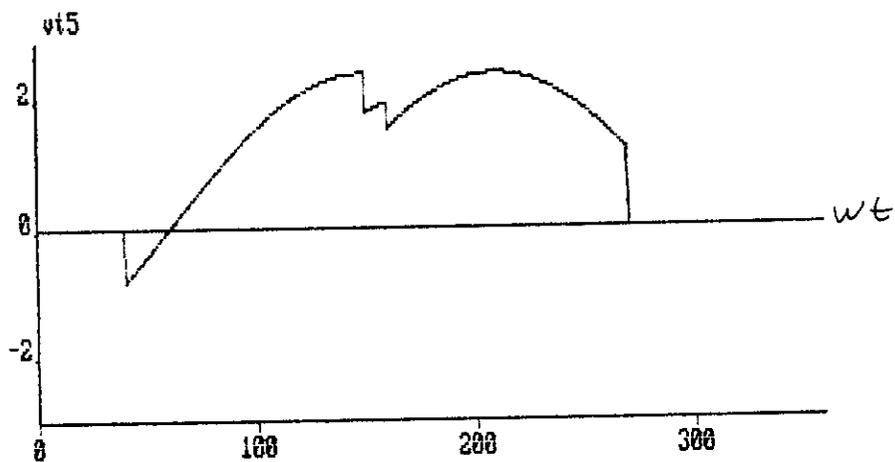
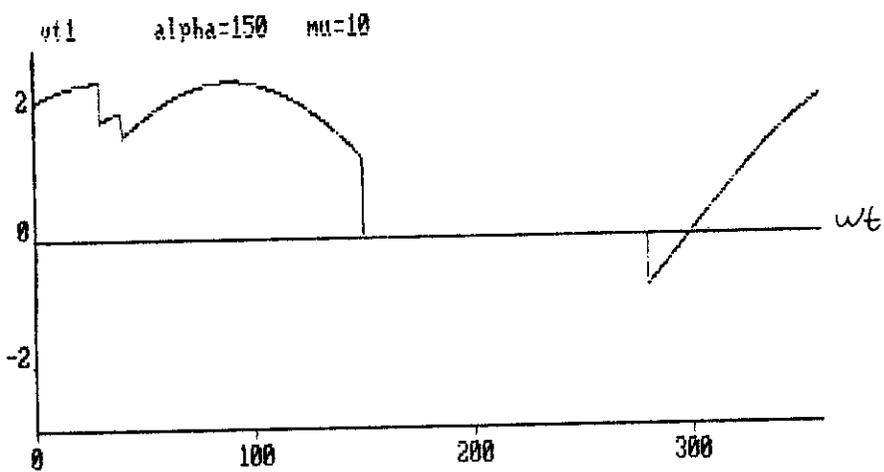


fig.(IV-5) tensions inverses aux bornes des thyristors $th1$ et $th5$

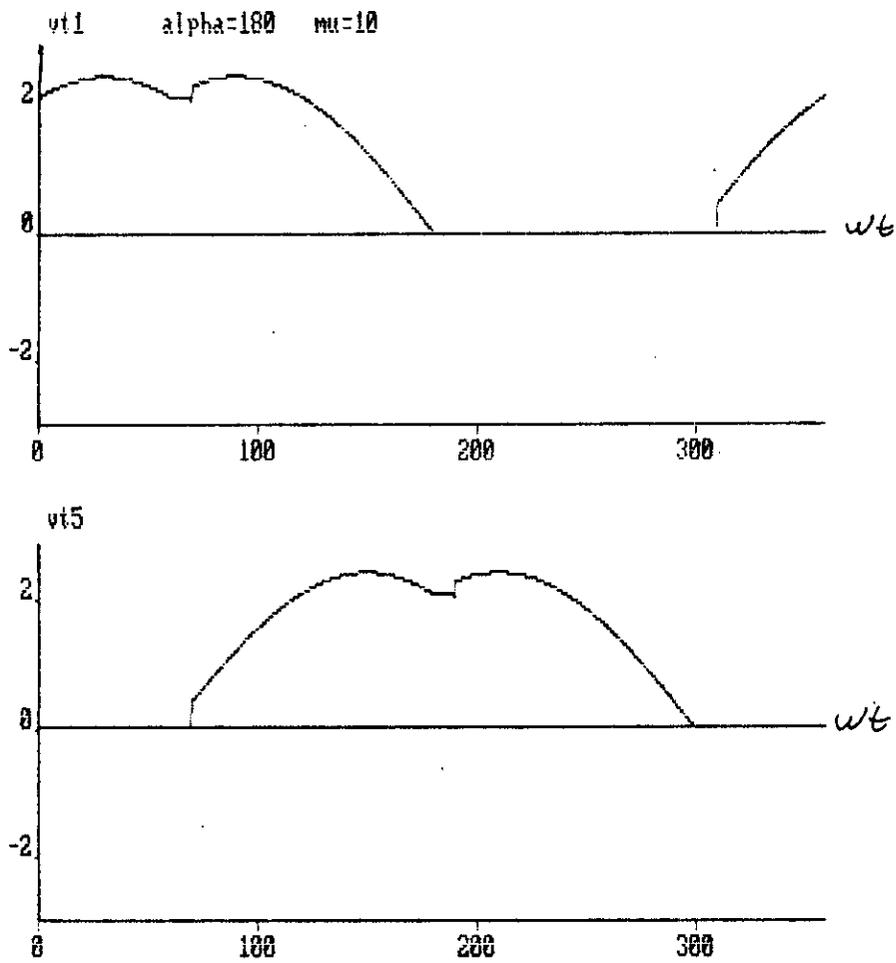


fig.(IV-5) tensions inverses aux bornes des thyristors th1 et th5

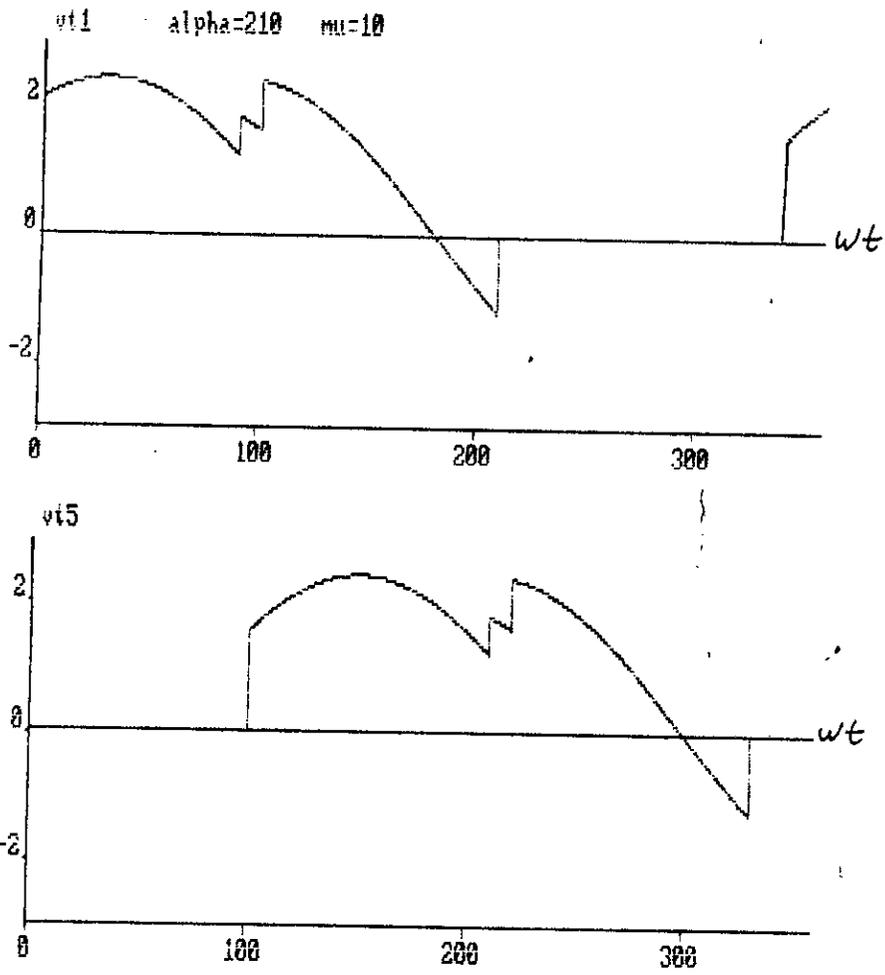


fig. (IV-5) tensions inverses aux bornes des thyristors th1 et th5

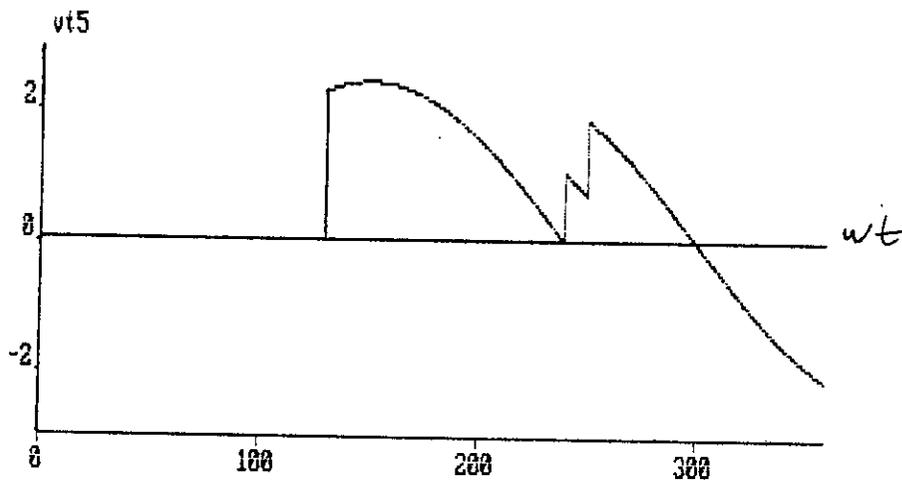
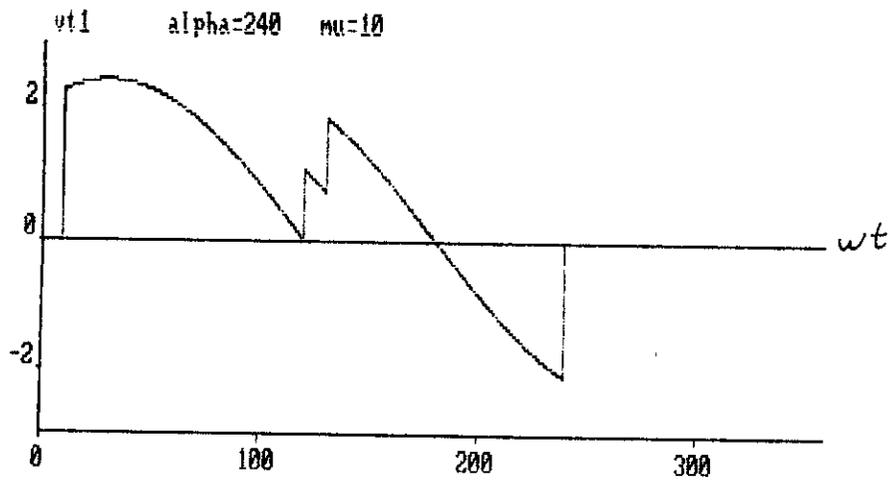


fig.(IV-5) tensions inverses aux bornes des thyristors th1 et th5

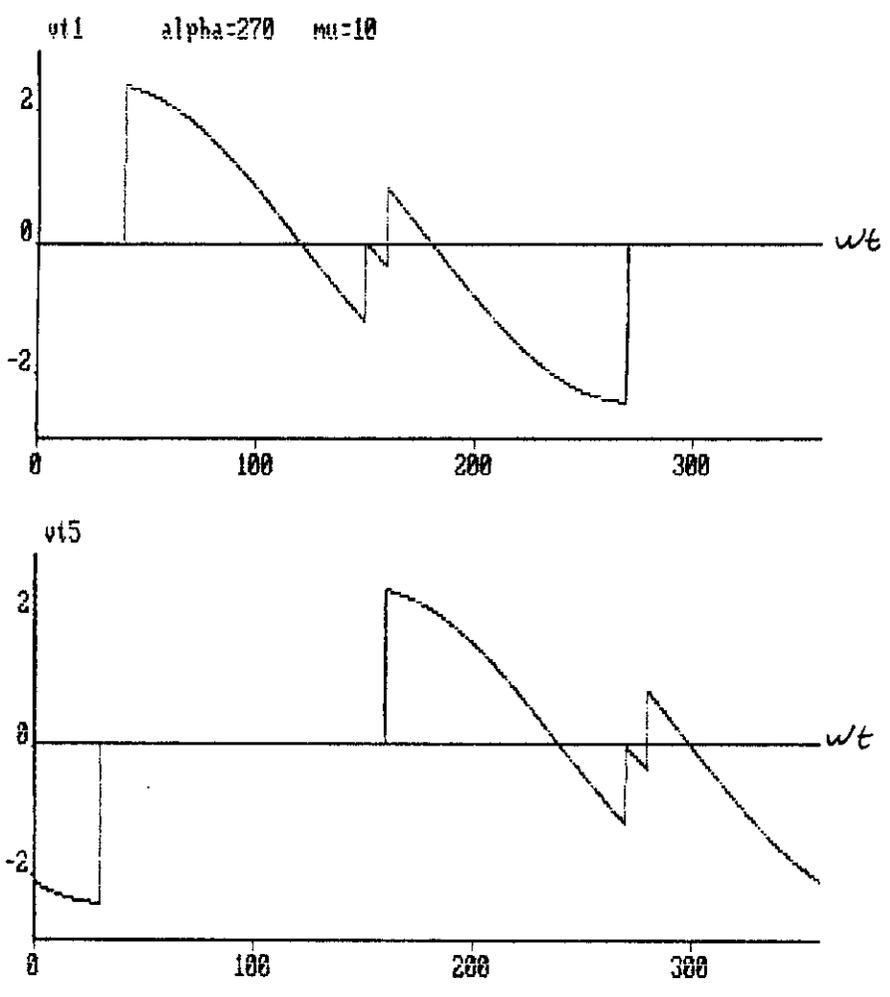


fig.(IV-5) tensions aux bornes des thyristors th1 et th5

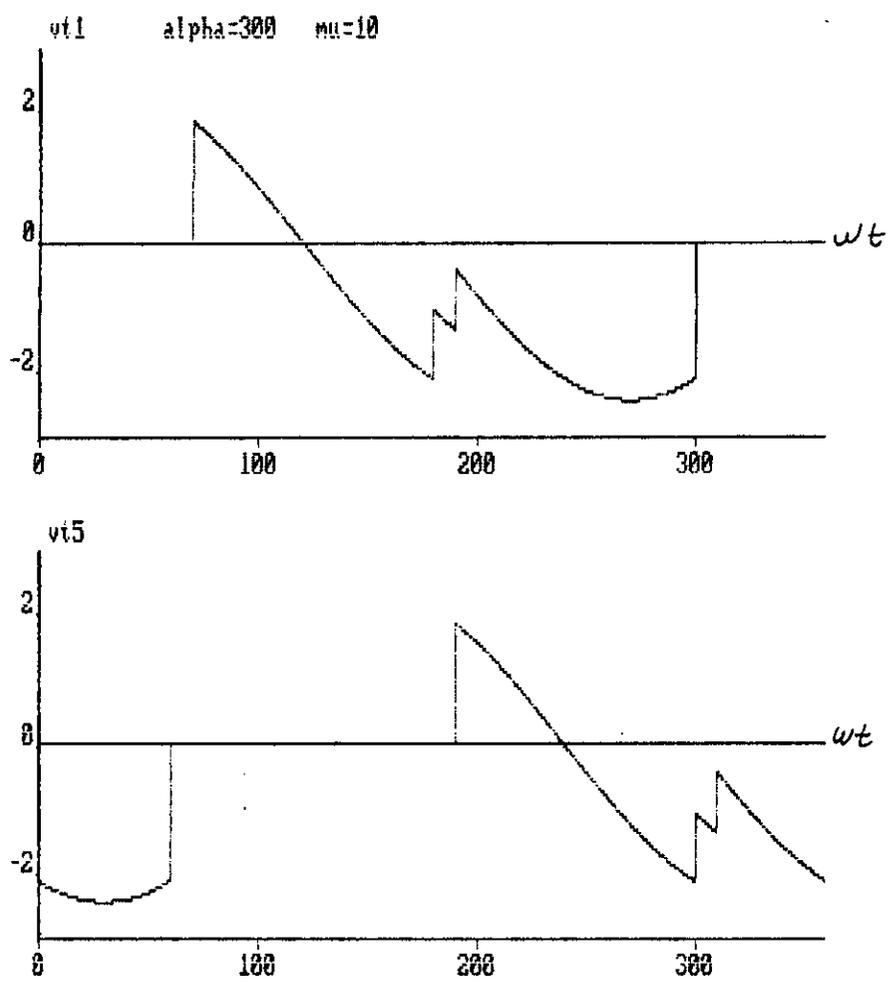


fig. (IV-5) tensions inverses aux bornes des thyristors th1 et th5

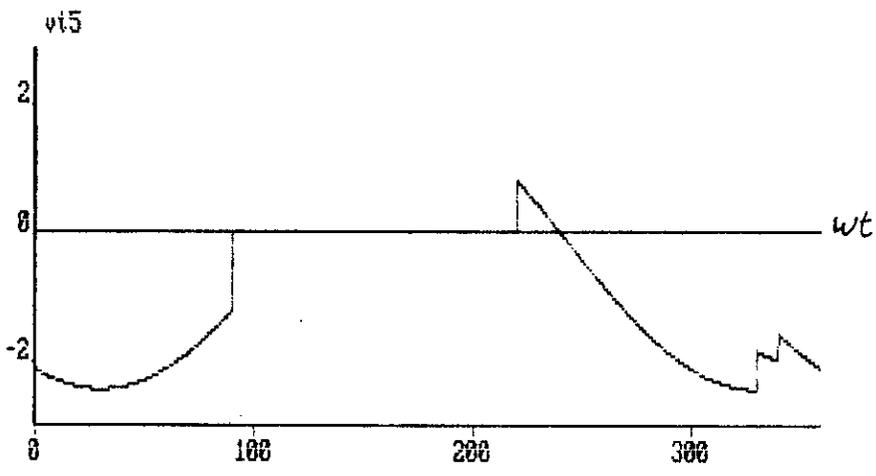
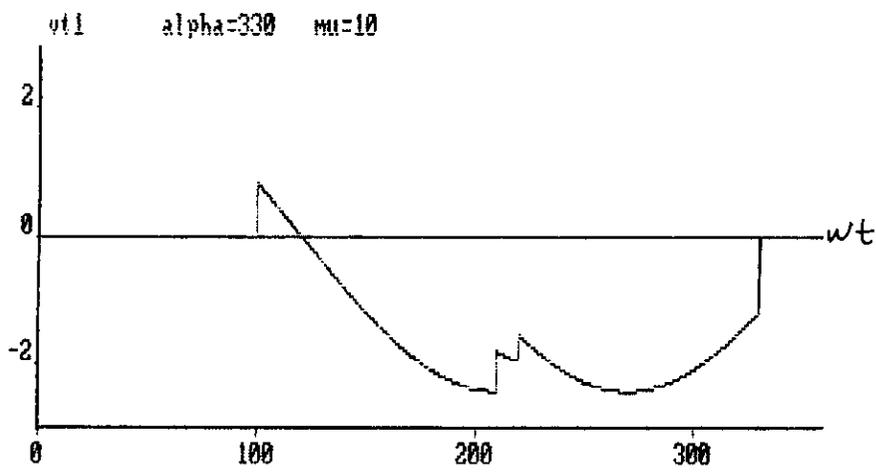


fig. (IV-5) tensions aux bornes des thyristors th1 et th5

CHAPITRE V

**INFLUENCE DES PARAMETRES DE
LA MACHINE SUR LA COMMUTATION**

Le phénomène d'empiètement anodique peut être assimilé à un court-circuit brusque biphasé caractérisé par un très fort courant.

La théorie de park consiste en la décomposition mathématique du système tournant triphasé en composantes diagonales du rotor.

Ceci permet d'aboutir dans chaque axe à un réseau fig(V-1) qu'on peut représenter par un schéma équivalent qui constitue le modèle de la machine en régime subtransitoire.

V-1- Détermination des réactances subtransitoires.

lors d'un régime transitoir, les schémas équivalents subtransitoires : transversale (directe) X_d'' et longitudinale (quadratique) X_q'' vus du stator sont données par la fig.(V-1)

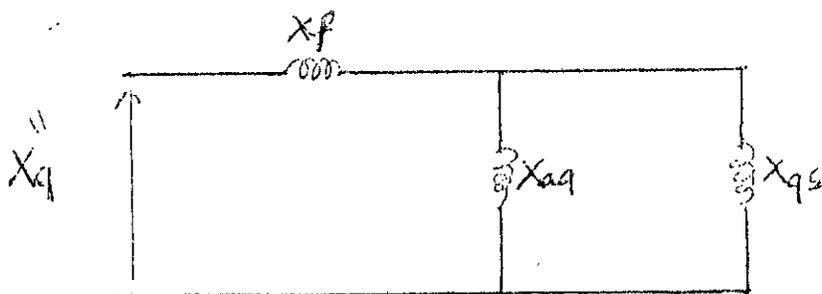
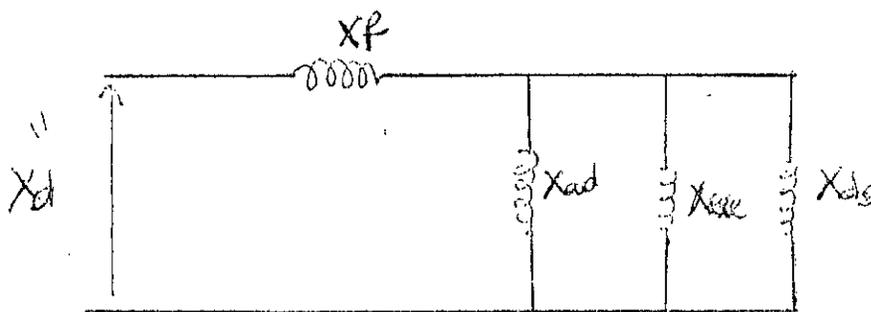


fig.(V-1) schéma équivalent de la machine en régime subtransitoire

X_f = Réactance de fuite du stator

X_{exe} = Réactance de la fuite d'excitation

X_{ad} , X_{aq} = Réactance de fuite d'excitation d'induit directe et quadratique

X_{ds} , X_{qs} = Réactance de fuite d'excitation des amottisseurs suivant l'axe d et q

on admet que la réactance de commutation est donnée par : [2]

$$X_c = X''_d \cos^2 \psi + X''_q \sin^2 \psi$$

avec

$$X''_d = X_f + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{exe}} + X_{ds}}$$

$$X''_q = X_f + \frac{1}{\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{qs}}}$$

il est commode d'exprimer les grandeurs et les paramètres fondamentaux en grandeurs relatives, en partant du fait :

$$x = \frac{X}{Z_n} \quad (\text{ en \% })$$

où Z_n est l'impédance nominale

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n}$$

avec U_n : tension nominale à vide

I_n : Courant nominal

les réactances de fuite d'induit directe et quadratique sont de la forme :

$$X_{ad} = \frac{2 m f \cdot \mu_0 D l w^2 \cdot k_b^2 \cdot k_d}{k_e \cdot k \cdot \mu \cdot e \cdot p^2}$$

$$X_{aq} = \frac{2 m f \cdot \mu_0 \cdot d l \cdot w^2 \cdot k_b^2 \cdot K_q}{k_e \cdot p^2 \cdot e}$$

e = épaisseur de l'entrefer

k_e = coefficient de l'entrefer

K_q, K_d = Coefficient de forme du champ de réaction transversale et longitudinale

K_u = Coefficient de saturation

La réactance de l'enroulement statorique est :

$$X_f = 4 \pi f \cdot \mu_0 \frac{l w^2}{p q} \lambda$$

q = nombre d'encoche par pôle et par phase

w = nombre de spires par phase

λ = perméance de fuite

où

$$\lambda = \lambda_e + \frac{q}{l} \lambda_f l_f$$

λ_e = perméance d'encoche par unité de longueur de la machine

$\lambda_f l_f$ = perméance des parties frontales

L'inductance de fuite se compose de trois termes :

- L'inductance de fuite d'encoche
- l'inductance de fuite des têtes de bobines
- l'inductance due au flux différentiel dans les machines à faible entrefer.

Dans le cas de notre machine, qui est une machine synchrone à pôles saillants, on peut négliger le flux de fuite à cause de l'épaisseur de l'entrefer qui est relativement importante, de la présence d'espace aérien entre les pôles et de la forte alternation des champs harmoniques par le système amortisseur.

La réactance de l'enroulement d'excitation en unités relatives est :

$$X_{exe} = \frac{4^2 \cdot A_{kb} \cdot k_{ad}^2}{\pi^2 \cdot B_e} L_{BS}$$

k_{ad} = Coefficient de réduction de la f.m.m. de la réaction d'induit suivant l'axe d à la f.m.m. de l'enroulement d'excitation

L_{BS} = perméance de fuite de l'enroulement d'excitation par unité de longueur

$$L_{BS} = \frac{2 \cdot h_{m1}}{3 \cdot c_{m1}} + \frac{h_{m2}}{c_{m2}} + \frac{h_p}{c_p} + \frac{(l_p - l)}{2 \cdot l_p} + 0.5 \cdot h_m + 0.125 \cdot b_m$$

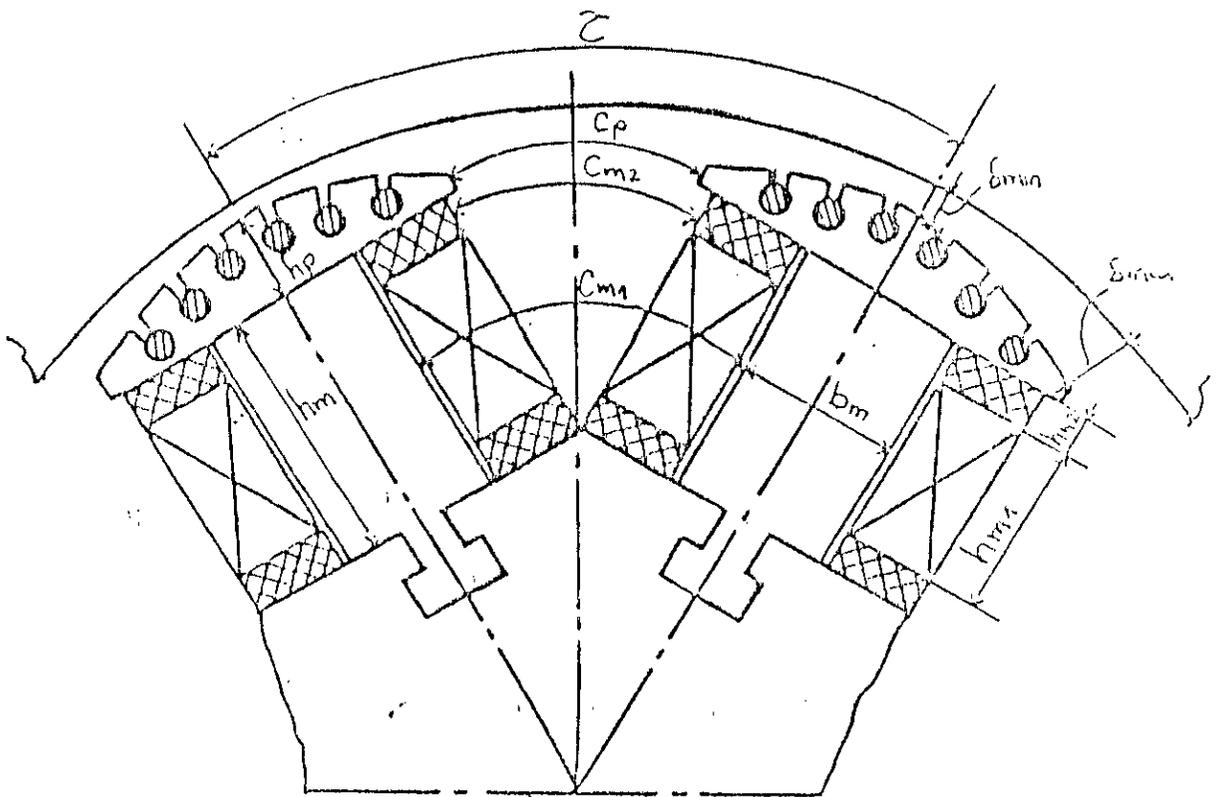


fig. (V-2) disposition des enroulements d'excitation et des pôles de la machine

pour le système amortisseur :

$$X_{ds} = 4 \frac{2 \mu_0 A}{b_e} \frac{k_b}{n_b} \lambda_d$$

$$X_{qs} = \frac{\lambda_q}{\lambda_d} X_{ds}$$

avec λ_d, λ_q = perméance de fuite suivant les axes d et q
 n_b = nombre de barres d'amortisseurs par intervalle polaire

V-2- Choix du type de bobinage

Il existe deux grandes classes d'enroulements qui prennent être à pas diamétral ou à pas raccourci

- les enroulements à une couche,
- les enroulements à deux couches.

V-2-1- Bobinage à une couche à pas diamétral

Dans un enroulement à une couche, à pôles consécutifs, l'ensemble des conducteurs sortant de q encoches forme un faisceau commun embrassé par le flux de fuite frontal total.

La réactance inductrice des parties frontales est de la forme :

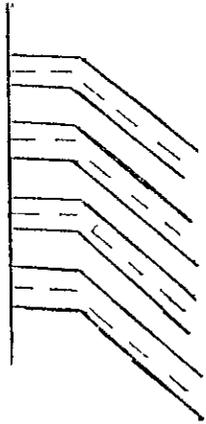
$$X_{fr} = 2 \pi f n^2 q^2 \rho \cdot \mu_0 \cdot \sum \lambda_{lx}$$

n = nombre de conducteurs par encoche

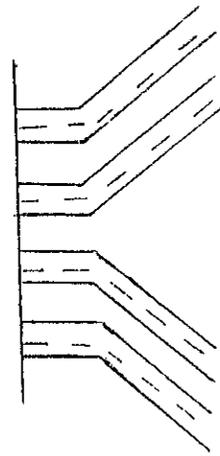
$\sum \lambda_{lx}$ est la somme des coefficient des perméances frontales.

par contre, dans un enroulement par pôle, dans les zones de sortie rectiligne des parties frontales, la réactance inductrice augmente de q^2 fois et ensuite, les fils se séparent en deux ; pour cette raison dans ces zones, la réactance inductrice augmente seulement de $(q/2)^2$ fois

V-2-2- Bobinage à une couche



b- par pôles consécutifs



a- par pôles

fig.(V-3) disposition des demi-têtes de bobines suivant le type de bobinage

Dans le bobinage à une couche à pas diamétral, les fuites sont maximales. D'où la valeur de la réactance de commutation est importante ce qui convient le plus au cas de l'alimentation en tension.

V-2-3- Bobinage à deux couches

On peut donner à ces enroulements la formes combriquée ou la forme ondulée.

Pour les bobinages triphasés, on emploie de plus en plus les bobinages à imbriqués à deux faisceaux par encoche, car ils présentent trois avantages :

- Possibilité de réduction du pas de bobinage
- Fixation homogène des têtes de bobines
- Nécessité d'un seul moule de bobines

Donc, nous opterons pour l'alimentation en courant, le bobinage par pôle, imbriqué à pas raccourci;

Et pour une alimentation tension, le bobinage par pôle conséquent, à pas diamétral.

V-3- Choix du type d'encoche

La réductance du fer étant négligeable, en supposant que les lignes d'inductance passent partout par l'encoche de façon rectiligne et parallèlement l'une à l'autre.

La perméance de l'encoche fig.(V-4 a) est :

$$\mathcal{L}_e = \frac{h_1}{3b_1} + \frac{h_2}{b_1} + \frac{2 h_3}{b_1+b_2} + \frac{h_4}{b_2}$$

la perméance de l'encoche fig.(V-4 b)

$$\mathcal{L}_e = \frac{h_1}{3b_1} + \frac{h_2}{b_3} + \frac{2 h_3}{b_2+b_3} + \frac{h_4}{b_2}$$

la perméance de l'encoche fig.(V-4 c)

$$\mathcal{L}_e = \frac{2 h_1}{3(b_1+b_3)} + \frac{h_2}{b_3} + \frac{2 h_3}{b_2+b_3} + \frac{h_4}{b_2}$$

la perméance de l'encoche circulaire fig.(V-4 d)

$$\mathcal{L}_e = \frac{0.623 kc + h_1}{b_1}$$

Dans le cas d'un conducteur circulaire massif, il faut tenir compte du blindage des champs de fuites, en introduisant un coefficient kc

$$kc > 1$$

pour la forme de l'encoche représentée sur la fig.(V-4 e) on a :

$$\mathcal{L}_e = \frac{2 h_1}{3(b_1+b_3)} + \frac{0.623}{b_2} + \frac{h_4}{b_2}$$

La perméance de l'encoche de la fig.(V-4 f)

$$\lambda_e = \frac{1}{4} \left(\frac{8h}{3b_1} + \frac{h_2}{b_1} + \frac{4h_3}{b_1} \right)$$

Le choix du type de l'encoche est lié à la largeur de son isthme, plus celui-ci est étroit, plus les lignes de fuites sont plus importantes à cause de la perméabilité importante du fer.

De ce fait, nous opterons pour une encoche ouverte, dans le cas d'une alimentation courant, car elle présente la plus faible perméance et pour une encoche semi-fermée ou trapézoïdale dans le cas d'une alimentation tension.

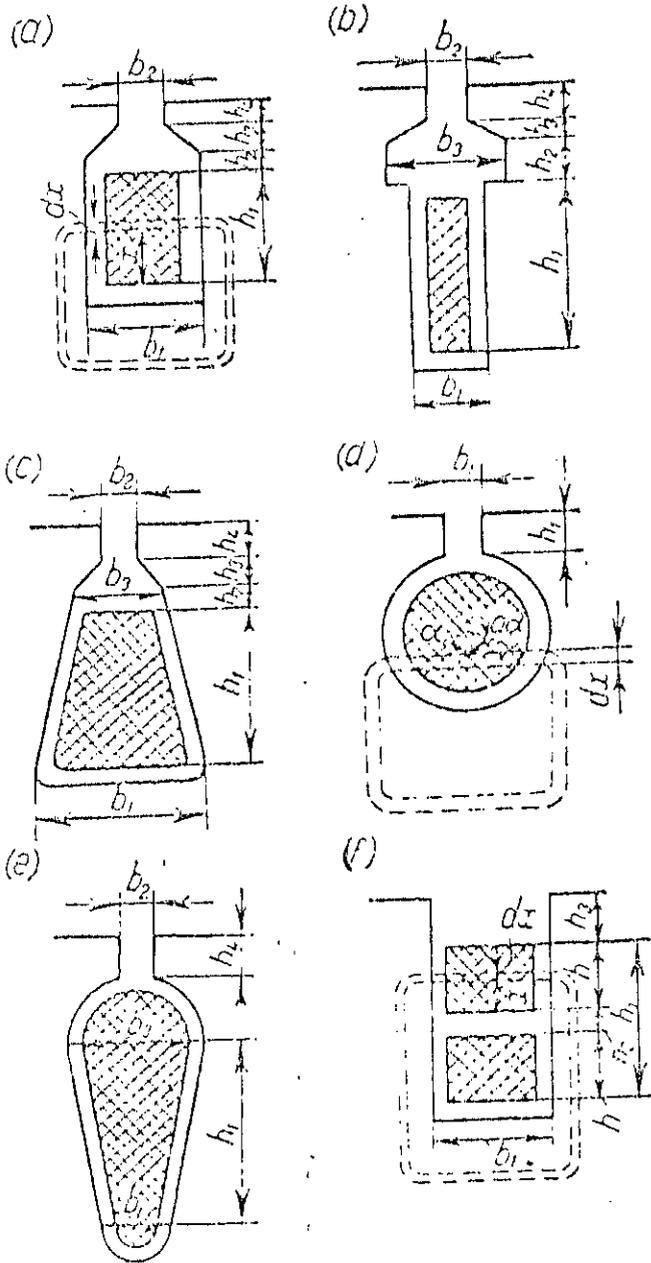


fig.(V-4) calcul de la perméance d'encoche

V-4- Influence du raccourcissement

Dans les enroulements triphasés à deux couches à pas raccourci, chaque encoche peut contenir des conducteurs appartenant à deux phases différentes, donc, à des courants de phases différentes. [10]

Avec un pas raccourci, l'étage inférieur sera décalé par rapport au supérieur d'un angle $(1-\beta)\pi$

On applique aux formules de perméances précédentes L_e , un coefficient de réduction k_s

$$k_s = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{a\pi}{m} \right)$$

avec

$$\beta = \frac{m-a}{m}$$

a : nombre tel que $\frac{m-a}{m}$ soit égal à la valeur relative

du pas .

En introduisant $h = \frac{h_1 - h_2}{2}$ dans la formule de la fig.(V-4 f)

et en négligeant $\frac{h_2}{12b_1}$ on a :

$$L_e = \frac{h_1}{3b_1} + \frac{h_3}{b_1}$$

La diminution de la perméance pour un pas raccourci β tel que

$2/3 < \beta < 1$ a lieu pour un k_s

$$k_s = \frac{3\beta + 1}{4}$$

la formule de la fig.(V-4 f) peut prendre la forme suivante :

$$\lambda_e = \left(\frac{h_1}{3b_1} + \frac{h_3}{b_1} \right) \frac{3\beta + 1}{4}$$

V-5- Perméance des parties frontales

Le calcul des perméances des parties frontales est beaucoup plus difficile que celui de la perméance de l'encoche, car les têtes de bobines se développent dans les trois plans et sont loins d'être de formes simples.

De plus, il faut tenir compte de l'inductance mutuelle entre phases, ou bobines voisines, et de la présence de pièces en métal massif qui modifient la courbe de répartition du champ magnétique.

Le calcul de ces inductances se fait par des formules empiriques.

Pour les enroulements à une couche à deux plans, on applique la formule suivante :

$$L = L_g L_f = 0,67 L_f - 0,43 \mathcal{C}$$

et pour les enroulements à une couche à trois plans, la valeur de la perméance est 2 fois plus petite.

$$L = L_g L_f = 0,47 L_f - 0,3 \mathcal{C}$$

V-6- Influence du nombre de paires de pôles

La réactance de commutation diminue, lorsque P varie de 2 à 4, puis reste pratiquement constante ; donc, il n'est pas nécessaire d'augmenter P au delà de 4 pour améliorer l'angle de commutation.

Dans le cas d'une alimentation tension, le nombre de paires de pôle doit être inférieur ou égal à 2 fig.(V-5).

V-7-Influence du nombre d'encoche par pôle et par phase

Lorsque le nombre d'encoche par pôle et par phase augmente, la réactance de commutation diminue et donc l'angle d'empiètement, cette augmentation de q nous donne une onde de la f..e.m. pratiquement sinusoidale.

La diminution de q, convient pour une alimentation tension fig.(V-6)

V-8- Influence des dimensions d'encoche

L'angle de commutation augmente pour les encoches profondes, d'où la nécessité d'une alimentation en tension.

L'amélioration de l'angle d'empiètement est meilleure pour une largeur d'encoche supérieure ou égale à son hauteur fig.(V-7)

V-9- Influence du pas de bobinage

On remarque que l'angle d'empiètement est proportionnel au coefficient de raccourcissement du bobinage.

Ce raccourcissement permet de réduire la réactance de commutation et par conséquent l'angle de commutation.

Dans le cas d'une alimentation tension, on utilise le pas diamétral fig.(V-8)

V-10- Influence de l'épaisseur de l'entrefer

L'augmentation de l'entrefer entraîne une réduction de la réactance de fuite des enroulements statoriques, permettant ainsi une décroissance de l'angle d'empiètement.

Pour l'alimentation en tension, il faut diminuer l'épaisseur de l'entrefer, afin d'augmenter la réactance de commutation fig.(V-9)

V-11- Influence du diamètre de la machine

L'angle d'empiètement augmente avec l'augmentation du diamètre de la machine. Pour améliorer l'angle d'empiètement, on procède à la diminution du diamètre de la machine, et l'augmenter pour une alimentation tension, car la réactance de commutation augmente fig.(V-10)

V-12- Influence de la longueur de la machine

L'angle de commutation est meilleur pour des machines dont la longueur est supérieure au diamètre. Ces machines sont dites de type "Saucisson". Dans le cas contraire, c'est à dire : les machines dont le diamètre est supérieur à la longueur, convient pour une alimentation tension, ces machines sont dites de type "Camembert". fig.(V-11)

V- 13- Conclusion

D'après les résultats obtenus, on constate que : la valeur de la réactance de commutation X_c influe considérablement sur la valeur de l'angle d'empiètement.

Pour minimiser la réactance de fuite afin d'améliorer l'angle de commutation, on peut dire que :

- Le moteur doit être du type saucisson,
- Le nombre de pôles doit être supérieur ou égal à 4,
- Le type de bobinage est par pôle, imbriqué à pas raccourci,
- L'épaisseur d'entrefer doit être grande
- L'encoche ouverte, sa largeur doit être supérieure ou égale à sa profondeur,

- Le nombre d'encoche pôle et par phase doit être supérieur ou égal à 4,
- Le moteur est muni d'amortisseurs.

Dans le cas contraire, c'est à dire, augmenter la réactance de commutation,

- Le Moteur est de type camembert,
- Le nombre de pôles doit être inférieur ou égal à 2,
- Le type de bobinage est par pôle conséquent, à pas diamétral,
- L'entrefer est petit,
- L'encoche est semi-fermée, profonde,
- Le nombre d'encoche/pôle/phase doit être inférieur ou égal à 2,
- Le moteur est sans amortisseurs.

Tableau récapitulatif :

	D/L	Type	Bobinage
Alimentation courant	<1	saucisson *1	par pôle
Alimentation tension	>2	camembert *2	par pôle conséquent

	Enroulement	Type d'encoche	dimension d'encoche	Nbrs d'encoche /pôle/phase
Alimentation courant	imbriqué à pas raccourci	ouverte	$b_1 \geq h_1$	≥ 2
Alimentation tension	concentrique à pas diamétral	semi-fermée	$h_1 \geq b_2$	≤ 2

	l'épaisseur d'entrefer	nombre de pôles	amortisseurs
Al	grand	≥ 4	avec
AU	petit	2	sans

*1 : les machines dont la longueur est supérieure au diamètre

*2 : les machines dont le diamètre est supérieur à la longueur

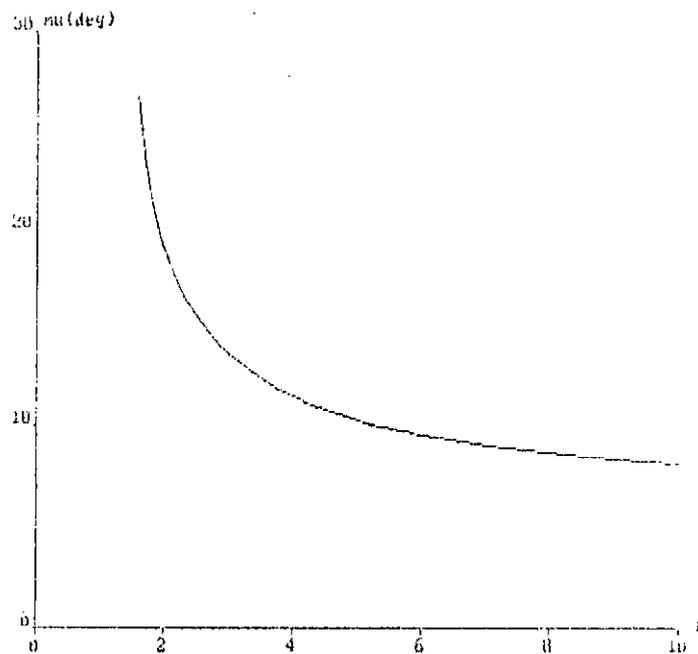


fig. (V-5 a) variation de l'angle d'empiètement en fonction du nombre de paire de pôle

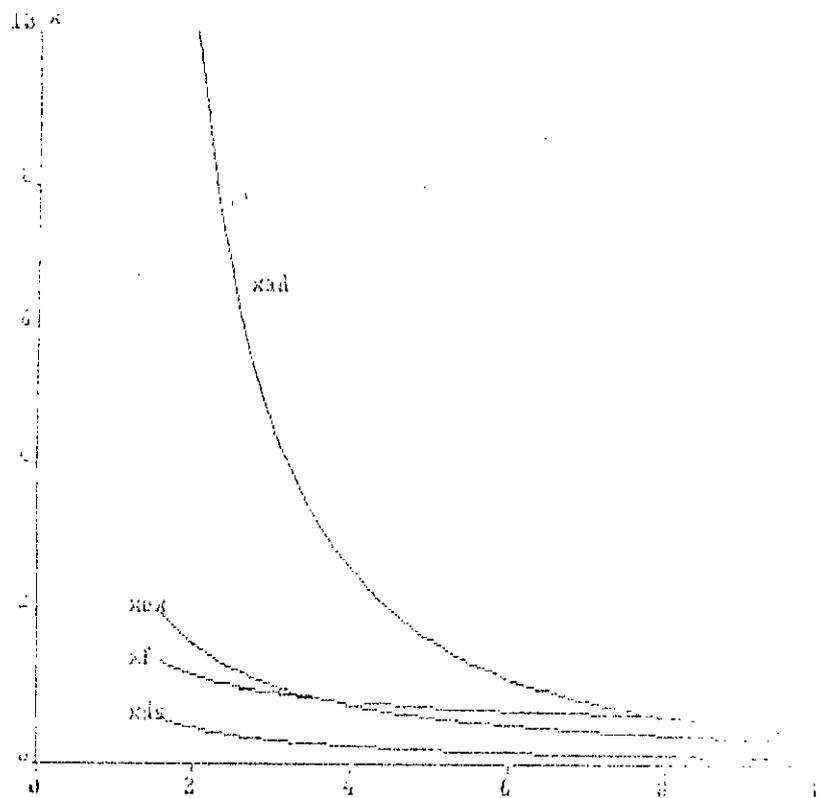


fig. (V-5 b) variation de la réactance de commutation en fonction du nombre de paire de pôle.

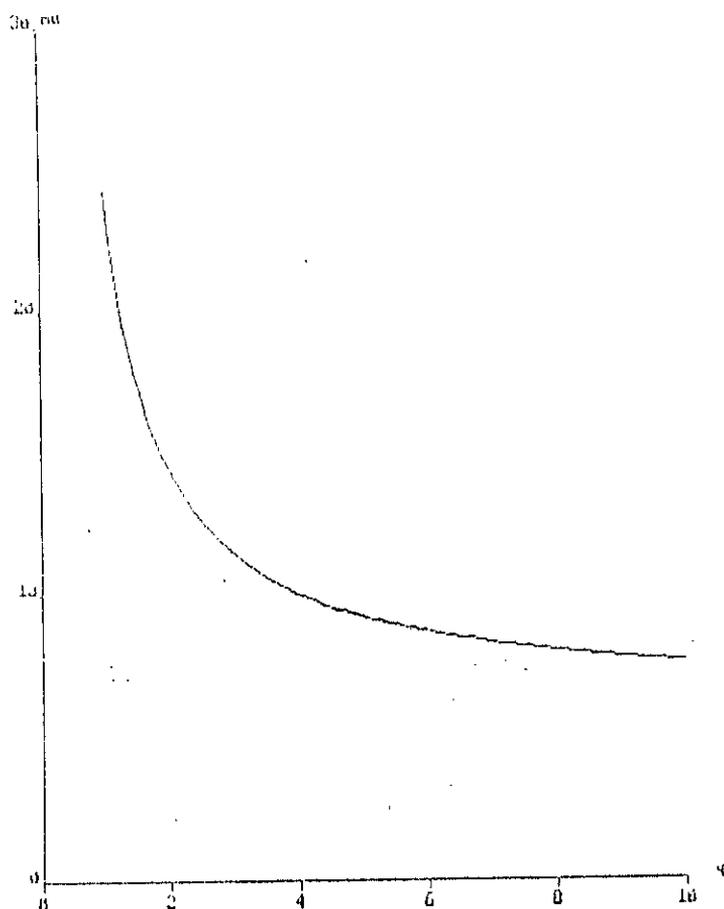


fig. (V-6 a) variation de l'angle d'empiètement en fonction du nombre d'encoche

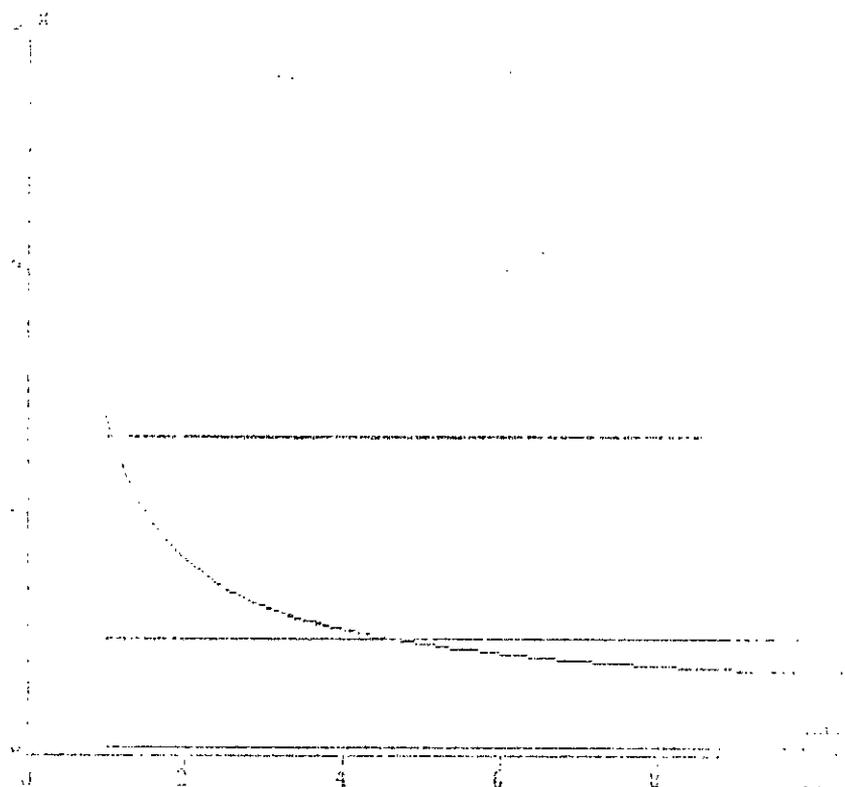


fig. (V-6 b) variation de la réactance de commutation en fonction du nombre d'encoche

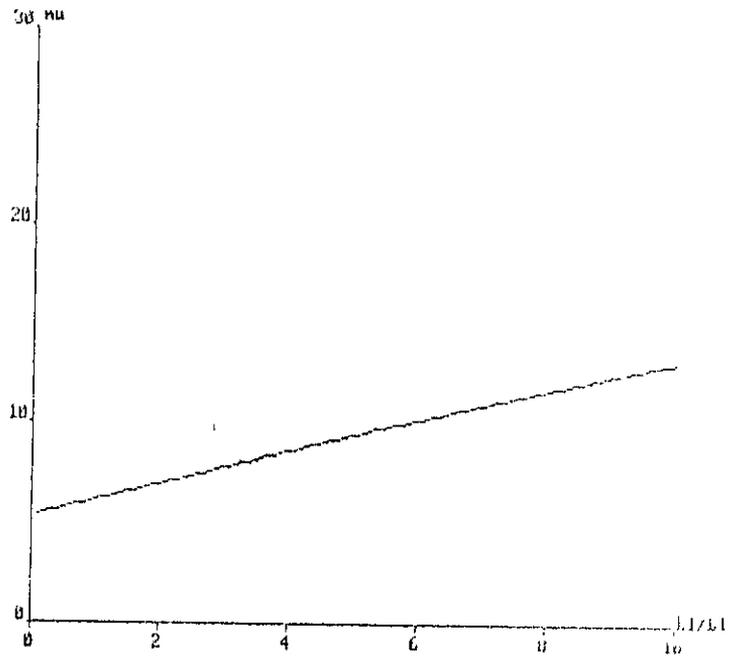


fig. (V-7) variation de l'angle d'empiètement en fonction des dimensions d'encoche

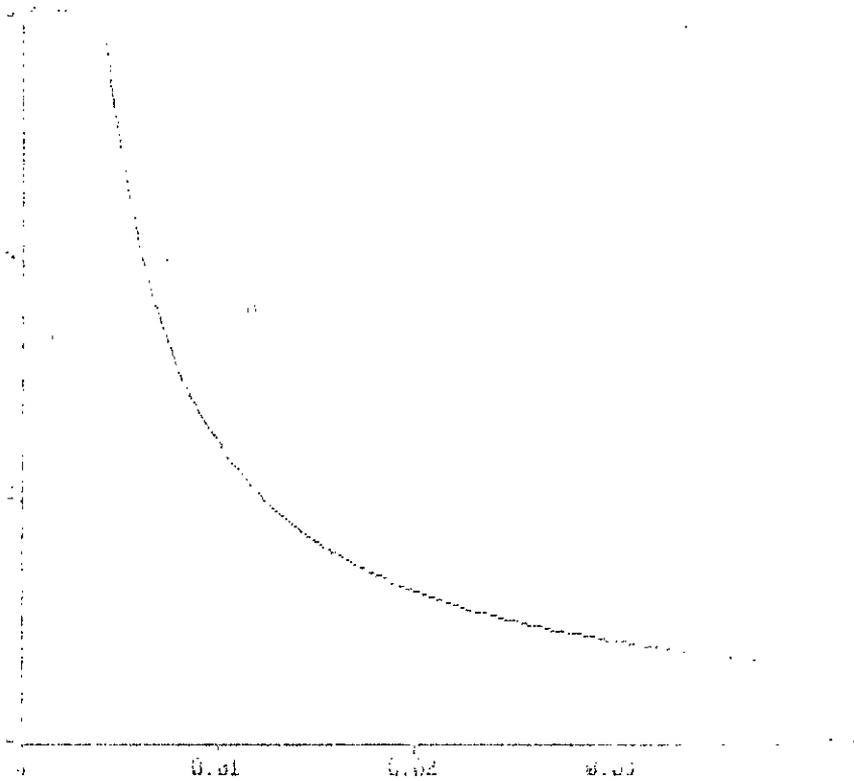


fig. (V-9) variation de la réactance de commutation en fonction de l'épaisseur d'entrefer

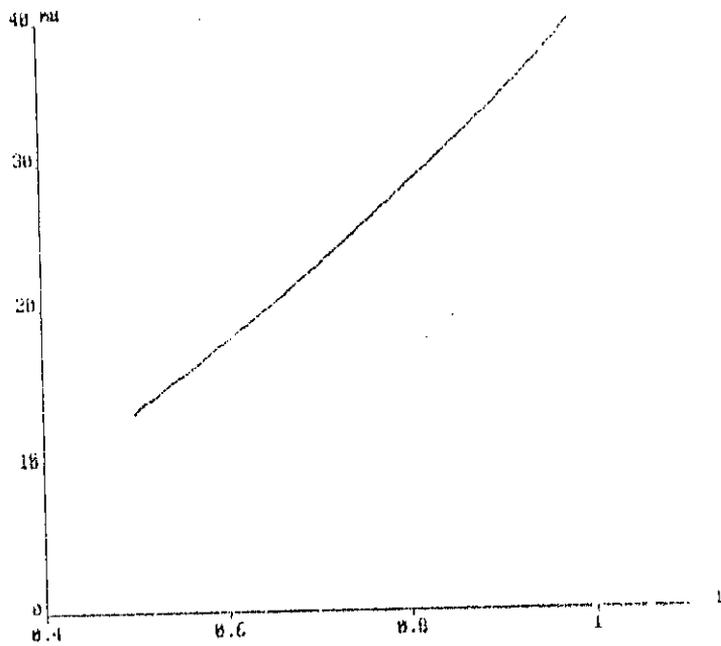


fig. (V-8 a) variation de l'angle d'empîtement en fonction du raccourcissement

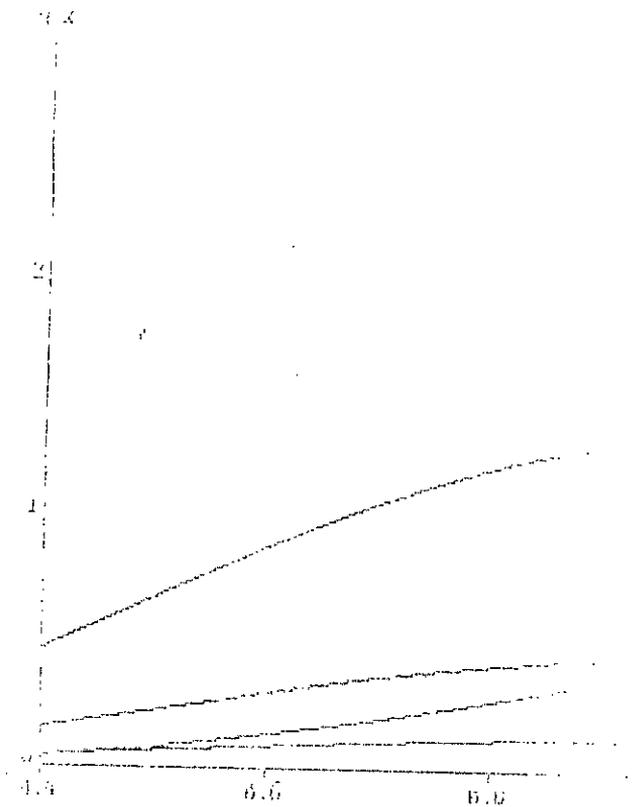


fig. (V-8 b) variation de la réactance de commutation en fonction du raccourcissement

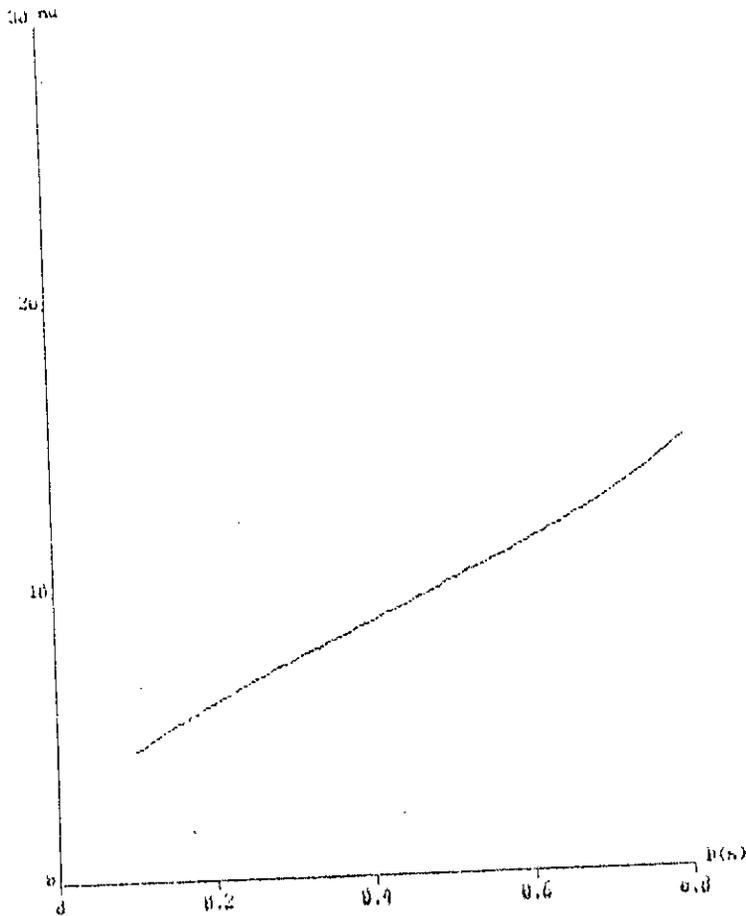


fig. (V-10) variation de l'angle d'empîement en fonction de diamètre de la machine

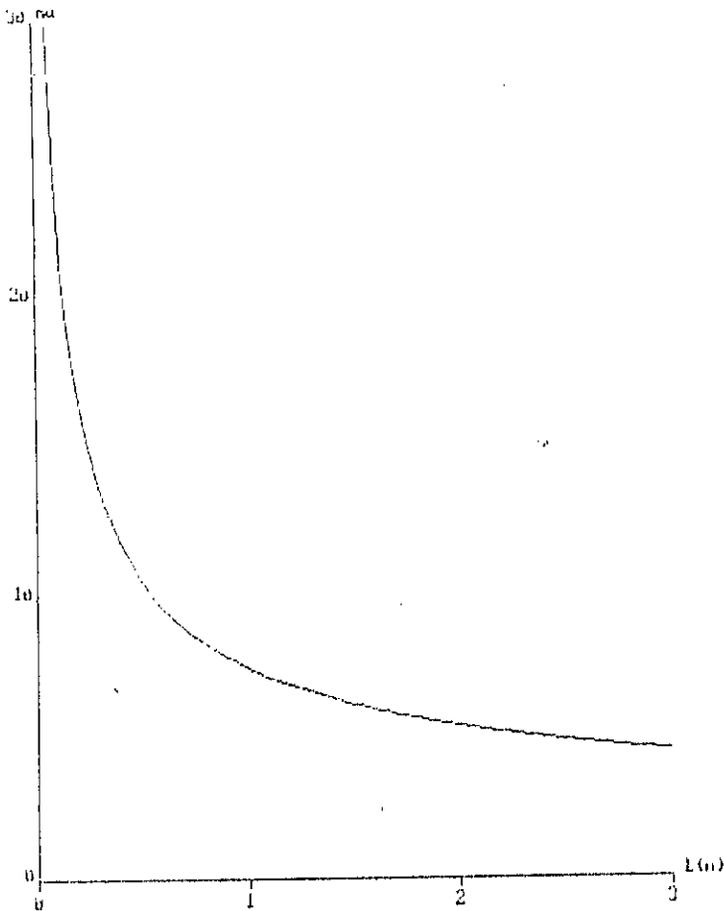


fig. (V-11 a) variation de l'angle d'empiètement en fonction de la longueur de la machine

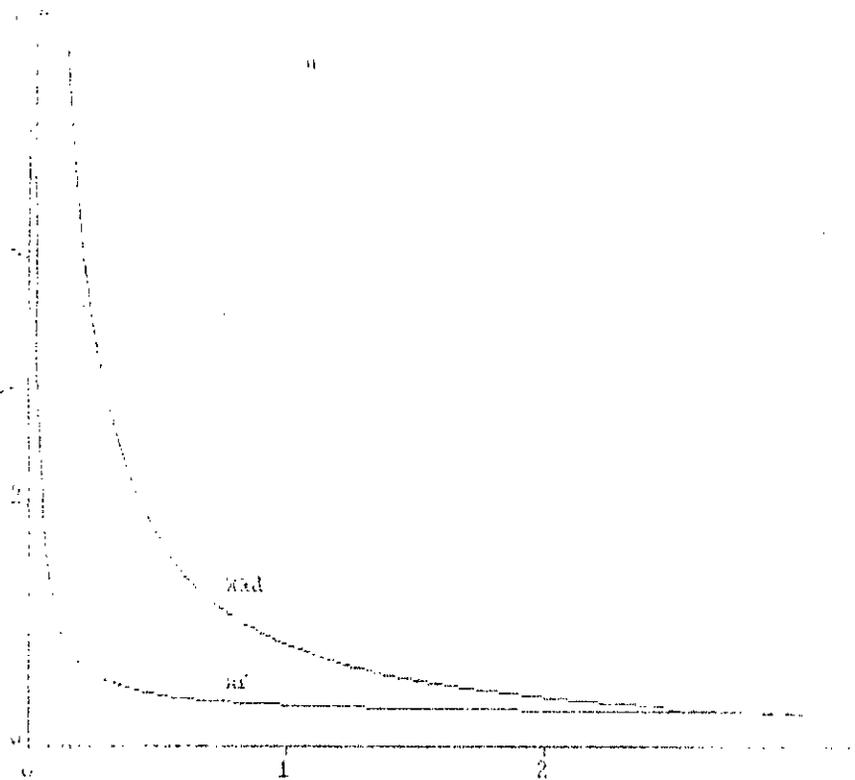


fig. (V-11 b) variation de la réactance de commutation en fonction de la longueur de la machine

REMARQUE :

Etant donné une machine synchrone autopilotée alimentée par un commutateur de courant à thyristors fonctionnant en commutation naturelle.

L'inversion du courant I dans l'enroulement de la machine ne peut se produire instantanément en raison du caractère inductif de la machine.

Lors de l'inversion, il y a un transfert de l'énergie stockée dans l'inductance des enroulements.

Cette énergie est proportionnelle à la surface S_1 (fig.a).

Si on remplace la commutateur de courant par un onduleur de ~~COURANT~~ à transistors en gardant la même machine (la même réactance X_c) avec :

- la même vitesse de rotation,*
- le même courant,*
- la même tension.*

L'énergie emmagasinée étant la même (principe de conservation d'énergie) la surface S_2 (fig.b) est égal à la surface S_1 ($S_1 = S_2$).

Or le temps de réponse du transistor t_{off} est inférieur à la durée de la commutation μ d'où apparition d'une surtension ΔE aux bornes du transistor au moment où il se bloque avec

$$\Delta E = X_c \cdot \Delta I / \Delta t.$$

Pour assurer le bon fonctionnement du transistor, la diode D doit schunter le transistor et par conséquent doit répondre avant qu'il ne soit détruit par la surtension ΔE

*Donc le t_{on} de la diode (fig.c) doit être inférieur au t_{off} du transistor.
Autrement dit, on doit choisir des diodes de récupération très rapides si non le transistor sera détruit.*

En conclusion on peut affirmer qu'une alimentation en courant d'une machine synchrone nécessite obligatoirement la commutation naturelle.

thyristor

transistor de puissance

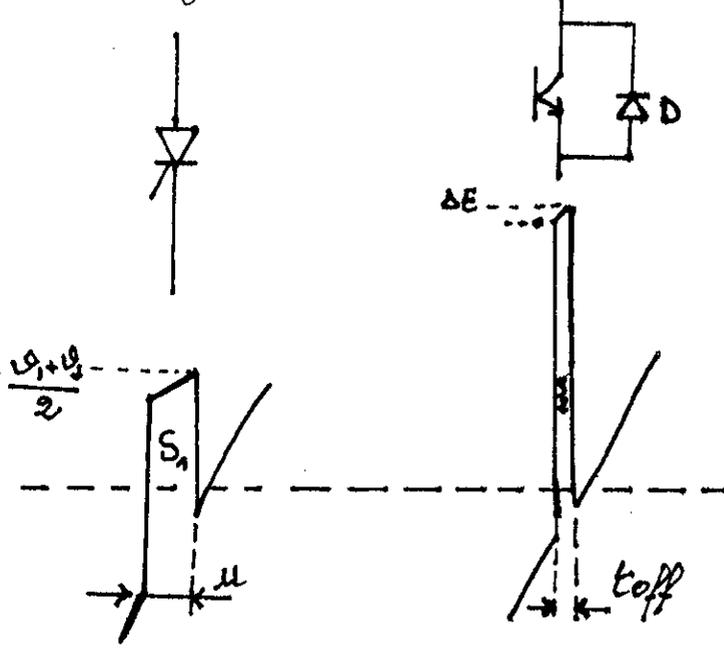
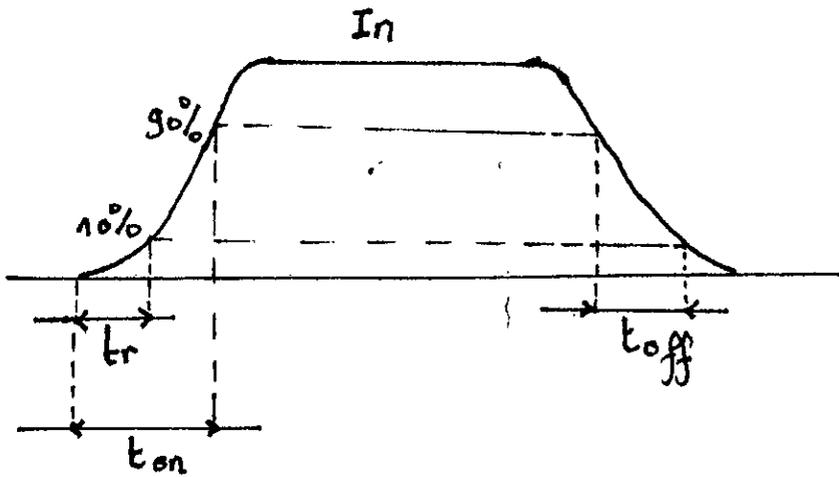


fig - a -

fig - b -



- fig - c -

CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE :

la machine synchrone autopilotée répond aux exigences particulières à savoir de bonnes performances et grande fiabilité de fonctionnement .

Elle peut être alimentée en tension ou en courant suivant l'utilisation. Cependant, il est évident que le choix de la machine influe sur le choix du convertisseur ainsi que sur son dimensionnement.

Cette étude a pour but d'établir un cahier de charge mettant en relief les caractéristiques des paramètres de la machine suivant les deux types d'alimentation. Nous avons vu que certaines limitations dues au processus de commutation sont liées aux paramètres de la machine notamment dans l'alimentation en courant et que le choix des paramètres de la machine est très prépondérant.

Pour une machine synchrone autopilotée alimentée en courant, la réactance de commutation doit être minimisée en vue d'obtenir une utilisation optimale de l'ensemble ; tandis que la présence de fortes inductances de fuites conduit systématiquement au choix d'un onduleur de tension.

Les amortisseurs interviennent par leur réactance de fuite dans le calcul de la réactance de commutation, leur utilisation réduit l'angle de commutation ce qui les rend indispensables dans l'alimentation en courant.

Cependant pour une alimentation en tension, leur présence est interdite.

Nous affirmons que le choix des réactances de fuites de la machine synchrone autopilotée est assujetti à l'alimentation de la machine.

Il y a antagonisme entre une alimentation en tension et une alimentation en courant.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] M. FALLOT
Théorie générale des circuits électriques
Edition : Dunod 1960
- [2] M. KOSTENKO, L. PIOTROVSKI
Machines électriques tome 2
Edition : Mir 1969
- [3] R. CHAUPRADE, F. MILSANT
Commande des moteurs à courant alternatif
Edition : Eyrolles 1980
- [4] H. BUHLER
Electronique de puissance
Edition : Georgi 1981
- [5] J. DALMASSO
Cours d'électrotechnique tome 1
Edition : Belin 1985
- [6] G. SEGUIER
Electronique de puissance
5 ème Edition : Dunod 1985
- [7] R. PERRET
Journée d'electronique de puissance
EPC : 1987
- [8] G. SEGUIER
Convertisseurs de l'electronique de puissance
tome 4.
Technique et documentation Lavoisier 1989
- [9] M. LAJOIE - MAZENC
T.I. D.3630
- [10] A. ANCEL
T.I. D.440