

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

5/88

وزارة التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

»O«

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

**Moteurs à cage (classique
et à rotor MASSIF) associés à
un Onduleur à MLI**

Proposé par :

R. IBTIOUEN

Etudié par :

BENSELAMA Abdallah

SIAGH LAZHAR

Dirigé par :

R. IBTIOUEN

M. MAHMOUDI

Promotion : Janvier 1988

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

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
LIBRARY

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

**Moteurs à cage (classique
et à rotor MASSIF) associés à
un Onduleur à MLI**

Proposé par :

R. IBTIOUEN

Etudié par :

BENSELAMA Abdallah

SIAGH LAZHAR

Dirigé par :

R. IBTIOUEN

M. MAHMOUDI

Promotion : Janvier 1988

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَالْحَمْدُ لِلَّهِ
الْعَلِيِّ الْعَظِيمِ

عبد القادر العظیم

*****DEDICACES*****

- A mon père et ma mère
- A mes frères et soeurs
- A ma grande famille
- A tout mes amis

*****SIAGH LAZHAR*****

- A mon père et ma mère
- A mes frères et soeurs
- A toute ma famille
- A tout mes amis

*****BENSELAMA ABDALLAH *

*****REMERCIEMENTS*****

A tous qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation de cette modeste étude , nous exprimons notre sincère reconnaissance et profonde gratitude.

nos remerciement vont principalement à:

Monsieur IBTIOUEN R. Notre promoteur , nous lui devons une grande reconnaissance , ainsi qu'à Messieurs MAHMOUDI M., MAMEDOV et M. HEMICI pour toute l'aide qui nous ont apportés et leurs conseils fructueux afin de nous orienter dans notre travail.

Messieur les enseignants de l'ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE qui ont contribué à notre formation.

toutes les personnes qui nous ont généreusement apporté soutien morale ou autre .

*****NOTATIION*****

E:	F.C.E.M. du moteur
U:	Tension entre phase
V:	Tension simple
Vn:	Tension d'harmonique de rang (n)
uc:	Tension de commande
up:	Tension de la porteuse
Il:	Courant statorique par phase
I'2:	Courant rotorique ramené au stator
In:	Courant d'harmonique de rang (n)
g:	le glissement
f:	fréquence
Fp:	Facteur de puissance
p:	Nombre de paire de pole
m:	Le rapport de transformation
Ws:	Vitesse desynchronisme
Kbl:	Coefficient de bobinage
Bs:	Induction de saturation
:	rapport cyclique
rl:	resistance statorique par phase du stator
ll:	inductance statorique par phase
Xu:	Reactance de magnetisation
Ilu:	courant de magnetisation
r'2:	resistance rotorique ramené au stator
l'2:	inductance rotorique ramné au stator
Pjs:	Pertes joules statorique

*****SOMMAIRE*****

I-INTRODUCTION.....	1
II-ONDULEUR à MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION:.....	2
II-1 GENERALITE:.....	2
2 EFFET D'HARMONIQUE... ..	2
II-2 MLI :	
1 PRINCIPE.....	3
2 MLI.....	6
3 ETUDE D'HARMONIQUE... ..	8
II-3 ONDULEUR UTILISE.....	10
III-ONDULEUR à MLI ASSOCIER à UN à MOTEUR à CAGE CLASSIQUE.	
1 RAPPELS.....	14
2 FONCTIONNEMENT à U/f Cst..	16
3 PARTIE EXPERIMENTALE.....	18
a)ESSAIS SANS MLI.....	18
b)ESSAIS AVEC MLI	18
c)INTERPRETATION.....	21
IV-ONDULEUR à MLI ASSOCIER à UN MOTEUR à ROTOR MASSIF... ..	29
IV-1-INTRODUCTION.....	29
IV-2 ETUDE DU MOTEUR à ROTOR MASSIF	30
IV-3 PARTIE EXPERIMENTALE:.....	34
1 ESSAIS SANS MLI ET AVEC MLI	34
2 RESULTATS OBTENUS.....	40
V-COMPARAISON:.....	41
VI-CONCLUSION.....	47
VII-ANNEX.....	✓
-BIBLIOGRAPHIE:.....	48

*****I-) INTRODUCTION*****

Le développement des semi-conducteurs de puissance a permis le remplacement progressif des convertisseurs dynamiques par des convertisseurs statiques fiables peu encombrant, d'entretien facile et moins coûteux.

- Parmi ces convertisseurs statiques nous avons l'onduleur autonome à modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui non seulement transforme la tension continue en tension alternative mais sert également comme variateur de vitesse, pour particulièrement la machine asynchrone à cage et ce par variation de la fréquence et de la tension.

Dans notre présent travail nous étudions l'association de l'onduleur (à MLI) à deux types de machines asynchrones triphasées à cage.

-La première est un moteur asynchrone à cage d'écureuil classique .

-La deuxième est un moteur asynchrone dont le rotor est massif lisse .

Pour ces deux types de moteurs, seuls leurs stators sont accessibles , ainsi toute commande vu peut être réalisée qu'à travers ces derniers. Nous allons donc analyser les performances de ces deux machines lorsqu'elles sont alimentées par l'intermédiaire d'un onduleur (à MLI) en les comparant au cas où les stators sont alimentés directement par le réseau (influence des harmoniques), et ensuite nous comparons les performances des deux machines entre elles.

II- ONDULEUR à MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION (MLI)

II-1- GENERALITES:

Selon le type de moteur; la nature de la source d'alimentation, le mode de réglage et les caractéristiques recherchées, nous avons différents types de convertisseurs réparties en deux grandes familles (nous nous intéressons qu'au côté tension)

-Les convertisseurs directs: Ces derniers transforment directement la tension du réseau, en une tension (ou un courant) d'amplitude et de fréquence variable: Ce sont les cycloconvertisseurs

-Les convertisseurs indirectes: Ils assurent une double conversion. En tête se trouve un redresseur (au milieu un étage à courant continu) et du côté machine un commutateur (qui est un onduleur). Parmi ces convertisseurs, nous avons:

-Le commutateur de tension. (onduleur à MLI)

-le commutateur de courant

2- EFFET DES HARMONIQUES

a) HARMONIQUE DE TENSION :

ces harmoniques conduisent à la saturation et augmentent donc les pertes fers

$$V = V_1 \sin(\omega t) + V_5 \sin(5\omega t) + V_7 \sin(7\omega t) + \dots \quad (13)$$

b) HARMONIQUE DE COURANT:

Les harmoniques de courant sont importants et conduisent:

-A une augmentation de la résistance entraînant des pertes importante dans le rotor

-Un effet pelliculaire accentué sur les inductance de fuites, sur la résistance du rotor qui augmente

-Un courant de crête I_{max} égale à deux fois le courant statorique à couper par les thyristors

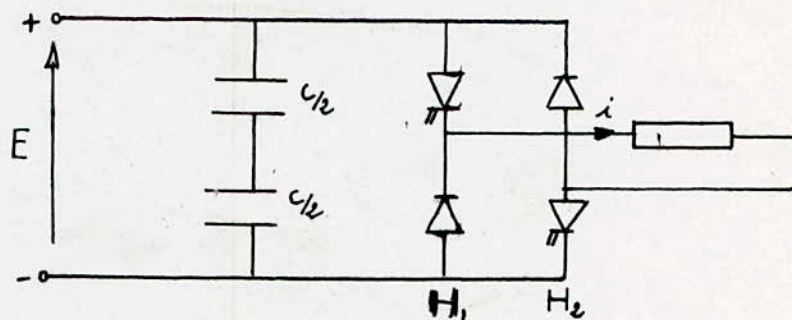
c) HARMONIQUE DE COUPLE:

Des couples pulsatoires dus aux actions mutuelles entre harmoniques et particulièrement les harmoniques de rang 5 et 7

II-2) ONDULEUR à MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION :

II-2-1) PRINCIPE:

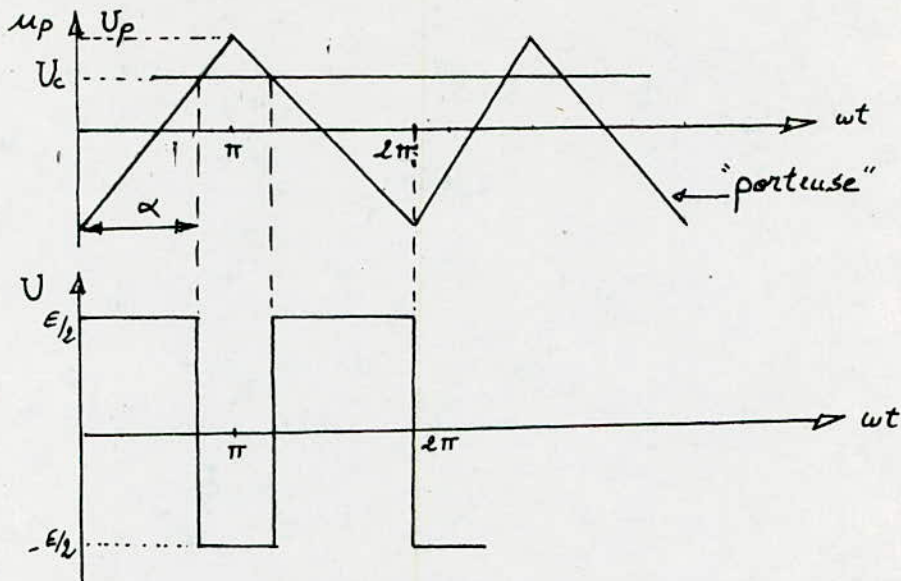
Un bras d'un onduleur à MLI est constitué par deux hacheurs polarisés différemment. ainsi la tension de sortie est formée par une succession de créneaux d'amplitude (E) et de largeur variable suivant la loi de modulation choisie(fig 1)



(fig 1) "Hacheurs constituant une phase de l'onduleur"

Les lois de modulation sont nombreuses, les plus répandues consistent à comparer des tension de référence à un signal triangulaire dont la fréquence est multiple de celle de l'onde fondamentale . Ce signal triangulaire est appelé "porteuse" (fig 2)

-La porteuse est comparée à la tension de commande U_c . Les deux signaux se coupent aux points d'abscisses (α et $\pi - \alpha$) ce qui donne:



(fig 2) " Commande par modulation"

La valeur moyenne de la tension de sortie sera

$$U_m = E/2 \left(\frac{U_c}{U_p} \alpha - 1 \right)$$

$$D'après : U_m = \frac{E}{2} \left(U_c / U_p \right)$$

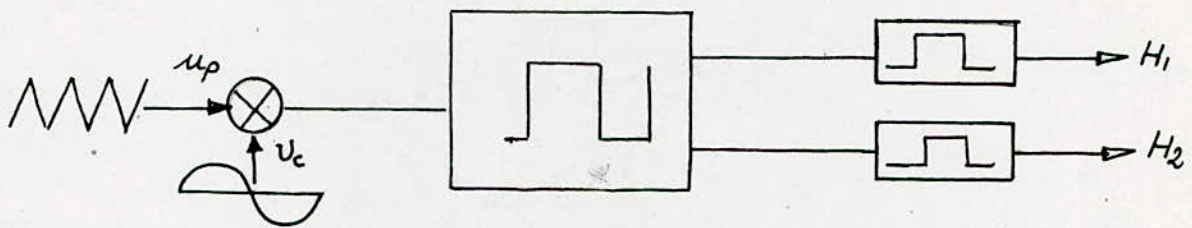
On constate que U_m est proportionnelle à U_c

Si U_c est une tension sinusoïdale de fréquence $f_{up} \gg f_{uc}$, nous obtiendrons une tension moyenne également sinusoïdale et proportionnelle à U_c/U_p .

la valeur du rapport de fréquence entre la porteuse et la modulatrice (signal de la référence fig 2) découle d'un compromis entre la neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur .

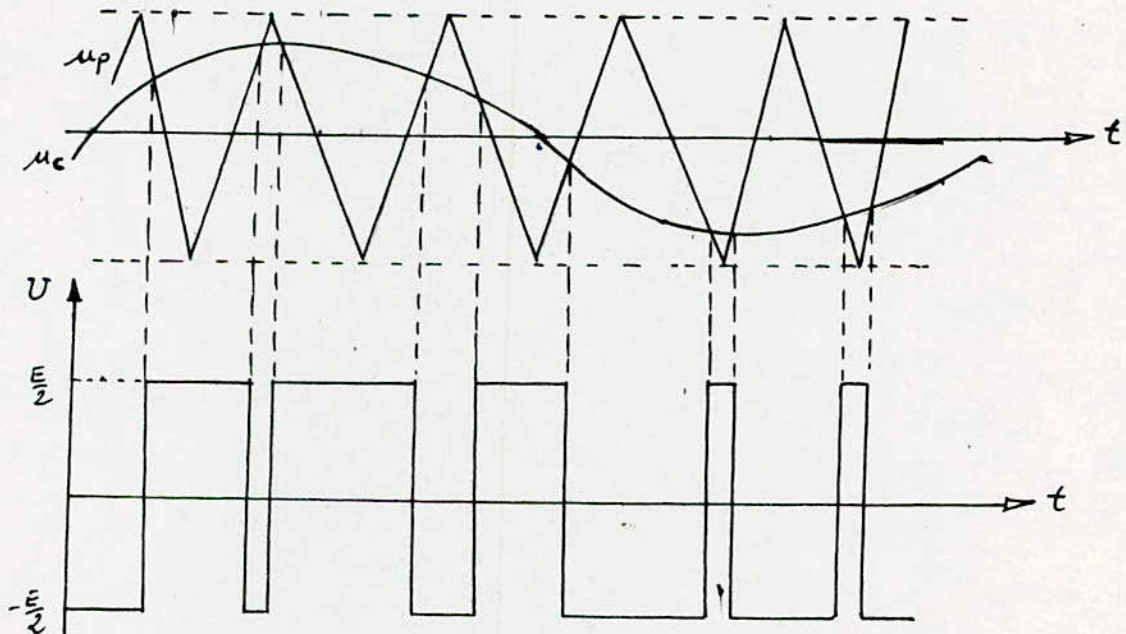
chaque intersection des deux signaux superposés U_p et U_c commande le changement d'état du comparateur (fig 3) qui donne les ordres de commutation aux hacheurs constituant une phase de l'onduleur.

(fig 3)



(fig 3) "schema synoptique de la modulation avec porteuse en signal triangulaire"

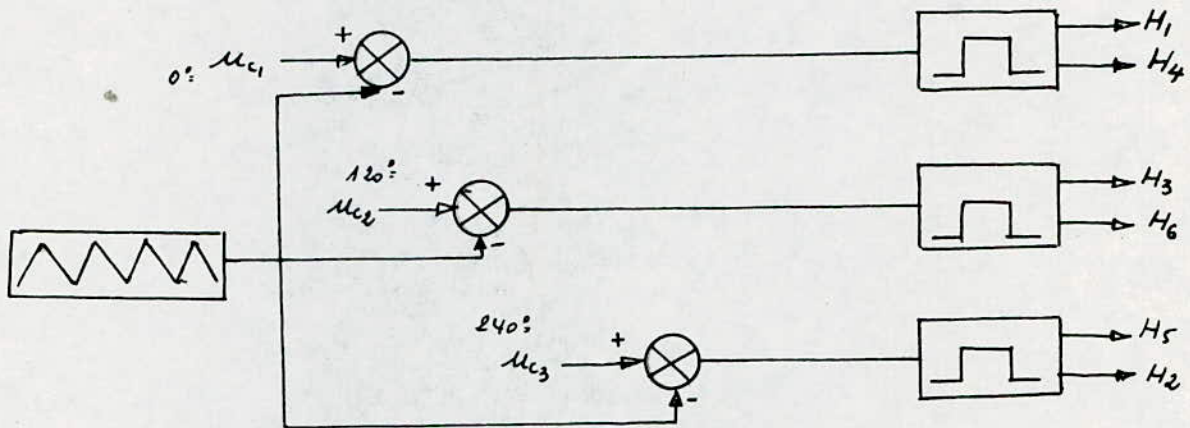
- la tension de sortie ne peut avoir instantanément que deux valeurs $+E/2$, $-E/2$ (fig 4)



(fig 4) "stratégie de la modulation triangulo-sinusoidale"

II-4-2) MLI TRIPHASE

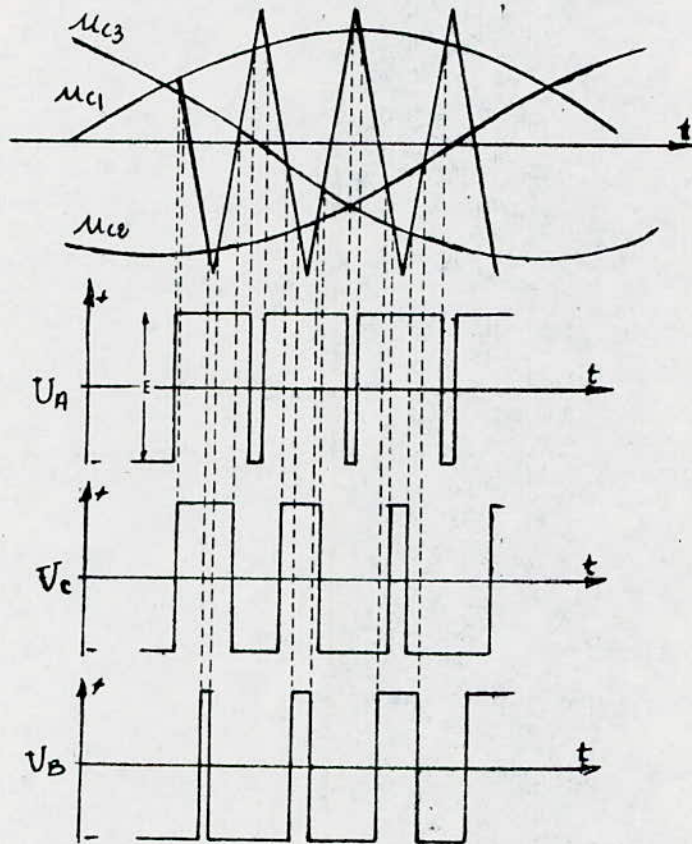
- Le principe décrit pour une phase s'applique au montage triphasé. Un générateur d'onde triangulaire comparé aux tensions de référence U_{c1}, U_{c2} et U_{c3} déphasées de 120° délivre des tensions de sorties déphasées de 120° (fig 5)



(fig 5) "Schéma synoptique de la commande par modulation triangulo-sinusoidale triphasée"

Soit $(\eta = \frac{U_p}{U_c})$: Indice de modulation .

le fondamentale des trois tensions U_a, U_b et U_c a la même fréquence que les tensions de référence. Son amplitude est une fonction linéaire de U_c/U_p : $U_1 = E/2 (U_c/U_p)$

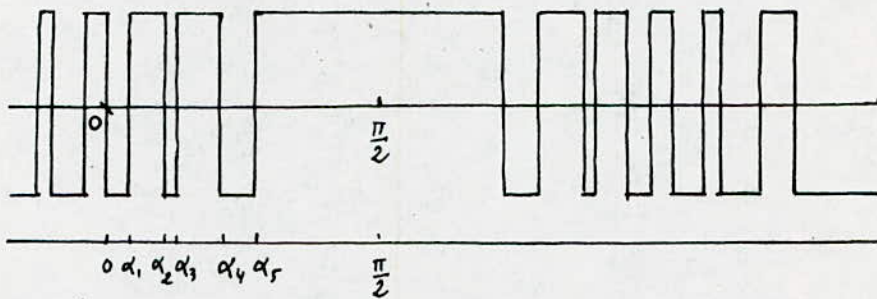


(fig: 6)

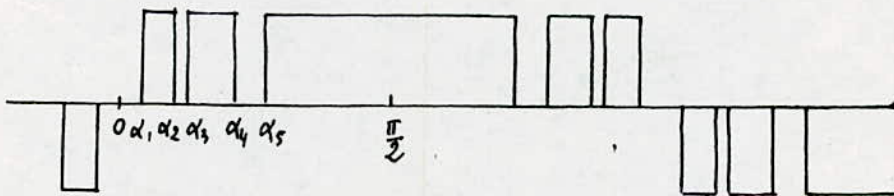
" Les trois tensions simples de sortie du MLI "

II-4-3 ETUDE HARMONIQUE:

Le calcul d'harmonique est très complexe il nécessite dans le cas générale l'utilisation d'un ordinateur. On distingue deux types d'onde en modulation de largeur d'impulsion (MLI), l'une bipolaire ou l'impulsion est comprise entre +E et -E (fig 7) et l'autre unipolaire ou l'impulsion est moitié, c'est à dire comprise entre 0 et -E pour l'aternance négative (fig 8)



(fig 7) "Onde bipolaire" $M(\alpha_i)$



(fig 8) "Onde unipolaire" $N(\alpha_i)$

Il est à remarquer que le type bipolaire peut être considéré comme la différence d'une onde unipolaire d'amplitude 2E et d'une onde rectangulaire d'amplitude E [4]

-a) HARMONIQUES DE TENSION :

Soient $M(\alpha_i)$ et $N(\alpha_i)$ les ondes respectivement bipolaire et unipolaire ou (α_i) désigne l'angle où s'opère un changement d'état dans l'onde et (α_k) le dernier de ces angles avant $(\frac{\pi}{2})$

- La décomposition en série de FOURRIER nous donne :

$$E(\alpha) = \sum_n B_n \sin(n\omega t)$$

Avec $A_n = 0$ (les harmoniques pairs sont nuls et

$$B_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} E(\alpha) \sin(n\omega t) dt$$

$N(\alpha_i)$ peut être considérée comme obtenue à partir d'ondes en créneaux $E(\alpha_i)$: $N(\alpha_i) = E(\alpha_1) - E(\alpha_2) + \dots + E(\alpha_k)$

$$N(\alpha_i) = \sum_{1,k} (-1)^{i-1} E(\alpha_i)$$

Ainsi le fondamental et les harmoniques impairs ont pour valeur

$$B_n = \frac{4E}{n\pi} \sum_{1,k} (-1)^{i-1} \cos(n\alpha_i)$$

-L'expression d'une onde $(M(\alpha_i))$ est

$$M(\alpha_i) = 2N(\alpha_i) - E(0)$$

$$= -E(0) + 2E(\alpha_1) - 2E(\alpha_2) + \dots + 2E(\alpha_k)$$

$$= -E(0) + 2 \sum (-1)^{i-1} E(\alpha_i)$$

Le fondamental et les harmoniques impairs ont pour valeur

$$B_n = \frac{4E}{n\pi} \left(-1 + 2 \sum (-1)^{i-1} \cos(n\alpha_i) \right)$$

$$\text{En fin } E(\alpha) = \frac{4E}{n\pi} \left(1 + 2 \sum (-1)^{i-1} \cos(n\alpha_i) \right) \sin(n\omega t)$$

Pour annuler les harmoniques d'ordre quelconque il suffit de choisir les angles où doit s'opérer la commutation

Par exemple : Pour annuler les harmoniques 3 et 5 (α_1) et (α_2) sont choisis tel que:

$$-1 + 2\cos(3\alpha_1) - 2\cos(3\alpha_2) = 0$$

$$-1 + 2\cos(5\alpha_1) - 2\cos(5\alpha_2) = 0 \quad (17)$$

D'ou

$$\alpha_1 = 23^\circ.62 \quad \text{et} \quad \alpha_2 = 33^\circ.30$$

-b) HARMONIQUES DE COURANT:

Soit Z l'impédance du moteur les harmoniques du s'écrivent:

$$I_n = \frac{V_n}{Z} = \frac{V_n}{\sqrt{R^2 + (n\omega)^2}}$$

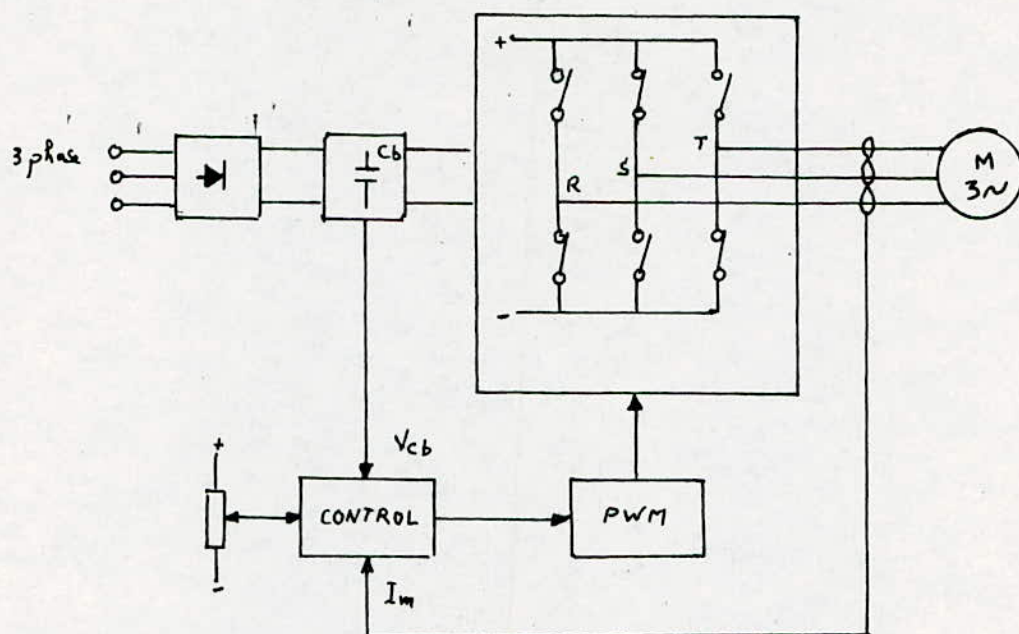
II-5-4-APPLICATION DES ONDULEURS à MLI

Les onduleurs à MLI permettent de réaliser des entraînements à vitesse variable de grandes performances pour les moteurs à cage. Ils offrent une grande plage de variation de la vitesse quelque soit la forme du couple résistant.

Et comme la neutralisation des harmoniques est assez bonne les couples pulsatoires sont réduits, surtout aux basses vitesses. Ils sont utilisés pour la commande d'un ou de plusieurs moteurs en traction électrique (CANADA), dans l'industrie textile, en métallurgie.

-II-6- ONDULEUR à MLI UTILISE

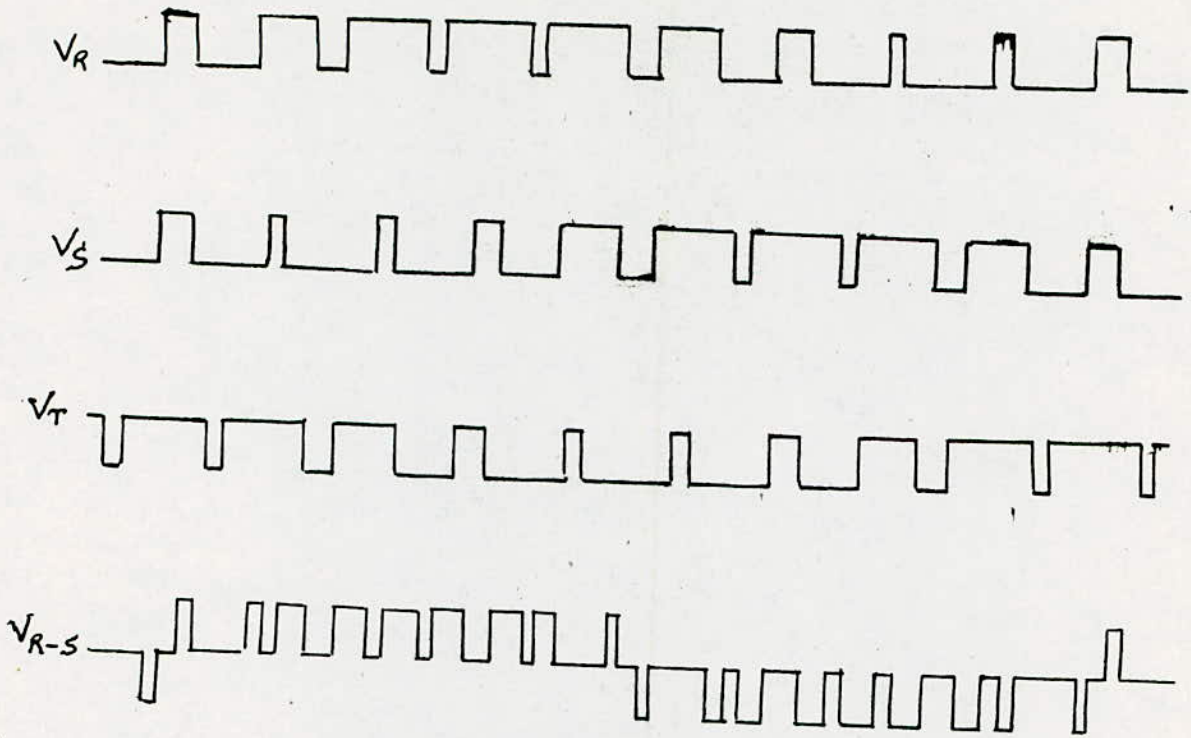
Notre onduleur utilise la technique de PWM (modulation de largeur d'impulsion à loi sinusoidale). Il comporte des circuits digitaux couplés à des circuits analogiques avec des éléments de puissance (V-MOS) sélectionnés. Un diagramme fonctionnel du système est montré (fig 9)



(fig 9) "Diagramme fonctionnel de l'onduleur à MLI utilisé dans notre travail"

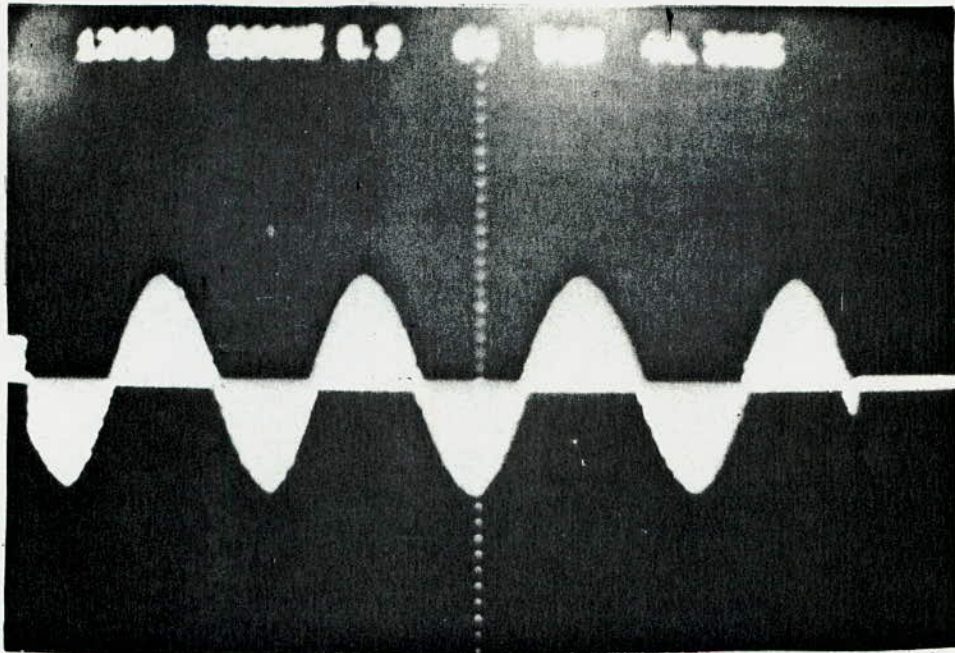
-Le driver fournit trois couples complémentaires de formes d'onde de sorties les quelles appliquées à un convertisseur à pont triphasé, produisent une sortie triphasée symétrique (120°).

Nous avons des signaux d'entrés pour l'inversion du mouvement START/STOP, RESET et URGENGE et trois sorties PWM avec les signaux de control et de synchronisme disponible. Les formes d'onde de sortie des impulsions modulées en largeur de façon que la différence de potentiel moyenne entre deux phases quelconques varie sinusoidalement comme illustré (fig 10)



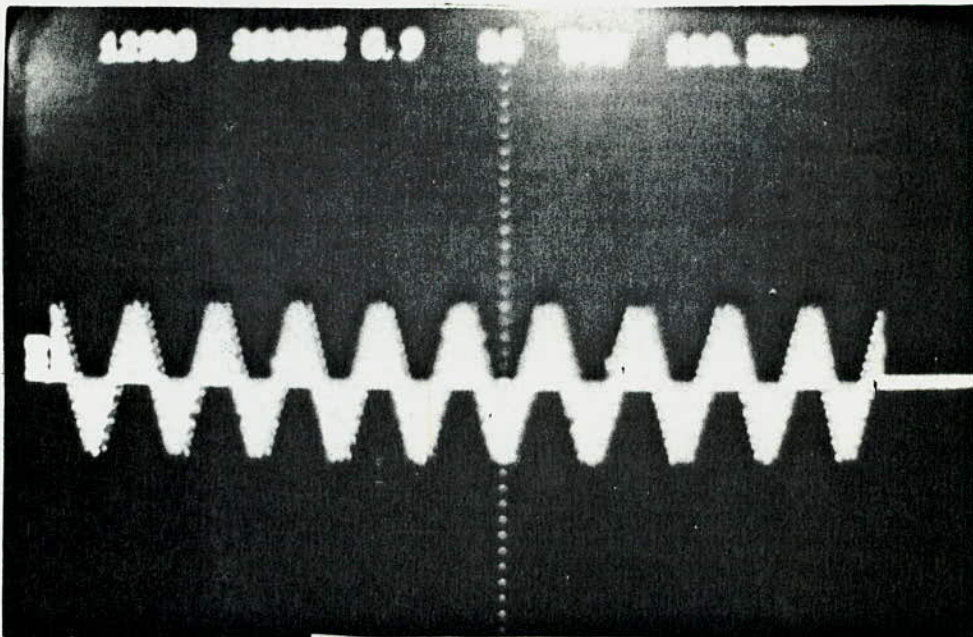
(fig 10) "impulsion "

La (fig 10) montre respectivement les phases R, S et T modulées et la tension de ligne V_{R-S} . La modulation PWM est obtenue en comparant une forme d'onde triangulaire appelé (porteuse) à une tension de référence sinusoidale appelée (modulatrice)



*****ONDE DU SIGNALE DE LA MODULATRICE à $f = 50\text{Hz}$ *****

(fig 11)



*****ONDE DU SIGNAL TRIANGULAIRE*****

(fig:12)

****III-ONDULEUR à MLI ASSOCIE à UN MOTEUR à CAGE CLASSIQUE****

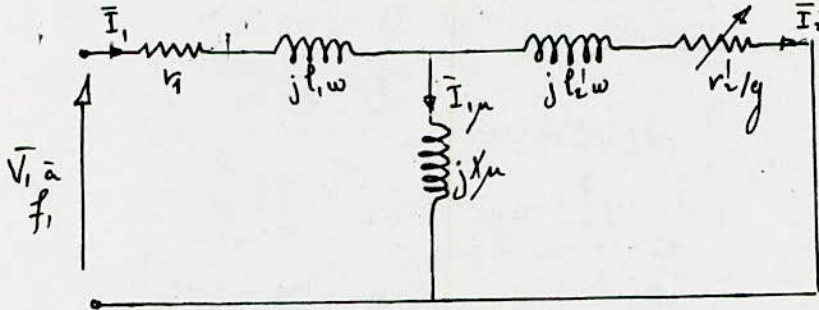
III-1) RAPPELS

a) -SCHEMAS EQUIVALENT :

Equation de la machine:

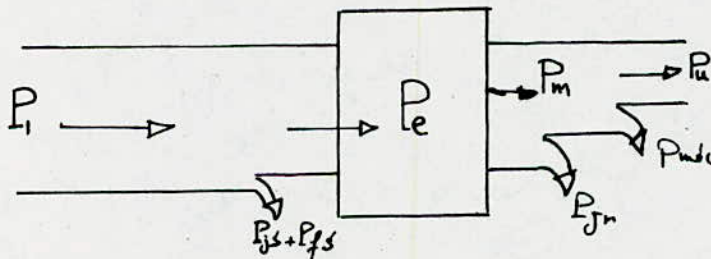
$$\bar{V}_1 = (r_1 + j\omega l_1) \bar{I}_1 + jX_u \bar{I}'_2$$

$$jX_u \bar{I}'_2 = (r'_2/g + j\omega l'_2) \bar{I}'_2 \quad \text{et} \quad \bar{I}'_2 = \bar{I}_1 - \bar{I}'_2 \quad (19)$$



(fig.13)" schémas équivalent par phase ramené au stator

-b) BILAN ENERGETIQUE:



-Puissance électrique absorbée $P_1 = 3V_1 I_1 \cos(\varphi)$

- Puissance transmise au rotor $P_e = P_1 - (p_{js} + p_{fs}) = 3r'_2/g(I'_2)^2$

- Puissance mécanique : $P_m = P_e - p_{jr} = P_e - 3r'_2 I'_2^2$

-Puissance utile: $P_u = P_m - p_{mec}$

-Rendement $\eta = P_u / P_1$

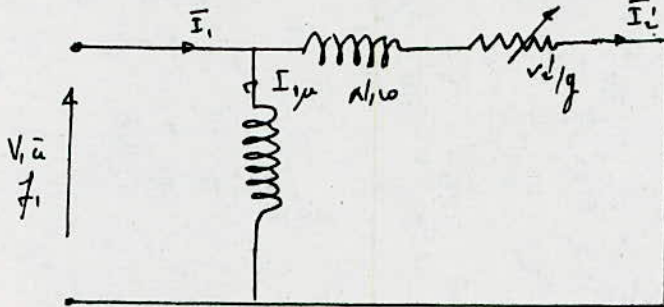
-C) COUPLE

-Couple électromagnétique : $C_e = P_e / \omega = P_m / ((1-g)\omega)$

-Couple utile : $C_u = P_u / \omega_r = C_e - p_{mec} / \omega_r$

-D) Caractéristique mécanique:

En effectuant une simplification sur le schémas équivalent (fig 13) et en négligeant $l_1 w$ et r_1 nous obtenons :(fig 14)



Avec $Nl = l_1 + l_1' / 2$

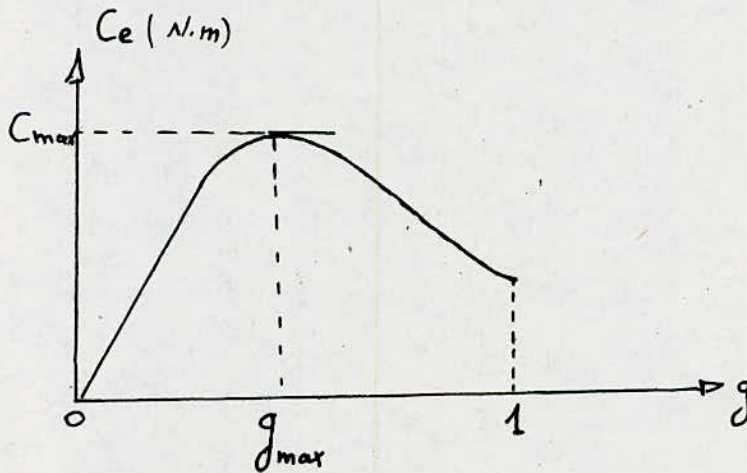
(fig 14) " schémas équivalent simplifié "

$$V_1 = (jNlw + r'2/g) I_1'$$

$$D'où C_e = \frac{3V_1}{2} \frac{(r'2/g)}{\sqrt{(r'2/g)^2 + (Nlw)^2}} \quad (20)$$

On posant $K = 3V_1 / \Omega$

$$D'où C_{max} = K/2Nlw \text{ et } g_{max} = r'2/Nlw \quad (21)$$



(fig. 15) "Caractéristique mécanique à V_1 et f_1 constant"

III-2) FONCTIONNEMENT à U/F CONSTAND

Si on désigne par $(\bar{\Phi})$ le flux d'entre fer de la machine :

$$j\bar{\Phi} = E_1/\omega$$

$$\text{Avec } \bar{E}_1 = \bar{V}_1 - (r_1 + j\ell_1\omega) \bar{I}_1$$

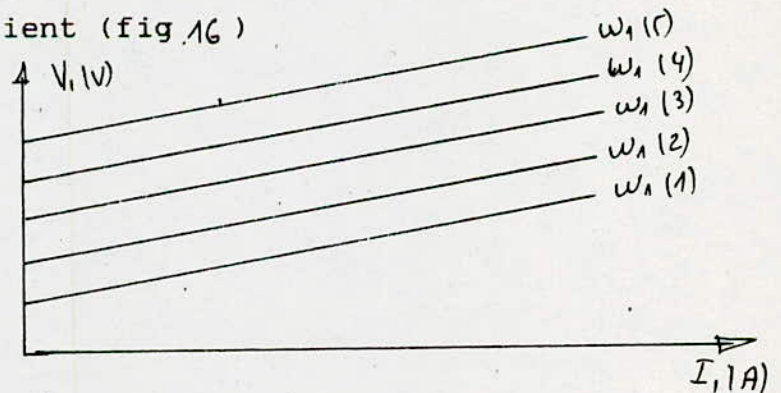
En considérant la resistance propre r_1 et l'inductance de fuite d'une phase statorique négligeable :

Donc $\bar{\Phi}$ Constante donne V_1/F_1 égale constante

Dans le cas général sans faire cette approximation on réalise de façon approchée un fonctionnement à $\bar{\Phi}$ constant c'est à dire qu'on écrit $\bar{V}_1 = k_1\omega + k_2\bar{I}_1$; car V_1 est croissante en fonction de I_1 et d'autre part proportionnelle à ω .

avec : $k_1 = V_1/\omega$ et k_2 déterminé à partir de la tension nominale de la machine

Dans le plan (V_1, I_1) on obtient (fig 16)



(fig 16)

-Étude théorique à U/f constant

pour les faibles valeurs de la fréquence d'alimentation (f_1), on obtient de faibles valeurs pour le couple ceci est dû au fait qu'aux valeurs réduites de f_1 et de V_1 les chutes de la tension statorique deviennent excessives diminuant ainsi le flux d'entre fer donc le couple .

-CONCLUSION:

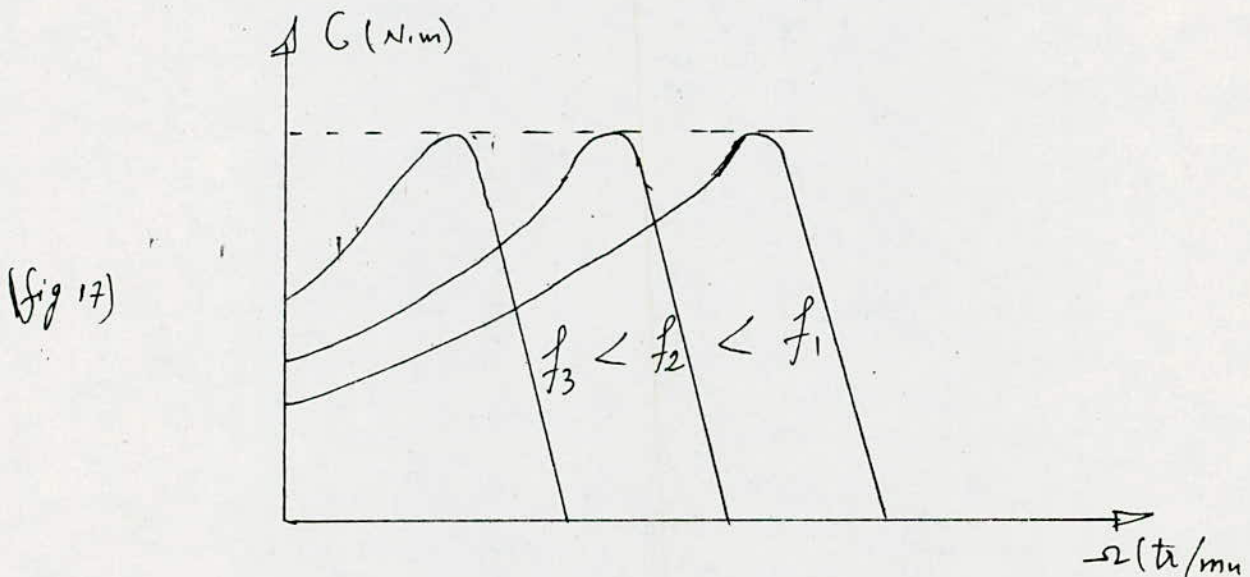
Pour un bon fonctionnement du moteur asynchrone à cage à différentes vitesses nous devons assurer la double condition:

$f_2 = \text{constante}$ et $\Phi_{\text{max}} = \text{constante}$

dans le cas où le courant I_2 est constant pour les faibles glissements: $I_2 = V_1 / ((Nl\omega)^2 + (r_2/g)^2)^{1/2}$ (26)

$$I_2 = gV_1/r_2 \quad (g \text{ assez réduit})$$

A différentes fréquences C_e est proportionnel à $(\frac{I_2}{I_{\text{mot}}})^2$ ainsi obtient on une famille de droites parallèles dans la partie caractérisant le fonctionnement stable de la caractéristique mécanique. (fig 17)



III-3) ETUDE EXPERIMENTALE :

III-3-1) ESSAIS SANS MLI:

a) MONTAGE:

Le montage utilisé est représenté (fig 18)

-CARACTERISTIQUE DU MOTEUR:

- Moteur à cage plaque signalitique: DOLORENZO

U:220/380V; I:4.5/2.6A; P=1.1kW; N=2820 tr/mn; F=50HZ

COS(φ)=0.8; CLASSE D'ISOLEMENT: E N°DE SERIE: 2369

- DYNAMO FREIN: I_{max}= 2.4A (ce qui limite notre couple de charge) tension U: 240V

_B) ESSAIS EFFECTUES:

Nous avons effectués les essais pour un couplage en triangle des enroulements statoriques du moteur à synchrone à cage classique en gardant le rapport U/f constant et ce en agissant sur l'excitation d'un alternateur et sur sa vitesse de rotation .

-Pour différentes valeurs de la fréquence nous avons relevé le courant par phase absorbé par le moteur le couple la vitesse de rotation ,et les puissances actives et réactives

III-3-2-)ESSAIS AVEC ONDULEUR à MLI:

-A) MONTAGE:

Le montage utilisé pour ces essais est représenté (fig.19) d'un onduleur de type MLI alimenté par une tension monophasée 220V sinusoidale et délivre un système de tension triphasées à fréquence variable.

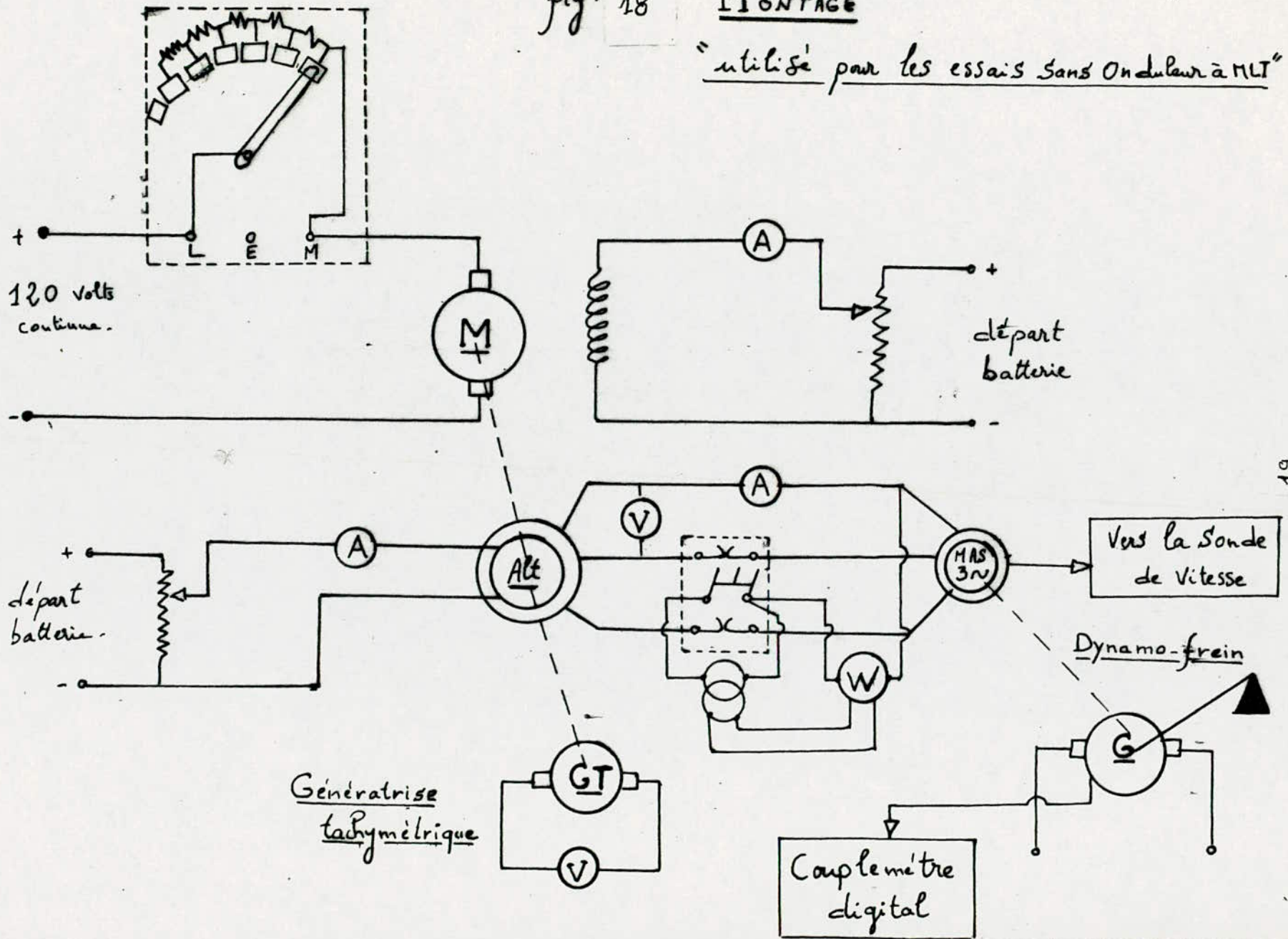
-B)ESSAIS EFFECTUES:

Les essais sont effectués dans les mêmes conditions qu' au paragraphe(III-3-1 B) de plus nous avons relever les courbes de

fig. 18

MONTAGE

"utilisé pour les essais sans Onduleur à MLI"



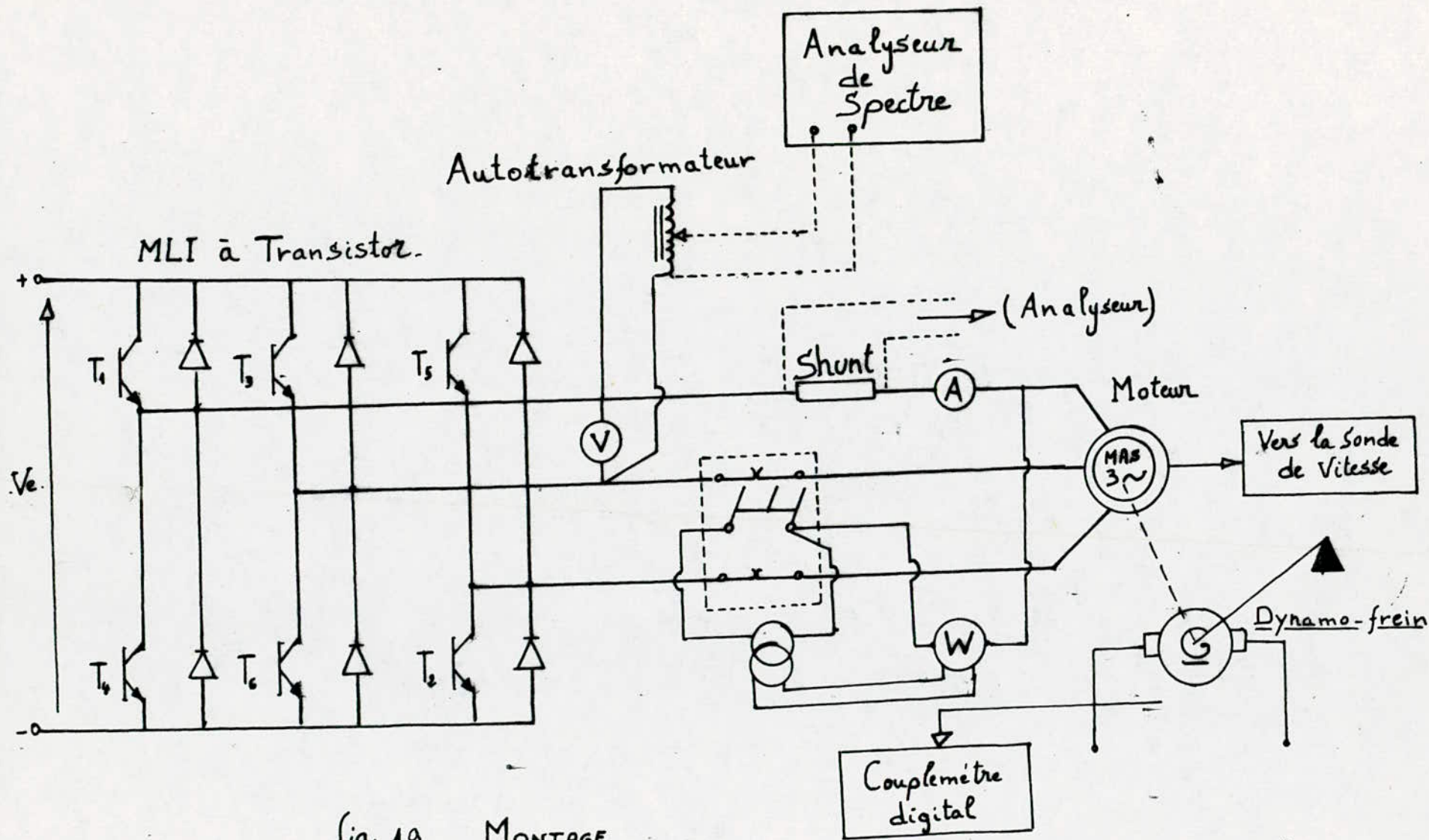


fig. 19 MONTAGE

"utilisé pour les mesures avec Onduleur à MLI"

variation de courant et de la tension en fonction du temps (fig 23 et 24) (fig 25 et 26)

*NOTA:

-nous n'avons pu maintenir rigoureusement constant le rapport U/f à fréquence donnée.

Au fur et à mesure que l'on chargeait le moteur ,la tension diminuait.L'impédance interne de l'onduleur à MLI utilisé qui n'était pas négligeable devant celle du moteur . Un moyen pour compenser cette éventuelle chute de tension n'est pas prévu pour notre onduleur.

-l'onduleur à MLI nous limitait la charge du moteur (I_{max} inférieure à 5A)

-La dynamo-frein utilisée ne pouvait dépasser une intensité (valeur de crête égale à 2.5A)

tous ces points ,limitaient nos essais à des valeurs admissibles pour le couple développé.

III-3-3)RESULTATS OBTENUS:

-CARACTERISTIQUE MECANIQUE $\Gamma(\Omega)$ (fig 20)

-Les caractéristiques mécaniques sont parallèles et de pente négative dans leur partie utile quelle soit la fréquence (stabilité)

-il n'y a pas pratiquement de variation de vitesse pour les mêmes conditions de fonctionnement que la machine soit associée ou non avec l'onduleur à MLI .Toutefois une surcharge ($\Gamma > \Gamma_N$) quand le moteur est associé à l'onduleur à MLI nous avons une légère diminution de vitesse(fig 20)

-Ainsi nous constatons que les harmoniques d'ordre supérieur ne

modifient pas la caractéristique mécanique du moteur à cage associé au MLI comme prévu et ce quelle soit la fréquence utilisée (variation de vitesse)

-CARACTERISTIQUE ELECTROMECHANIQUE $I(g)$ (fig. 21)

-Les caractéristiques sont linéaires et identiques à elles mêmes pour les fréquences adoptées comme pour toute machine asynchrone

-pour le cas où le moteur est associé à l'onduleur à MLI il nous a été très difficile de tracer les caractéristiques $I(g)$ pour différentes fréquences car tous les points obtenus étaient aberrants (léger déséquilibre).

CARACTERISTIQUE FACTEUR DE PUISSANCE $F_p(g)$ (fig. 22)

-Onduleur à MLI améliore la valeur du facteur de puissance, au fur et à mesure que le glissement augmente pour la fréquence nominale (fig. 22)

fig. 20 Moteur Asynchrone à cage classique
Caractéristique $\Gamma = f(\Omega) \approx \frac{U}{f} \approx C \frac{s}{f}$

-xxx- avec Onduleur à MLI

-ooo-- Sans Onduleur à MLI

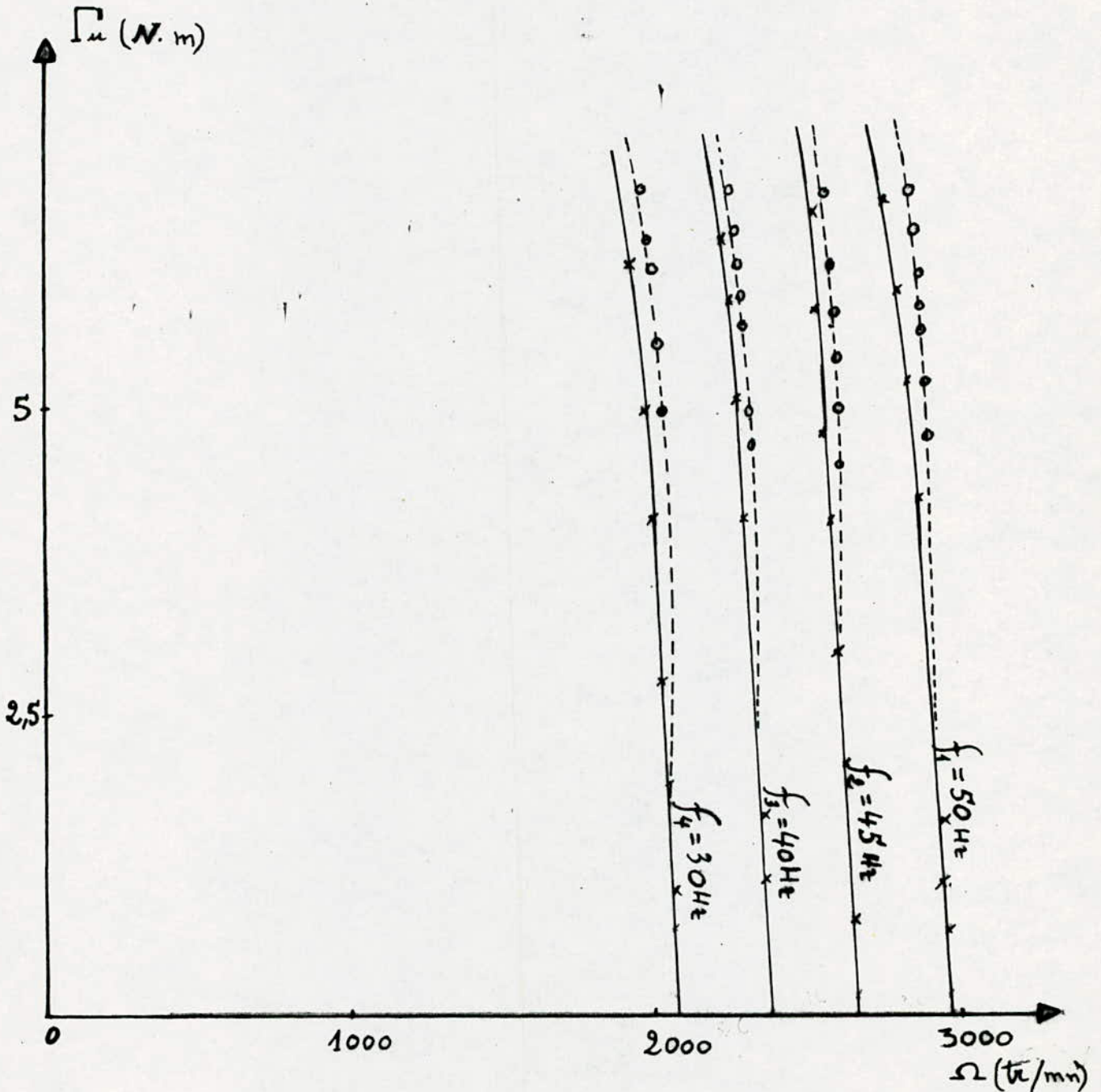


fig. 21 Moteur Asynchrone à cage classique
Caractéristique $I = f(\varphi)$ à $\frac{U}{f} \approx C$
 sans Onduleur à MLI.

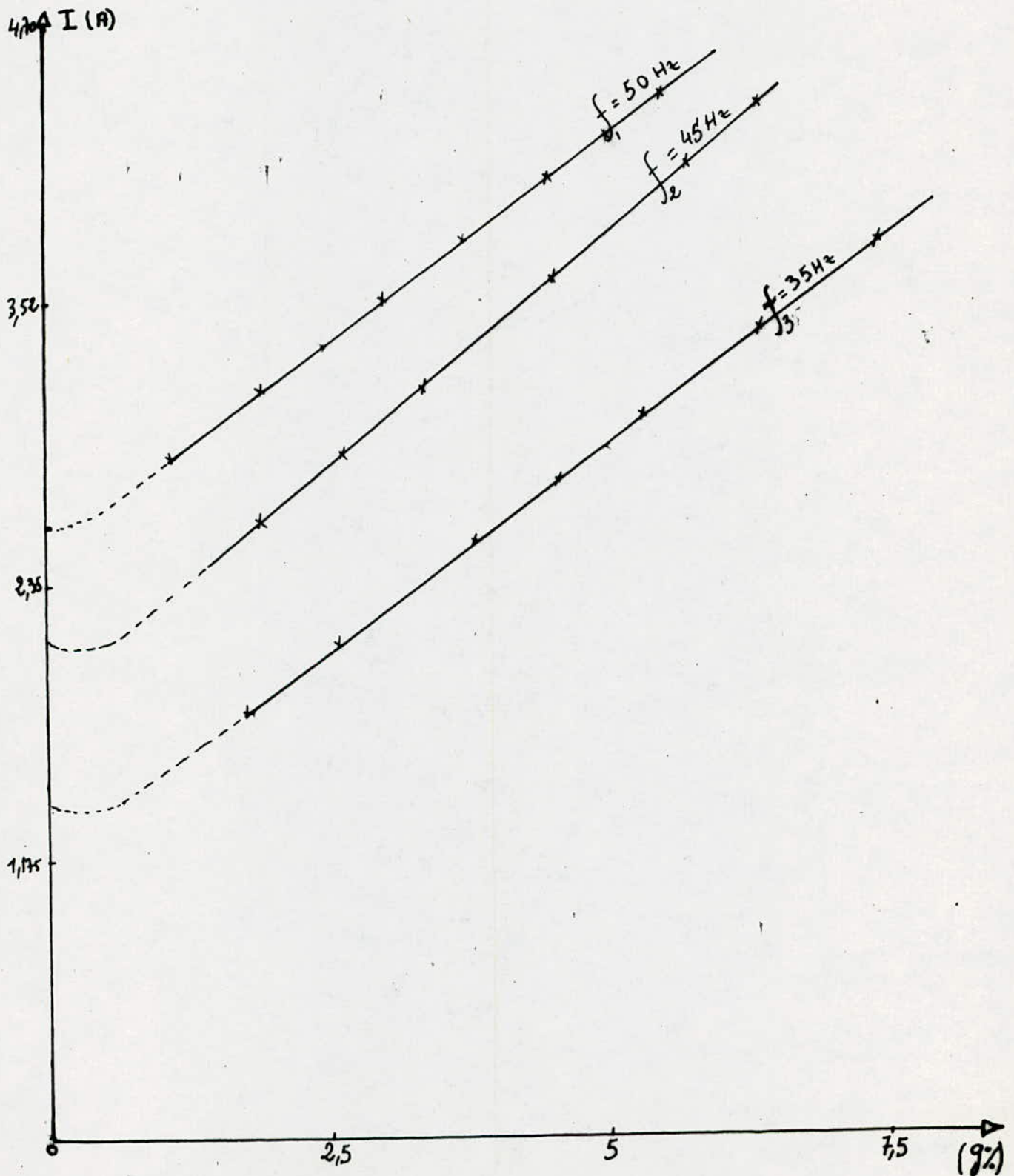
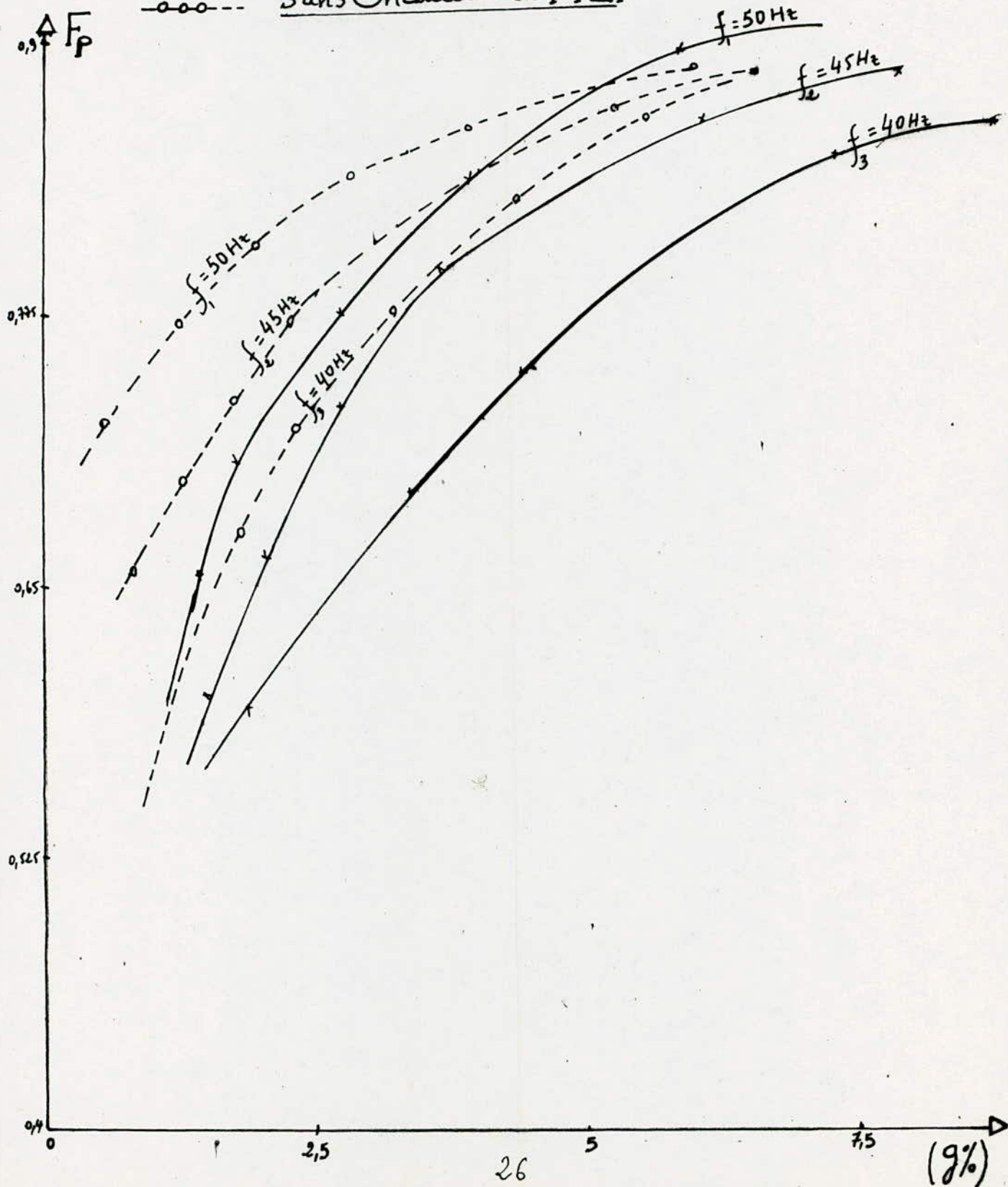
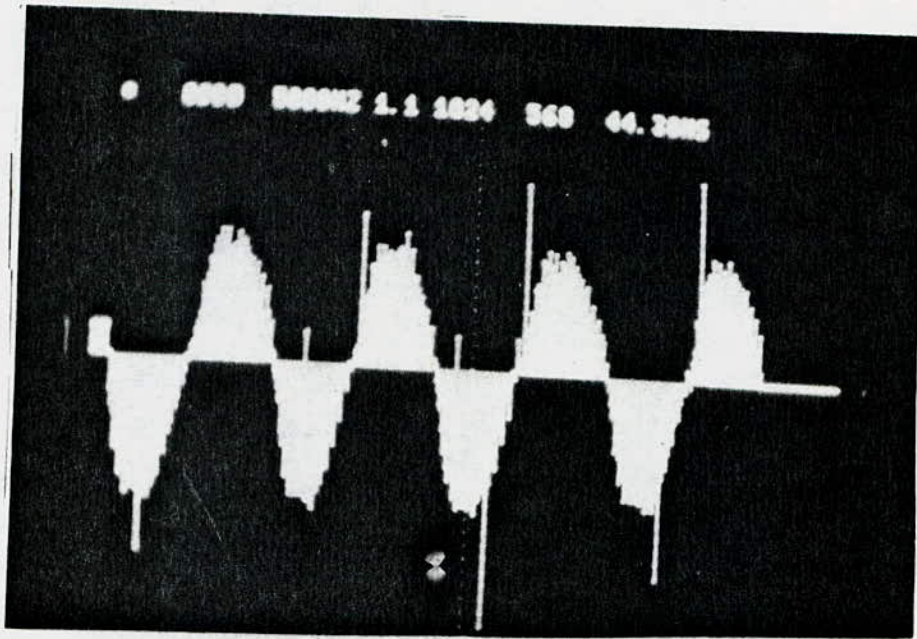


fig. 22 Moteur Asynchrone à cage classique
Caractéristique $F_p = f(g) \approx \frac{U}{f} \approx C \frac{1}{f}$

xxx avec Onduleur à MLI

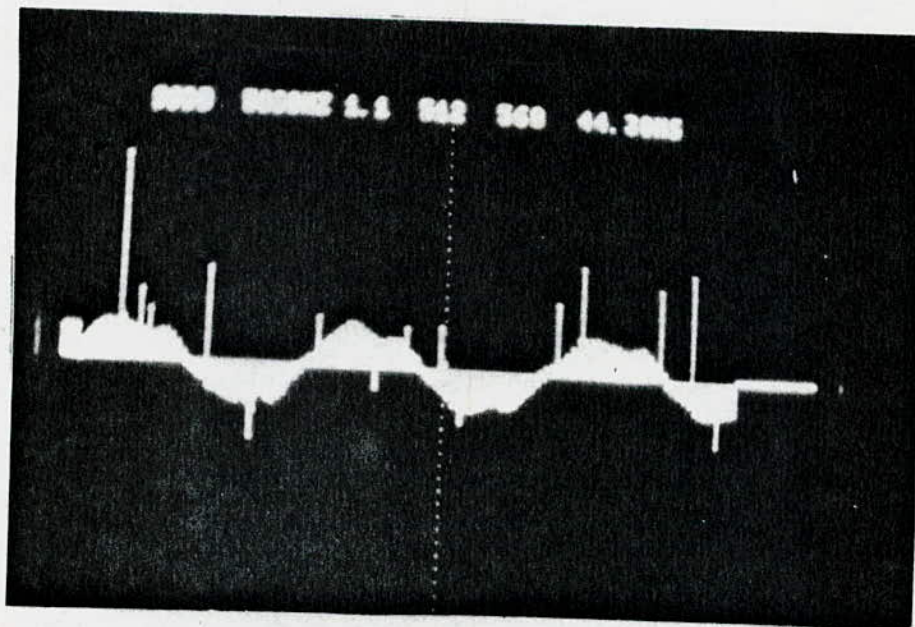
ooo sans Onduleur à MLI





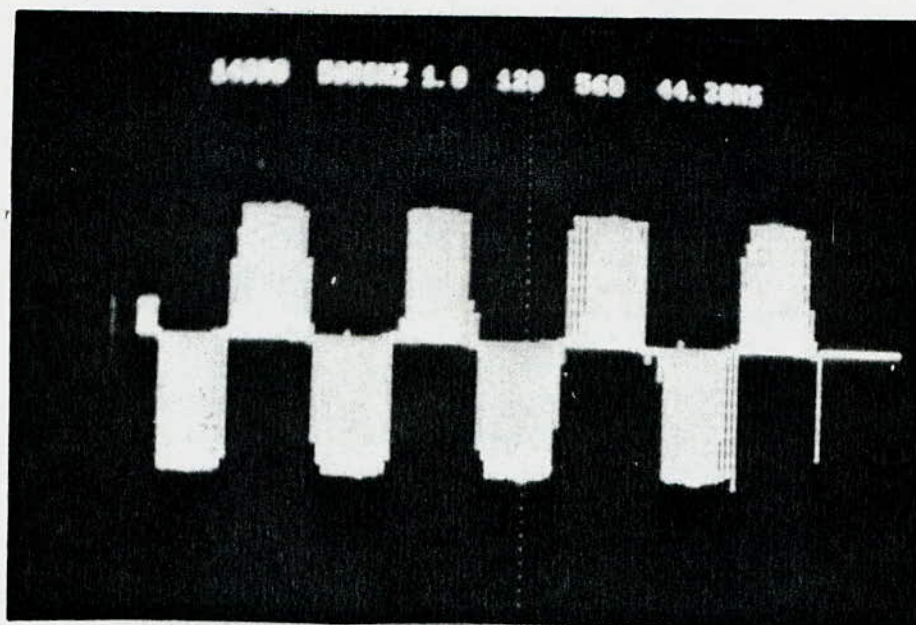
*****ONDE DE COURANT à $I = 3,7$ A; $\Gamma = 3,7$ N.m à $f = 50$ Hz*****

(fig 23)



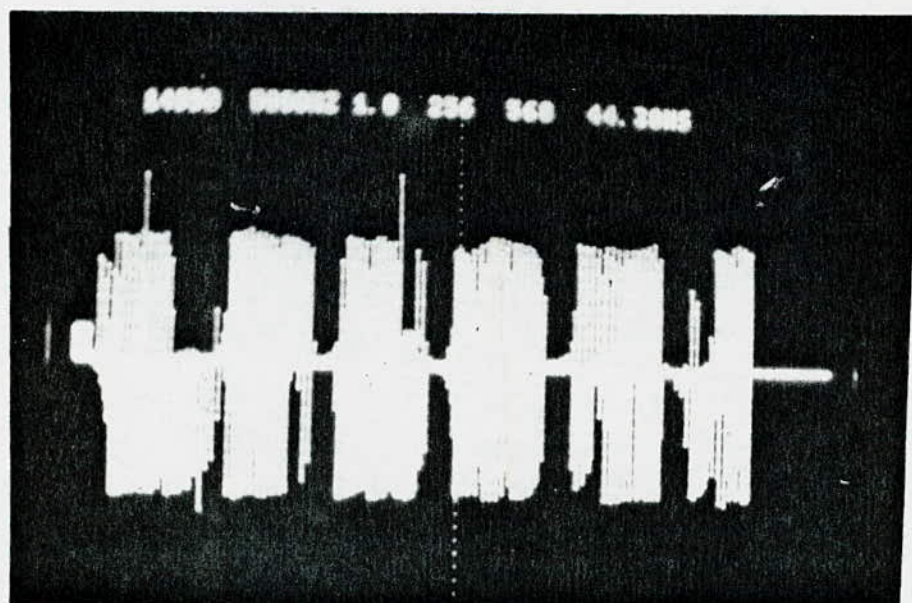
***** ONDE DE COURANT à $I = 3,6$ A; $\Gamma = 3,7$ N.m à $f = 35$ Hz*****

(fig 24)



*****ONDE DE TENSION à U = 220V; $\Gamma = 3,7$ N.m à f = 50Hz*****

(fig: 25)



*****ONDE DE TENSION à U = 190V; $\Gamma = 3,7$ N.m à f = 35Hz*****

(fig: 26)

IV-ONDULEUR à MLI ASSOCIE à UN MOTEUR ASYNCHRONE à ROTOR MASSIF

IV-1-) INTRODUCTION:

Les moteurs asynchrones traditionnels sont limités en vitesse par leur tenue mécanique .Pour les moteurs à très grandes vitesses de rotation on est donc amenés a renoncer à cette structure . Une des solutions possibles consiste à utiliser un rotor constitué d'un cylindre en acier massif .Le fonctionnement d'un tel moteur bien qu'étant toujours basé sur le fonctionnement d'induction est différent de celui du moteur conventionnel puisqu'on confie alors au fer rotorique le double rôle à savoir canaliser le flux magnétique et les courants induits

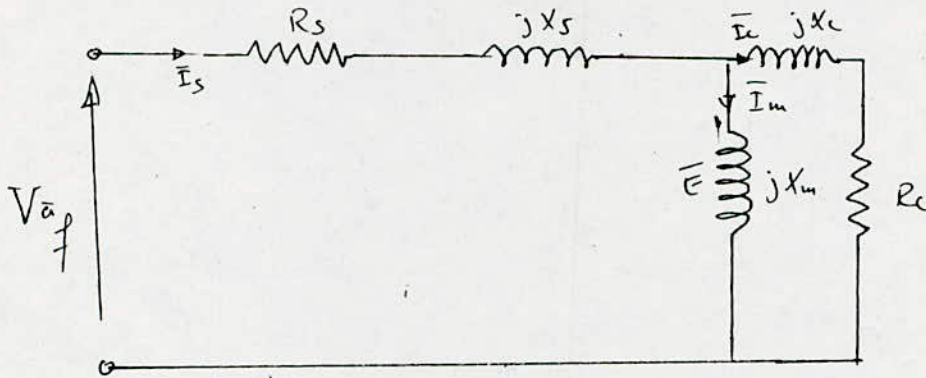
-Le moteur à rotor massif possède un bon couple au démarrage par contre ses caractéristiques se dégradent considérablement aux faibles glissement ,les raisons sont à la fois élèctriques et mécaniques et en ce sens plusieurs travaux ont été effectués au département .Nous allons présenté une étude succincte pour ce type de machine .

IV-2-) ETUDE DU MOTEUR ASYNCHRONE à ROTOR MASSIF:

L'intérêt d'une étude théorique de ce type de moteur est de définir les différents paramètres d'un schémas élèctrique équivalent à partir duquel les caractéristiques de fonctionnement seraient prédéterminées.Une étude théorique détaillée est assez complexe ,mais peut être simplifiée par le choix adéquat de la caractéristique magnétique de l'acier rotorique et par l'introduction d'hypothès simplificatrice

VI-2-1) SCHEMAS EQUIVALENT:

Par analogie avec le moteur asynchrone à rotor bobiné le schémas équivalent du moteur asynchrone à rotor massif lisse (sans pertes fer) ramené au stator est représenté par la (fig 31)



(fig 27)"schéma équivalent par phase du moteur asynchrone à rotor massif lisse ramené au stator "

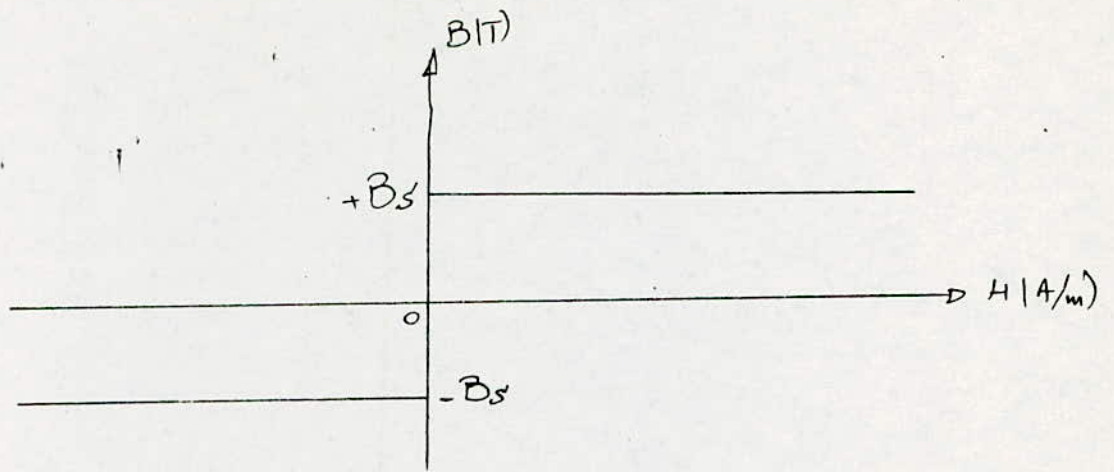
pour la détermination des différent paramètres du schémas équivalent ,nous avons opté pour le modèle physique utilisé par la référence qui donne des résultats assez concordants avec les mesures (modèle expérimenté au sein du laboratoire de machines).

IV-2-2) ANALYSE THEORIQUE ADOPTEE:

-a) CHOIX DE LA CARACTERISTIQUE MAGNETIQUE DE L'ACIER

ROTORIQUE:

La caractéristique réelle de l'acier rotorique (non linéaire) est approximée par une courbe stylisée rectangulaire' (fig 32). cette courbe comporte un saut brusque de $(-B_s)$ à $(+B_s)$ lorsque le champ magnétique change de signe .

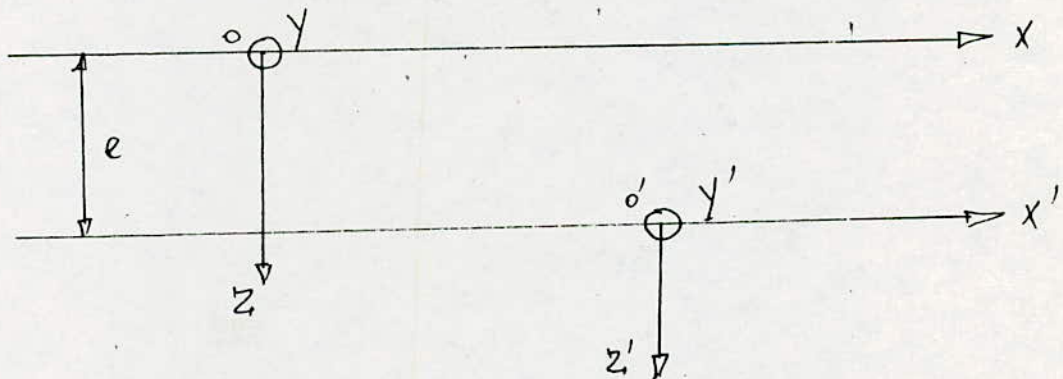


(fig. 28) "Caractéristique magnétique adoptée pour l'acier rotorique "

-B)MODEL D'ETUDE

Un système de coordonnées rectangulaires (OXYZ) est lié à l'axe magnétique d'une phase du bobinage statorique. Un autre système de coordonnées rectangulaires (O'X'Y'Z') est lié au rotor (fig 33). Quand le rotor tourne dans le sens des X croissant avec un glissement g , la relation X à X' est :

$$X - X' = \frac{\tau_p}{3.14} (1-g)\omega t$$



(fig 29) "représentation schématique développée du modèle d'étude"

Les hypothèses adoptées sont usuelles à toute étude d'une machine électrique. Dans notre cas nous supposons les grandeurs

électrique . Dans notre cas nous supposons les grandeurs électriques et magnétique sinusoidales et qu'à une certaine profondeur du rotor , les champs s'annulent.

IV-2-3) DETERMINATION DES PARAMETRE DU SCHEMAS EQUIVALENT

Les résultats de l'étude théorique citée avant ont permis de déterminer le courant rotorique ramené au stator par considération des fondamentaux des F.M.M. des différentes parties de la machine

$$I_c = P \cdot \sigma \cdot \tau_p / 32mL^2 \cdot (Kb1 N)^3 \cdot Bsf \cdot g E^2 \quad (A) \quad (27)$$

L'impédance de charge ramené au stator est donnée par :

$$Z_c = E / I_c$$

$$\text{Donc } Z_c = 32mL^2 \cdot (Kb1 N)^3 \cdot Bsf \cdot 1 / P \sigma \tau_p \cdot 1 / g E \quad (\Omega) \quad (28)$$

Cette étude montre que l'argument de Z_c est constant et indépendant du glissement et de la F.E.M. induite

$$\varphi = \text{ARCTG}(1/2) \quad (29)$$

La résistance de charge ramené au stator sera donnée par :

$$R_c = Z_c \cos(\text{ARCTG}(1/2)) \quad (\Omega)$$

$$R_c = 28.6 mL^2 \cdot (Kb1 N)^3 \cdot Bsf \cdot 1 / P \sigma \tau_p \cdot 1 / g E \quad (\Omega) \quad (30)$$

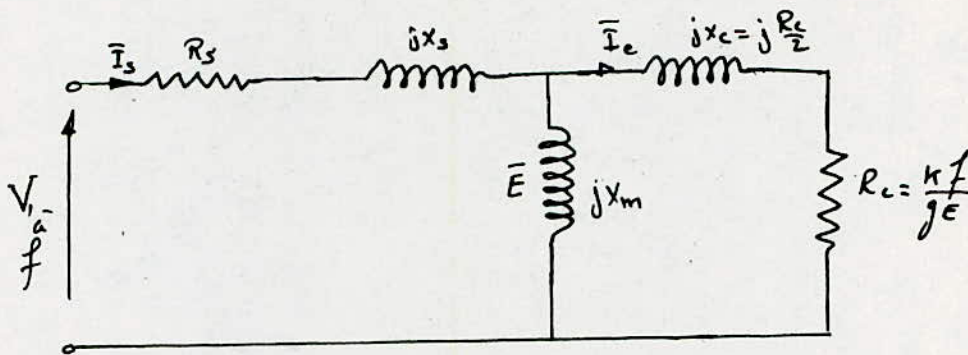
L'impédance de charge exprimée en fonction de R_c sera :

$$Z_c = \sqrt{R_c^2 + (R_c/2)^2} \text{ soit } Z_c \approx 1.12 R_c \quad (31)$$

En posant $K = 28.6 mL^2 \cdot (Kb1 N)^3 \cdot Bsf / P \cdot \sigma \cdot \tau_p$

$$I_c = g E^2 / (1.12 K f) \quad (A) \quad \text{et } R_c = K f / (g E) \quad (\Omega) \quad (32)$$

en définitif , le schémas électrique équivalent par phase ramené au stator est donné par (fig 34)



(fig 30) "Schemas Equivalent"

IV-2-4) COUPLE ELECTROMAGNETIQUE:

La puissance transmise au rotor correspond à la partie active du circuit rotorique :

$$P_t = m R_c I_c^2 \quad (\text{W}) \quad \text{avec} \quad I_c = E / (1.12 R_c) \quad (33)$$

Le couple électromagnétique est donné par

$$T = P_t / \Omega_s \quad (\text{N.m}) \quad \text{Avec} \quad \Omega_s = \omega_s / p$$

A l'aide des expressions établies nous obtenons:

$$T = 0.126 \frac{m P_g E^2}{(K f)^2} \quad (\text{N.m}) \quad (34)$$

IV-3-) ETUDE EXPERIMENTALE:

IV-3-1-) MESURE SANS ET AVEC ONDULEUR à MLI :

a-) MONTAGES:

Les montages utilisés sont identiques aux montages (fig 18.19), ou le moteur à cage est remplacé par un moteur asynchrone à rotor massif.

-B-) CARACTERISTIQUES DU MOTEUR:

-Le stator est conçu à l'origine pour un moteur asynchrone à cage d'écureuil; il possède 36 encoches, 4 poles et 37 conducteurs par encoche.

- plaque signalétique à l'origine :

tension: 220/380V, courant: 9/5.2A, vitesse: 1410tr/mn;

puissance: 2.2 kW; fréquence: 50Hz; $\cos(\varphi) = 0.8$ Rs (à 75°C) = 3.4; $\lambda = 10$

-longueur du noyau: L=110 mm

-Diamètre externe : De=145 mm

-Diamètre interne : Di=88.5 mm

-Classe d'isolement : "B"

*-Le rotor est un cylindre plein en acier: Xc18

-Diamètre : D= 87.7 mm

-Longueur active : L=110 mm

-Résistivité de l'acier rotorique #1.87 10^{-7} $\Omega \cdot m$ (à chaud)

-C-) MESURE EFFECTUEES:

Nous avons effectués les mêmes mesures que pour le moteur à cage avec les enroulements statoriques couplés en étoile (le couplage nous été imposé par l'onduleur à MLI car pour un couplage en triangle, le courant déclenchait au démarrage la protection de celui-ci) de plus nous avons relevé les courbes de variation de

fig. 31 Moteur Asynchrone à rotor massif
Caractéristique $\Gamma = f(\Omega) \approx \frac{U}{f} \approx C \frac{s}{e}$

---xxx--- avec Onduleur à MLI

----- Sans Onduleur à MLI

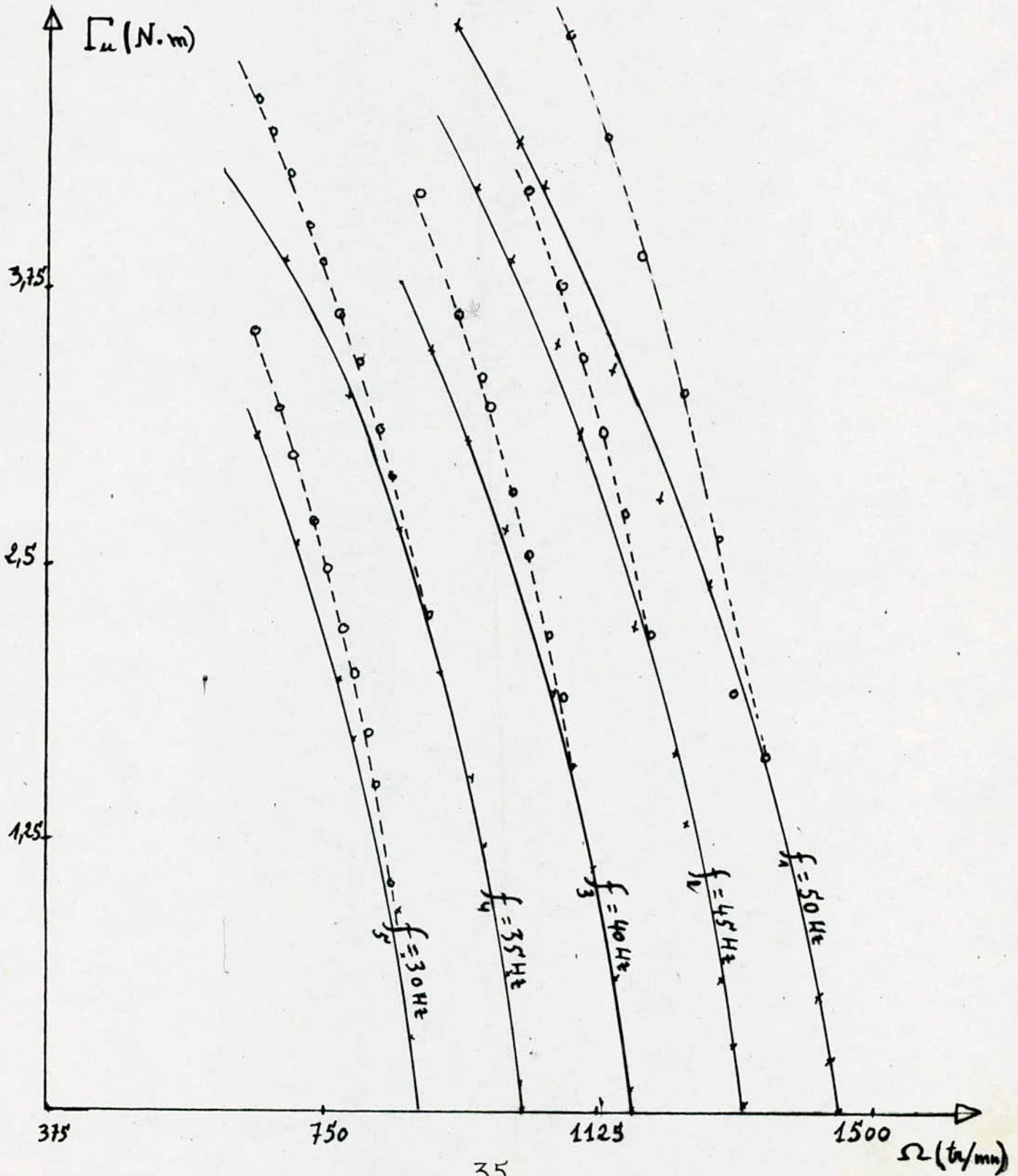


fig. 32 Moteur Asynchrone à rotor massif
 Caractéristique $I = f(\gamma)$ à $\frac{U}{f} \approx C^{ste}$
 avec Onduleur à MLI

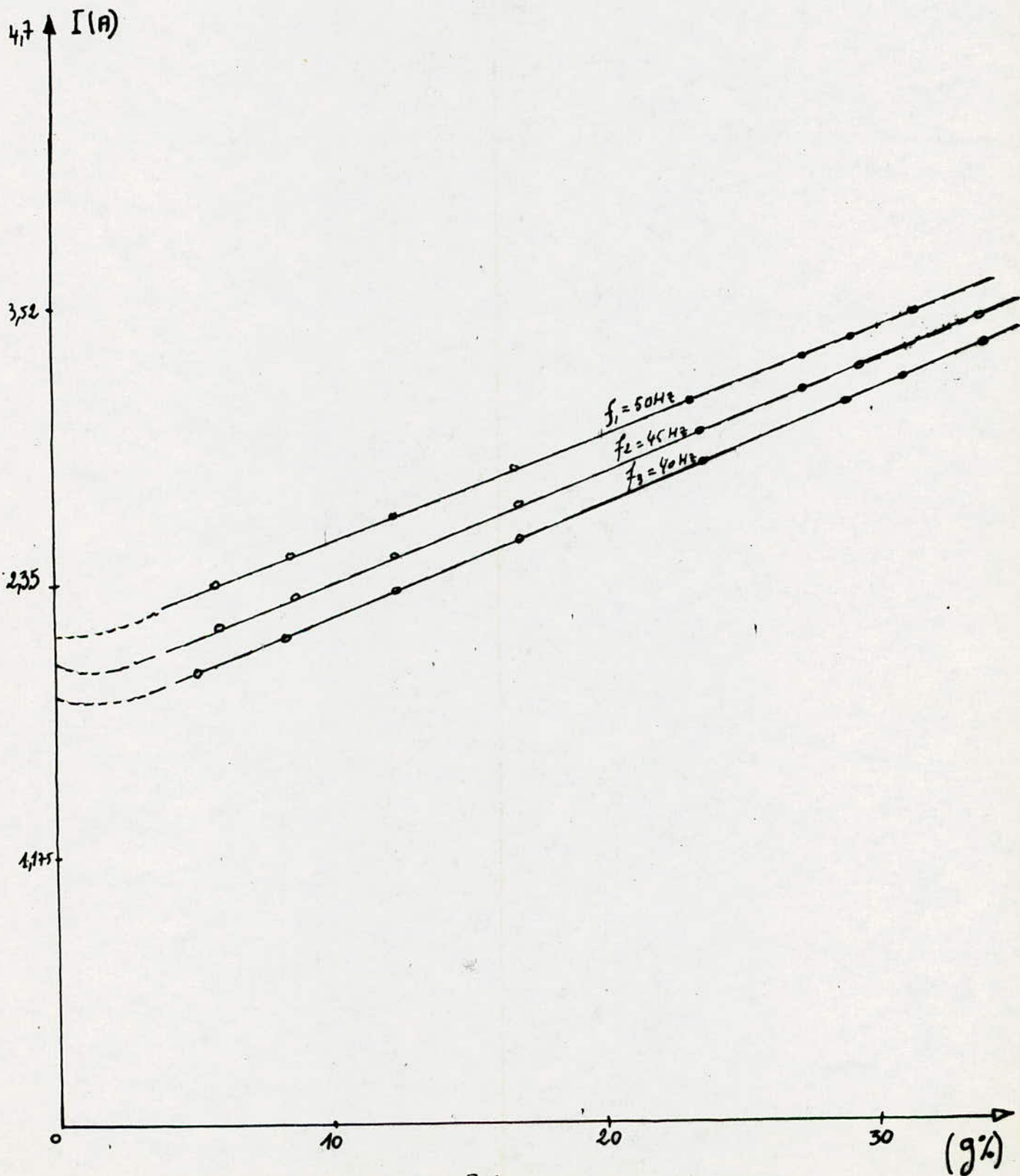
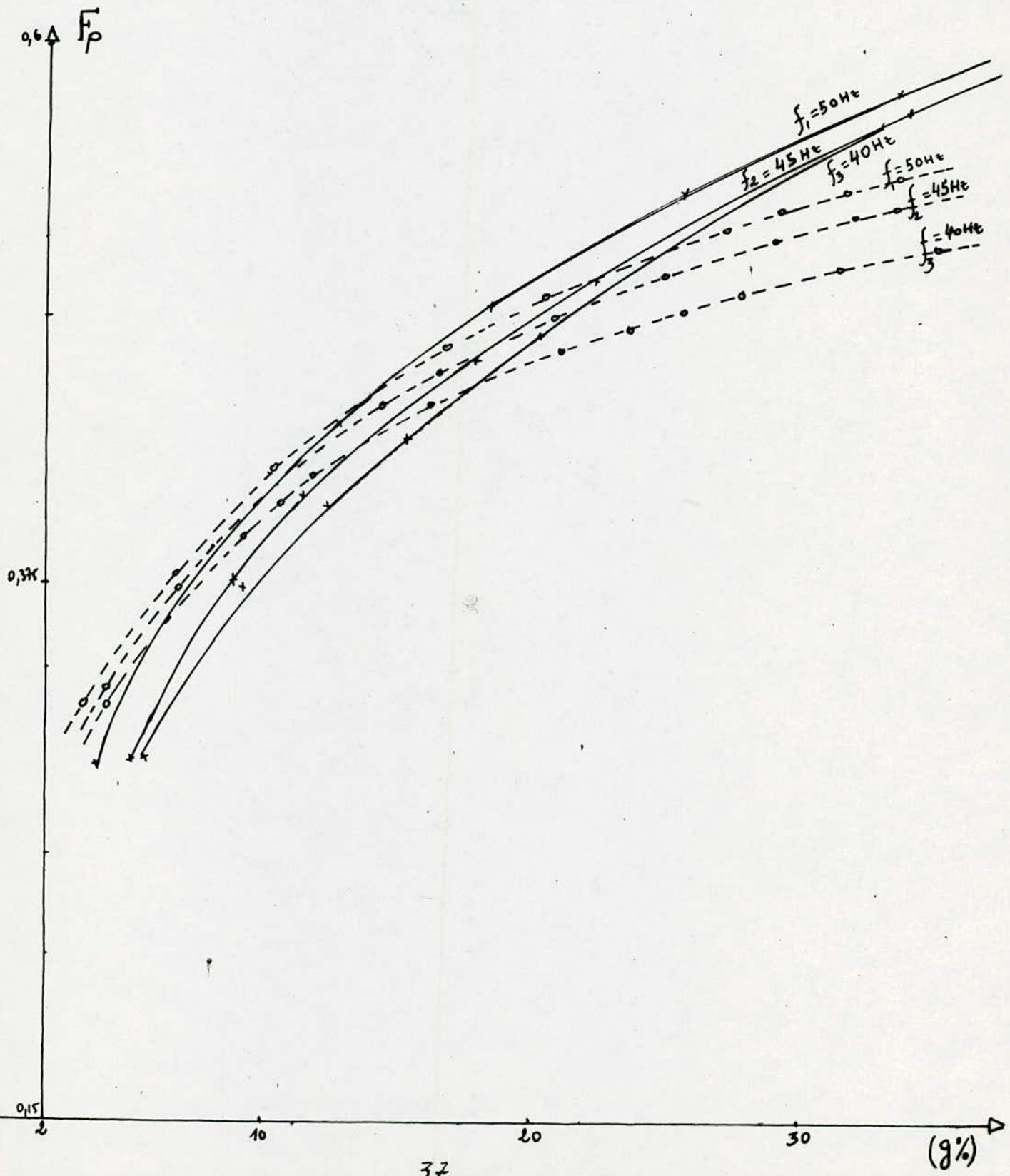
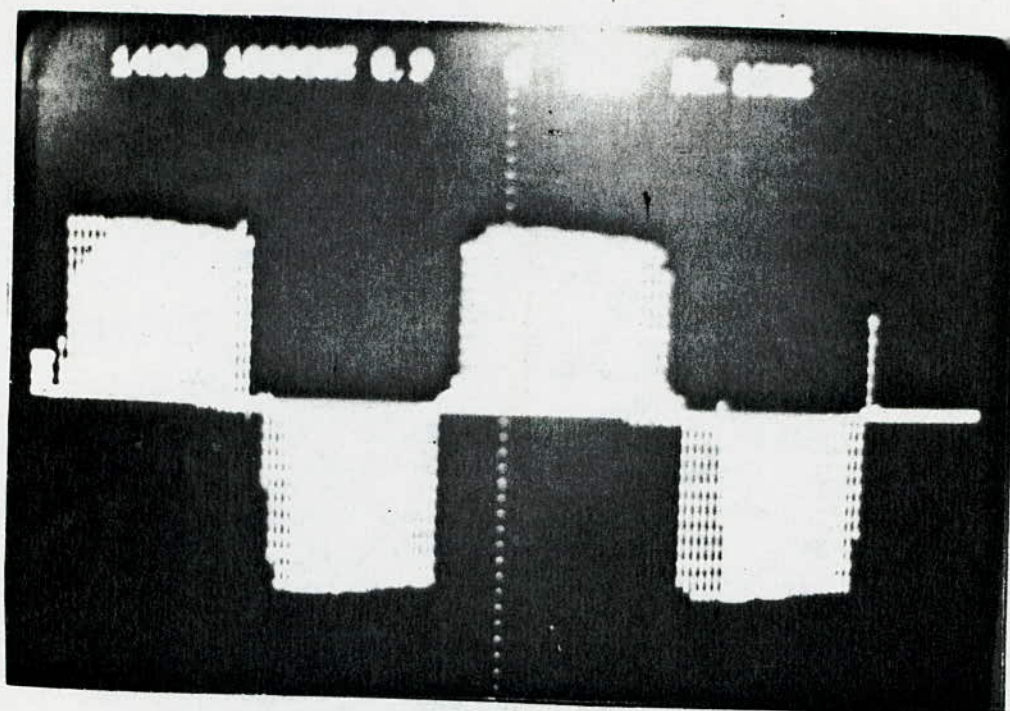


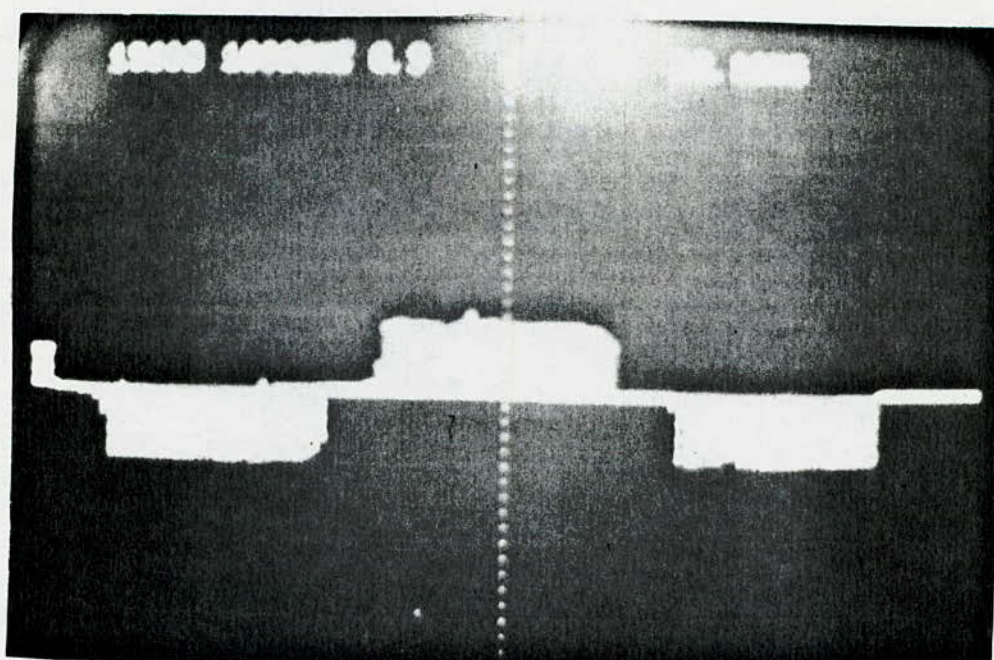
fig. 31 Moteur Asynchrone à rotor massif
Caractéristique $F = f(g)$ à $\frac{U}{f} \approx C$
 - x x x - avec Onduleur à MLI
 - o o o o - Sans Onduleur à MLI





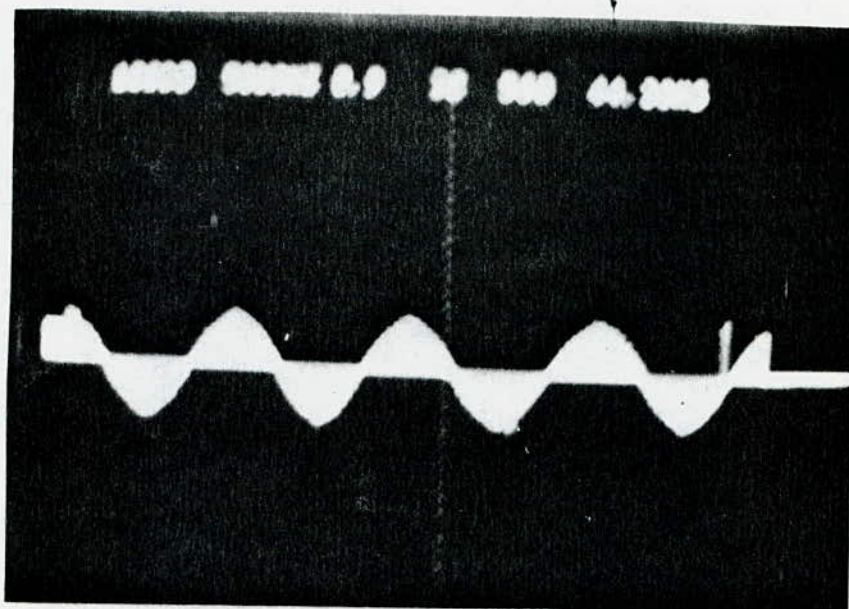
*****ONDE DE TENSION a $U = 220$ V; $\Gamma = 5,8$ N.m a $f = 50\text{Hz}$ *****

(fig: 32)



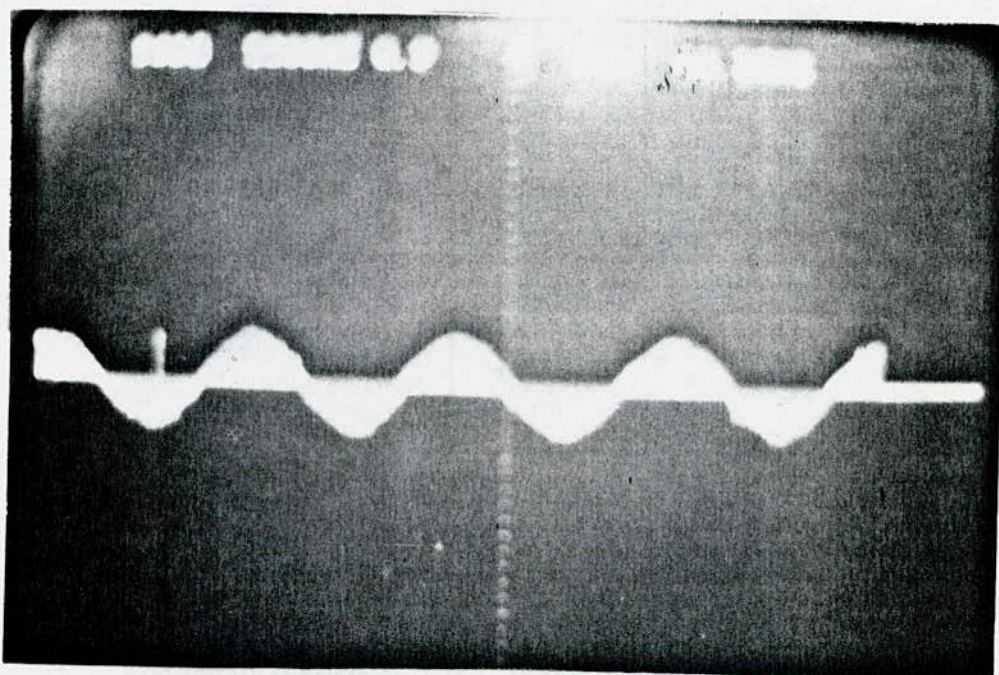
*****ONDE DE TENSION a $U = 190$ V; $\Gamma = 5,8$ N.m a $f = 35\text{Hz}$ *****

(fig: 33)



*****ONDE DE COURANT à $I = 3,9$ A; $\Gamma = 5,8$ N.m à $f = 50$ Hz*****

(fig: 34)



***** ONDE DE COURANT à $I = 3,8$ A; $\Gamma = 5,8$ N.m à $f = 35$ Hz*****

fig-35

la tension et de courant en fonction du temps (fig 32;33 et 34,35).

-IV-3-2-)RESULTATS OBTENUS:

-Caractéristique mécanique $\Gamma(-\Omega)$ à U/f constant (fig 31)

-A fréquence donnée le glissement dans le cas sans onduleur à MLI est inférieur par rapport au cas où le moteur lui est associé.

-L'onduleur à MLI associé à un moteur asynchrone à rotor massif accentue la résistance rotorique (celle-ci est directement liée à la fréquence c à d aux harmoniques)

Caractéristique électromécanique: $I(\gamma)$ à U/f constant: (fig 32)

-le courant avec l'onduleur à MLI associé au moteur asynchrone à rotor massif lisse augmente avec le glissement (résultat prévisible), à fréquence donnée. (fig 32)

-Avec la diminution de fréquence, à glissement donnée, le courant au niveau du moteur diminue. (fig 32)

*Caractéristique du facteur de puissance: $F_p(\gamma)$ à U/f constant:

-pour les faibles glissements ($20\% > \gamma > 0$) l'influence de l'onduleur sur le F_p quand il est associé au moteur asynchrone à rotor massif n'est pas importante. Par suite pour les faibles vitesses de rotation ($30\% < \gamma$) l'onduleur à MLI associé à ce dernier provoque une amélioration du facteur de puissance (fig 31)

-ceci montre que l'onduleur à MLI réduit les harmoniques d'ordre supérieur pour les glissements élevés.

V-COMPARAISON ENTRE MOTEUR à CAGE CLASSIQUE ET LE MOTEUR à ROTOR MASSIF QUAND IL SONT ASSOCIEES à UN ONDULEUR à MLI

-CARACTERISTIQUES MECANQUES $\Gamma(\omega)$ à U/f CONSTANT:

Nous rappelons que les vitesses de synchronisme des machines étudiées sont différentes ,l'une est à deux poles (moteur à cage) l'autre est à quatre poles ,de plus le point de fonctionnement nominale du moteur asynchrone à rotor massif est indéfini ,à cela il faut ajouter les conditions de surcharge de l'onduleur à MLI (paragraphe III-3-2-b NOTA)toutes ces raisons ne nous ont pas facilité la comparaison.

Toute fois nous avons établi que:

- pour un couple donné et une fréquence donnée,le glissement pour la machine à cage est plus faible que la machine à rotor massif qu'ils soient associés ou non à l'onduleur à MLI.

-Quelque soit la fréquence les caractéristiques mécaniques obtenues pour le moteur asynchrone à rotor massif associé ou pas à l'onduleur à MLI présentent une stabilité plus accentuée que celles obtenu pour le moteur à cage dans les mêmes conditions de fonctionnement.En effet le moteur à rotor massif est stable quelque soit la vitesse pour une fréquence donnée.

- l'onduleur à MLI associé à un moteur asynchrone à cage permet l'obtention des vitesses réduites sans détériorer les caractéristiques mécaniques.

-CARACTERISTIQUES ELECTROMECHANQUES $I(g)$ à U/f CONSTANT:

- Il est assez délicat d'interpreter les caractéristiques courants glissement à U/f constant pour une éventuelle

comparaison pour les deux machines car le courant est très réduit (paragraphe III-3-2-b) toute fois nous avons effectués les mesures et obtenu des résultats inexploitable

- Le facteur de puissance d'un moteur asynchrone quand il est associé à un onduleur à MLI se trouve amélioré pour les glissement élevés (fig 28). Toute fois il demeure toujours faible comparé à celui obtenu avec la machine à cage (fig 31)
- les harmoniques d'ordre supérieur que ce soit pour la tension ou le courant sont négligeables surtout pour les glissements élevés comme nous le montre les fig (36 et 37) que ce soit pour la machine à cage ou à rotor massif qui se trouve moins affectée par les harmoniques d'ordre supérieurs étant donné qu'elle travaille à vitesse plus réduite que la machine à cage (fig 36 et 37).

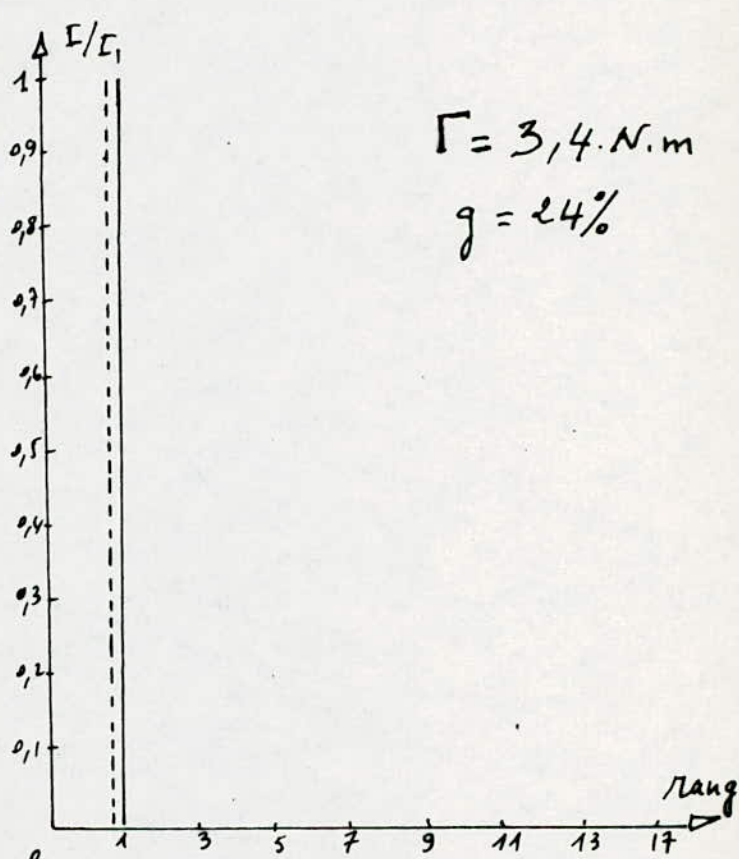
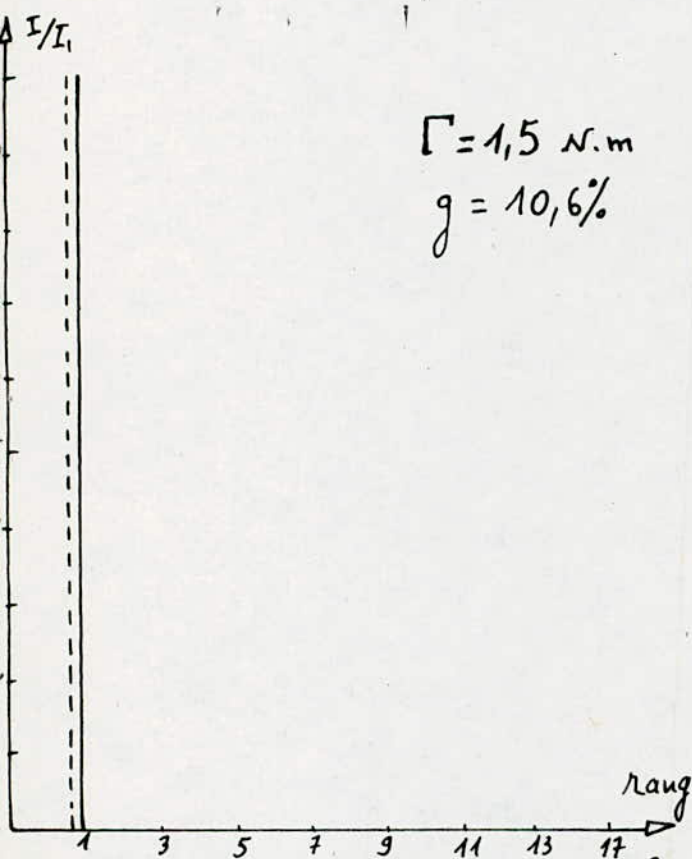
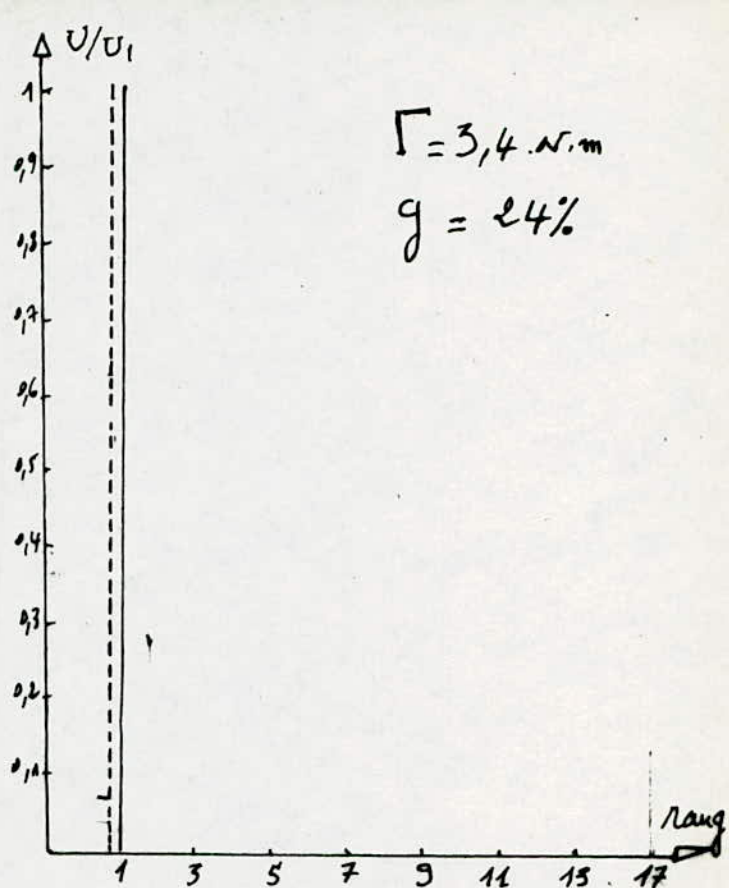
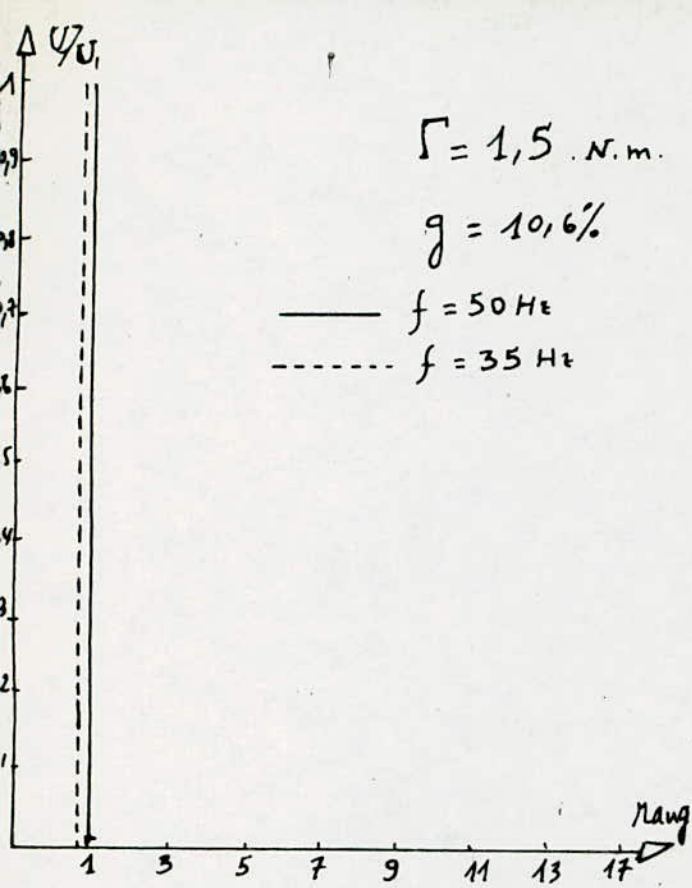


fig. 36 " Spectre par les harmoniques de tension et de courant par un moteur asynchrone à rotor massif à $\frac{U}{f} \approx C^{ste}$ "

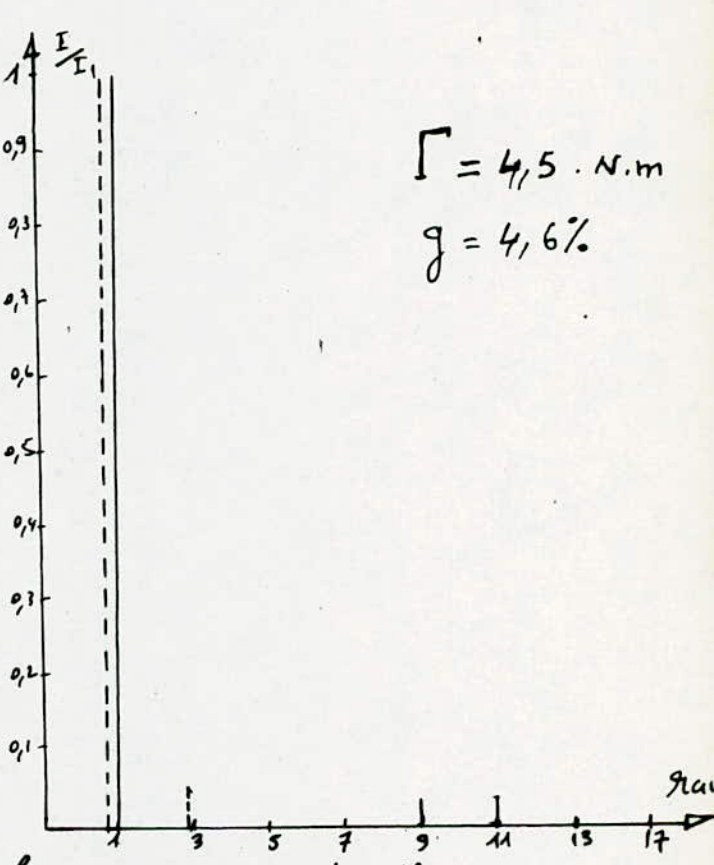
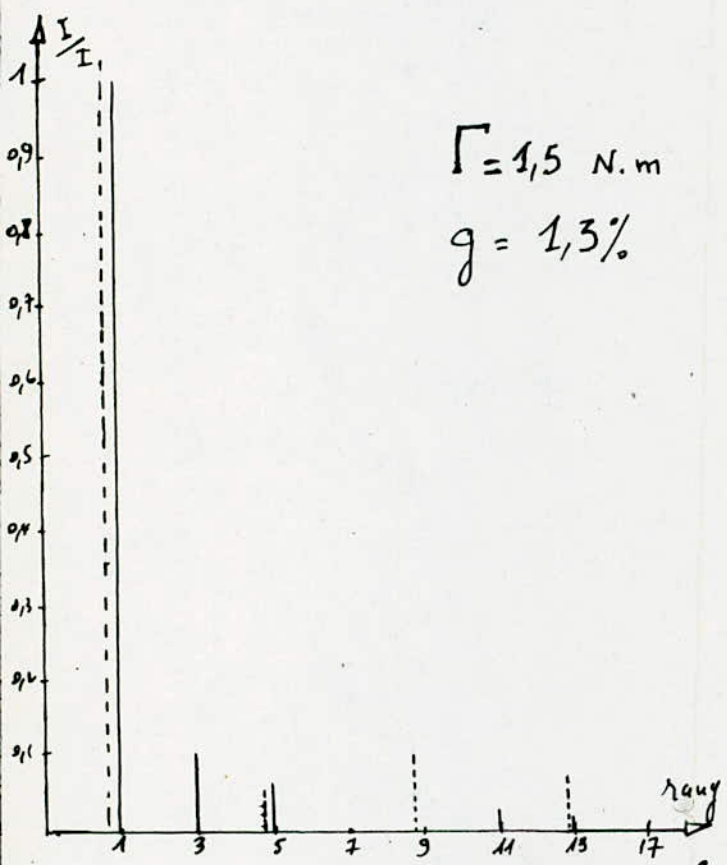
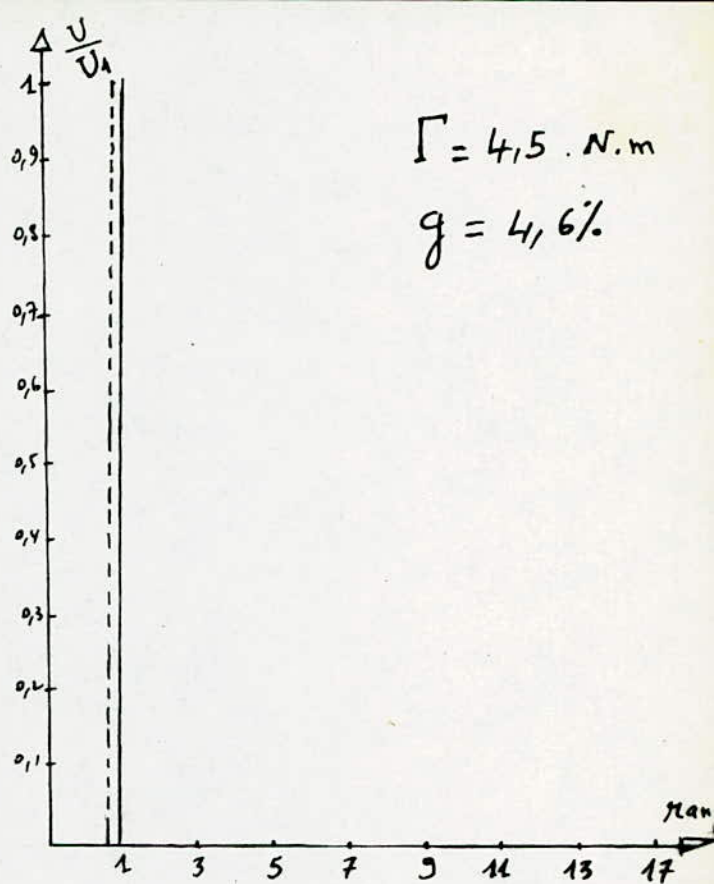
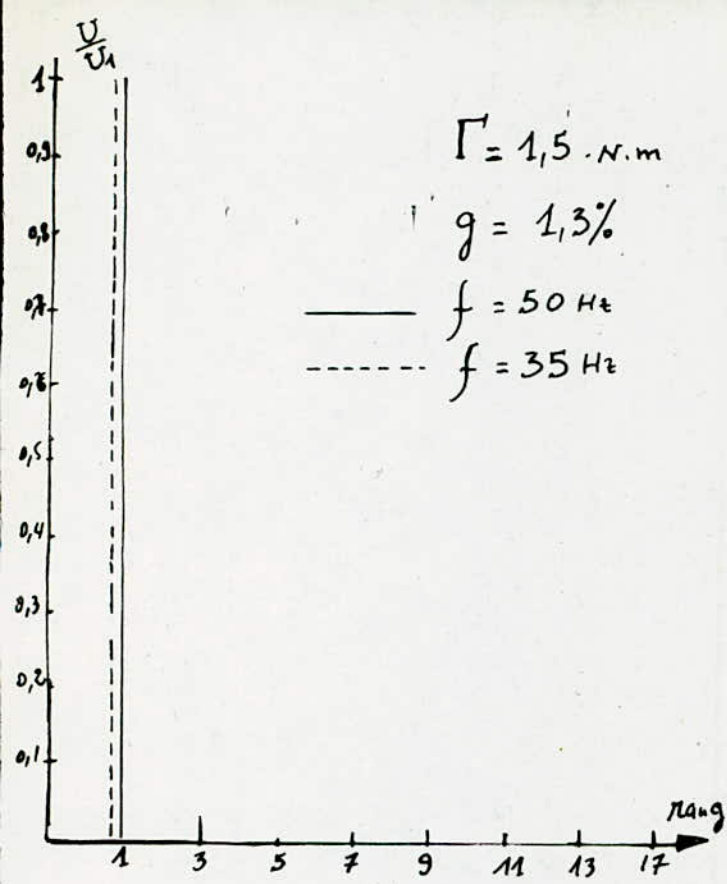
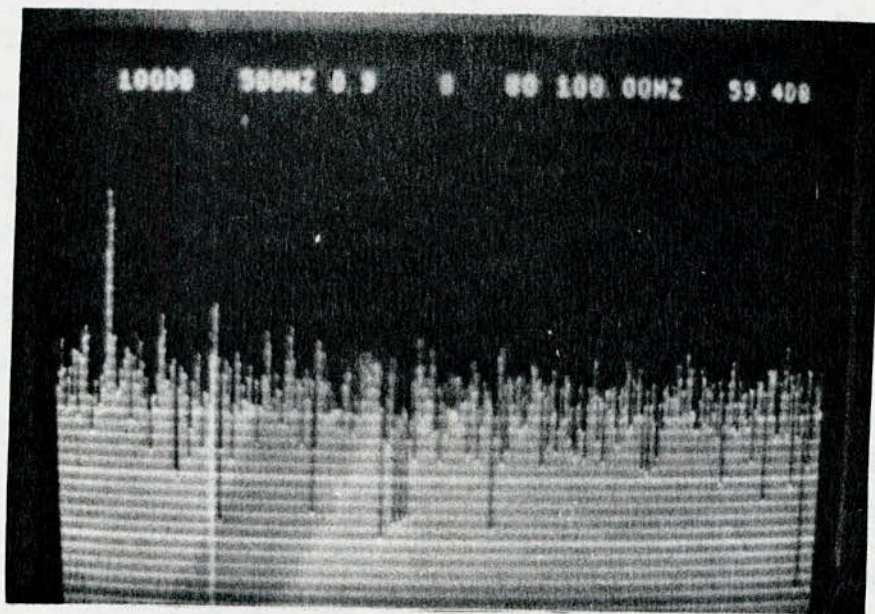


fig-37

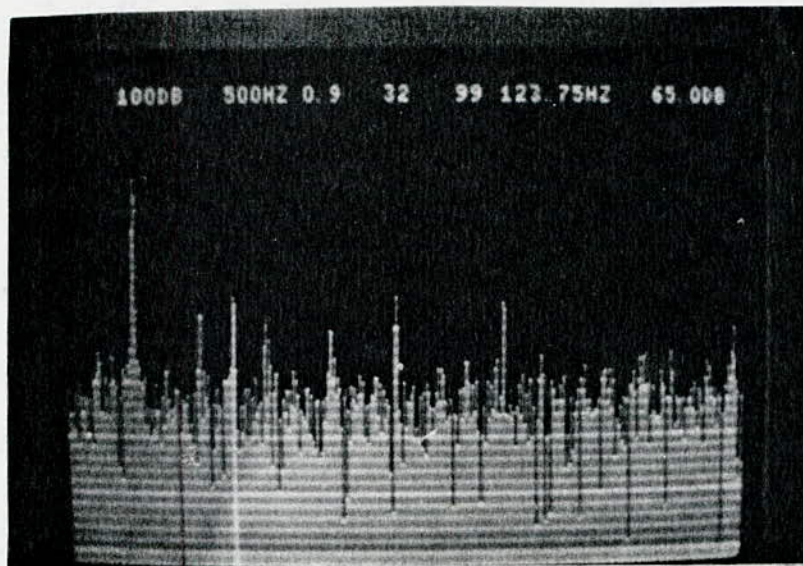
" Spectre pour les harmoniques de tension et de courant pour un moteur asynchrone à cage classique à $\frac{U}{f} = c^2$



"SPECTRE D'HARMONIQUE DE COURANT POUR LE MOTEUR A CAGE"

$I = 2.5 A$; $\Gamma = 3.6 N.m$; $f = 35 Hz$

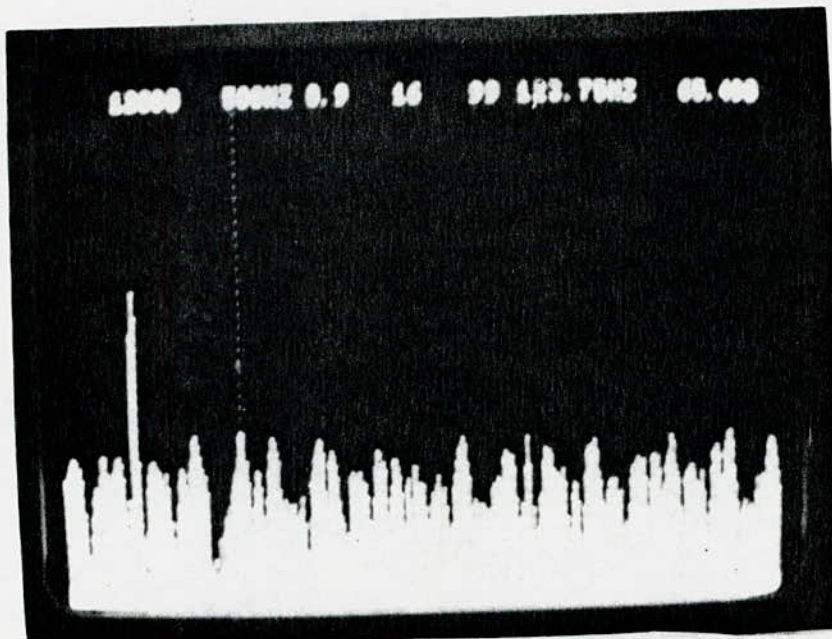
(fig-38)



"SPECTRE D'HARMONIQUE DE COURANT POUR LE MOTEUR A CAGE"

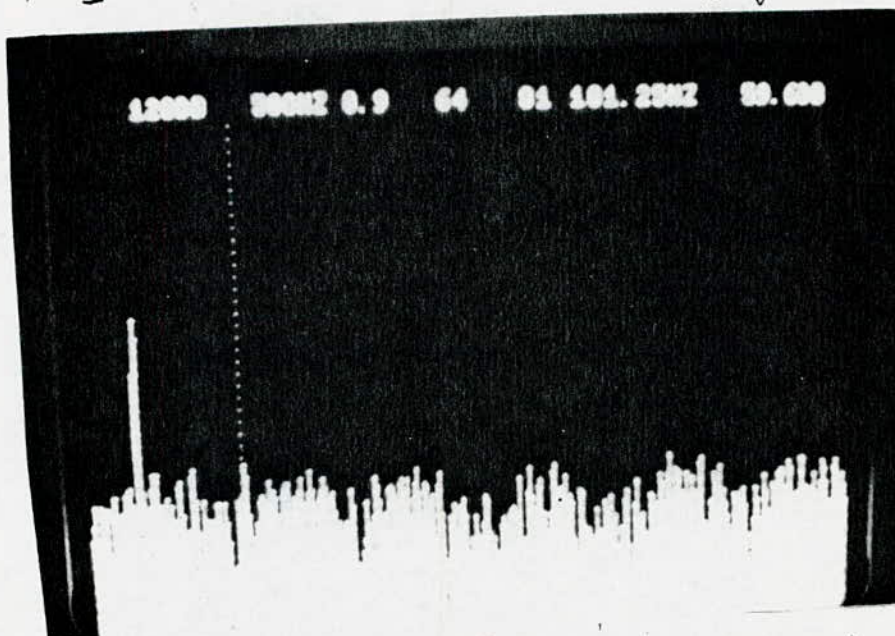
$I = 3 A$; $\Gamma = 3.6 N.m$; $f = 50 Hz$

(fig-39)



★ "SPECTRE D'HARMONIQUE DE COURANT POUR LE MOTEUR à ROTOR MASSIF" ★

$I = 3,9$; $\Gamma = 5.8$ N.m ; $f = 50$ Hz (fig: 40)



★ "SPECTRE D'HARMONIQUE DE COURANT POUR LE MOTEUR à ROTOR MASSIF" ★

$I = 3,2$; $\Gamma = 5.8$ N.m ; $f = 35$ Hz (fig: 41)

*****VI-) CONCLUSION*****

Ce travail nous à permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine de l'électronique de puissance et des machines

-Les caractéristiques mécaniques avec l'onduleur à MLI qu'il soit associé au moteur à cage ou au moteur à rotor massif s'adapte très bien à la variation de vitesse. En effet l'onduleur à MLI pour les deux types de moteur ne provoque pas d'harmoniques susceptibles de perturber leurs performances surtout au glissements élevés.

Pour le moteur à rotor massif associé à l'onduleur à MLI les harmoniques sont pratiquement négligeables ce qui permet d'entrevoir une éventuelle utilisation pour ce type de moteur surtout sachant que celui-ci offre un couple de démarrage important pour un courant acceptable en prévoyant un refroidissement adéquat.

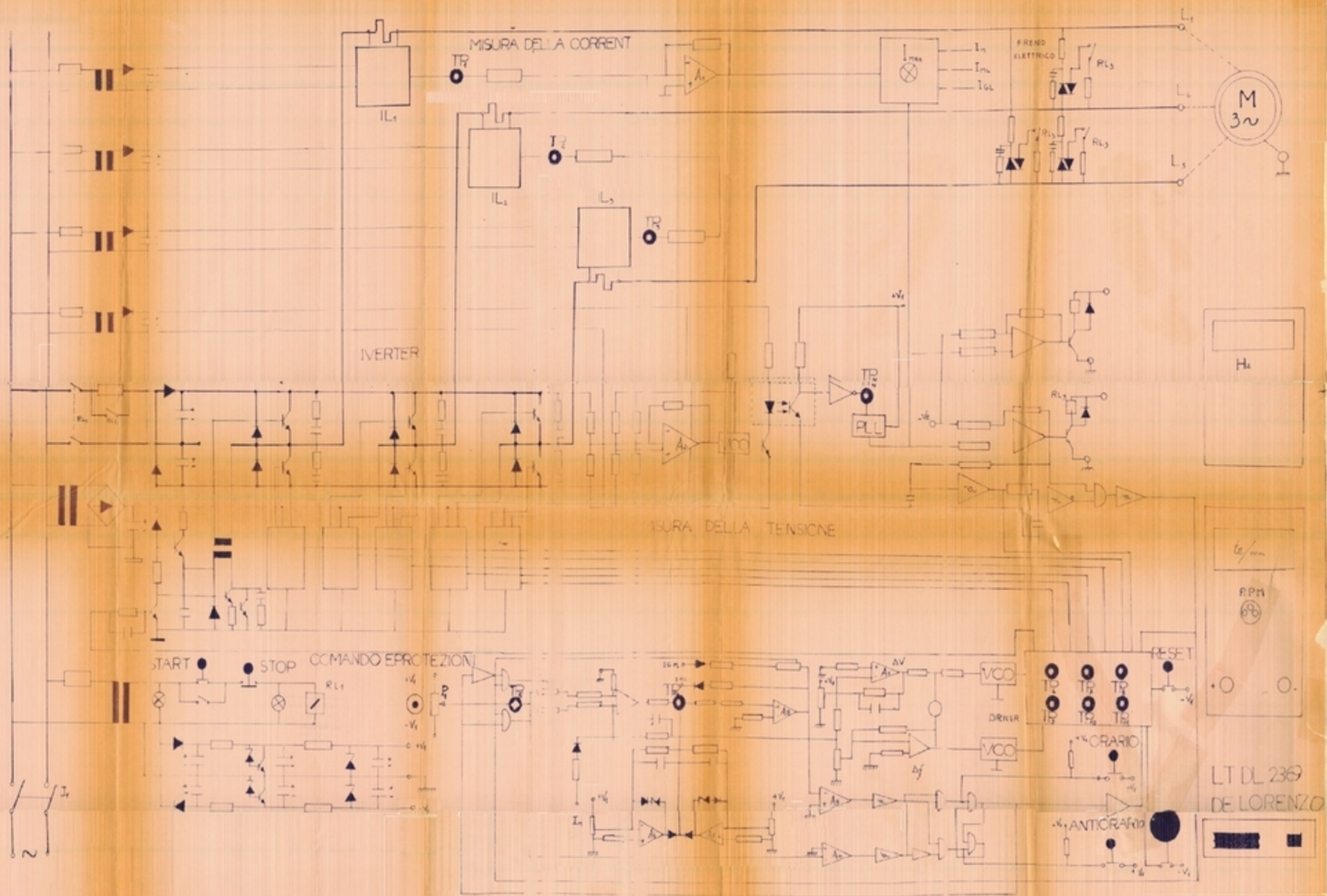
-Notre étude aurait été encore plus complète si l'onduleur utilisé n'était pas limité du point de vu intensité s'il avait un moyen permettant de compenser la chute de tension en charge.

Nous proposons pour la suite de cette étude d'améliorer l'onduleur à MLI utilisé et une étude de simulation numérique pour parvenir à d'autre résultats.

***** BIBLIOGRAPHIE*****

- /1/ : Guy SEGUIER - "Electronique de puissance"
Edition DUNOD -1979
- /2/ : H. BUHLER - "Electronique de puissance"
Edition DUNOD -1982
- /3/ : R. CHAUPRADE - "Electronique de puissance"
et F. MILSANT T 2 Edition EYROLLES -1984
- /4/ : F. BRICHANT - " Ondule autonome"
Edition DUNOD -1982
- /5/ : R. IBTIOUEN - "Etude d'un moteur asynchrone
à rotor massif lisse pour
different valeur d'entre fer
et étude thermique"
Thèse de Magister E.N.P.1984
- /6/ : H. BOUKHALFA - "Variation de vitesse par
et E. AIT-SAAD moteur asynchrone"
P.F.D E.N.P. JUIN -1986
- /7/ : G.SEGUIER - "Electrotechnique industrielle"
et F.NOTELET Edition technique et documentation
-1985
- /8/ : A. HASNIOUA - "Association onduleur moteur
et A. ZAIDI asynchrone réglage de la
vitesse P.F.E/ E.N.P.JUIN-1984
- /9/ : D. JOVANIC - "Influence du type de commande sur
la caractéristique d'un moteur
asynchrone alimenté à fréquence
variable"
R.G.E. JANVIER 1985
- /10/ : B. DAVAT - "Méthode de modélisation des
machines électriques à rotor massif"
R.G.E. MARS 1985
- /11/ : J. SAINT MICHEL - "rotor ferromagnetique pour
obtenir des fortes puissances
à des grandes vitesses"
R.G.E MARS 1987

- /12/ : J. ZUBEK -"pulsewidth modulation inverter motor
A.ABBONDANTI drives with improved modulation"
C.J.NORBY I.E.E.E. NOVEMBER/DECEMBER 1975
- /13/ : A.B.PLUNKETT -"Direct flux and torque regulation
in a PWM inverter-induction motor drive"
I.E.E.E. MARCH/APRIL 1977
- /14/ : A.BELLINI -"Induction machine frequency control:
G.GIOFFI three-phase bridge.inverter behavior
and performance"
JULY AUGUSTE 1971



SCHEMA SYNOPTIQUE D'UN
 ONDULEUR A MLI
 (Modulation de largeur d'impulsion)

ECOLE NATIONALE
 POLYTECHNIQUE

PROMOTION
 JANVIER 88

LT DL 2369
 DE LORENZO