

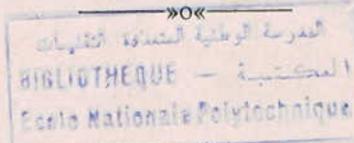
16/88
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

«O»

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : D'ELECTRONIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES

en vue d'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

SUJET

Etude de la Régulation de Vitesse d'un Moteur à Courant Continu

Proposé par :

Melle A. MOUSSAOUI

Etudié par :

LOUNES MOHAMED
NASRI AZZEDINE

Dirigé par :

Melle A. MOUSSAOUI

Promotion ; Janvier 1988

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

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

»O«

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : D'ELECTRONIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

en vue d'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

SUJET

Etude de la Régulation de Vitesse d'un Moteur à Courant Continu

Proposé par :

Melle A. MOUSSAOUI

Etudié par :

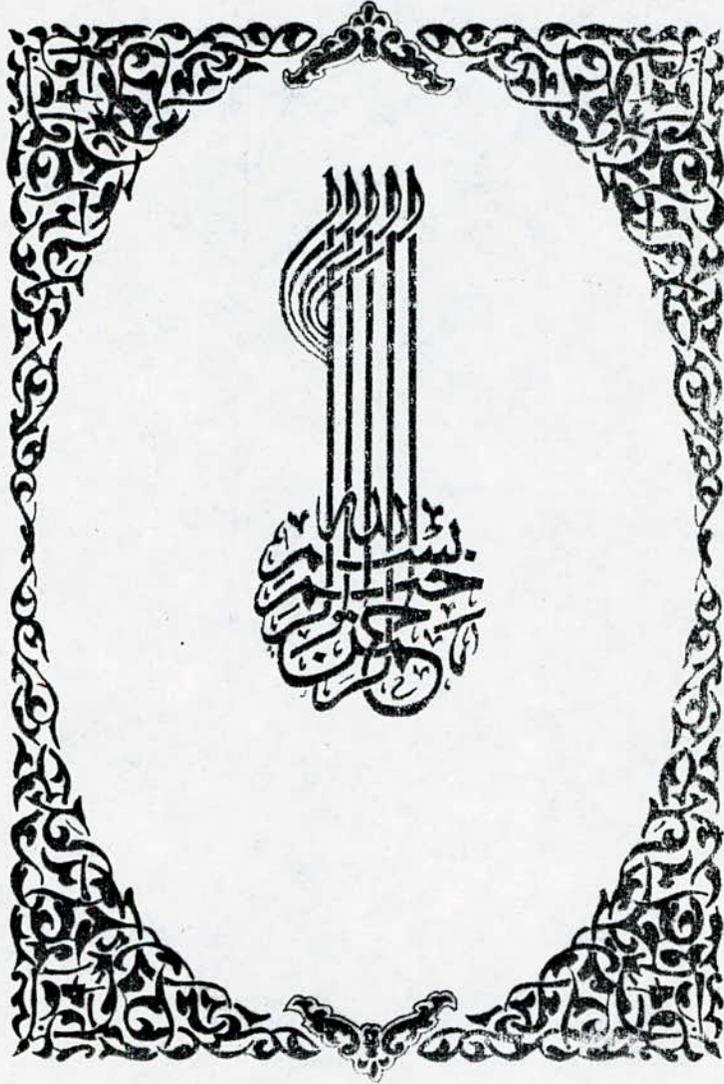
LOUNES MOHAMED
NASRI AZZEDINE

Dirigé par :

Melle A. MOUSSAOUI

Promotion : Janvier 1988

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique



D E D I C A C E S

Je dedie ce travail à :

- Mes parents
- Mes frères et soeurs
- Toutes ma famille
- Tous mes amis

Azzedine. N

A mon père

A ma mère

A mes frères et soeurs

A ma famille et à tous mes amis

Je dédie ce modeste travail

Mohammed. L

R E M E R C I E M E N T S

Nous adressons nos vifs remerciements à notre promotrice
Melle. MOUSSAOUI pour son dévouement et pour l'aide précieuse
qu'elle nous a apportée.

Nous tenons également à remercier

- Mr. CHIGARA
- Mr. LYSSOV
- Mr. BOUBEKEUR

Enseignants à l' E. N. P. pour nous avoir éclairé certains
détail qui nous ont permis de compléter notre travail.

Tous ceux qui ont contribué de pres et de loin à
l'Elaboration de ce travail.

Tous les enseignants et personnels du département
Electronique et du Centre de Calcul.

SOMMAIRE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

-CHAPITRE 1-

Entraînements réglés avec Moteur à C.C	2
Equations du moteur en régime statique	3
" " " " " variable	4
Schéma fonctionnel du moteur	4
Réponse de vitesse et de courant à un échelon de tension	6
" " " " " " " " " " couple	6

-CHAPITRE 2-

Régulation de vitesse proportionnel	11
Etude de la stabilité du système	11
Influence d'une variation de couple sur la vitesse	15
" " " " " " " " " " " réf et de couple sur le courant	16

-CHAPITRE 3-

Régulation en cascade	26
Reponse dynamique d'un pont de thyristors	26
Détermination de régulateur de courant	28
" " " " " " " " " " " en fonction de la stabilité	30
" " " " " " " " " " " de vitesse	32
Dimensionnement de régulateur	34
Filtre pour la valeur de référence	37

-CHAPITRE 4-

Réalisation pratique d'un régulateur de vitesse sans contrainte de courant	39
Réalisation d'un régulateur en cascade	39

-CONCLUSION-

Annexe	45
--------	----

I N T R O D U C T I O N

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة —
BIBLIOTHEQUE —
Ecole Nationale Polytechnique

Pour effectuer un certain travail avec des performances données, le système doit être asservi. Le premier rôle d'un système de régulation est d'obliger la ou les grandeurs asservies ("SORTIE" du système) à conserver des valeurs aussi proches que possibles de celles que l'on considère comme idéales. Ces valeurs idéales, ou théoriques, sont à leurs tour des fonctions des grandeurs d'entrée du système : "REFERENCE" et "PERTURBATION".

Si l'on s'arrange pour utiliser des fonctions des grandeurs de sortie comme entrées supplémentaires, on a créé une "BOUCLE FERMÉE", ou commande à rétro-action.

Il y a trois raisons de se servir de la commande à rétro-action tout d'abord, c'est le moyen le plus commode de réaliser les relations désirées entre entrée et sortie. Ensuite, elle permet de compenser de façon interne, les imprecisions et les dérivées des caractéristiques des composants du système. Enfin et c'est ordinairement le point que l'on considère comme le plus important, tout au moins au point de vue de l'exploitant, elle minimise les effets des perturbations qui, nées hors du système, en effectuant la sortie.

On ne demande pas seulement à un régulateur de faire concorder la valeur de la variable primaire, par exemple la vitesse, avec une grandeur de référence, mais encore de remplir un certain nombre de fonctions, nécessaires au bon comportement des machines.

- a) Limitation des grandeurs critiques.
- b) Commande précise des variables de façons à éviter une rapidité excessive dans leurs évolutions.
- c) Ajustement et optimisation aisés d'une boucle de commande, indépendamment des autres.
- d) Transfert sans à coup d'un mode de commande à un autre.

Dans cette étude nous commençons dans un premier lieu par la mise en équations du moteur, puis nous traitons la régulation de vitesse sans contrainte du courant. Celle-ci sera suivie par une étude complète de la régulation en cascade. Des schémas de réalisation pratique seront proposés avant d'achever par une conclusion.

PREMIER CHAPITRE

Entraînements réglés avec moteurs à courant continu

I.1 Le moteur à courant continu est le moteur le plus utilisé pour réaliser d'entraînements réglés,

Bien que sa construction soit plus complexe que celle d'un moteur asynchrone. Ceci provient du fait que l'on peut faire varier la vitesse d'un moteur à C.C simplement au moyen d'une tension variable.

L'Electronique de puissance met à disposition des convertisseurs de courant, qui sont des sources de tensions variables par excellence.

On peut faire varier très rapidement la tension continue tout en disposant d'une puissance de commande très faible. Ces propriétés sont très favorables pour la réalisation de circuits de réglage de haute qualité.

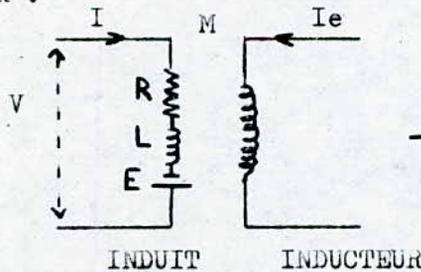
I.2 Equations du moteur :

Les deux grandeurs électrique fondamentales qui interviennent dans un moteur sont la tension d'alimentation et le courant.

Les deux grandeurs mécanique qui résultent de la conversion électromécanique sont le couple et la vitesse.

On considère un moteur à courant continu à excitation séparée ou indépendant c.a.d à flux constant ($I_e = \text{CSTE}$).

SCHEMA DU MOTEUR :



LES EQUATIONS SONT :

$$V - E = RI + L \frac{dI}{dt} \quad \text{EQUATION ELECTRIQUE}$$

$$\Gamma - \Gamma_r = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{EQUATION MECANIQUE}$$

$$\left. \begin{aligned} E &= k_1 \phi \Omega \\ \Gamma &= k_2 \phi I \end{aligned} \right\} \text{EQUATIONS DE CONVERSION} \\ \text{ELECTROMECANIQUE}$$

Si le Flux (ϕ) reste constant ou constate que ces équations sont linéaires, ce qui est bien le cas si

$I_e = \text{constante.}$

Les Equations deviennent :

$$V - E = RI + L \frac{dI}{dt}$$

$$\Gamma - \Gamma_r = J \frac{d\Omega}{dt}$$

$$E = K_E \Omega$$

$$\Gamma = K_m I$$

* En conclusion, dans la mesure où les paramètres $[R, L, J, K_E, K_m]$ restent constant dans tout les régimes de fonctionnement, le moteur a courant continu alimenté à flux constant $[I_e = \text{CSTE}]$ est un système linéaire, il peut donc être asservi en vitesse et en courant par des régulateurs linéaires et en se basant sur les théories d'asservissement linéaires.

a) Equations du moteur en régime statique.

En régime établi les Equations deviennent

$$V - E = RI$$

$$\Gamma - \Gamma_r = 0$$

$$E = K_E \Omega$$

$$\Gamma = K_m I$$

En éliminant I, E, Γ entre ces Equations, on obtient :

$$\Omega = \frac{V}{K_E} - \frac{R \Gamma_r}{K_E K_m} = \frac{V}{K_1 \phi} - \frac{R \Gamma_r}{k_1 k_2 \phi^2}$$

A partir de cette dernière Equation on remarque qu'on peut faire varier la vitesse soit en agissant sur la tension d'alimentation ou sur le flux d'induction mais ce dernier moyen présente essentiellement deux inconvénient ϕ :

1°- L'Inducteur est un enroulement très selfique ainsi les variations du courant inducteur sont lentes donc leurs réactions sur la vitesse seront également lentes.

A partir de laquelle on peut déduire les deux relations suivantes:

$$\omega(P) = \frac{V(P) - \frac{R(1+PTe)}{KE \cdot Km} \Gamma_r(P)}{1 + PTe + P^2 Te \cdot Tem} \dots\dots\dots(9)$$

$$I(P) = \frac{[V(P)Te + P] + \Gamma_r(P)}{1 + PTe + P^2 Te \cdot Tem} \dots\dots\dots(10)$$

Avec $Rem = \frac{RJ}{KE \cdot Km}$ c'est la constante électromécanique du moteur.

De ces deux équations on constate que la réponse de vitesse et du courant a une variation de tension ou de couple sont du 2° Ordre.

Pour l'ensemble des moteurs : $Te \ll Tem$

Dans ces conditions une approximation du dénominateur des Equations (9) et (10) est : $(1 + PTe) (1 + P^2 Rem)$.

d) Données numériques

Pour illustrer les études théoriques, on présentera des courbes et des résultats numériques qui se basent sur les données numériques suivantes :

$P_n = 20W$	$R = 740\Omega$
$KE = 0,25 \frac{V}{rd/S}$	$J = 1,7 \cdot 10^{-4} kgm^2$
$Km = 0,53 \frac{N.m}{A}$	$\omega_n = 1000 \frac{t}{min}$
$Te = 4,86 m.S$	$I_n = 9,37 A$
$Tem = 93,23 m.S$	$T_n = 2000g. cm$
$Kcm = 9,52$	$Kc = 0,06 \frac{V}{A}$
$Tcm = 1,67 mS$	$Kn = 0,01 \frac{V}{rd/S}$

E. Réponse du vitesse et du courant a un échelon de tension :

Si l'on suppose que le couple résistant Γ_r reste constant lors d'une variation de tension V, cela se traduit dans les Equations par $\Gamma_r(s) = 0$

Si on considère le dénominateur du 2° ordre les réponses auront l'allure voire figure N° : 1.2 , 1.3

F. Réponse du vitesse et du courant a un échelon de couple :

De même que précédemment si l'on suppose que la tension V reste constante lors d'une variation de couple, cela se traduit dans les Equations $V(s)=0$

Les réponses auront l'allure voire figure N°. 1.4 1.5

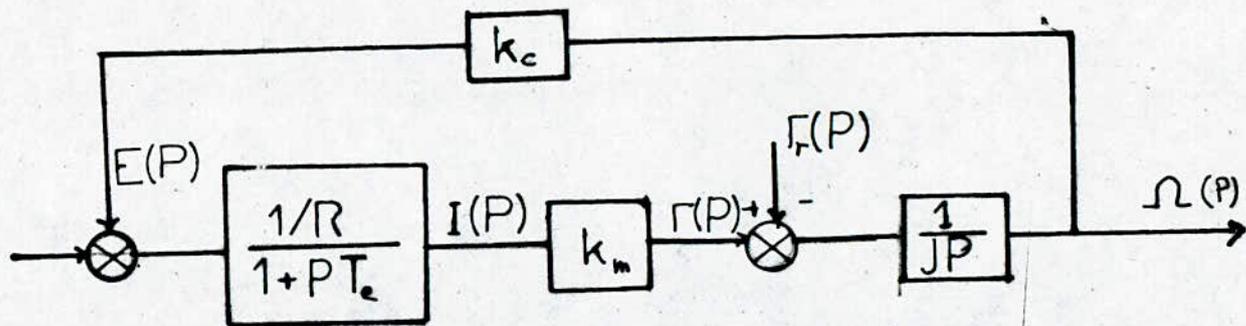


FIG N° 1

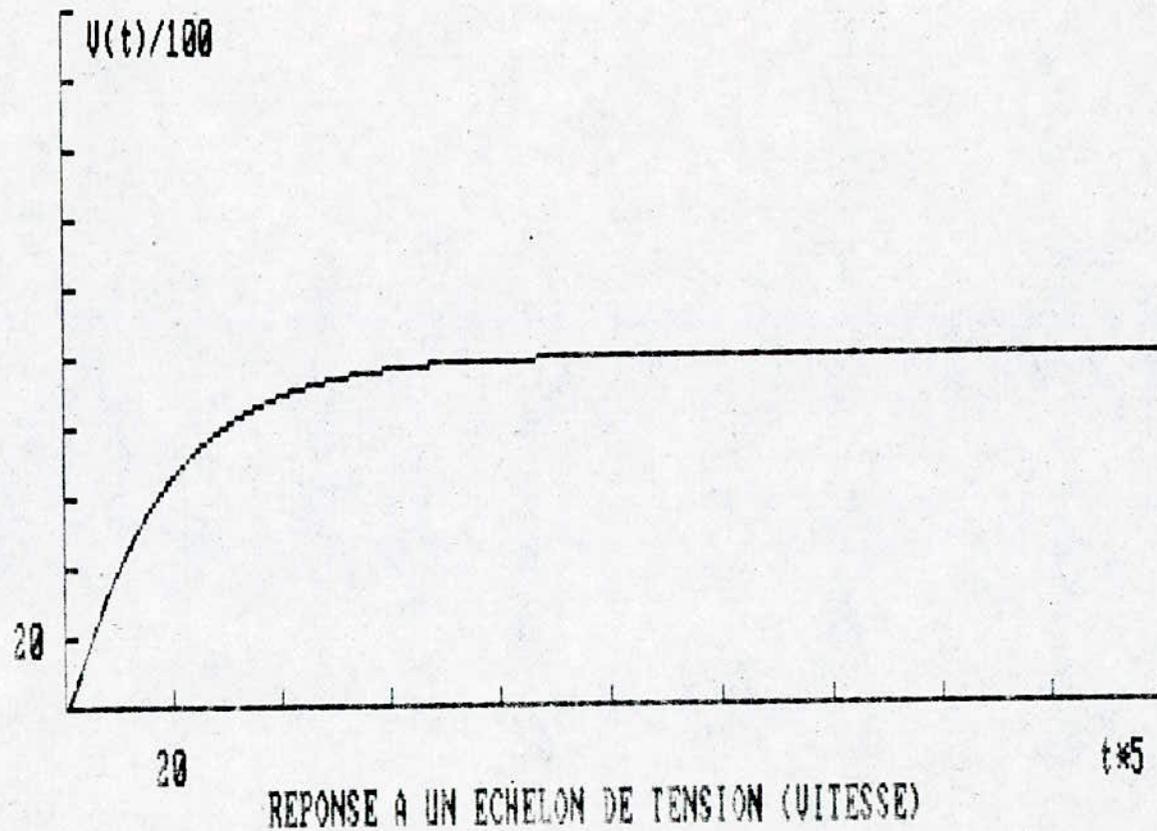


FIG 1-2

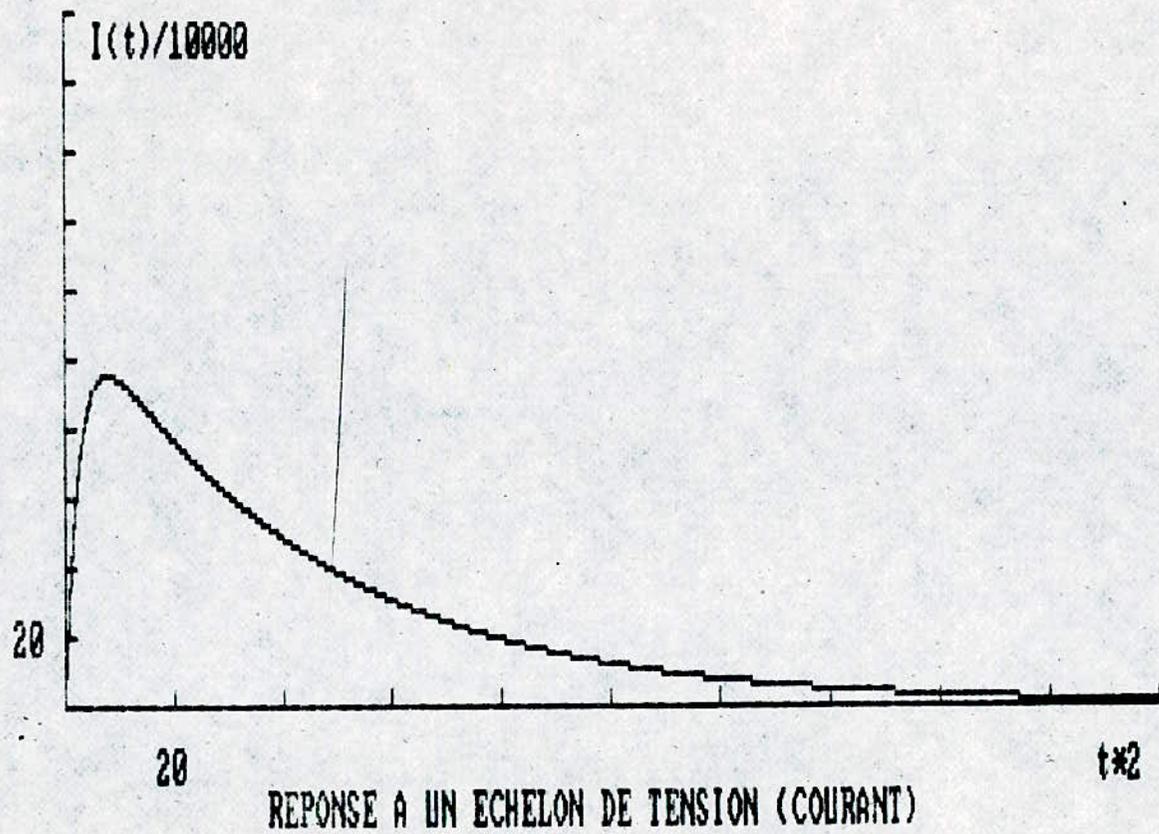
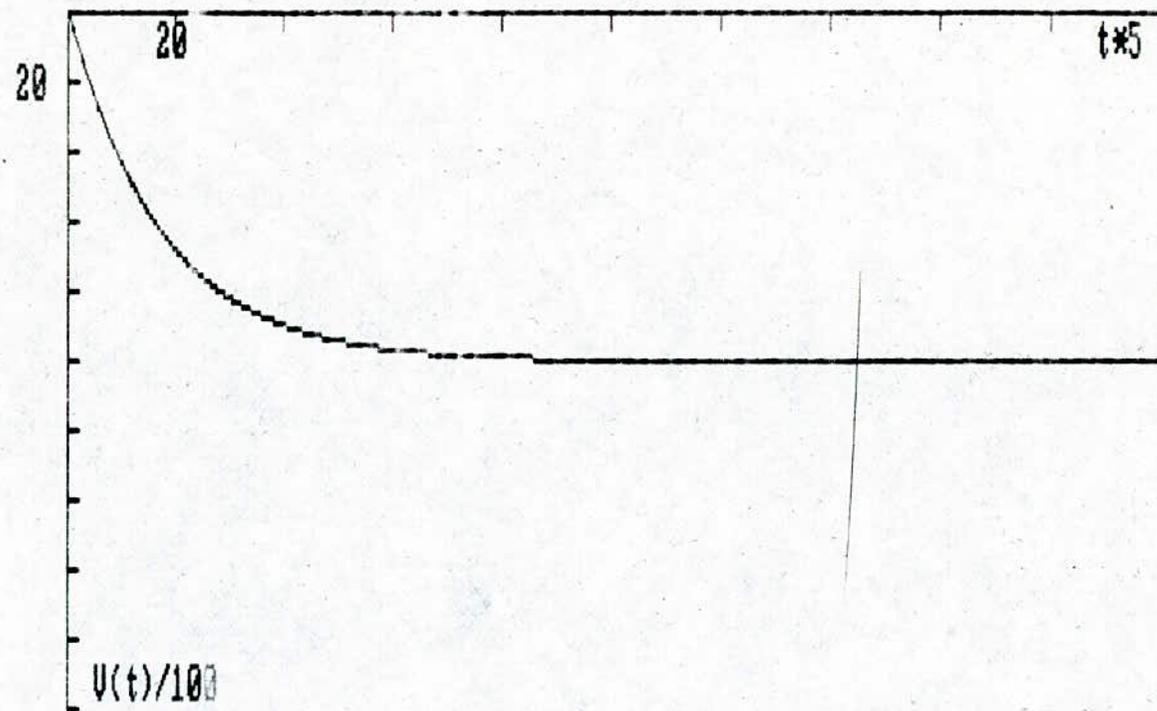
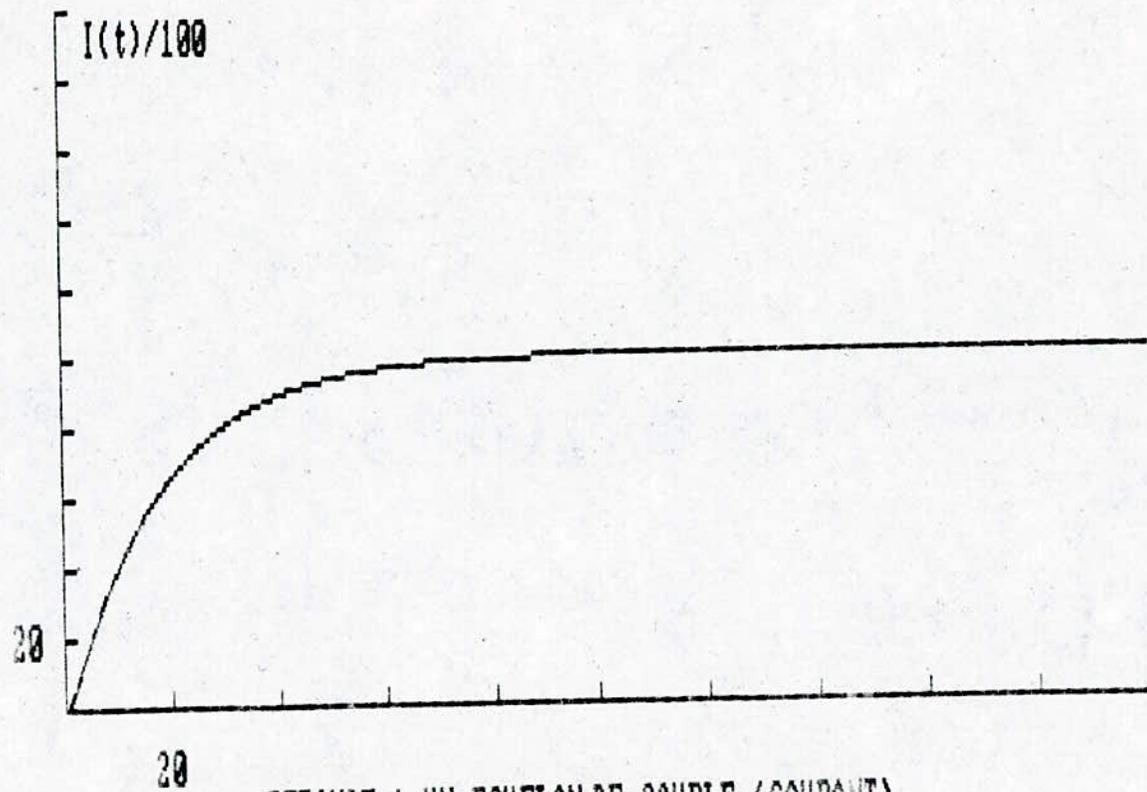


FIG 1-3



REPOSE UN ECHELON DE COUPLE (VITESSE)

FIG 1-4



REPONSE A UN ECHELON DE COUPLE (COURANT)

FIG 1-5

01

Régulations de vitesse sans contrainte du courant dans un premier temps, nous allons supposer que le courant dans le moteur peut prendre d'importe quelle valeur.

Nous allons considérer le moteur comme étant un système où l'on injecte une tension et qui fournit une vitesse, ce système étant perturbé par un couple résistant T_r .

La vitesse est mesurée par un système quelconque que l'on supposera sans constante de temps.

Ce capteur de vitesse convertit la vitesse en une tension (Ex. DYNAMO TACHYMÉTRIQUE) et on appellera K_n le coefficient de conversion.

$$V = K_n \Omega \text{ et de même } V \Omega (P) = K_n \Omega (P)$$

2.1 Régularisation de vitesse proportionnel.

Le schéma d'une régularisation proportionnel sera voir figure N° (2.1)

En posant $G = K_{cm}$

Avec α le Gain proportionnel
G le Gain Convertisseur

2.1.1 Etude de la stabilité du système.

Pour faire cette étude on calcule la fonction de transfert en boucle ouverte, pour tracer la réponse harmonique et voir le comportement du système selon la valeur de α .

$$F.T.B.O. = \frac{\alpha G K_n}{K_E} \cdot \frac{1}{1 + T_{em} P + T_e P^2}$$

On voit que le Gain en B.O. est proportionnel à α , dont elle peut rendre le système instable, car l'augmentation de α entraîne une diminution de la marge de phase ϕ comme le montre la figure N° (2.2)

2.1.2 Réponse indicielle.

Dans un premier lieu nous calculons la fonction de transfert en B.F.

$$F.T.B.F. = \frac{1}{K_n} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K_E}{\alpha G K_n} + \frac{K_E T_{em}}{\alpha G K_n} P + \frac{T_e T_{em} K_E P^2}{\alpha G K_n}}$$

Soit $T_{em} = \frac{K_E T_{em}}{\alpha G K_n}$

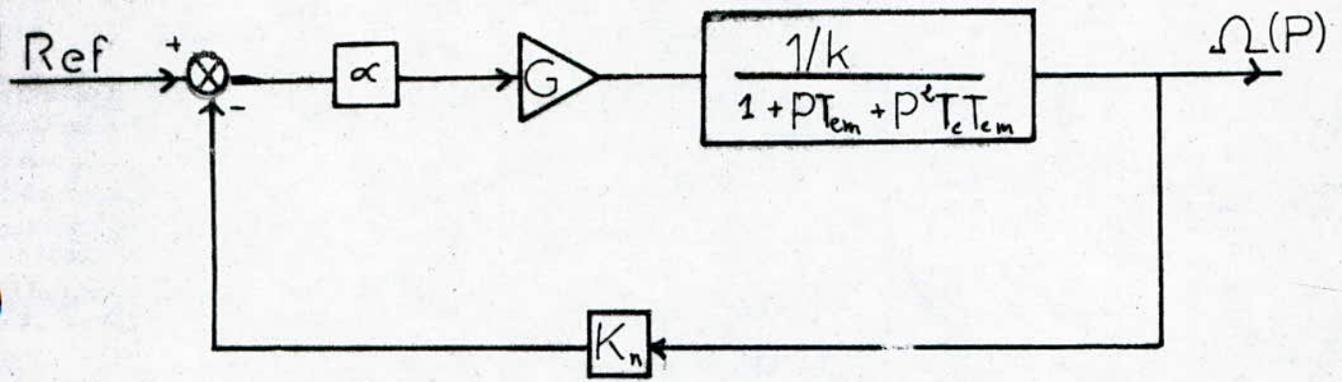


FIG N°2.1 (1)

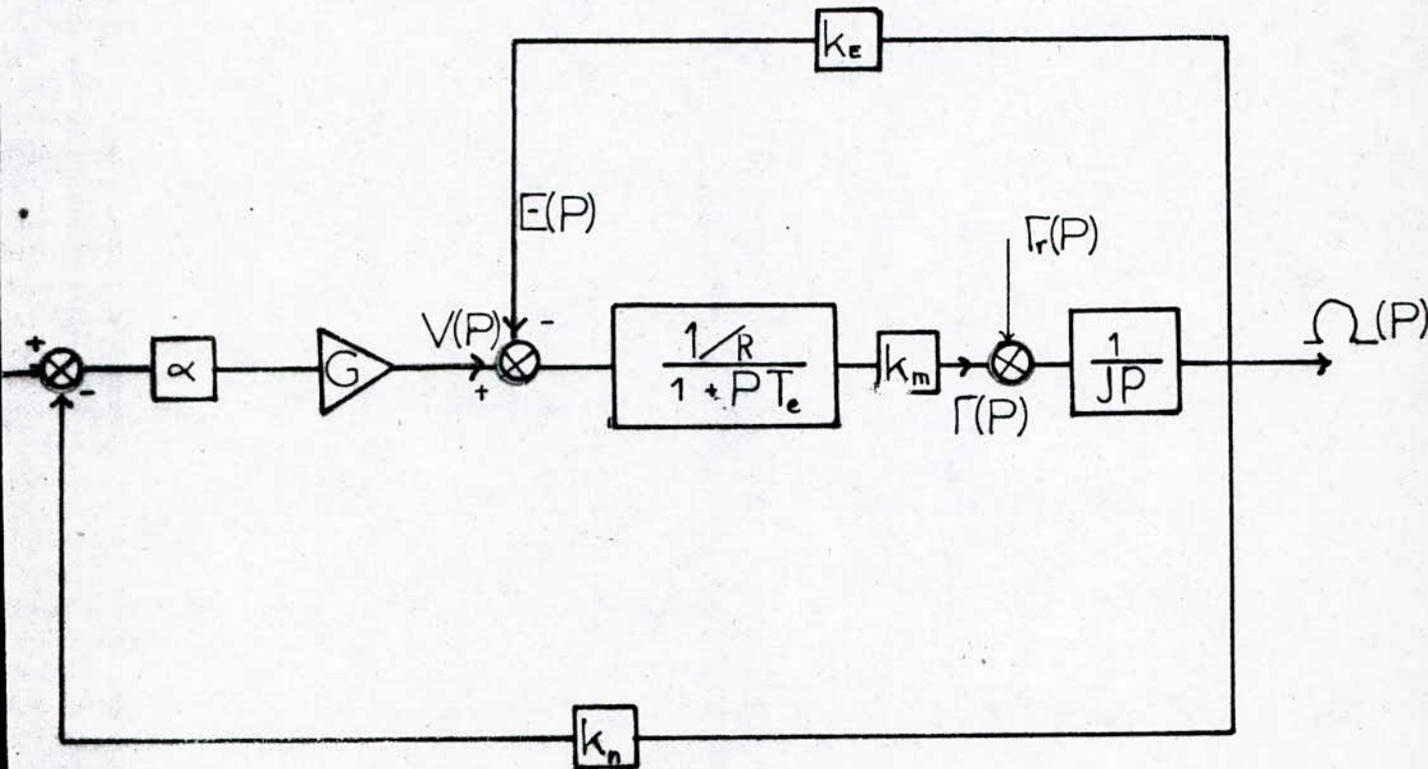
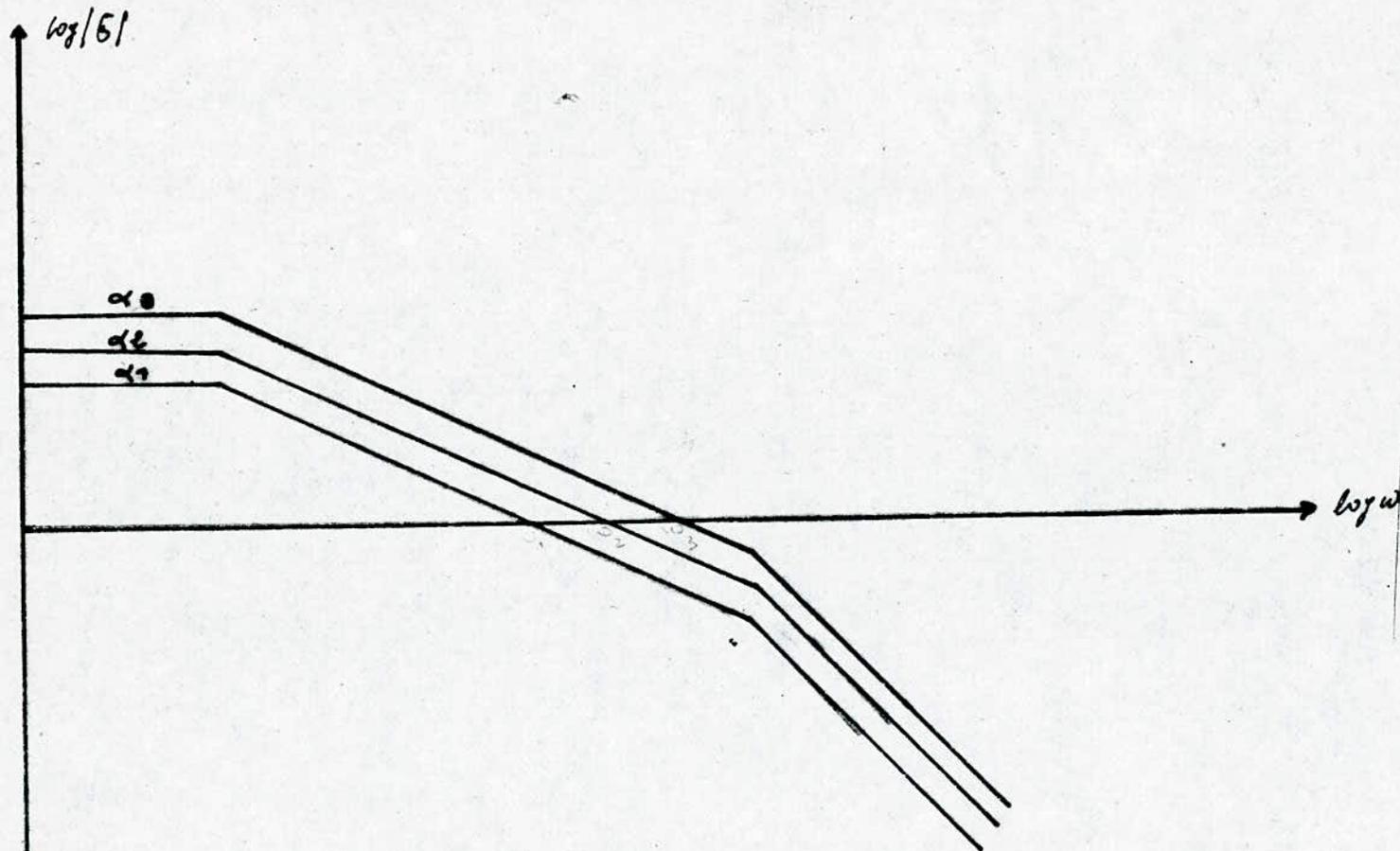
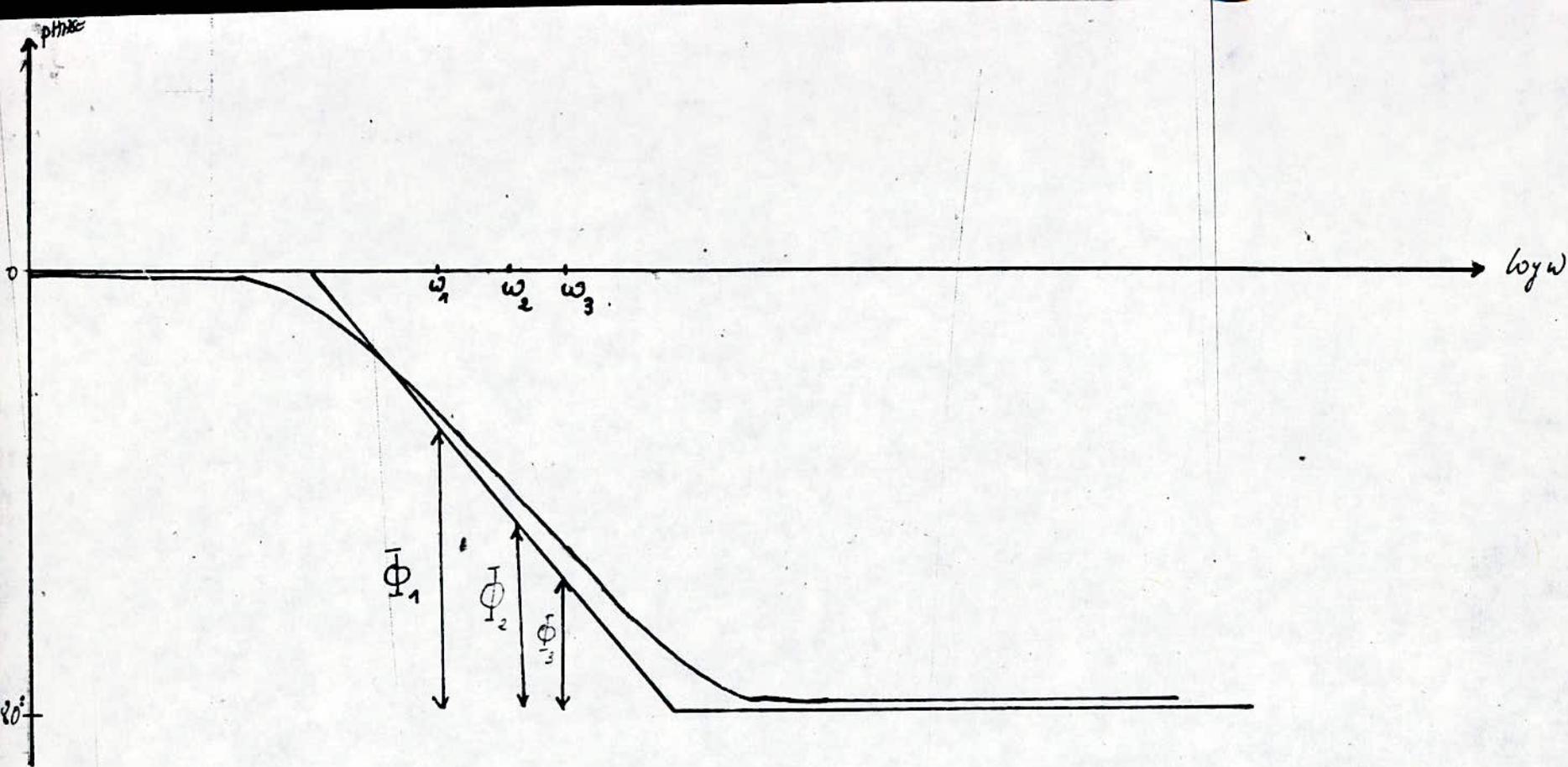


FIG N°2.3 (3)



Gain vitesse proportionnel FIG N° 2.2.2)



Phase de la vitesse proportionnel FIG N°2.2

Nous pouvons remarquer que :

1 - Le système est un système du 2° Ordre

2 - Si α est très grand ($1 \gg \frac{KE}{\alpha GKn}$)

La fonction de transfert devient.

$$\frac{\Omega(P)}{REF(P)} = \frac{1}{1 + P T'em + P^2 T'em \cdot Te} \quad 2.2$$

3 - La nouvelle constante du temps électromécanique

$$T'em = \frac{Tem KE}{\alpha GKn}$$

Est inversement proportionnelle au gain α , plus α est grand plus la réponse du moteur sera rapide.

$$\text{Soit } \omega_n = \frac{1}{\sqrt{\frac{KE Te Tem}{\alpha GKn}}} = \sqrt{\frac{\alpha GKn}{Te Tem KE}}$$

$$Z = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Tem KE}{\alpha GKn Te}}$$

Donc la fonction (2.2) devient

$$\frac{\Omega(P)}{REF(P)} = \frac{1}{1 + \frac{2Z}{\omega_n} \times P + \frac{P^2}{\omega_n^2}} \quad \text{VOIR FIG 2.4.1}$$

2.2 Influence d'une variation de couple sur la vitesse

D'après la figure n° (2.3)

$$(1) V(P) = [REF(P) - Kn \Omega(P)] \alpha G$$

$$(2) \Gamma(P) = [V(P) - KE \Omega(P)] \frac{Kn}{P} \frac{1}{1+PTe}$$

$$(3) \Omega(P) = [\Gamma(P) - \bar{r}(P)] \times \frac{1}{JP}$$

Nous supposons que $REF(P) = 0$ (pas de variation de référence)

$$(1) \text{ et } (2) = \Gamma(P) = [-Kn \Omega(P) \alpha G - KE \Omega(P)] \frac{\frac{Km}{R}}{1 + PTe}$$

$$(4) \Gamma(P) = -\frac{Km}{R} [KE + Kn \alpha G] \frac{\Omega(P)}{1 + PTe}$$

$$(3) \text{ et } (4) = JP \Omega(P) = \frac{KEKm + KmKn\alpha G}{R(1 + PTe)} \Omega(P) - \sqrt{r}(P)$$

$$O.N.A : \Omega(P) \times \left[JP + \frac{KEKm + KmKn\alpha G}{R(1 + PTe)} \right] = -\sqrt{r}(P)$$

D'où :

$$\Omega(P) = - \frac{R}{\frac{Km.Kn\alpha G}{1 + KE + PTe} + PTe} \frac{\sqrt{r}(P) [1 + PTe]}{GXKn}$$

Nous pouvons remarquer :

- 1 - Qu'il existe une variation de vitesse lors d'une variation de couple
- 2 - Que la vitesse ne revient pas à sa valeur initiale car pour un échelon de couple d'amplitude \sqrt{r} :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Omega(t) = \lim_{P \rightarrow 0} P \Omega(P) = - \frac{H \sqrt{r}}{KmKn\alpha G + KE Km}$$

- 3 - L'Amplitude de la variation de vitesse lors d'une variation de couple résistant est inversement proportionnelle au gain α .

La réponse du vitesse a un échelon unitaire de couple est donnée par la figure N° (2.4)

2.3 Influence d'une variation de référence et d'une variation de couple sur le courant.

C'est dans le but d'avoir le comportement du courant lors d'une régulation proportionnel que nous faisons cette étude,

D'après le Schema N° (2.3)

$$V(P) = [R_{REF}(P) - Kn \Omega(P)] \alpha \dots \dots \dots (1)$$

$$\Omega(P) = [K_m I(P) - \sqrt{r}(P)] \frac{1}{JP} \dots \dots \dots (2)$$

$$E(P) = KE \Omega(P) \dots \dots \dots (3)$$

$$I(P) = [V(P) - E(P)] \frac{1}{R} \frac{1}{1 + PTe} \dots \dots \dots (4)$$

De l'Equations (1) et (2) on tire

$$V(P) = \left[R_{REF}(P) - \frac{Kn Km}{JP} I(P) + \frac{Kn \sqrt{r}(P)}{JP} \right] \alpha \dots \dots \dots (5)$$

Si α est très grand on a $\frac{KE}{\alpha X Kn} \ll 1$

L'Expression du courant devient

$$I(P) = \frac{\frac{J_P}{K_n K_m} \text{REF}(P) + \left[\frac{1}{K_n G \alpha} + \frac{1}{K_E} \right] \sqrt{r}(P)}{1 + P T'_{em} + P^2 T_e T'_{em}}$$

Avec $T'_{em} = \frac{K_E T_{em}}{G K_n \alpha}$

Le facteur d'amortissement est :

$$Z = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T'_{em}}{T_e}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_E T_{em}}{\alpha K_n G T_e}}$$

On constate que le coefficient Z est inversement proportionnel à α ce qui revient à dire plus α est grand, le système est moins amorti.

On se qui concerne les réponses a des échelons unitaire de référence et de couple voir figure N° (2.5)

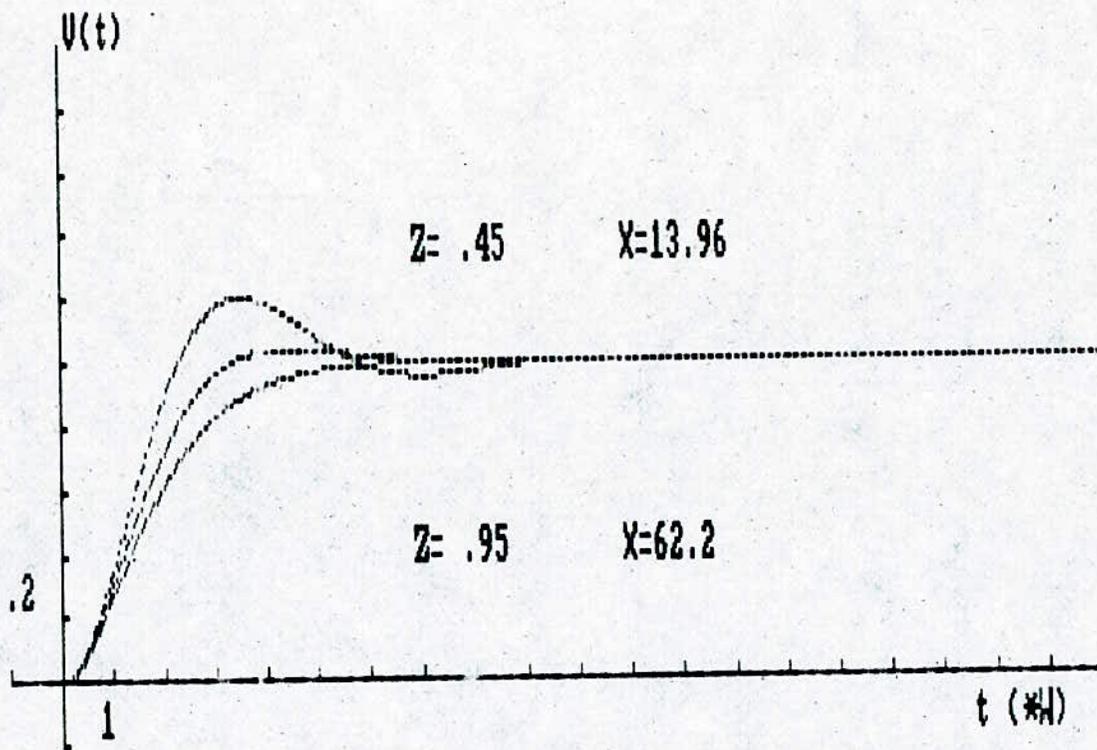
2.3.1 Remarques : La valeur du courant IM est important tant que.

- 1° - J est grand
- 2° - K (ou le flux) est faible
- 3° - Z est faible ce qui revient à dire α est grand.

2.3.2 Conclusion sur l'action proportionnelle :

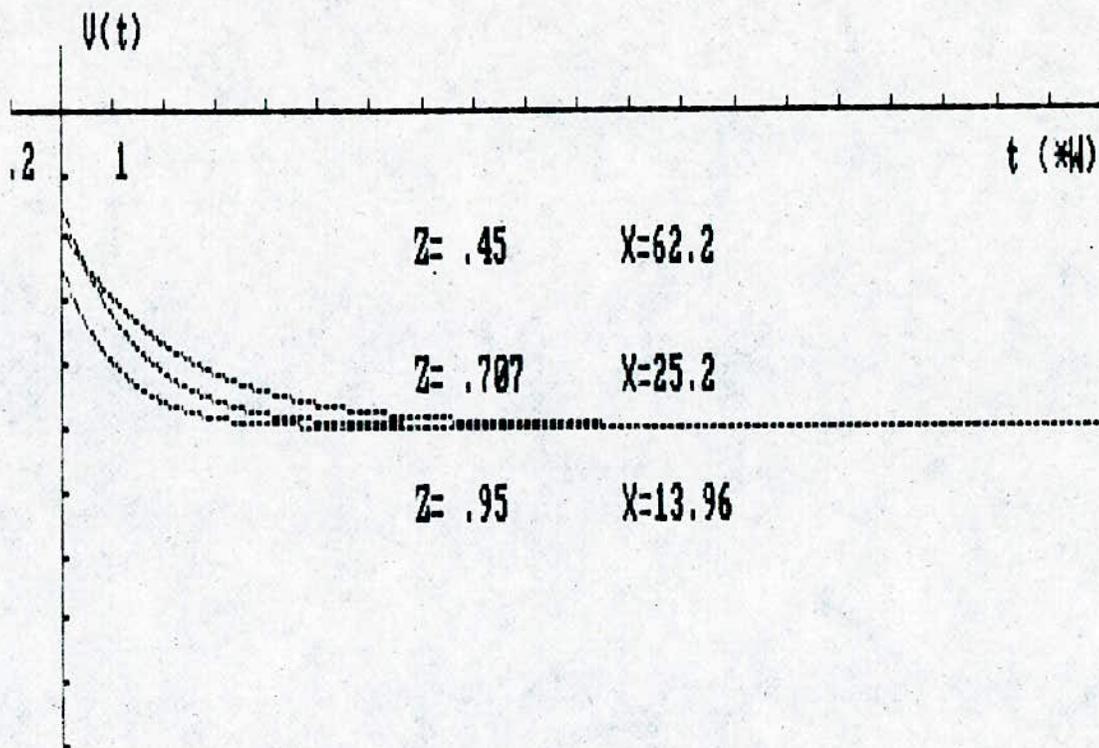
- 1 - Son intérêt est de rendre les réponses du moteur plus rapide cependant le système risque d'être instable.
- 2 - La vitesse varie lors d'une variation de couple.
- 3 - Le courant pendant les transitoires peut être très important, cependant pour éviter ces inconvénients et améliorer les réponses du moteur il faut disposer d'un autre type de régulateur dont la fonction de transfert est F(P), où F(P) est à déterminer.

Le Schema d'une telle régulation est le suivant : Voir figure (2.6)



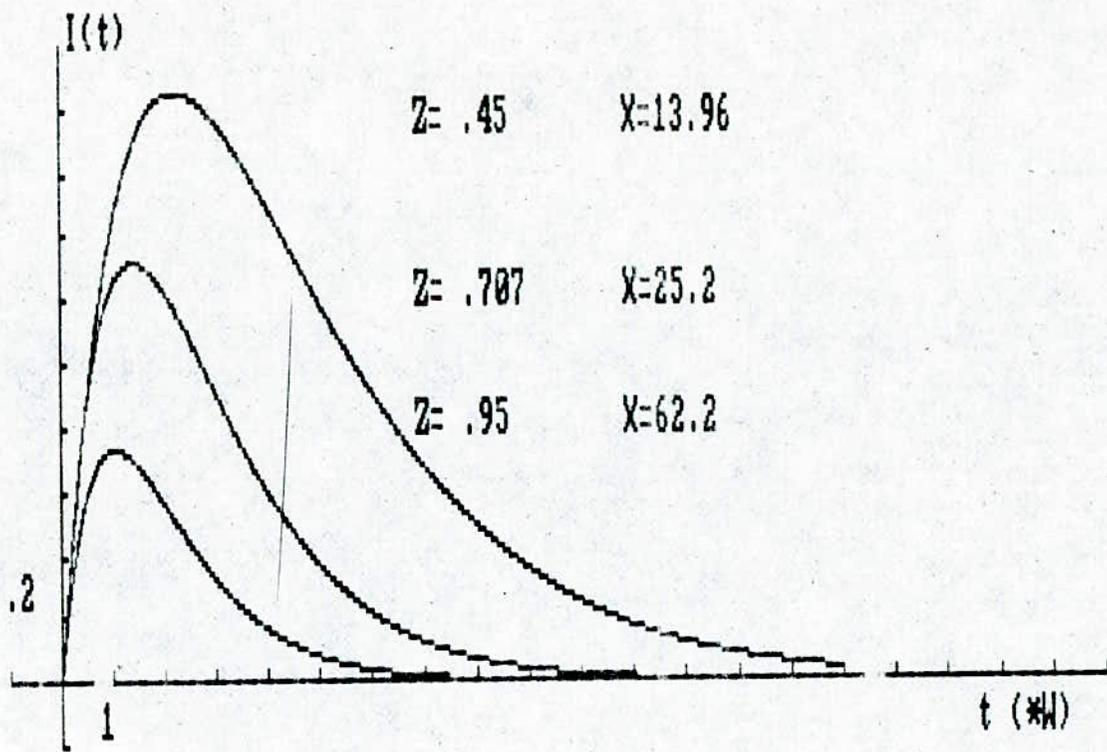
REPON E DE VITESSE A UN ECHELON DE REFERENCE

FIG. 241 1



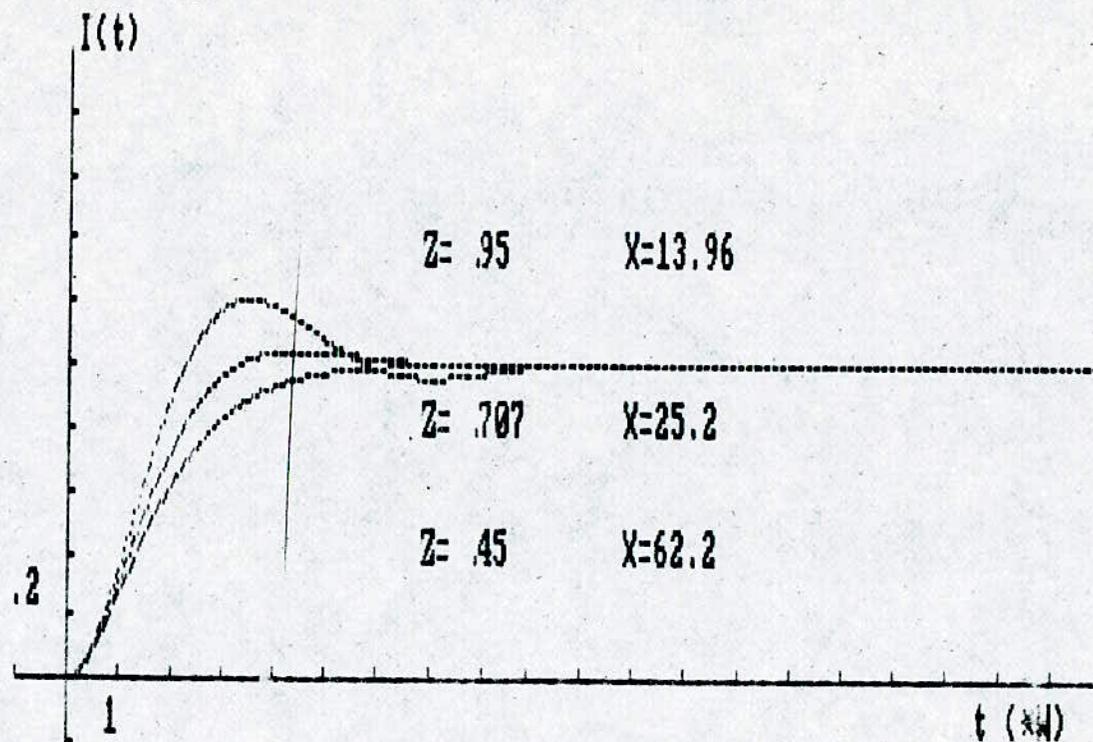
REPONSE DE VITESSE A UN ECHELON DE COUPLE

FIG 24



REPONSE DE COURANT A UN ECHELON DE REFERENCE

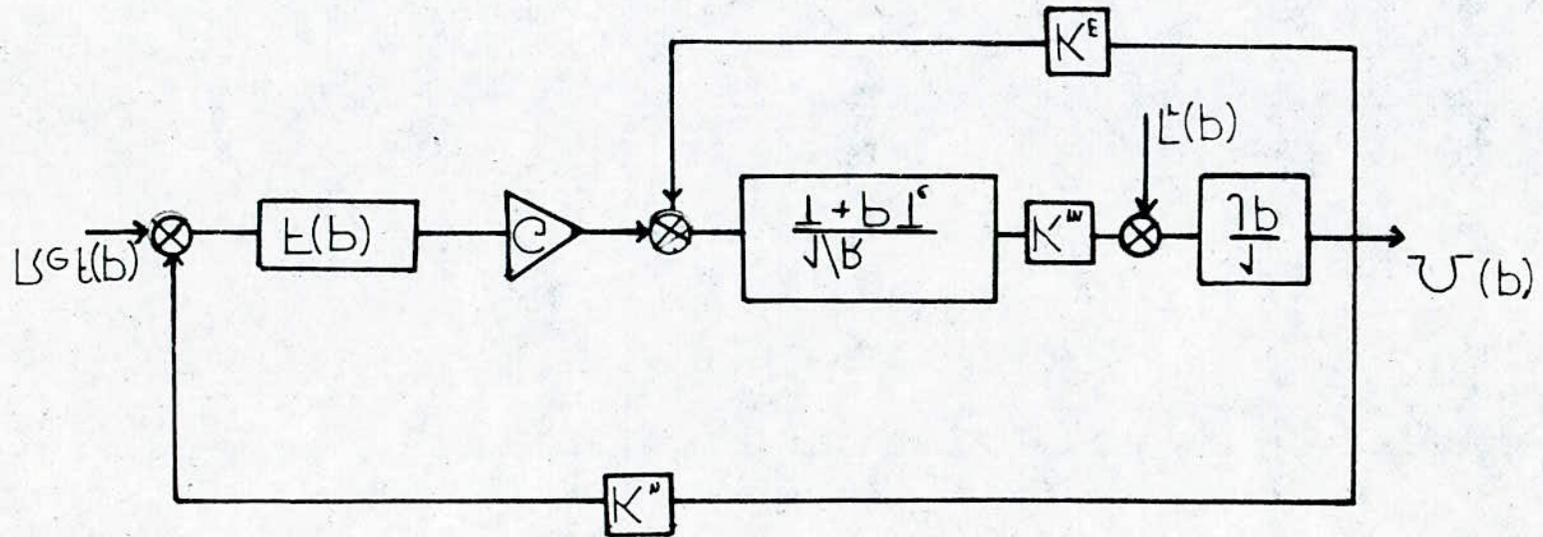
FIG 25



REPONSE DE COURANT A UN ECHELON DE COUPLE

FIG 25

Fig. 5.9



D'où l'expression de vitesse :

$$\Omega(P) = \frac{\frac{REF(P)}{Kn}}{1 + \frac{KE}{KnG} \times \frac{1 + P T_{em} + P^2 T_e \cdot T_{em}}{F(P)}} - \frac{\frac{r(P) R(1 + P T_e)}{K_m \cdot KE}}{1 + P T_{em} + P^2 T_e \cdot T_{em} + \frac{Kn G F(P)}{KE}}$$

On sait que le polynôme $(1 + P T_{em} + P^2 T_e \cdot T_{em})$ possède deux constantes de temps ($T'e$, $T'em$) dont $T'em$ est dominant cependant un choix judicieux conduit à prendre un régulateur P.I., dont la fonction de transfert est de la forme :

$$F(P) = \frac{1 + T_1 P}{T_P} = \frac{1}{T_P} + \frac{T_1}{T}$$

Avec : $\frac{1}{T_P}$: Intégrale

$\frac{T_1}{T}$: Proportionnelle

De plus pour compenser $T'em$ choisissant :

$$F(P) = \frac{1}{T_P} (1 + T'em)$$

L'expression de vitesse devient :

$$\Omega(P) = \frac{\frac{REF(P)}{Kn}}{\frac{1 + K E T_P (1 + P T'e)}{Kn G}} - \frac{\frac{r(P) R (1 + P T_e)}{K E K_m}}{\frac{1 + P T_{em} + P^2 T_e \cdot T_{em} + \frac{Kn G (1 + T'e P)}{K E T_P}}$$

Posons $\tau = \frac{K E T_P}{Kn G}$

Enfin l'expression finale de $\Omega(P)$ est :

$$\Omega(P) = \frac{\frac{REF(P)}{Kn}}{1 + \tau P + \tau T'e P^2} - \frac{\frac{K Z \cdot P (1 + P T_e) r(P)}{K_2}}{1 + P(\tau + T'em) + P^2 \tau T_{em} + P^3 \tau T_e \cdot T_{em}}$$

Nous remarquons maintenant que la réponse du vitesse à une variation du couple est du 3° ordre mais elle reprend sa valeur initiale au bout d'un certain temps tandis que la réponse à une variation de référence est du 2° ordre ce qui conduit à choisir τ de telle manière que la réponse se fasse sans oscillation et avec un faible dépassement de l'ordre de 5%.

D'après le critère d'amortissement nous choisissons ($\tau = 2 T'e$)

Le choix doit subir essentiellement à deux conditions.

1 - rapidité de réponse à une échelon de REF

2 - Le dépassement doit être faible.

2.3.3 Stabilité du système.

Pour justifier notre choix on trace la réponse harmonique du système en boucle ouverte.

$$F.T.B.O. = F(P) \times G \times \frac{1}{(1 + P T'e)(1 + P T'em)} Kn$$

$$F.T.B.O. = \frac{1}{\tau P (1 + P T'e)}$$

D'après la fig n° (2.) on constate que le système est toujours stable.

D'où l'expression de vitesse :

$$\Omega(P) = \frac{\frac{REF(P)}{Kn}}{1 + \frac{KE}{KnG} \times \frac{1 + P T_{em} + P^2 T_e \cdot T_{em}}{F(P)}} - \frac{\sqrt{r(P)} R(1 + P T_e)}{\frac{Km \cdot KE}{1 + P T_{em} + P^2 T_e \cdot T_{em} + KnG \frac{F(P)}{KE}}}$$

On sait que le polynôme $(1 + P T_{em} + P^2 T_e \cdot T_{em})$ possède deux constantes de temps ($T'e, T'em$) dont $T'em$ est dominant cependant un choix judicieux conduit à prendre un régulateur P.I, dont la fonction de transfert est de la forme :

$$F(P) = \frac{1 + T_1 P}{T_P} = \frac{1}{T_P} + \frac{T_1}{T}$$

Avec : $\frac{1}{T_P}$: Intégrale

$\frac{T_1}{T}$: Proportionnelle

De plus pour compenser $T'em$ choisissant :

$$F(P) = \frac{1}{T_P} (1 + T'em)$$

L'expression de vitesse devient :

$$\Omega(P) = \frac{\frac{REF(P)}{Kn}}{\frac{1 + KETP(1 + P T'e)}{KnG}} - \frac{\frac{\sqrt{r(P)} R(1 + P T_e)}{KE Km}}{\frac{1 + P T_{em} + P^2 T_e \cdot T_{em} + KnG(1 + T'eP)}{KETP}}$$

Posons $\tau = \frac{KET}{KnG}$

Enfin l'expression finale de $\Omega(P)$ est :

$$\Omega(P) = \frac{\frac{REF(P)}{Kn}}{1 + \tau P + \tau T'e P^2} - \frac{\frac{RZ.P(1 + P T_e) \sqrt{r(P)}}{K2}}{1 + P(\tau + T'em) + P^2 \tau T_{em} + P^3 \tau T_e \cdot T_{em}}$$

Nous remarquons maintenant que la réponse du vitesse a une variation du couple est du 3° ordre mais elle reprend sa valeur initiale au bout d'un certain temps tandis que la réponse a une variation de référence est du 2° ordre ce qui conduit à choisir τ de telle manière que la réponse se fasse sans oscillation et avec un faible dépassement de l'ordre de 5%.

D'après le critère d'amortissement nous choisissons ($\tau = 2 T'e$)

Le choix doit subir essentiellement à deux conditions.

1 - rapidité de réponse à un échelon de REF

2 - Le dépassement doit être faible.

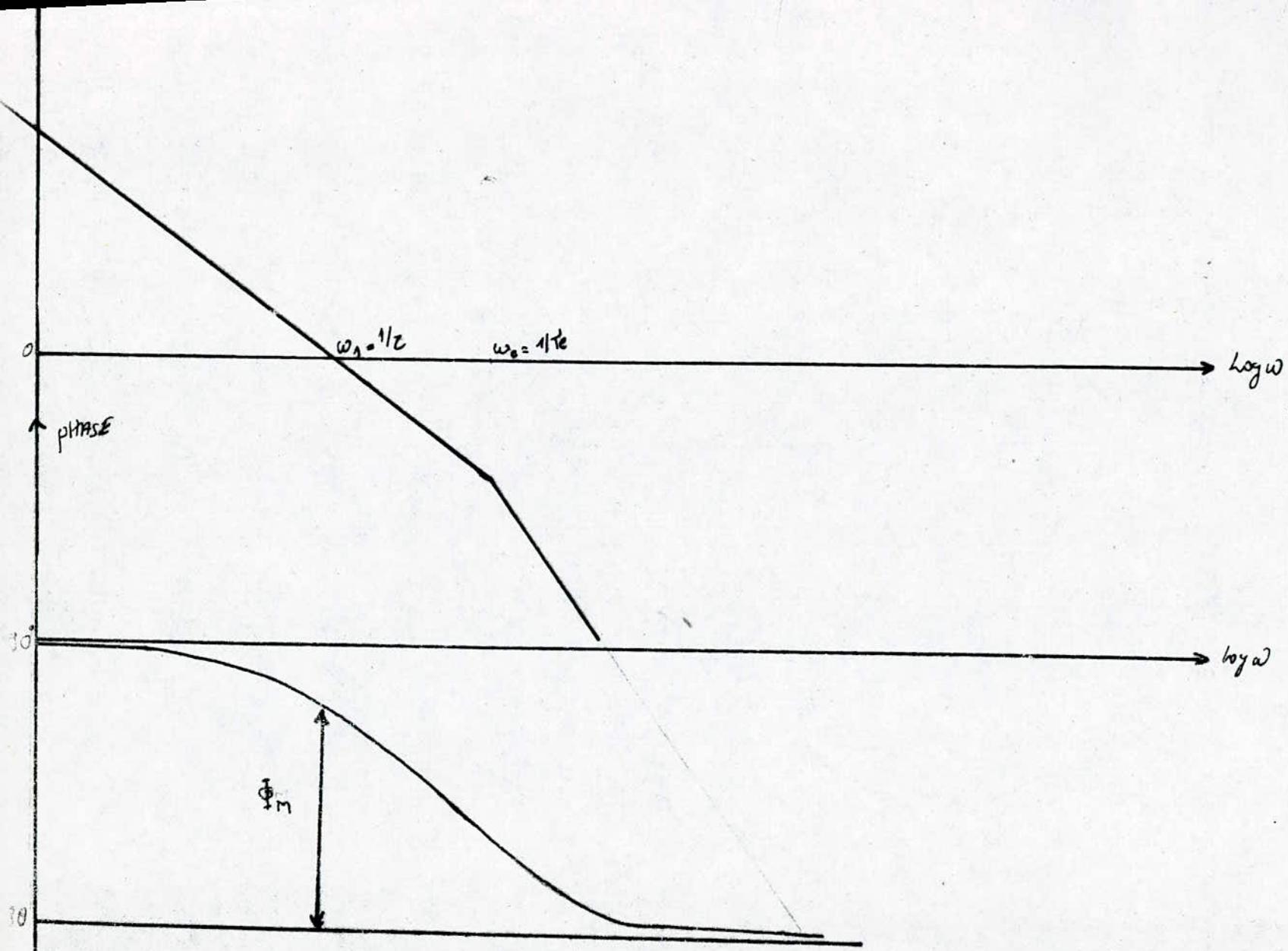
2.3.3 Stabilité du système.

Pour justifier notre choix on trace la réponse harmonique du système en boucle ouverte.

$$F.T.B.O. = F(P) \times G \times \frac{1}{(1 + P T'e)(1 + P T'em)} Kn$$

$$F.T.B.O = \frac{1}{\tau P(1 + P T'e)}$$

D'après la fig n° (2.) on constate que le système est toujours stable.



Reponse harmonique de la boucle de vitesse FIG N° 27⁷⁾

REPONSE DE VITESSE A UN ECHELON DE REFERENCE

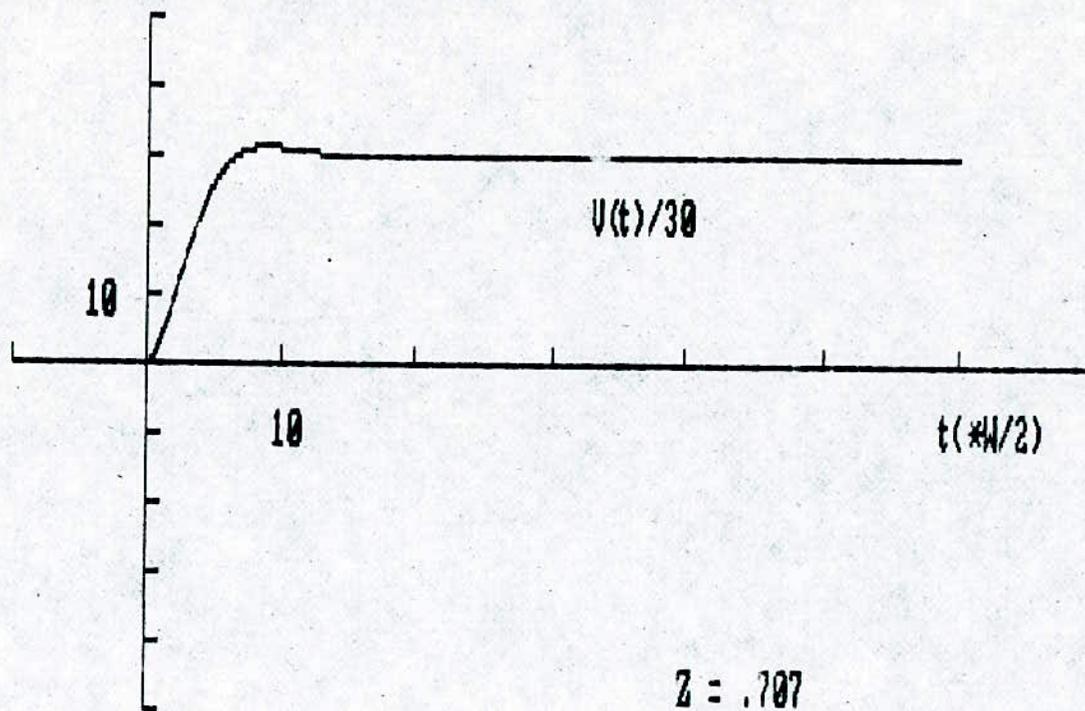


FIG 2.6.1

REGULATION EN CASCADE

3.1 Position du Problème.

Nous avons vu dans la partie précédente que si nous maintiendrons l'excitation constante. Il suffit d'agir sur la tension d'induit par l'intermédiaire d'un convertisseur à thyristor pour réguler la vitesse du moteur à courant continu. Mais nous voyons que le courant peut prendre des valeurs prohibitives, notamment lors des démarrages, ce qu'est inacceptable, car les thyristors et le moteur possède des courants maximum admissible qu'il ne faut pas les dépasser. En plus il faut limiter la vitesse d'évolution du courant.

3.2 Schema bloc de régulation. Voir figure³(3.1)

Avec REGV : Rélateur de vitesse
REGI : " " courant
CONVERT : Convertisseur de courant

Les capteurs sont supposés sans constante de temps

Enfin le schema de la figure N°(3.1) peut se mettre sous la forme suivante :(3.2)

3.3 Boucle de courant.

3.3.1 Réponse dynamique d'un pont de thyristor.

Pour traiter la régulation du courant il faut en premier lieu étudier le comportement du convertisseur de courant en régime transitoire. Car dans tout ce qui précède nous avons supposé que le convertisseur forme un amplificateur de puissance parfait de gain "G". Ceci est valable seulement si les constantes de temps qui interviennent dans le montage sont supérieures ou égales à 10ms ce qui est bien le cas dans l'étude précédente où nous avons traité la vitesse sans tenir compte du courant par contre pour cette étude on est obligé de prendre en considération la réponse transitoire du convertisseur dont les constantes des temps sont très petites.

On peut tenir compte de ce comportement de manière approximative en considérant T_{cm} comme un temps mort (Le retard mis par le convertisseur afin de fournir la tension à sa sortie).

La fonction de transfert de l'ensemble convertisseur plus le dispositif de commande de gâchette pour des petites variations est :

$$G_{cm}(P) = \frac{K_{cm}}{1 + P T_{cm}}$$

Avec $T_{cm} = \frac{1}{2PF}$ où P : indice de pulsation
f : fréquence du réseau.

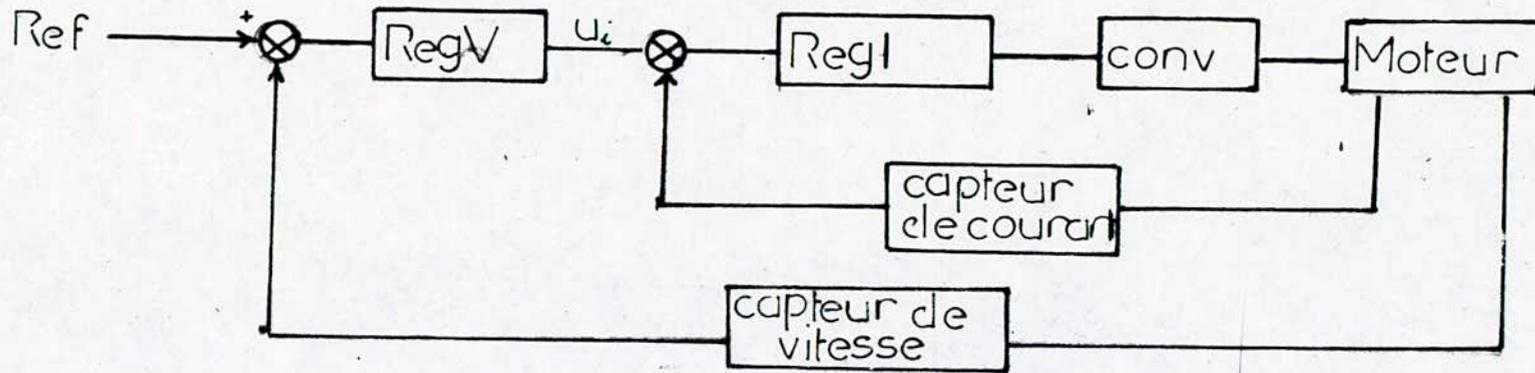


FIG N° 3.13.1)

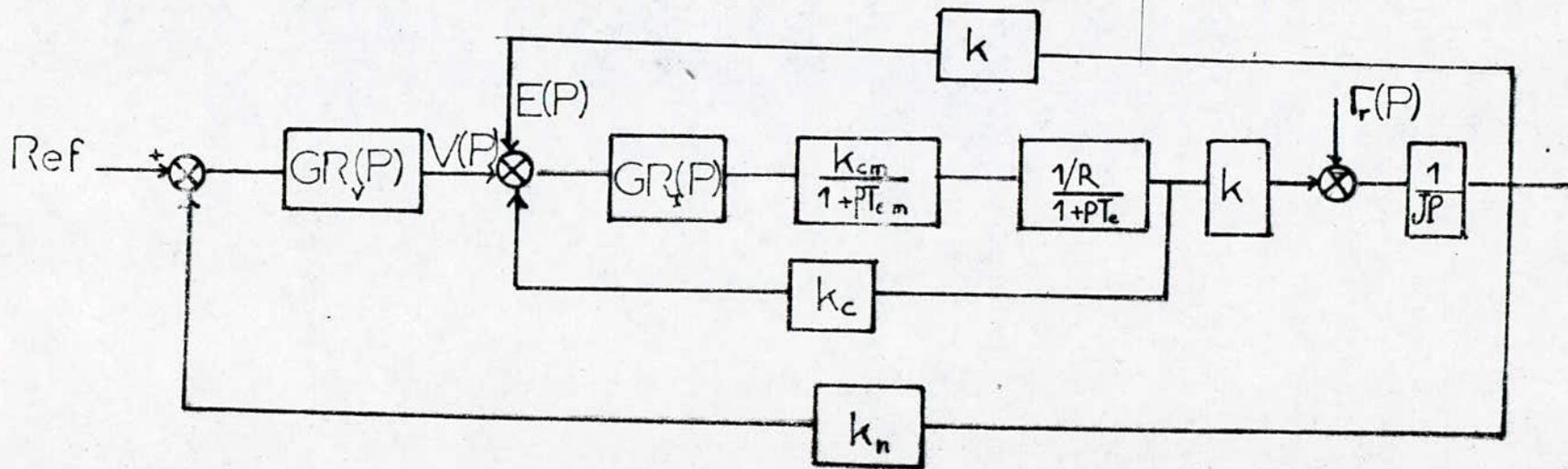


FIG N° 3.2.2)

5.4 Détermination du régulateur de courant :

Lors de l'étude du moteur à courant continu

Nous avons obtenu pour le courant l'expression suivante :

$$I(P) = \frac{V(P) \frac{T_{em} P}{R} + \frac{r(P)}{K_m}}{1 + P T_{em} + P^2 T_e \cdot T_{em}}$$

Et si nous étudions la réponse temporelle du courant à une variation de tension V nous pouvons vérifier que le courant maximum est atteint au bout d'un temps de l'ordre de T_e . Par contre la force contre électrotrice évolue comme la vitesse avec la constante de temps T_{em} , comme $T_{em} \ll T_e$, donc le courant s'établit dans le moteur alors que la force contre électromotrice n'a pratiquement pas varié.

Si le régulateur possède une composante proportionnelle la réponse du courant sera plus rapide ce qui nous conduit à considérer que E est restée constant ce que se traduit par $E(P) = 0$ et que n'intervient que comme une perturbation d'où la simplification de la boucle de courant dans ces conditions, la régulation se présente ainsi par la figure N°(3.3)

$F(P)$: Etant la fonction de transfert du régulateur

K_c : " " " " " " capteur

De courant que l'on suppose parfait.

La fonction de transfert en boucle fermée est

$$F.T.B.F = \frac{I(P)}{REF(I(P))} = \frac{\frac{1}{K_c}}{1 + \frac{R}{G_{cm}(P)} \cdot \frac{1 + P T_e}{F(P)}}$$

Pour que la réponse en courant soit le plus rapide possible et rendre l'erreur permanente due à la perturbation de E est nulle donc à la vitesse.

Nous choisissons un régulateur du type PI dont la fonction de transfert est de la forme.

$$F(P) = \frac{1 + T_{in} P}{T_{ii} P}$$

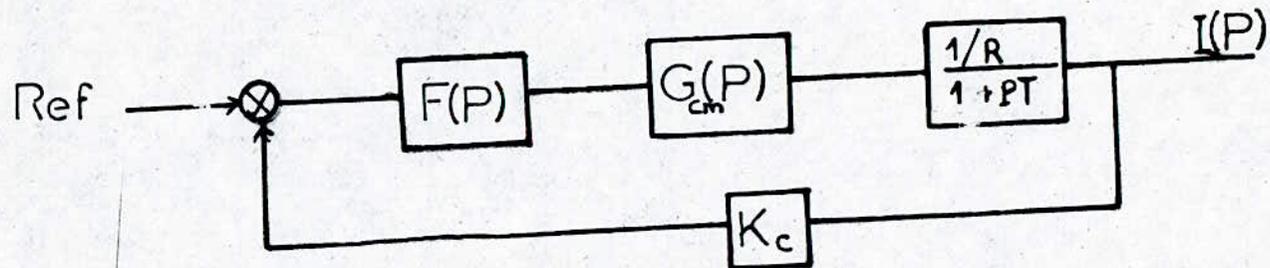
Prenons $T_{in} = T_e$ pour compenser la constante du temps électrique.

La fonction de transfert en B.F devient.

$$F.T.B.F = \frac{\frac{1}{K_c}}{1 + \frac{R T_{ii}}{K_c K_{cm}} (1 + P T_{em}) P}$$

$$F.T.B.F = \frac{\frac{1}{K_c}}{1 + T_i P + T_i T_{em} P^2}$$

Avec $T_i = \frac{R T_{ii}}{K_c K_{cm}}$



FIGN°3.3 (3)

Avec un choix judicieux de T_i on peut rendre la réponse au courant plus rapide avec une amortissement suffisante.

3.5 Détermination du régulateur en fonction de la stabilité.

La fonction de transfert en boucle ouverte est

$$F_{TBO} = \frac{K_{cm} K_c}{T_i P R (1 + P T_{cm})} = \frac{1}{T P (1 + T_{cm} P)}$$

D'après le critère d'amortissement T doit être choisie tel que :

$$\frac{T}{T_{cm}} = 2 \quad T = 2 T_{cm}$$

Donc $\frac{R T_i}{K_c K_{cm}} = 2 T_{cm} \quad T_i = \frac{2 T_{cm} K_c K_{cm}}{R}$

La fonction de transfert en B.O devient

$$F.T.BO = \frac{1}{2 T_{cm} P (1 + T_{cm} P)}$$

Pour justifier notre choix on trace la réponse harmonique selon le diagramme de bode on constate que la courbe passe par l'axe 0dB avec une pente de $(-1) \left[\frac{-20dB}{decade} \right]$ ce qui assure que le système est stable.

On trouve de plus une marge de phase $\phi M = 65,5^\circ$.

Une fréquence de coupure $\omega_c = 300 \frac{rd}{s}$.

Voir figure n° (3.4)

3.6 Réponse indicielle de courant.

D'après ce qui précède la fonction de transfert de la boucle de courant est.

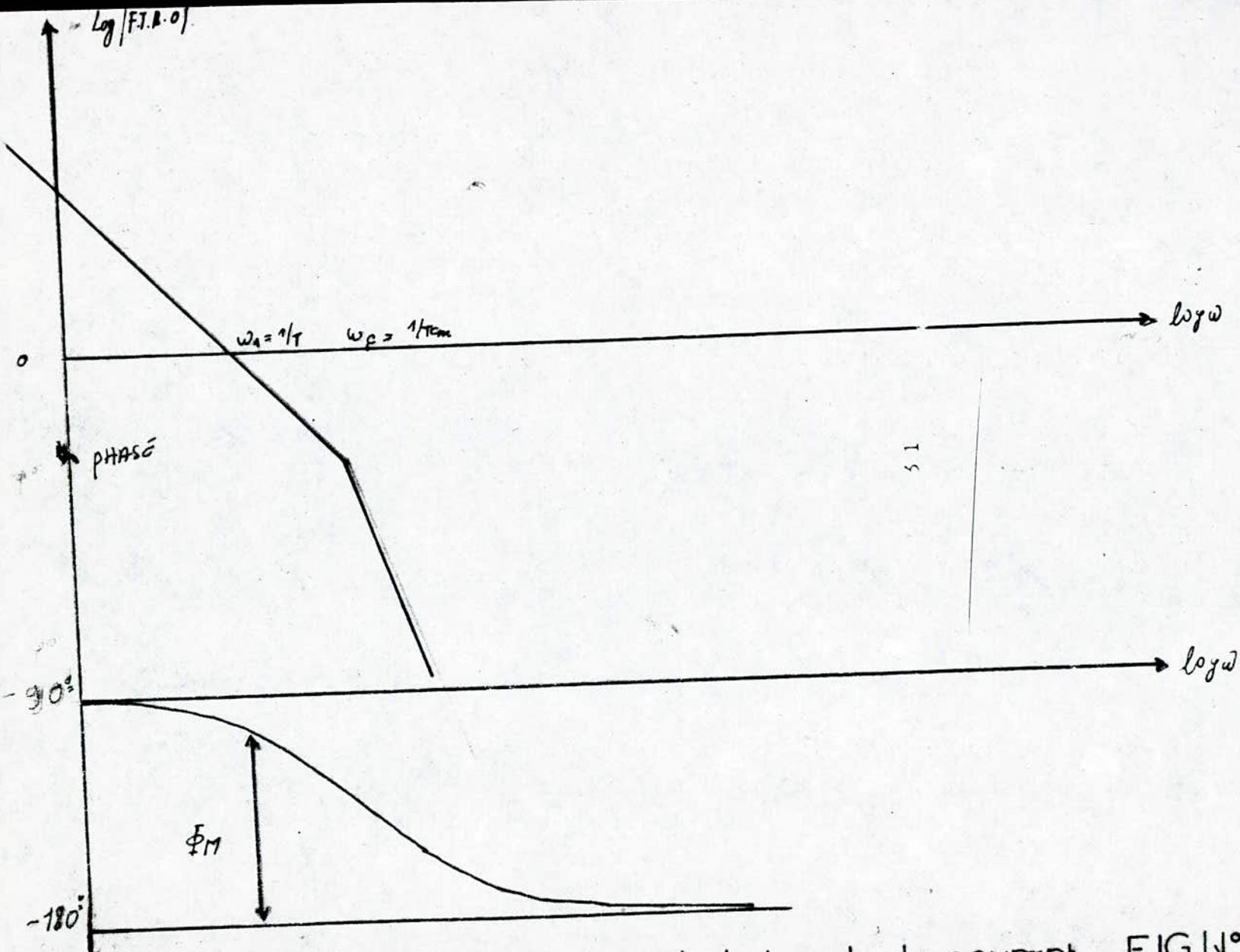
$$F.T.B.F. = \frac{I(P)}{REF_I(P)} = \frac{\frac{1}{K_c}}{1 + 2 T_{cm} P [1 + T_{cm} P]}$$

$$\frac{I(P)}{REF_I(P)} = \frac{1}{k_c (1 + T P + T T_{cm} P^2)}$$

3.7 Limitation du gradient de courant $\left[\frac{dI}{dt} \right]$.

En générale les moteurs n'admet pas des surtensions important aux bornes des lames de leurs collecteur, donc il faut limiter la vitesse d'augmentation de courant qui provoque ces surtensions en introduisant un limiteur de pente entre la référence et le régulateur.

On limite ainsi la rapidité de variation de la référence et ainsi celle de courant.



Réponse harmonique de la boucle de courant . FIG N° 3.4 . 4)

Généralement la variation sera $\left(\frac{dI}{dt}\right)_{\max} = 20\% \text{ à } 50\% \text{ de } I_n$.

3.8 Boucle de vitesse.

3.8.1 Détermination de régulateur de vitesse

Nous avons montré précédemment que la fonction de transfert de la boucle de courant fermée est

$$F^{TBF} = \frac{1}{k_c} \frac{1}{(1+2T_{cm}P)(1+P^2T_{cm})}$$

Pour simplifier les calculs en néglige le terme (T_{cm}) ce qui rend l'ordre de cette (1)

$$F^{TBF} = \frac{1}{k} \frac{1}{(1+2T_{cm}P)}$$

On constate que le circuit de réglage de la variable auxiliaire (le courant dans notre cas) intervient avec une fonction de transfert du 1^o ordre qui va s'ajouter à la fonction de transfert $\left(\frac{k_n}{J_P}\right)$.

La présence de la perturbation \sqrt{r} nous oblige à réaliser une action intégrale dans le régulateur de vitesse pour que cette dernière reste constante quelque soit le couple résistant, soit $\frac{1}{T_{in}P}$ cette fonction.

Il est alors facile de montrer qu'un tel système est instable et ceci en traçant le diagramme de bode de la réponse harmonique en boucle ouverte.

Soit en posant $T = 2T_{cm}$.

$$O N A : F^{TBO} = \frac{1}{T_{in}P} \times \frac{1}{1+TP} \times k \times \frac{1}{J_P} \times k_n = \frac{k k_n}{J k_c T_{in}} \times \frac{1}{P^2(1+TP)}$$

$$F^{TBO} = \frac{k k_n}{J k_c T_{in}} \times \frac{1}{P^2(1+TP)}$$

Le diagramme de bode de cette fonction (voir figure n°3.6).

On constate que la marge de phase ϕ_M est toujours négative, donc le système est instable.

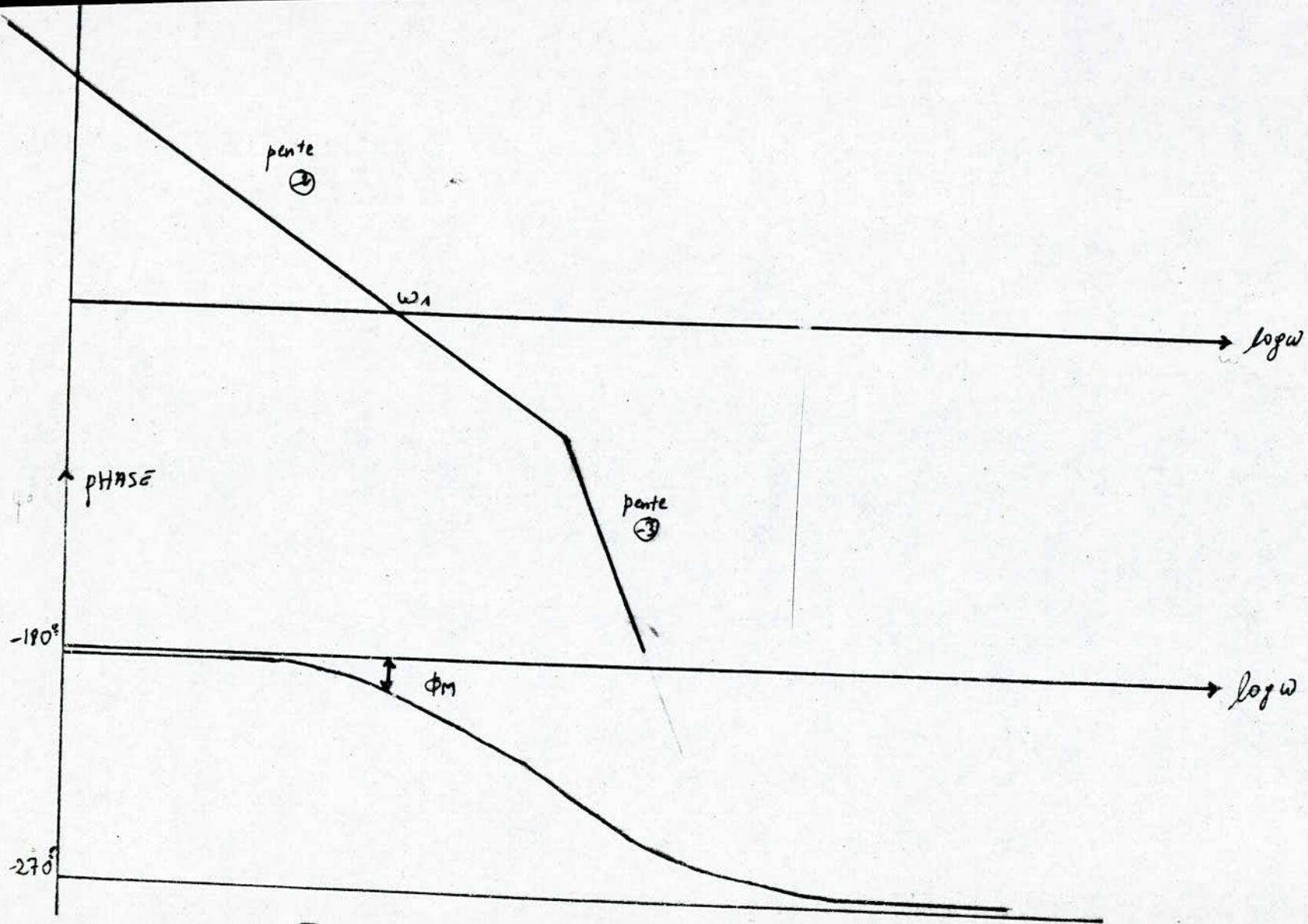
Pour réaliser la stabilité du système il faut réaliser en plus de l'action intégrale un système d'avance de phase du type $(1+T_{nv}P)$

Ce qui donne pour le régulateur de vitesse une fonction de la forme :

$$\frac{1}{T_{iv}P} (1+T_{nv}P) = \frac{1 + T_{nv}P}{T_{iv}P} \text{ (régulateur du type P.I.)}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$F^{TBO} = \frac{k k_n}{J k_c T_{iv}} \cdot \frac{1 + T_{nv}P}{P^2(1+T P)}$$



Reponse harmonique de la boucle de vitesse FIG N° 3.6 (6)

Si $T_{nv} > T$ la réponse harmonique devient (voir figure n° 3.7)

On voit bien maintenant que la marge de phase est positive ce qui assure la stabilité de système.

3.8.2 Dimensionnement de régulateur

Comme "T" est une petite constante de temps donc elle ne doit pas être compenser par T_{nv} à ce moment pour assurer un réglage rapide de la grandeur de sortie lors d'une variation de la grandeur perturbatrice, il faut choisir la constante de temps tel que $T_{nv} = 4T$.

Pour le choix de T_{nv} d'après l'allure générale de la réponse harmonique en boucle ouverte par bode (figure n° 3.7).

Afin que le passage par l'axe de (0dB) AIT lien avec une pente (-1) il faut que :

$$\left(\frac{1}{T_{nv}} < \omega_1 < \frac{1}{T} \right).$$

Et d'après le critère d'amortissement et pour que ce dernier soit optimal il faut choisir :

$$\frac{T_{nv}}{T_{iv}} = \frac{1}{2} \frac{T_m}{I}$$

D'où $T_{iv} = \frac{8 T^2}{T_m}$

D'après ces conditions la fonction de transfert en boucle ouvert devient :

$$F.T.B.O \frac{1 + T_{nv}P}{2T_{nv}T^2P^2(1+TP)} = \frac{1 + 4TP}{8T^2 P^2 (1+T)}$$

3.8.3 Réponse indicielle.

1. - Influence d'un échelon de RbF.

La fonction de transfert en vucle fermé d'après ce qui précède est donnée par

$$\frac{\Omega_r(P)}{\Omega(P)} = \frac{1 + T_{nv}P}{1 + T_{nv}P + 2T T_{nv}P^2 + 2T^2 T_{nv}P^3}$$

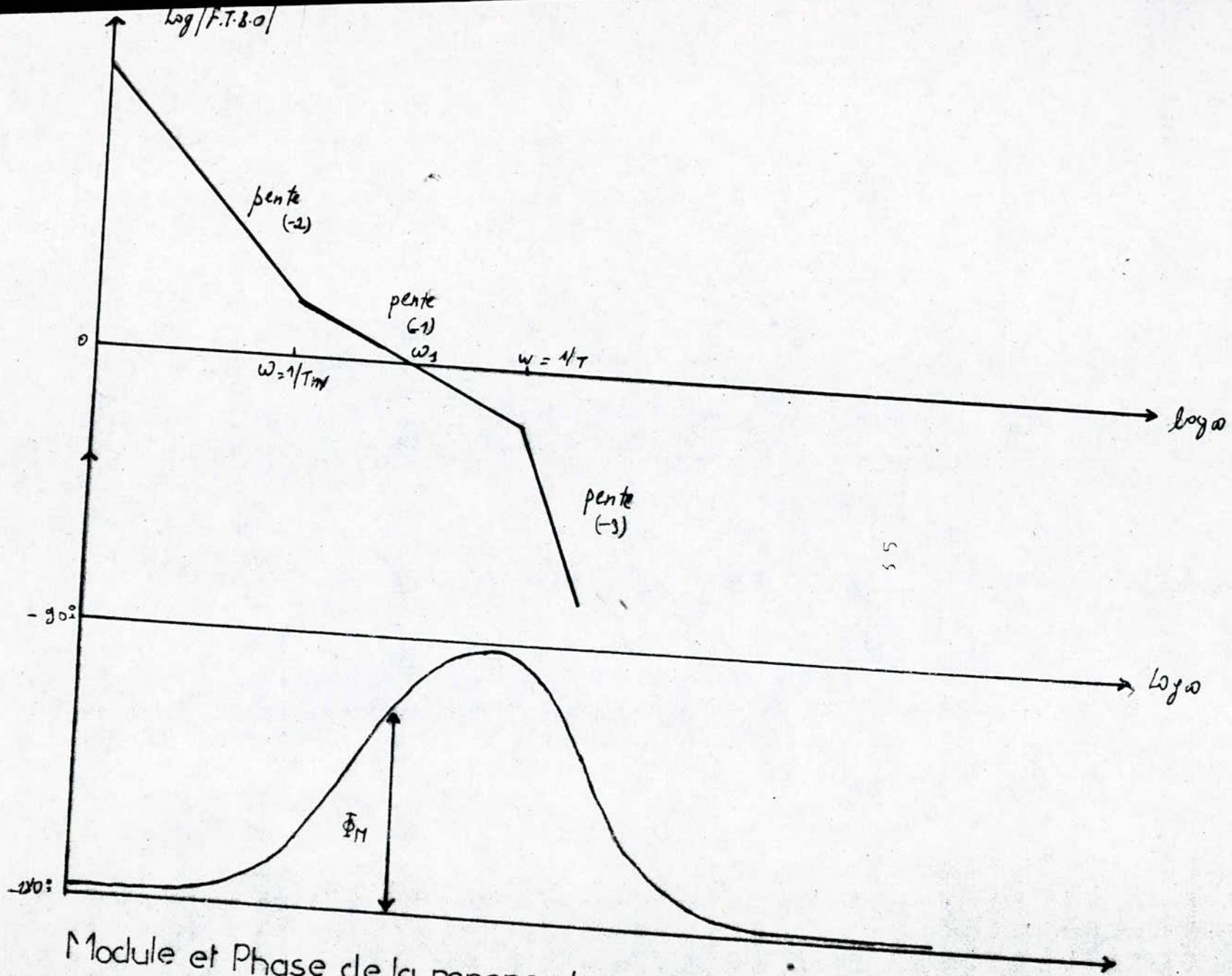
Pour la réponse à échelon unitaire de référence voir figure n°(3.8)

2. - Influence d'un échelon de couple résistant.

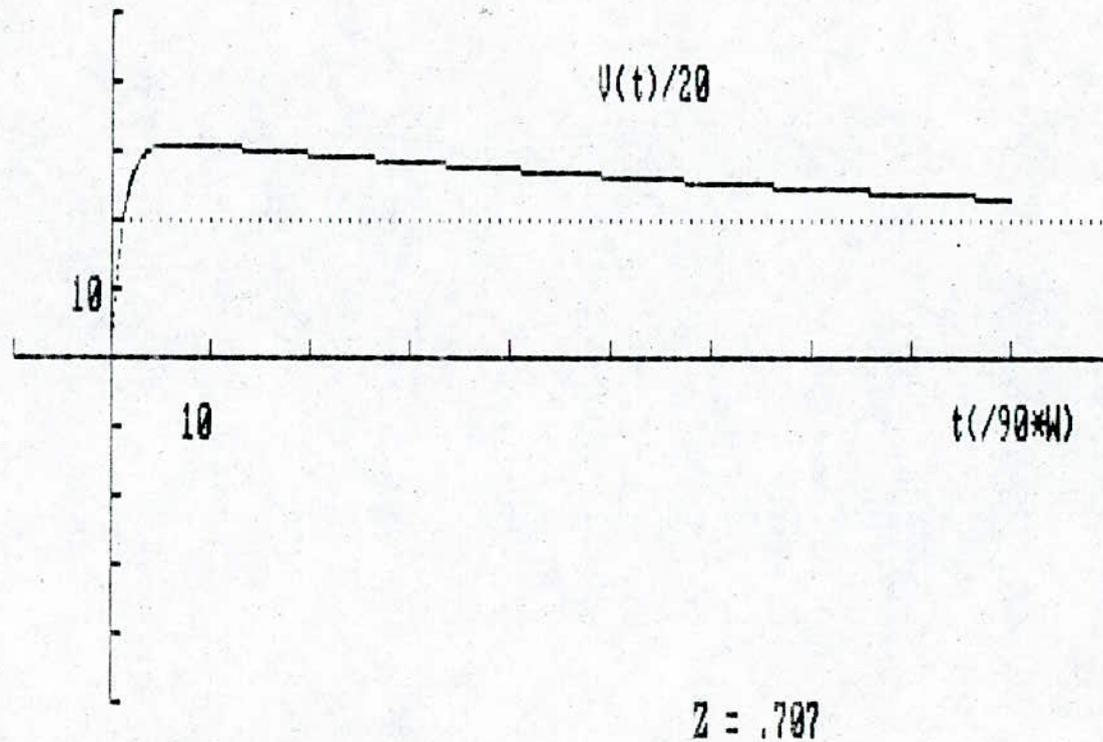
De même que pour l'échelon de référence

En calcul la fonction de transfert on trouve.

$$\frac{F_r'(P)}{F_r(P)} = \frac{\Omega_r(P)}{\Omega(P)} = \frac{P \frac{2T T_{nv}}{T_m} (1 + PT)}{1 + T_{nv}P + 2T_{nv}T^2P^2 + 2T_{nv}T^2P^3}$$



Module et Phase de la reponse harmonique de boucle de vitesse FIG N° 3.7



REPONSE DE VITESSE A UN ECHELON DE REFERENCE

FIG. 3-8

REPONSE DE VITESSE A UN ECHELON DE REFERENCE

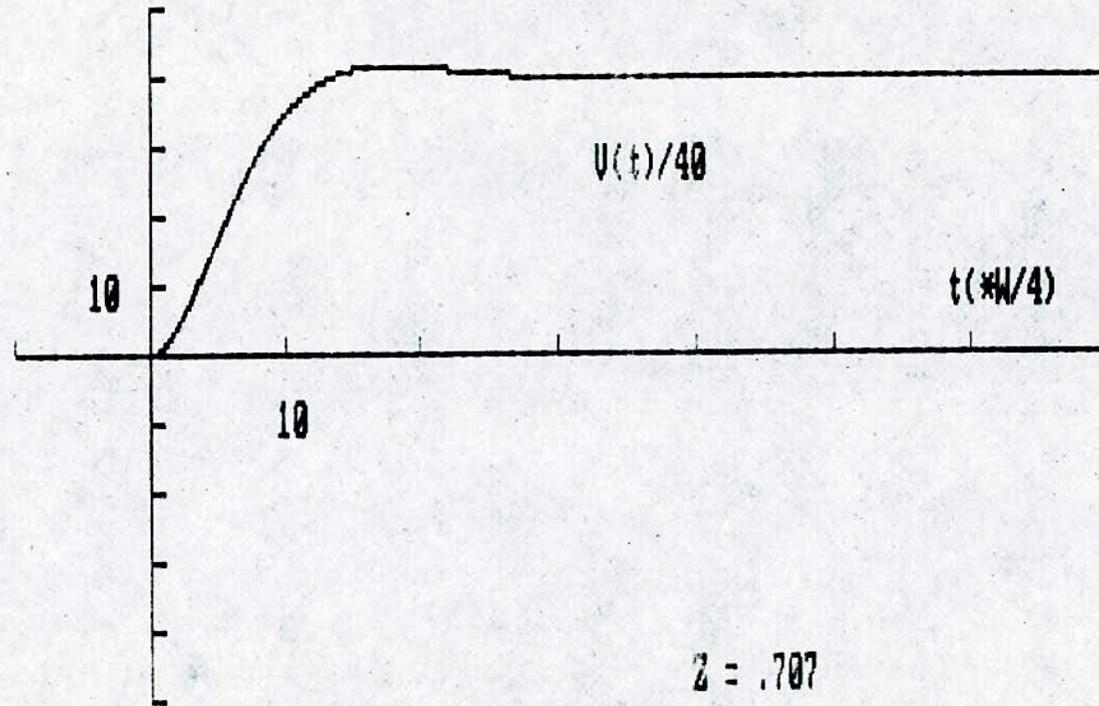


FIG-3-9

54.

On remarque que pour $T_{nv} T_{nv} = 4T$ ONA un grand dépassement d'environ 43% de la grandeur de sortie lors d'une variation de la valeur de référence mais il assure une réaction rapide par rapport à des variations de la grandeur perturbatrice pour réduire ce grand dépassement on monte un filtre en serie avec l'organe de référence ce filtre n'influence pas la relation entre i et r tandis que i est lié à la nouvelle référence REF * par la fonction de transfert

$$F.T^* = F(P)_F \times F'(P)_{REF}$$

En tenant compte de la fonction $F'(P)$ donnée par (b) et pour un choix judicieux en prend comme fonction de transfert pour le filtre.

$$Ff(P) = \frac{1}{1+T_{nv}P}$$

Pour compenser le zero de $F'_{REF}(P)$ qui provoque essentiellement le dépassement, car le terme (PT_{nv}) correspond à une différentiation cependant le dépassement diminue à 7,5% et le temps de montée est à peu près 2,5 fois plus grand que dans le cas sans filtre pour la valeur de référence.

QUATRIEME CHAPITRE

4.1 Réalisation pratique d'un régulateur de vitesse sans contrainte de courant.

En utilisant de A.0 le schéma pratique est. fig (4.1)

Dans un tel montage la fonction de transfert est légèrement différente, car le gain est différent sur la référence et le retour tachymétrique.

Un montage équivalent serait : fig (4.2)

$$\text{Avec } R_{REF}[\Omega] = - \frac{R1'}{R} R_{REF} \Omega$$

$$\text{On tire } VC = \frac{[R_{REF}'(\Omega) - K_n \Omega][1 + R2 C2P]}{R1' C2P}$$

Par analogie avec le schéma fonctionnel de la première partie.

Et d'après les résultats obtenus il faut choisir.

$$R2 C2 = T'em$$

$$R1' C2 \times \frac{KE}{KnG} = \tau = 2 Te'$$

R1 est choisie en fonction du régime statique, car pendant ce régime on a :

$$\Omega = - \frac{R_{REF}'}{K_n}$$

$$\text{d'où } R1 = R1' \cdot \frac{R_{REF}[\Omega]}{K_n \cdot \Omega}$$

A partir de ces relations et en se basant sur les données numériques.

Les valeurs des éléments sont :

$$R1 = 8,2 \text{ K}\Omega$$

$$R1' = 1 \text{ K}\Omega$$

$$R2 = 20 \text{ K}\Omega$$

$$C2 = 4,7 \text{ Micro-F}$$

Le schéma général : voir fig (4.3)

4.2 Réalisation pratique d'une régulation de courant et de vitesse par boucles en cascade.

Dans le cas le système de régulation se compose de deux boucles superposées, celle de l'intérieur est destinée à la régulation du courant, tandis que celle de l'extérieur régule la vitesse

4.2.1 Régulation de courant :

Nous avons déjà vu qu'il s'agit d'un régulateur

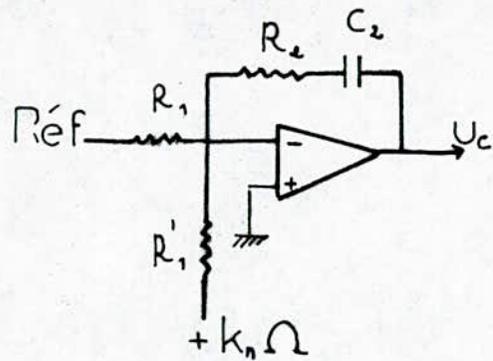


FIG. N° 4.1)

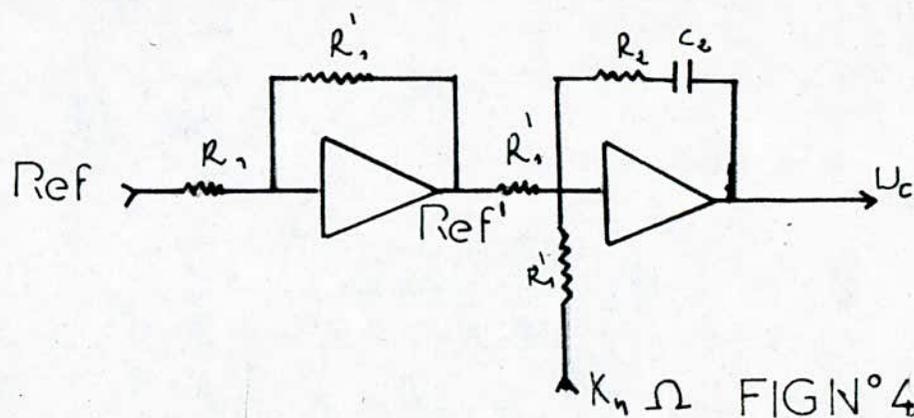


FIG. N° 4.2)

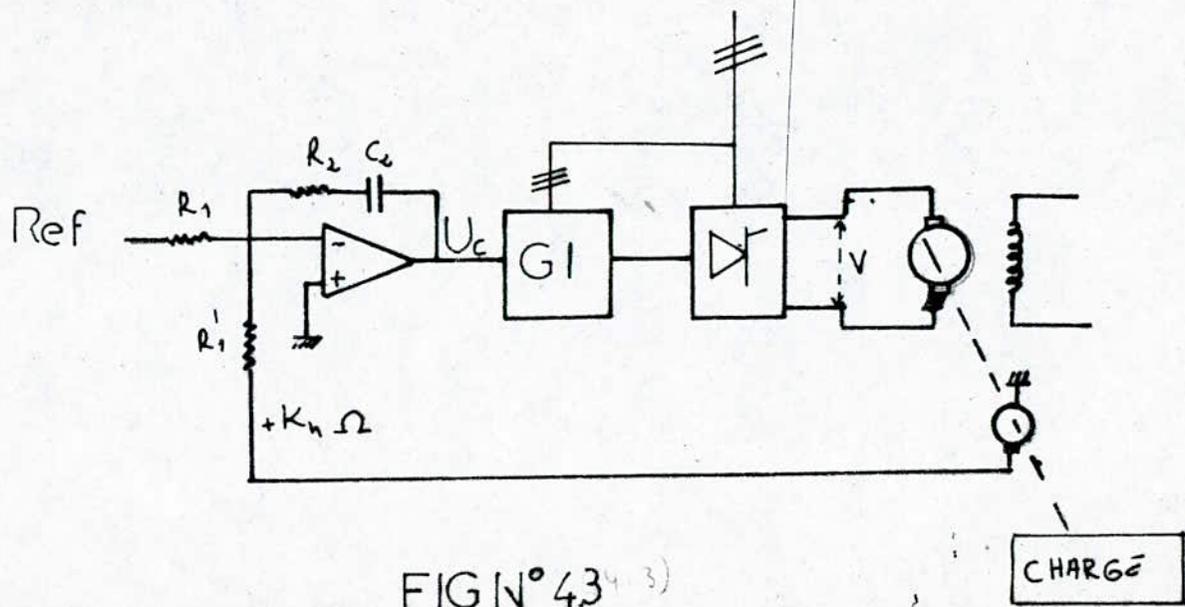


FIG. N° 4.3)

CHARGE

[P.1] Pour compenser [Te] et que la pulsation de coupure est $\omega_1 = 300 \frac{rd}{s}$.

Le schéma du régulateur est : voir fig.(4.4)

Avec les mêmes considérations que précédemment on trouve.

$$V_e = \left[-\frac{R_{EF}}{R_3} - \frac{K_c I}{R'3} \right] \frac{[1 + R_4 C_4 P]}{C_4 P}$$

$$D'où V = \frac{[-R'3 R_{EF} - K_c I]}{R_3} \frac{[1 + R_4 C_4 P]}{R'3 C_4 P}$$

$$\text{Nous posons : } GRI = \frac{1 + R_4 C_4 P}{R_3 C_4 P}$$

Et d'après les résultats obtenus dans le chapitre précédent, nous devons avoir.

$$R_4 C_4 = T_e$$

$$\frac{R'1' C_2 R}{K_c K_{cm}} = \frac{1}{\omega_1}$$

Et pour limiter l'amplitude maximum du courant, R_3 est choisi tel que :

$$\frac{R_{EF} [I]_{max}}{R_3} = \frac{K_c I_{max}}{R'3}$$

$$D'où R_3 = R_3' \frac{R_{EF} [I]_{max}}{K_c I_{max}}$$

Dans ces conditions et avec les données numériques on trouve pour les éléments suivants :

$$R_3 = 1,2 \text{ K}\Omega$$

$$R'3 = 27 \Omega$$

$$R_4 = 5,6 \Omega$$

$$C_4 = 1 \text{ micro-F}$$

Pour limiter le gradient du courant on utilise un limiteur de pente et d'amplitude de type [SF 45] dont la pente [P = 0,185 A/S]

Le schéma devient : fig. (4.5)

4.2.2 Régulation de vitesse :

Il s'agit aussi d'un régulateur P.T et en tenant compte du résultats obtenu pour la boucle de courant

Le schéma du régulateur est : voir fig. (4.6)

Avec les mêmes considérations :

$$V_C = \left[-\frac{R'5 R_{EF} [\Omega]}{R_5} - K_n \Omega \right] \frac{1 + R_6 C_6 P}{R'5 C_6 P}$$

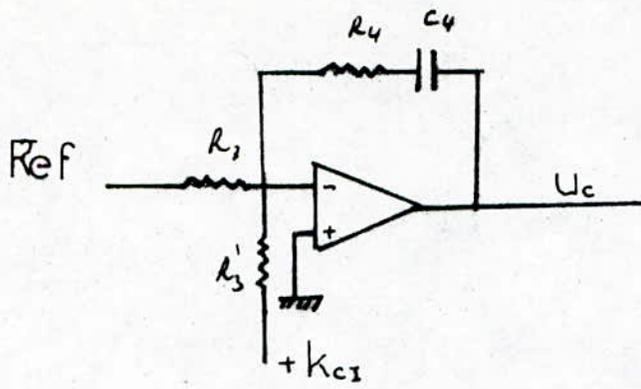


FIG N° 4.4 (4)

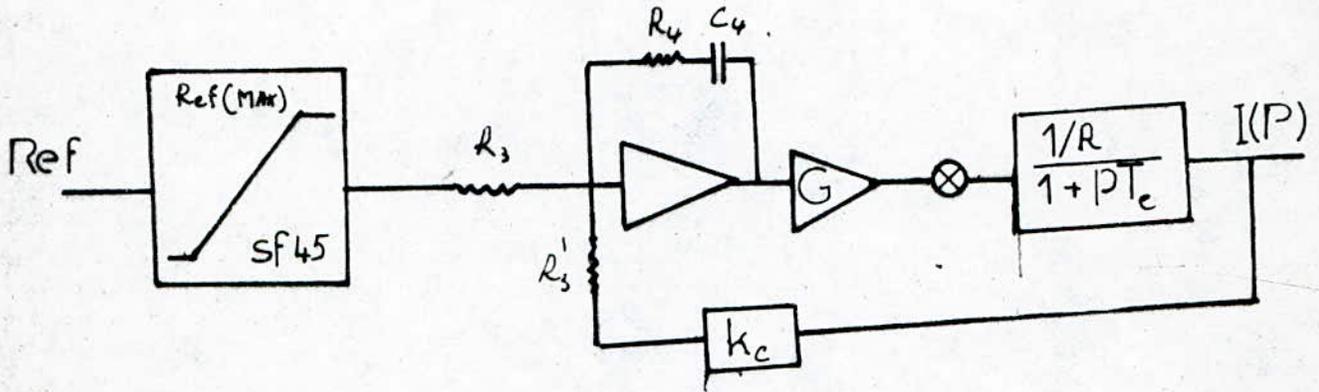
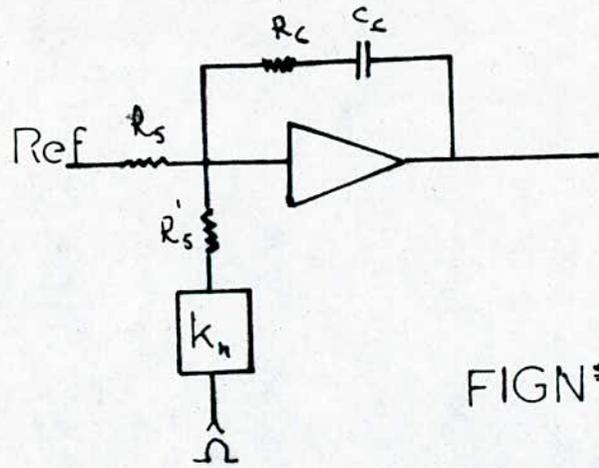
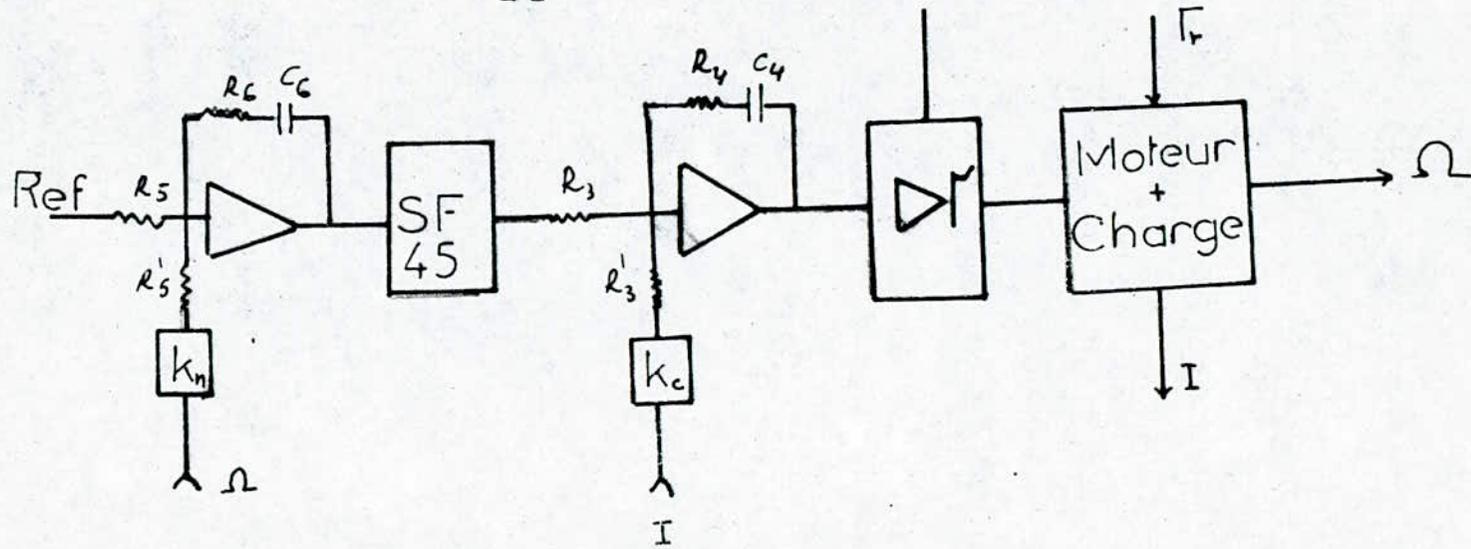


FIG N° 4.5 (5)



FIGN° 4.6^{a, b)}



FIGN° 4.7^{a)}

Nous posons $GRV = \frac{1 + R6C6P}{R'5 C6P}$

D'après ce qui précède nous devons avoir

$$R6 C6 = 4 T$$

$$\frac{R6}{R'5} = \frac{1}{2} \frac{T Kc'}{Kn KmT}$$

Avec $Kc' = Kc \frac{R3}{R'3}$

$$\frac{1}{2T} = Wc$$

Pour le régime établi R5 est choisie tel que :

$$R5 = R'5 \frac{KcT' \left[\int \right]_{\max}}{Kn \Omega_{\max}}$$

4.2.3 remarques : à partir de l'expression de réponse de vitesse à un échelon de couple nous voyons que l'amplitude de la variation de vitesse est :

- Proportionnelle à T2 donc inversement proportionnelle à Wc2.
- Inversement proportionnelle à J.

Pour avoir la meilleure réponse possible, il faut que cette amplitude soit faible ce qui conduit à choisir Wc le plus grand possible.

Sa limite est :

$$Wc = \frac{1}{Tnv} = \frac{1}{4T}$$

d'où $Wc_{\max} = 75 \frac{rd}{s}$

Pratiquement il n'y a pas de réalisation d'asservissement de vitesse avec de telle valeur de Wc.

Les valeurs les plus souvent rencontrées sont de l'ordre $Wc \neq 15,20 \frac{rd}{s}$

Choisissons $Wc = 15 \frac{rd}{s}$ on trouve pour les éléments du régulateur les

valeurs suivant :

$$R5 = 560 K\Omega$$

$$R'5 = 560 \Omega$$

$$R6 = 6,8 K\Omega$$

$$C6 = 2 \text{ micro} - F$$

En fin ONA le schéma général de la régulation. fig.(4.7)

C O N C L U S I O N

L'Etude que nous avons fait nous a montré que la vitesse d'un moteur a courant continu sans aucune régulation est sensible aux perturbations (Variation du couple résistant), et pour attendre le régime établi il met un temps de l'ordre de T_{em} ,

En introduisant dans la chaîne directe un régulateur proportionnelle. On peut rendre le système plus rapide en augmentant la valeur du gain proportionnelle cependant le système risque d'être instable et le courant devient très important, notamment lors du démarrage, en ajoutant en plus de l'action proportionnelle une action intégral ce qui conduit à un régulateur du type (P.I). La vitesse varie lors d'une perturbation mais elle revient à sa valeur initial au bout d'un certain temps, le courant reste encore important pendant le régime transitoire d'où la nécessité d'introduire en plus de la boucle de régulation de vitesse une boucle de courant en cascade qui doit être le plus rapide possible pour ne pas affecter la rapidité du système, et en ajoutant un filtre pour la valeur de référence le dépassement diminue en plus

Avec des choix judicieux de régulateurs on améliore énormément les réponses du point de vue :

- Limitation du courant.

Il existe d'autres types de régulation comme la régulation en parallèle et la régulation par boucles convergentes et selon le cas, on choisit l'une ou l'autre.

Dans l'avenir des améliorations leurs seront certainement apportées bien que les principes n'en soient pas modifiés, les principales évolutions auxquelles nous pouvons attendre sont : - La généralisation des régulateurs adaptatifs où les paramètres du régulateur seront adaptés en fonction des conditions de fonctionnement du système à asservir, En particulier la variation des constantes des temps suivant la valeur du courant et de l'inertie.

- La généralisation d'asservissement hybride où l'on met en parallèle une régulation analogique et une régulation digitale. Ceci permet d'améliorer énormément la précision de l'asservissement.

- P_n : Puissance nominale
 Ω_n : Vitesse "
 Γ_n : Couple "
 I_n : Courant "
 K_n : Constante de conversion de vitesse
 K_c : " " " " courant
 K_{cm} : Gain du convertisseur de courant
 K_E : Constante de la F. E. M.
 K_m : " du couple moteur
 R : résistance de l'Induit
 J : Moment d'inertie du rotor
 Γ_f : Couple résistant
 $G_{cm}(P)$: Fonction de transfert du convertisseur de courant
 $G_{RV}(P)$: " " " " régulateur de vitesse
 $G_{RI}(P)$: " " " " " " courant
 $REF(\Omega)$: référence de vitesse
 $REF(I)$: " " courant
 T_{cm} : Constante du temps du convertisseur de courant
 Ω : Vitesse angulaire.

* CALCUL DES CONSTANTES KE, Km :

d'après les Equations du moteur en régime dynamique

$$\begin{cases} V = E + RI \\ E = K_E \Omega \\ \Gamma = K_m I \end{cases}$$

Choisissons pour les calculs les valeurs du point nominal E
(I_n , Γ_n , Ω , U_n)

On sait que $P_n = U_n I_n = U_n = \frac{P_n}{I_n}$

D'où $K_E = \frac{U_n - R I_n}{\Omega_n}$

$$K_E = \frac{P_n - R I_n^2}{\Omega_n I_n} = 0,25 \text{ V/rd/S}$$

$$K_m = \frac{\Gamma_n}{I_n} = 0,53 \frac{\text{mN}}{\text{A}}$$

* Calcul des éléments du régulateur de vitesse sans contrainte du courant.

On sait d'après l'étude précédente que les paramètres de ce régulateur doivent satisfaire aux relations suivantes :

$$R_2 C_2 = T_{em}$$

$$R_1' C_2 = \frac{2 T_{em} K_n K_{cm}}{K_E}$$

$$R_1 = R_1' \frac{REF (\Omega)_{max}}{K_n \Omega_{max}}$$

$$R_1 C_2 = \frac{2 \times 5,14 \times 10^3 \times 0,01 \times 9,52}{0,25} = 0,04$$

$$R_1 = R_1' \frac{10 \times 30}{0,01 \times 10^3 \cdot 10} = \frac{30}{10} R_1'$$

$$R_2 C_2 = 88 \times 10^{-3}$$

Avec $REF (\Omega)_{max} = 10V$

Choisissant $C2 = 4,7$ micro - F

On trouve : $\begin{cases} R2 = 18,723 \text{ K.OHM} \\ R1 = 0,832 \text{ K - OHM} \\ R1 = 7,945 \text{ K - OHM} \end{cases}$

Nous prenons les valeurs normalisés suivantes :

$\begin{cases} C2 = 4,7 \text{ micro - F} \\ R1 = 8,2 \text{ K - OHM} \\ R1' = 1 \text{ K - OHM} \\ R2 = 20 \text{ K - OHM} \end{cases}$

* Fonction de transfert du convertisseur de courant.

Pour les petites variations de la tension de commande l'ensemble convertisseur plus le dispositif de commande de gachette introduit dans la chaîne directe un retard T_{cm} et un gain K_{cm} ce qui se traduit par la fonction :

$$G_{cm}(P) = K_{cm} \cdot \text{EXP}(-T_{cm}P)$$

Mais pour faire l'Etude de stabilité on fait une approximation comme se suit :

$$G_{cm}(P) = \frac{K_{cm}}{\text{EXP}(T_{cm}P)} \quad \text{et comme } T_{cm} \text{ est une petite constante de temps on peut}$$

remplacer l'exponentielle par son développement du premier ordre.

$$\text{Exp.}(T_{cm}P) = 1 + T_{cm}P.$$

$$\text{D'où } G_{cm}(P) = \frac{K_{cm}}{1 + PT_{cm}}$$

$$\text{Avec } T_{cm} = \frac{1}{2PF} \quad \begin{array}{l} P : \text{Indice de pulsation} \\ f : \text{Frequence du secteur} \end{array}$$

Lors des grandes variations de la tension de commande, les retards qui se manifestent dependent en premier lieu du point de fonctionnement et de la grandeur, ainsi que du sens de variation de la tension de commande U_{cm} .

* régulation en cascade

On tenons compte du résultats obtenu au cours de l'étude précédente les éléments du régulateur doivent vérifier les relations.

$$\begin{aligned} R_u C2 &= T_e \\ R3' C2 &= \frac{K_m K_c}{2T_{cm} R} \end{aligned}$$

$$R3 = \frac{R_u F (I)_{\max}}{I_{\max} K_c} \quad R3'$$

Avec $I_{max} = I_n = 0,37 \text{ A}$

$$R_{EF} (I)_{max} = 10 \text{ V}$$

On trouve : $R_4 C_4 = 4,86 \times 10^{-3}$
 $R_3' C_4 = 2,57 \times 10^{-3}$
 $R_3 = 450,45 R_3'$

Choisissons : $C_2 = 1 \text{ micro - F}$

On trouve : $\begin{cases} R_4 = 4,86 \text{ K - OHM} \\ R_3' = 25,7 \text{ OHM} \\ R_3 = 11,57 \text{ K - OHM} \end{cases}$

Nous prenons les valeurs normalisés juste supérieur :

$$\begin{cases} C_1 = 1 \text{ micro - F} \\ R_3 = 12 \text{ K - OHM} \\ R_3' = 27 \text{ OHM} \\ R_4 = 5,6 \text{ K - OHM} \end{cases}$$

* régulateur de vitesse

Nous avons déjà vu que les paramètres du régulateur de vitesse doivent vérifier les relations suivantes :

$$\begin{cases} R_6 C_6 = 4T \\ \frac{R_6}{R_5} = \frac{J_{kc} R_3 \omega_c}{R_3' K_n K_m} \\ R_5 = R_5' \frac{R_{EF}(\Omega)_{max}}{\Omega_{max} K_n'} \end{cases}$$

Pour l'application numérique nous prenons :

$$R_{EF}(\Omega)_{max} = 104$$

$$\Omega_{max} = \frac{1000t}{\text{mi}}$$

$$\omega_c = 15 \frac{\text{rd}}{\text{s}}$$

Ce qui donne $\begin{cases} R_6 C_6 = 13,36 \times 10^{-3} \\ \frac{R_6}{R_5'} = 12,996 \\ R_5 = 9,549 \times R_5' \end{cases}$

Si nous choisissons. $C6 = 2 \text{ micro} - F$
 $C6 = 2 \text{ micro} - F$
 $R6 = 6,68 \text{ K} - \text{OHM}$
 $R'5 = 513,997 \text{ OHM}$
 $R5 = 4,908 \text{ K} - \text{OHM}$

Nous prenons les valeurs normalisés juste supérieur :

$R5 = 5,6 \text{ K} - \text{OHM}$

$R'5 = 560 \text{ OHM}$

$R6 = 6,8 \text{ K} - \text{OHM}$

$C6 = 2 \text{ mic} - F$

```

10 CLS:SCREEN 2
20 INPUT "TPEM =";TPEM
30 INPUT "TPE =";TPE
40 INPUT "TE =";TE
50 CLS
60 XMAX=200:YMAX=200:VIEW (50,30)-(600,160):WINDOW (0,0)-(XMAX,YMAX)
70 LINE (0,0)-(XMAX,0):LINE (0,0)-(0,YMAX)
80 FOR X=0 TO XMAX STEP 20:LINE (X,0)-(X,4):NEXT X
90 FOR Y=0 TO YMAX STEP 20:LINE (0,Y)-(2,Y):NEXT Y
100 LOCATE 5,9:PRINT "U(t)/100":LOCATE 19,4:PRINT "20":LOCATE 22,13:PRINT "20"
110 LOCATE 22,72:PRINT "t*5"
120 '
130 '
140 !*****
150 ' TRACER DE LA REPONSE A UN ECHELON DE TENSION ( VITESSE )
160 !*****
170 DIM F(1000)
180 FOR T=0 TO 1000 STEP 1
190 F(T)=1-(TPE*EXP(-T/TPE)-TPEM*EXP(-T/TPEM))/(TPEM-TPE)
200 PSET (T/5,F(T)*100):NEXT T
210 LOCATE 23,20:PRINT "REPONSE A UN ECHELON DE TENSION (VITESSE)"
220 ERASE F1
230 '
240 '
250 '
260 IF INKEY$ <> " " THEN 260
270 PRINT CHR$(12)
280 XMAX=200:YMAX=200:VIEW (50,30)-(600,160):WINDOW (0,0)-(XMAX,YMAX)
290 LINE (0,0)-(XMAX,0):LINE (0,0)-(0,YMAX)
300 FOR X=0 TO XMAX STEP 20:LINE (X,0)-(X,4):NEXT X
310 FOR Y=0 TO YMAX STEP 20:LINE (0,Y)-(2,Y):NEXT Y
320 LOCATE 5,9:PRINT "I(t)/100000":LOCATE 19,4:PRINT "20":LOCATE 22,13:PRINT "20"
330 LOCATE 22,72:PRINT "t*2"
340 '
350 '
360 !*****
370 ' TRACER DE LA REPONSE A UN ECHELON DE TENSION ( COURANT )
380 !*****
390 DIM I(20000)
400 FOR T=0 TO 400 STEP .05
410 F2(T)=(EXP(-T/TPEM)-EXP(-T/TPE))/(TPEM-TPE)
420 PSET (T/2,F2(T)*100000):NEXT T
430 LOCATE 23,20:PRINT "REPONSE A UN ECHELON DE TENSION (COURANT)"
440 '
450 '
460 IF INKEY$ <> " " THEN 460
470 PRINT CHR$(12)
480 XMAX=200:YMAX=200:VIEW (50,30)-(600,160):WINDOW (0,-YMAX)-(XMAX,0)
490 LINE (0,0)-(XMAX,0):LINE (0,-YMAX)-(0,0)
500 FOR X=0 TO XMAX STEP 20:LINE (X,0)-(X,-4):NEXT X
510 FOR Y=-YMAX TO 0 STEP 20:LINE (0,Y)-(2,Y):NEXT Y
520 LOCATE 20,9:PRINT "U(t)/100":LOCATE 6,4:PRINT "20":LOCATE 5,13:PRINT "20"

```

```

10 CLS:SCREEN 2
20 INPUT "TPEM =";TPEM
30 INPUT "TPE =";TPE
40 INPUT "TE =";TE
50 CLS
60 XMAX=200:YMAX=200:VIEW (50,30)-(600,160):WINDOW (0,0)-(XMAX,YMAX)
70 LINE (0,0)-(XMAX,0):LINE (0,0)-(0,YMAX)
80 FOR X=0 TO XMAX STEP 20:LINE (X,0)-(X,4):NEXT X
90 FOR Y=0 TO YMAX STEP 20:LINE (0,Y)-(2,Y):NEXT Y
100 LOCATE 5,9:PRINT "U(t)/100":LOCATE 19,4:PRINT "20":LOCATE 22,13:PRINT "20"
110 LOCATE 22,72:PRINT "t*5"
120 '
130 '
140 !*****
150 ' TRACER DE LA REPONSE A UN ECHELON DE TENSION ( VITESSE )
160 !*****
170 DIM F1(1000)
180 FOR T=0 TO 1000 STEP 1
190 F1(T)=1-(TPE*EXP(-T/TPE)-TPEM*EXP(-T/TPE))/(TPEM-TPE)
200 PSET (T/5,F1(T)*100):NEXT T
210 LOCATE 23,20:PRINT "REPONSE A UN ECHELON DE TENSION (VITESSE)"
220 ERASE F1
230 '
240 '
250 '
260 IF INKEY$ <> " " THEN 260
270 PRINT CHR$(12)
280 XMAX=200:YMAX=200:VIEW (50,30)-(600,160):WINDOW (0,0)-(XMAX,YMAX)
290 LINE (0,0)-(XMAX,0):LINE (0,0)-(0,YMAX)
300 FOR X=0 TO XMAX STEP 20:LINE (X,0)-(X,4):NEXT X
310 FOR Y=0 TO YMAX STEP 20:LINE (0,Y)-(2,Y):NEXT Y
320 LOCATE 5,9:PRINT "I(t)/10000":LOCATE 19,4:PRINT "20":LOCATE 22,13:PRINT "20"
330 LOCATE 22,72:PRINT "t*2"
340 '
350 '
360 !*****
370 ' TRACER DE LA REPONSE A UN ECHELON DE TENSION ( COURANT )
380 !*****
390 DIM F2(8000)
400 FOR T=0 TO 400 STEP .05
410 F2(T)=(EXP(-T/TPEM)-EXP(-T/TPE))/(TPEM-TPE)
420 PSET (T/2,F2(T)*10000):NEXT T
430 LOCATE 23,20:PRINT "REPONSE A UN ECHELON DE TENSION (COURANT)"
440 '
450 '
460 IF INKEY$ <> " " THEN 460
470 PRINT CHR$(12)
480 XMAX=200:YMAX=200:VIEW (50,30)-(600,160):WINDOW (0,-YMAX)-(XMAX,0)
490 LINE (0,0)-(XMAX,0):LINE (0,-YMAX)-(0,0)
500 FOR X=0 TO XMAX STEP 20:LINE (X,0)-(X,-4):NEXT X
510 FOR Y=-YMAX TO 0 STEP 20:LINE (0,Y)-(2,Y):NEXT Y
520 LOCATE 20,9:PRINT "U(t)/100":LOCATE 6,4:PRINT "20":LOCATE 5,13:PRINT "20"

```

```

530 LOCATE 5,72:PRINT "+*5"
540 '
550 '
560 !*****
570 '      TRACER DE LA REPONSE A UN ECHELON DE COUPLE ( VITESSE )
580 !*****
590 DIM F3(1000)
600 FOR T=0 TO 1000 STEP 1
610 F3(T)= (1-(TPE-TE)*EXP(-T/TPE)-(TPEM-TE)*EXP(-T/TPEM))/(TPE-TE)
620 PSET (125,F3(T)*100):NEXT T
630 ERASE 53
640 LOCATE 23,20:PRINT "REPONSE A UN ECHELON DE COUPLE (VITESSE)"
650 '
660 '
670 IF INKEY# ">" THEN 470
680 PRINT TAB(12)
690 XMAX=30:YMAX=200:UTW=(50,30)-(400,160):WINDOW (0,0)-(XMAX,YMAX)
700 LINE (0,0)-(XMAX,0):LINE (0,0)-(0,YMAX)
710 FOR X=0 TO XMAX STEP 20:LINE (X,0)-(X,4):NEXT X
720 FOR Y=0 TO YMAX STEP 20:LINE (0,Y)-(2,Y):NEXT Y
730 LOCATE 5,9:PRINT "T(t)/100":LOCATE 19,4:PRINT "20":LOCATE 22,13:PRINT "20"
740 '
750 '
760 !*****
770 '      TRACER DE LA REPONSE A UN ECHELON DE COUPLE ( COURANT )
780 !*****
790 DIM F4(1000)
800 FOR T=0 TO 1000 STEP 1
810 F4(T)= (1-(TPE)*EXP(-T/TPE)-TPEM*EXP(-T/TPEM))/(TPEM-TPE)
820 PSET (125,F4(T)*100):NEXT T
830 LOCATE 23,20:PRINT "REPONSE A UN ECHELON DE COUPLE (COURANT)"
840 IF INKEY# ">" THEN 840

```

```

530 LOCATE 5,72:PRINT "t*5"
540 '
550 '
560 !*****
570 '      TRACER DE LA REPONSE A UN ECHELON DE COUPLE ( VITESSE )
580 !*****
590 DIM F3(1000)
600 FOR T=0 TO 1000 STEP 1
610 F3(T)=-1+((TPE-TE)*EXP(-T/TPE)-(TPEM-TE)*EXP(-T/TPEM))/(TPEM-TPE)
620 PSET (T/5,F3(T)*100):NEXT T
630 ERASE F3
640 LOCATE 23,20:PRINT "REPONSE A UN ECHELON DE COUPLE (VITESSE)"
650 '
660 '
670 IF INKEY$ <> " " THEN 670
680 PRINT CHR$(12)
690 XMAX=200:YMAX=200:VIEW (50,30)-(800,160):WINDOW (0,0)-(XMAX,YMAX)
700 LINE (0,0)-(XMAX,0):LINE (0,0)-(0,YMAX)
710 FOR X=0 TO XMAX STEP 20:LINE (X,0)-(X,4):NEXT X
720 FOR Y=0 TO YMAX STEP 20:LINE (0,Y)-(2,Y):NEXT Y
730 LOCATE 5,9:PRINT "I(t)/100":LOCATE 19,4:PRINT "20":LOCATE 22,13:PRINT "20"
740 '
750 '
760 !*****
770 '      TRACER DE LA REPONSE A UN ECHELON DE COUPLE ( COURANT )
780 !*****
790 DIM F4(1000)
800 FOR T=0 TO 1000 STEP 1
810 F4(T)=1+(TPE*EXP(-T/TPE)-TPEM*EXP(-T/TPEM))/(TPEM-TPE)
820 PSET (T/5,F4(T)*100):NEXT T
830 LOCATE 23,20:PRINT "REPONSE A UN ECHELON DE COUPLE (COURANT)"
840 IF INKEY$ <> " " THEN 840

```

```

10 PRINT CHR$(12):SCREEN 2
20 FOR I=1 TO 3
30 LOCATE I+3,5:PRINT "W(";I;")";:INPUT "=";W(I)
40 LOCATE I+3,25:PRINT "Z(";I;")";:INPUT "=";Z(I)
50 NEXT I
60 PRINT CHR$(12)
70 GOTO 180
80 A=.00486:B(I)=SQR(1-Z(I)^2):C(I)=W(I)/B(I):D(I)=W(I)*B(I):RETURN
90 XMAX=20:YMAX=2
100 VIEW (50,30)-(400,160)
110 WINDOW (-XMAX/20,-YMAX/10)-(XMAX,YMAX)
120 LINE (-XMAX/20,0)-(XMAX,0):LINE (0,-YMAX/10)-(0,YMAX)
130 FOR X=-XMAX/20 TO XMAX STEP 1
140 LINE (X,0)-(X,.03):NEXT X
150 FOR Y=-YMAX/10 TO YMAX STEP .2
160 LINE (0,Y)-(1,Y):NEXT Y
170 RETURN
180 '*****
190 ' REPOSE DE VITESSE A UN ECHELON DE REFERENCE
200 '*****
210 GOSUB 90
220 FOR I=1 TO 3
230 GOSUB 80
240 DIM F1(1000)
250 PHI=ATN(B(I)/Z(I))
260 FOR T=0 TO 20 STEP .05
270 F1(T)=1-EXP(-Z(I)*T)*SIN(B(I)*T+PHI)/B(I)
280 PSET (T,F1(T))
290 NEXT T
300 ERASE F1
310 NEXT I
320 LOCATE 17,7:PRINT ".2":LOCATE 20,13:PRINT "1":LOCATE 20,68:PRINT "t (*W)".
330 LOCATE 16,33:PRINT "Z=";Z(3):LOCATE 16,45:PRINT " X=62.2"
340 LOCATE 9,33:PRINT "Z=";Z(1):LOCATE 9,45:PRINT " X=13.96"
350 LOCATE 16,33:PRINT "Z=";Z(3):LOCATE 16,45:PRINT " X=62.2"
360 LOCATE 4,11:PRINT "U(t)"
370 LOCATE 23,15:PRINT "REPOSE DE VITESSE A UN ECHELON DE REFERENCE"
380 IF INKEY$ <> " " THEN 380
390 '*****
400 ' REPOSE DE COURANT A UN ECHELON DE REFERENCE
410 '*****
420 PRINT CHR$(12)
430 GOSUB 90
440 FOR I=1 TO 3
450 GOSUB 80
460 DIM F2(1000)
470 FOR T=0 TO 15 STEP .01
480 F2(T)=C(I)*EXP(-Z(I)*T)*SIN(B(I)*T*3.14/180)
490 PSET (T,F2(T))
500 NEXT T
510 ERASE F2
520 NEXT I
530 LOCATE 17,7:PRINT ".2":LOCATE 20,13:PRINT "1":LOCATE 20,68:PRINT "t (*W)".
540 LOCATE 6,33:PRINT "Z=";Z(1):LOCATE 6,45:PRINT " X=13.96"
550 LOCATE 10,33:PRINT "Z=";Z(2):LOCATE 10,45:PRINT " X=25.2"
560 LOCATE 13,33:PRINT "Z=";Z(3):LOCATE 13,45:PRINT " X=62.2"
570 LOCATE 4,11:PRINT "I(t)"
580 LOCATE 23,15:PRINT "REPOSE DE COURANT A UN ECHELON DE REFERENCE"
590 IF INKEY$ <> " " THEN 590
600 '*****
610 ' REPOSE DE VITESSE A UN ECHELON DE COUPLE
620 '*****
630 PRINT CHR$(12)
640 XMAX=20:YMAX=2
650 VIEW (50,30)-(400,160)
660 WINDOW (-XMAX/20,-YMAX/10)-(XMAX,YMAX/10)
670 LINE (-XMAX/20,0)-(XMAX,0):LINE (0,-YMAX/10)-(0,YMAX/10)
680 FOR X=-XMAX/20 TO XMAX STEP 1
690 LINE (X,0)-(X,.03):NEXT X
700 FOR Y=-YMAX/10 TO YMAX/10 STEP .2

```

```

710 LINE (0,Y)-(1,Y):NEXT Y
720 FOR I=1 TO 3
730 GOSUB 90
740 DIM F3(1000)
750 PHI3=ATN(A*D(I)/(1-A*Z(I)*W(I)))*180/3.14-PHI1
760 FOR T=0 TO 20 STEP .05
770 F3(T)=(1-SQR(1-2*A*Z(I)*W(I)+A^2*W(I)^2))*EXP(-Z(I)*T)*SIN((B(I)*T)+PHI3)*3.14/180/B(I)
780 PSET (T,F3(T)) :NEXT T
790 ERASE F3
800 NEXT I
810 LOCATE 7,14:PRINT "1":LOCATE 7,70:PRINT " (*W)" LOCATE 7,111:PRINT ".2"
820 LOCATE 9,33:PRINT "Z=";Z(1):LOCATE 9,45:PRINT " X=62.2"
830 LOCATE 12,33:PRINT "Z=";Z(2):LOCATE 12,45:PRINT " X=25.2"
840 LOCATE 15,33:PRINT "Z=";Z(3):LOCATE 15,45:PRINT " X=13.96"
850 LOCATE 4,11:PRINT "I(t)"
860 LOCATE 27,15:PRINT "REPONSE DE VITESSE A UN ECHELON DE COUPLE"
870 IF INKEY$ <> " " THEN 870
880 *****
890 F4(T)=CONFONDU AVEC F1(T) : REPONSE DE COURANT A UN ECHELON DE COUPLE
900 PRINT *****
920 GOSUB 90
930 FOR I=1 TO 3
940 GOSUB 80
950 DIM F4(1000)
960 PHI1=ATN(B(I)/Z(I))
970 FOR T=0 TO 20 STEP .05
980 F4(T)=1-EXP(-Z(I)*T)*SIN(B(I)*T+PHI1)/B(I)
990 PSET (T,F4(T))
1000 NEXT T
1010 ERASE F4
1020 NEXT I
1030 LOCATE 17,7:PRINT ".2":LOCATE 20,13:PRINT "1":LOCATE 20,68:PRINT "t (*W)"
1040 LOCATE 16,33:PRINT "Z=";Z(1):LOCATE 16,45:PRINT " X=62.2"
1050 LOCATE 13,33:PRINT "Z=";Z(2):LOCATE 13,45:PRINT " X=25.2"
1060 LOCATE 9,33:PRINT "Z=";Z(3):LOCATE 9,45:PRINT " X=13.96"
1070 LOCATE 4,11:PRINT "I(t)"
1080 LOCATE 27,15:PRINT "REPONSE DE COURANT A UN ECH"
1090 IF INKEY$ <> " " THEN 1090
1100 END

```

```

10 DIM F1(3000)
20 PRINT CHR$(12):SCREEN 2
30 INPUT "DONNER LA VALEUR DE W";W
40 INPUT "DONNER LA VALEUR DE Z";Z
50 B=W/SQR(1-Z^2):C=W*SQR(1-Z^2):D=SQR(1-Z^2)
60 PRINT CHR$(12)
70 A=.00334:TE=.01336
80 XMAX=100:YMAX=100
90 VIEW (50,30)-(600,160)
100 WINDOW (-XMAX/10,-YMAX/2)-(7*XMAX/10,YMAX/2)
110 LINE (-XMAX/10,0)-(7*XMAX/10,0):LINE (0,-YMAX/2)-(0,YMAX/2)
120 FOR X=-XMAX/10 TO 7*XMAX/10 STEP 10
130 LINE (X,0)-(X,2):NEXT X
140 FOR Y=-YMAX/2 TO YMAX/2 STEP 10
150 LINE (0,Y)-(1,Y):NEXT Y
160 '*****
170 '      REPONSE DE VITESSE A UN ECHELON DE REFERENCE
180 '*****
190 PHI1=ATN(D/Z)
200 FOR T=0 TO 30 STEP .01
210 F1(T)=1-EXP(-Z*T)*SIN(D*T+PHI1)/D
220 PSET (T*2,F1(T)*30)
230 NEXT T
240 LOCATE 3,10:PRINT "REPONSE DE VITESSE A UN ECHELON DE REFERENCE "
250 ERASE F1
260 LOCATE 11,12:PRINT"10":LOCATE 14,24:PRINT"10":LOCATE 14,66:PRINT "t(*W/2)
270 LOCATE 20,25:PRINT"W =";W:LOCATE 20,50:PRINT"Z =";Z
280 LOCATE 9,44:PRINT"V(t)/30"
290 IF INKEY$ <> " " THEN 290
300 GOTO 10

```

```

10 DIM F1(3000)
20 PRINT CHR$(12):SCREEN 2
30 INPUT "DONNER LA VALEUR DE W";W
40 INPUT "DONNER LA VALEUR DE Z";Z
50 B=W/SQR(1-Z^2):C=W*SQR(1-Z^2):D=SQR(1-Z^2)
60 PRINT CHR$(12)
70 A=.00486:TE=.088
80 XMAX=100:YMAX=100
90 VIEW (50,30)-(600,160)
100 WINDOW (-XMAX/10,-YMAX/2)-(7*XMAX/10,YMAX/2)
110 LINE (-XMAX/10,0)-(7*XMAX/10,0):LINE (0,-YMAX/2)-(0,YMAX/2)
120 FOR X=-XMAX/10 TO 7*XMAX/10 STEP 10
130 LINE (X,0)-(X,2):NEXT X
140 FOR Y=-YMAX/2 TO YMAX/2 STEP 10
150 LINE (0,Y)-(1,Y):NEXT Y
160 '*****
170 '      REPONSE DE VITESSE A UN ECHELON DE REFERENCE
180 '*****
190 PHI1=ATN(D/Z)
200 FOR T=0 TO 20 STEP .01
210 F1(T)=1-EXP(-Z*T)*SIN(D*T+PHI1)/D
220 PSET (T*4,F1(T)*40)
230 NEXT T
240 LOCATE 3,15:PRINT"REPONSE DE VITESSE A UN ECHELON DE REFERENCE"
250 ERASE F1
350 LOCATE 11,12:PRINT"10":LOCATE 14,24:PRINT"10":LOCATE 11,66:PRINT "L(*W/4)"
360 LOCATE 20,25:PRINT"W=";W:LOCATE 20,50:PRINT"Z=";Z
370 LOCATE 8,44:PRINT"U(T)/40"
390 IF INKEY$ <> " " THEN 390
400 GOTO 10

```

```

10 PRINT CHR$(12):SCREEN 2
20 INPUT "DONNER LA VALEUR DE W";W
30 INPUT "DONNER LA VALEUR DE Z";Z
40 B=W/SQR(1-Z^2):C=W*SQR(1-Z^2):D=SQR(1-Z^2)
50 PRINT CHR$(12)
60 A=.00334:TE=.01334
70 XMAX=100:YMAX=100
80 VIEW (50,30)-(600,160)
90 WINDOW (-XMAX/10,-YMAX/2)-(XMAX,YMAX/2)
100 LINE (-XMAX/10,0)-(XMAX,0):LINE (0,-YMAX/2)-(0,YMAX/2)
110 FOR X=-XMAX/10 TO XMAX STEP 10
120 LINE (X,0)-(X,2):NEXT X
130 FOR Y=-YMAX/2 TO YMAX/2 STEP 10
140 LINE (0,Y)-(1,Y):NEXT Y
150 '*****
160 ' REPONSE DE VITESSE A UN ECHELON DE COUPLE AVEC FILTRE
170 '*****
180 DIM F(100)
190 FOR T=0 TO 100:F(T)=20:PSET (T,F(T)):NEXT T
200 DIM F1(1000)
210 PHI1=ATN(-D/Z)+ATN(TE*C/(1-TE*Z*W))
220 FOR T=0 TO 1 STEP .001
230 F1(T)=1-(TE^2*W^2*EXP(-T/TE)/(1-2*TE*Z*W+TE^2*W^2))+EXP(-Z*T)*SIN(D*T-PHI1)
(D*SQR(1-2*Z*TE*W+TE^2*W^2))
240 PSET(T*90,F1(T)*20):NEXT T
250 LOCATE 11,11:PRINT"10":LOCATE 14,18:PRINT"10":LOCATE 14,66:PRINT"t(/90*W)"
260 LOCATE 21,25:PRINT"W =";W:LOCATE 21,50:PRINT"Z =";Z
270 LOCATE 6,44:PRINT"U(t)/20"
271 LOCATE 23,10:PRINT "REPONSE DE VITESSE A UN ECHELON DE COUPLE AVEC COUPLE
280 IF INKEY$ ">" THEN 280
290 GOTO 10

```