

وزارة الجامعات والبحث العلمي
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*COMMANDE PAR RETOUR D'ETAT
AVEC OBSERVATEUR
-Etude Comparative-*

Proposé par :

M^r M.S. BOUCHERIT

Etudié par :

M^{lle} DJAMILA TRABZI

Dirigé par :

M^r M.S. BOUCHERIT

PROMOTION

JUIN 1992

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة الجامعات والبحث العلمي
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

COMMANDE PAR RETOUR D'ETAT

AVEC OBSERVATEUR

-Etude Comparative-

Proposé par :

Mr M.S.BOUCHERIT

Etudié par :

Mlle DJAMILA TRABZI

Dirigé par :

Mr M.S.BOUCHERIT

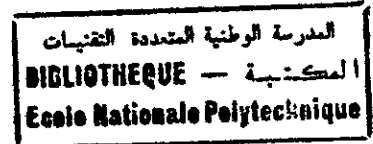
PROMOTION

JUIN 1992

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

- mon cher père
- ma très chère mère
- ma soeur
- mes frères
- mes amis(es)
- et à tous ceux que j'aime



REMERCIEMENTS

Il m'est agréable à la fin de ce travail d'exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui m'ont aidé dans tous les domaines à la réalisation de cette étude .

Les orientations et précieux conseils de Mr M.S. BOUCHERIT durant ce travail m'ont énormément aidé . Je lui présente ma profonde gratitude .

TABLES DE MATIERES

INTRODUCTION

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

CHAPITRE I : REGLAGE PAR RETOUR D'ETAT D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

I.1 Modélisation

I.1.1 Description du système à régler

I.1.2 Mise en équation

I.2 Structure de réglage

I.2.1 Structure optimale de réglage

I.2.2 Structure globale de réglage

I.3 Réglage d'état du courant d'induit

I.3.1 Structure de réglage

I.3.2 Equations d'états du système

I.3.3 Détermination des coefficients de réglage

I.3.4 Réponses indicielles

I.4 Réglage d'état de la vitesse

I.4.1 Structure de réglage

I.4.2 Equations d'états du système global

I.4.3 Détermination des coefficients de réglage

I.4.4 Réponses indicielles

I.5 Conclusion

CHAPITRE II : OBSERVATEUR DE LUENBERGER

II.1 Structure de l'observateur de LUENBERGER

II.1.1 Equations de l'observateur

II.1.2 Conditions d'existances du reconstituteur

II.1.3 Détermination des matrices de l'observateur pour $m=1$

II.2 Structure générale de réglage avec observateur

II.2.1 Systèmes d'équations

II.2.2 Equation d'état du système complet

II.3 Réglage avec observateur dans la boucle de courant

II.3.1 Structure de réglage du courant

II.3.2 Equation d'état du système fermé

II.3.3 Réponses indicielles

II.3.4 Réglage de la vitesse

II.4. Réglage avec observateur dans la boucle de

vitesse

- II.4.1 Réglage du courant d'induit
- II.4.2 Structure de réglage de la vitesse
- II.4.3 Equation d'état du système global
- II.4.4 Réponses indicielles

CHAPITRE III : ESTIMATEUR D'ETAT DE KALMAN

- III.1 Structure de l'estimateur d'état de KALMAN
 - III.1.1 Systèmes d'équations
 - III.1.2 Détermination du gain K_e
- III.2 Structure générale de réglage avec estimateur d'état
 - III.2.1 Equations d'états du système complet
- III.3 Réglage avec estimateur dans la boucle de courant
 - III.3.1 Structure de réglage du courant
 - III.3.2 Equation d'état du système global fermé
 - III.3.3 Réponses indicielles
 - III.3.4 Réglage de la vitesse
- III.4 Réglage avec estimateur dans la boucle de vitesse
 - III.4.1 Réglage du courant
 - III.4.2 Structure de réglage de la vitesse
 - III.4.3 Equations d'états du système global fermé
 - III.4.4 Réponses indicielles

CHAPITRE IV : PREDICTEUR D'ETAT DE KALMAN

- IV.1 Structure du prédicteur d'état de KALMAN
 - IV.1.1 Systèmes d'équations
 - IV.1.2 Détermination du gain K_p
- IV.2 Structure générale de réglage avec prédicteur d'état
 - IV.2.1 Equation d'état du système complet
- IV.3 Réglage de la boucle de courant avec prédicteur d'état
 - IV.3.1 Structure de réglage du courant
 - IV.3.2 Equation d'état du système global fermé
 - IV.3.3 Réponses indicielles
 - IV.3.4 Réglage de la vitesse

- IV.4 Réglage de la boucle de vitesse avec prédicteur
 - IV.4.1 Réglage du courant
 - IV.4.2 Structure de réglage de la vitesse
 - IV.4.3 Equation d'état du système global fermé
 - IV.4.4 Réponses indicielles

CHAPITRE V : OBSERVATEUR D'ETAT ET DE PERTURBATION

- V.1 Observateur d'état sous l'influence de perturbation
- V.2 Structure de l'observateur d'état et de perturbation
 - V.2.1 Systèmes d'équations
- V.3 Structure générale de réglage avec observateur d'état et de perturbation
 - V.3.1 Système d'équation
 - V.3.2 Equation d'état du système complet
 - V.3.3 Détermination des coefficients de l'observateur
- V.4 Réglage avec observateur dans la boucle de courant
 - V.4.1 Structure de réglage de courant
 - V.4.2 Equation d'état du système global fermé
 - V.4.3 Réponses indicielles
 - V.4.4 Réglage de la vitesse
- V.5 Réglage avec observateur dans la boucle de vitesse
 - V.5.1 Réglage de courant
 - V.5.2 Structure de réglage de la vitesse
 - V.5.3 Equation d'état du système global fermé
 - V.5.3 Réponses indicielles

CHAPITRE VI : ETUDE COMPARATIVE

- VI.1 Observateur dans la boucle de vitesse
 - VI.1.1 réglage du courant
 - VI.1.2 Réglage de vitesse
- VI.2 Observateur dans la boucle de vitesse
 - VI.2.1 réglage du courant
 - VI.2.2 Réglage de vitesse
- VI.3 Conclusion

CONCLUSION

INTRODUCTION

Les méthodes classiques de représentation des systèmes conviennent très bien à l'étude de système monovariante.

Cependant, elles sont mal adaptées aux systèmes multivariants, et elles se prêtent mal à la conception d'une commande optimale.

Pour ces raisons, on préfère utiliser le concept d'état, qui traite d'une façon unifiée les systèmes SISO et MIMO.

En 1963, DAVID.G.LUENBERGER initialise la théorie des **OBSERVATEURS**, pour la reconstruction d'état des systèmes dynamiques linéaires. Et depuis, de son utilité et son intime connection avec le concept fondamental des systèmes, la théorie des observateurs continue d'être un fruit pour les recherches dans plusieurs directions.

En vue de ceci, l'observateur est arrivé à avoir sa place d'orgueil dans la commande linéaire multivariante à côté du régulateur linéaire optimal et du filtre de Kalman.

La raison majeure du développement des observateurs pour les systèmes linéaires multivariants vient grâce à l'introduction de l'espace d'état dans le domaine temporel par KALMAN en 1960.

Dans l'approche de l'espace d'état, le comportement dynamique du système dans chaque instant, est complètement décrit dans un cadre de dimension fini par le vecteur d'état.

L'impact immédiat pour les méthodes d'espace d'état était la résolution remarquable et directe des problèmes de commande de systèmes multivariants par exemple: compensation des pôles, commande non interactive, régulateur optimal, ect ...

Or, dans l'état pratique, le vecteur d'état n'est pas disponible i.e, il est impossible de mesurer tous les éléments du vecteurs d'état.

Pour vaincre le problème des informations incomplètes des états, on utilise l'observateur qui fournit une solution pratique

et élégante pour ce problème.

Maintenant, l'observateur est un système auxillaire dynamique par la reconstruction du vecteur d'état à partir du système réel, en se basant sur ces entrées et sorties. La reconstruction du vecteur d'état est alors substituée par les états inaccessibles du système dans la loi de commande dans l'espace d'état.

L'objectif de notre travail est de comparer les performances statiques et dynamiques des observateurs en appliquant la structure de réglage en cascade pour un moteur à courant continu.

Le premier chapitre présente une modélisation du moteur à courant continu dans l'espace d'état, suivi de la structure optimale de réglage qu'on appliquera pour le réglage du moteur à courant continu.

Le second, troisième et le quatrième chapitres développent respectivement l'observateur de LUENBERGER, l'estimateur et le prédictor d'état de KALMAN, ainsi que leurs applications dans le réglage d'état du moteur à courant continu .

Le cinquième chapitre traite la théorie de l'observateur d'état et de perturbation, et son application au réglage du moteur à courant continu .

Enfin le dernier chapitre est consacré à l'étude comparative des résultats obtenues pour les différentes observateurs.

REGLAGE PAR RETOUR D'ETAT D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

Les méthodes modernes de commande par retour d'état supposent que l'on connaisse les valeurs d'états. Et, moyennant l'usage généralisé du calcul matriciel, le comportement dynamique d'un système peut être entièrement décrit à l'aide de ces variables d'états .

Dans ce chapitre , on définira la structure optimale de réglage qu'on adaptera pour la régulation du courant et de la vitesse du moteur .

I-1-Modélisation:

I-1-1-Description du système à régler :

Le système à régler est un moteur à courant continu à excitation séparée, alimenté par un hacheur à thyristors. L'excitation du moteur est maintenue constante à sa valeur nominale ϕ_n [3].

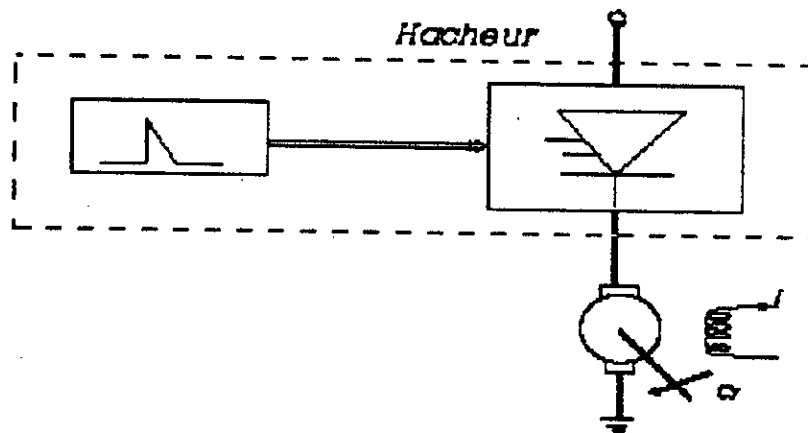


Figure 1.1 Schéma de principe du réglage d'un M.C.C

I-1-2-Mise en équation:

Le circuit électrique équivalent du système est le suivant:

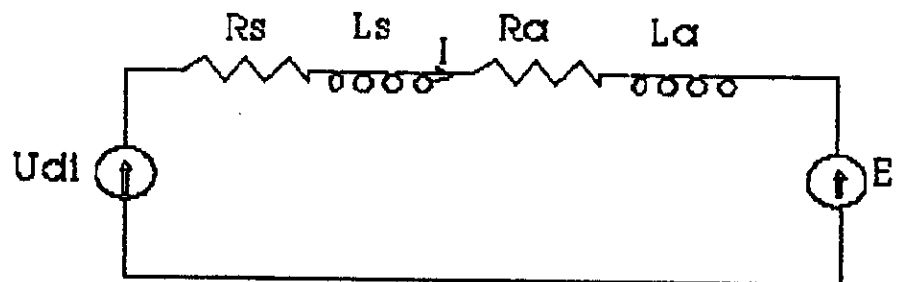


Figure 1.2 Schéma équivalent d'un moteur à courant continu

R_a et L_a sont respectivement la résistance et l'inductance équivalentes des enroulements d'induit, tandis que R_s et L_s représentent l'inductance et la résistance de la self de lissage introduite pour atténuer les ondulations du courant d'induit .

*Equation électrique:

$$-U_{dl} + (R_a + R_s) I + (L_a + L_s) \frac{dI}{dt} + E = 0 \quad (1-1)$$

Après passage aux valeurs relatives, on aboutit à :

$$-u_{dl} + R \cdot i + R \cdot T_c \frac{di}{dt} + e = 0 \quad (1-2)$$

avec : $e = \phi n (\phi - 1)$

$$\frac{di}{dt} = \frac{u_{dl} - R \cdot i - n}{R \cdot T_c} \quad (1-3)$$

ou : $R = (R_a + R_s) \frac{I_n}{U_n}$ et $T_c = \frac{L_a + L_s}{R_a + R_s}$

sont respectivement la résistance totale exprimée en grandeur relative, et la constante de temps électrique.

*Equation mécanique :

$$C_m - J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + K_f \cdot \Omega + C_{ch} \quad (1-4)$$

En valeurs réduites l'équation mécanique s'écrit :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{i - A_f \cdot n - C_c}{T_r} \quad (1-5)$$

tel que : $T_m = \frac{T_r}{A_f}$

où : T_m est la constante de temps mécanique

*Equation du convertisseur :

$$\frac{du_{dl}}{dt} = \frac{K_{cm} U_{cm} - u_{dl}}{T_{cm}} \quad (1-6)$$

la transformation de Laplace des équations (1-3),(1-5),(1-6) donne les relations suivantes :

$$i = \frac{U_{di} - n}{R(1 + sT_t)} \quad (1-7)$$

$$n = \frac{i - C_c}{A_f(1 + sT_m)} \quad (1-8)$$

$$U_{di} = \frac{K_{cm}}{1 + sT_{cm}} \cdot U_{cm} \quad (1-9)$$

d'où le diagramme fonctionnel:

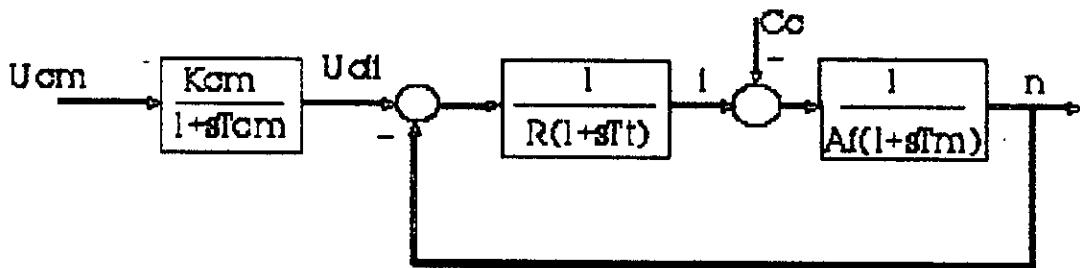


Figure 1.3 Diagramme fonctionnel du système à régler

Les données du moteur sont [3] :

$U_n=110V$, $I_n=32A$, $P_n=3Kw$, $N_n=1500tr/mn$, $J_n=12A$.
 $R_a=0.4\Omega$, $L_a=16mH$, $J=0.06Kg.m^2$, $T_m=6150ms$, $K_f=0.00975 MKSA$
 $T_t=72.5ms$, $T_r=493ms$, $K_{cm}=1.2$, $T_{cm}=2.5ms$, $R_s=1.2\Omega$, $L_s=100mH$.

I-2-Structure de réglage:

I-2-1-Structure optimale de réglage:

La structure optimale de réglage est obtenue par la minimisation d'un critère d'intégration appliqué au système à

régler muni du régulateur intégrateur. Pour trouver le minimum on fait appel au principe d'optimisation de Bellman [2] .

Le vecteur de commande optimale a pour expression [2] :

$$u[k] = -K_p x_p[k] + K_R x_R[k] + K_w w[k] - K_v v[k] \quad (1-10)$$

$w[k]$: grandeur de consigne .

$v[k]$: grandeur de perturbation .

La structure de réglage optimale déduite est [2] :

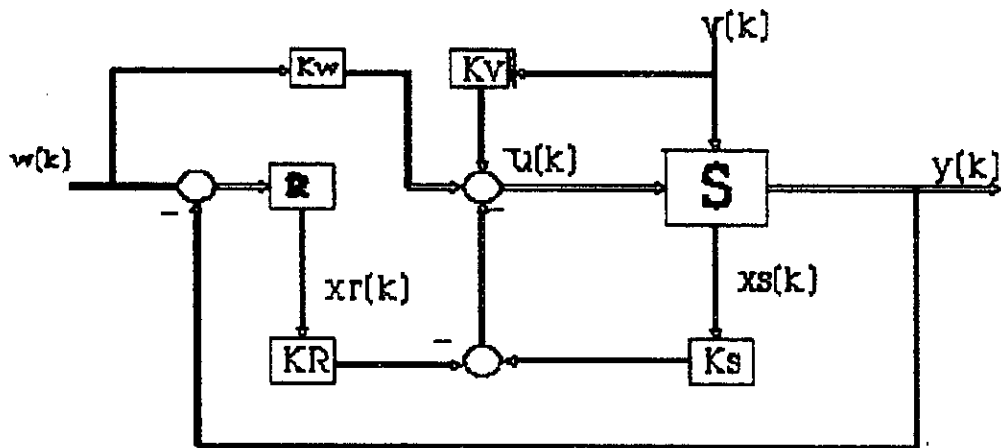


Figure 1.4 Structure optimale de réglage

I-2-2-Structure globale de réglage:

La structure globale (fig 1-5) est une structure en cascade qui comprend une boucle intermédiaire du courant et une boucle principale de vitesse. La contre-réaction du vecteur d'état est formée des grandeurs i et u_{di} pour le réglage du courant et des grandeurs n et i pour le réglage de vitesse. Donc, en plus du réglage de la vitesse, on doit prévoir celui du courant d'induit.

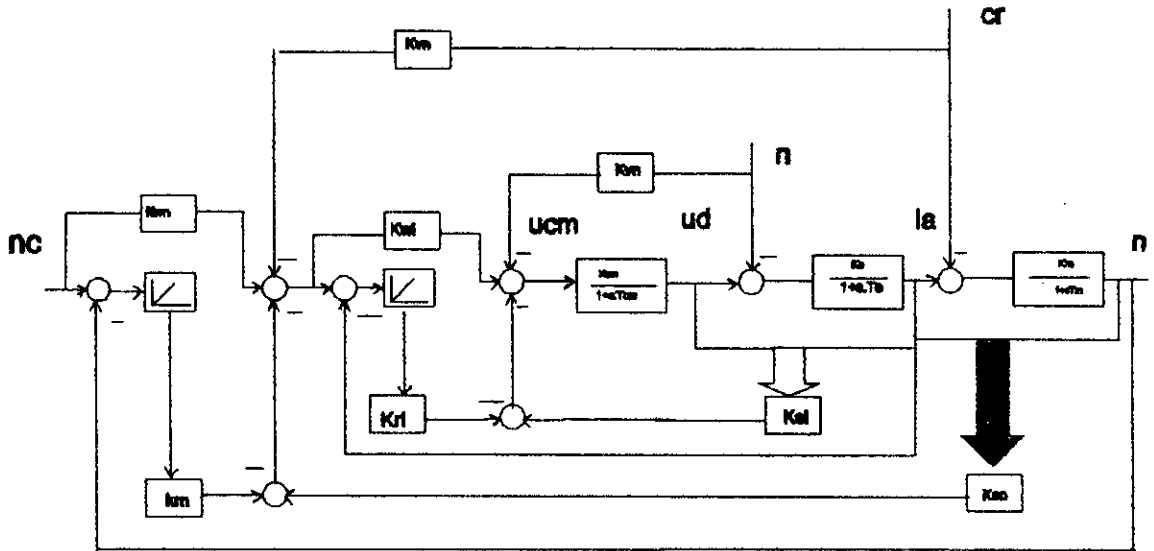


Figure 1.5 Structure globale de réglage

I-3-Réglage d'état du courant d'induit:

I-3-1-Structure de réglage:

Le diagramme fonctionnel représentant la structure de réglage d'état du courant est illustré à la figure (1-6).

Cette structure de réglage suppose que la grandeur de perturbation ; la vitesse du moteur ; reste constante pendant une période d'échantillonnage .

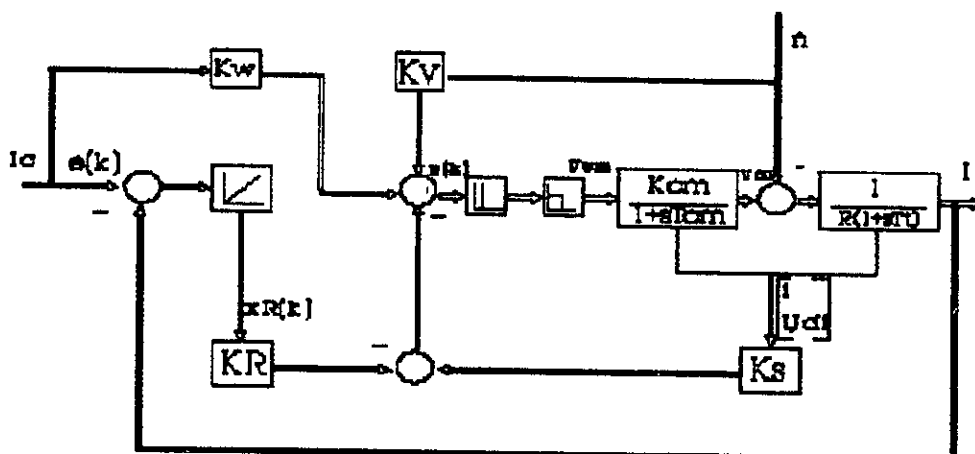


Figure 1.6 Structure de réglage du courant d'induit

I-3-2-Equations d'états du système:

Les équations de fonctionnement du moteur (1-3) et (1-6) peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{u}_{di} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/Tt & 1/R.Tt \\ 0 & -1/Tcm \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ u_{di} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Kcm/Tcm \end{bmatrix} U_{cm} + \begin{bmatrix} -1/R.Tt \\ 0 \end{bmatrix} n$$

(1-10)

$$i = [1 \ 0] \begin{bmatrix} i \\ U_{di} \end{bmatrix}$$

d'où:

$$\dot{X}_s = A_s X_s + B_s U_{cm} + B_{sv} n \tag{1-11}$$

$$Y_s = C_s^T X_s \tag{1-12}$$

avec: $X_s^T = [i \quad u_{di}]$ le vecteur d'état .

Le passage aux équations d'états échantillonnées aboutit à [2]:

$$X_s[k+1] = F_s X_s[k] + H_s u[k] + H_{sv} v[k] \quad (1-13)$$

$$Y[k] = C_s^T X_s[k] \quad (1-14)$$

$$F_s = \begin{bmatrix} \exp(-T/T_t) & T_{cm}/R(T_t - T_{cm})[\exp(-T/T_t) - \exp(-T/T_{cm})] \\ 0 & \exp(-T/T_{cm}) \end{bmatrix}$$

$$H_s = \begin{bmatrix} K_{cm}/R(T_t - T_{cm})[T_t(1 - \exp(-T/T_t)) - T_{cm}(1 - \exp(-T/T_{cm}))] \\ K_{cm}(1 - \exp(-T/T_{cm})) \end{bmatrix}$$

$$H_{sv} = \begin{bmatrix} 1/R(\exp(-T/T_t) - 1) \\ 0 \end{bmatrix}$$

La connaissance des matrices d'états F_s , H_s et H_{sv} nécessitent le choix de la période d'échantillonnage . nous avons choisi selon le théorème de Schannon [1] une période d'échantillonnage $T = 20$ ms .

En posant $X^T = [X_s \quad X_r]$, les équations d'états du système muni du régulateur Intégrateur s'écrivent :

$$\begin{aligned} X[k+1] &= FX[k] + Hu[k] + H_w w[k] + H_v v[k] \\ Y[k] &= C^T x[k] \end{aligned} \quad (1-15)$$

$$F = \begin{bmatrix} F_s & 0 \\ -C_s & 1 \end{bmatrix} ; H = \begin{bmatrix} H_s \\ 0 \end{bmatrix} ; H_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; H_v = \begin{bmatrix} H_{sv} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_s^T = [1 \quad 0] ; C^T = [1 \quad 0 \quad 0] .$$

En boucle fermée , les équations du système deviennent :

$$X[k+1] = F_G x[k] + H_{Gw} w[k] + H_{Gv} v[k] \quad (1-17)$$

$$Y[k] = C^T x[k] \quad (1-18)$$

$$\begin{aligned} \text{Où : } F_G &= F - H.K^T \\ H_{Gw} &= H_w + H.K_w \\ H_{Gv} &= H_v - H.K_v \end{aligned} \quad (1-19)$$

I-3-3-Détermination des coefficients de réglage:

Afin d'obtenir un comportement dynamique satisfaisant du système, on doit choisir des pôles garantissant un amortissement relatif optimal selon [2]:

$$Z_1 = \exp(\omega_1 T) [\cos \omega_1 T \pm j \sin \omega_1 T] \quad (1-20)$$

Les coefficients de contre-réaction d'état s'écrivent[2] :

$$K^T = K_s^T.T$$

$$K_s^T = [a_1 \ -a_1] \quad (1-21)$$

avec :

a_1 : les coefficients du polynôme caractéristique du système en boucle fermée .

a_1 : les coefficients du polynôme caractéristique du système en boucle ouverte .

la matrice T étant la matrice inverse de S ($T = S^{-1}$) définie par :

$$\begin{aligned} S_n &= H \\ S_i &= F.S_{i-1} + a_{i-1}.H \quad i = 1..n \end{aligned} \quad (1-22)$$

Le coefficient de l'intervention directe de la grandeur de consigne est déterminé par la minimisation d'un pôle par rapport à la grandeur de consigne [2] :

$$K_v = \frac{K_R}{1-Z_3} \quad (1-23)$$

Et par le critère d'annulation de la grandeur d'état du régulateur en régime établi, on a le coefficient de l'intervention directe de la grandeur de perturbation [2] :

$$K_v = \frac{C_s^T (I - F_s + H_s K_s^T)^{-1} H_{sv}}{C_s^T (I - F_s + H_s K_s^T)^{-1} H_s} \quad (1-24)$$

Nôtre système est du troisième ordre, on choisira une paire de pôle complexe conjugué et un pôle réel [10]:

$$Z_{1,2} = 0.328 \pm 0.322j$$

$$Z_3 = 0.46$$

$$\text{d'où : } K^T = [1.26 \quad -4.64 \cdot 10^{-2} \quad -4.82 \cdot 10^{-1}]$$

$$K_w = 0.892 \quad ; \quad K_v = -0.786$$

I-3-4-Réponses indicielles:

La figure (1-7) montre l'allure de la réponse indicielle par rapport à la grandeur de consigne [10]. On voit que le courant atteint son régime établi après 6 périodes d'échantillonnage. Le dépassement maximum est de 4 % avec un temps de réponse de 50 ms, la tension $u_{di}[k]$ se stabilise à 0.465 u.r .

La qualité de réglage est donc bonne .

La réponse indicielle par rapport à la grandeur de perturbation est représentée à la figure (1-8), sur la grandeur à régler $I[k]$, il existe un dépassement de 3.2 %, la tension u_{di} se stabilise après 8 périodes d'échantillonnage .

On peut conclure que le choix des pôles selon (1-20) assure un bon réglage du courant.

I-4-Réglage d'état de la vitesse:

I-4-1-Structure de réglage:

Pour simplifier l'étude du circuit principale, on remplace le circuit de courant en boucle fermée par un système équivalent du première ordre de constante de temps T_e .

Ainsi, la structure globale (fig 1-5) devient :

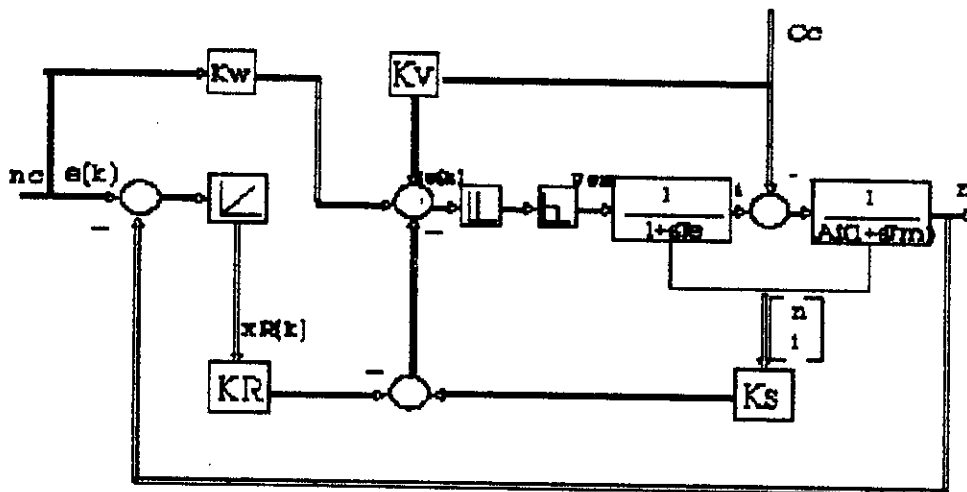


Figure 1.9 Structure de réglage de la vitesse

I-4-2-Equations d'états du système global:

Les équations échantillonnées du système lors du réglage de la vitesse sont :

$$\begin{bmatrix} \dot{n} \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/T_m & 1/Tr \\ 0 & -1/Te \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/Te \end{bmatrix} i_c + \begin{bmatrix} -1/Tr \\ 0 \end{bmatrix} C_c$$

Après passage aux systèmes échantillonnées, l'équation devient:

$$X_s[k+1] = F_s X_s[k] + H_s[k] + H_{sv}[k] \tag{1-25}$$

$$F_s = \begin{bmatrix} \exp(-T/T_m) & T_e \cdot T_m / T_r (T_e - T_m) [\exp(-T/T_e) - \exp(-T/T_m)] \\ 0 & \exp(-T/T_e) \end{bmatrix}$$

$$H_s = \begin{bmatrix} T_m / T_r (T_e - T_m) [T_e (1 - \exp(-T/T_e)) - T_m (1 - \exp(-T/T_m))] \\ 1 - \exp(-T/T_e) \end{bmatrix}$$

$$H_{sv} = \begin{bmatrix} -T_m / T_r (1 - \exp(-T/T_m)) \\ 0 \end{bmatrix}$$

I-4-3-Détermination des coefficients de réglage:

De la structure (fig 1-8), nous constatons que le réglage de vitesse est similaire au réglage de courant .

Il est utilisé pour le dimensionnement des coefficients de réglage les mêmes méthodes .

Ce dimensionnement nécessite la connaissance de la constante de temps équivalente T_e . Elle est déterminée de la réponse indicielle du courant [10]: $T_e = 45 \text{ ms}$.

Sachant que la boucle de vitesse est très lente par rapport à celle du courant, la partie réelle des pôles est très proche de 1, soit [10]:

$$Z_{1,2} = 0.895 \pm j 0.094$$

$$Z_3 = 0.9$$

Et de la même manière que le réglage du courant ,on obtient [10]:

$$K^T = [2.67 \quad -2.03 \cdot 10^{-1} \quad -0.136]$$

$$K_w = 1.36 \quad ; \quad K_v = -0.796$$

I-4-4-Réponses indicielle:

La figure (1-10) montre la réponse indicielle par rapport à la

grandeur de consigne. On voit que la grandeur à régler $n[k]$ ne possède qu'un dépassement maximum de 4.2 % avec un temps de réponse de 440 ms ,le courant i atteint un maximum de 1.69 u.r .

La figure(1-11) donne l'allure de la réponse indicielle du système global fermé par rapport à une variation de la grandeur de perturbation, le dépassement maximum de la grandeur à régler $n[k]$ est de 3.8 % et celle du courant $i[k]$ est de 25 % qui se stabilise après 25 périodes d'échantillonnage, donc le courant s'adapte à la nouvelle valeur de la charge .

I-5-Conclusion:

Nous avons adopté dans ce chapitre la structure optimale pour le réglage par contre-réaction d'état du courant d'induit et de la vitesse du moteur. Ce réglage exige que toutes les grandeurs d'états du système à régler soient mesurables .

En pratique, il n'est pas toujours possible ,physiquement ou économiquement, d'installer tous les capteurs nécessaires pour mesurer les grandeurs d'états, on doit alors employer un observateur pour pouvoir les reconstruire .

Les chapitres qui suivent, seront consacrés à l'étude des observateurs suivi de leurs application au réglage d'état .

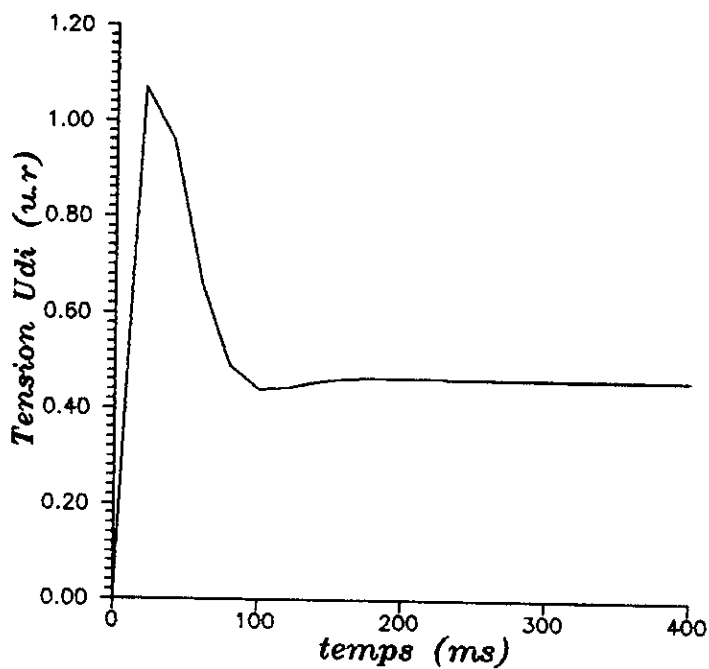
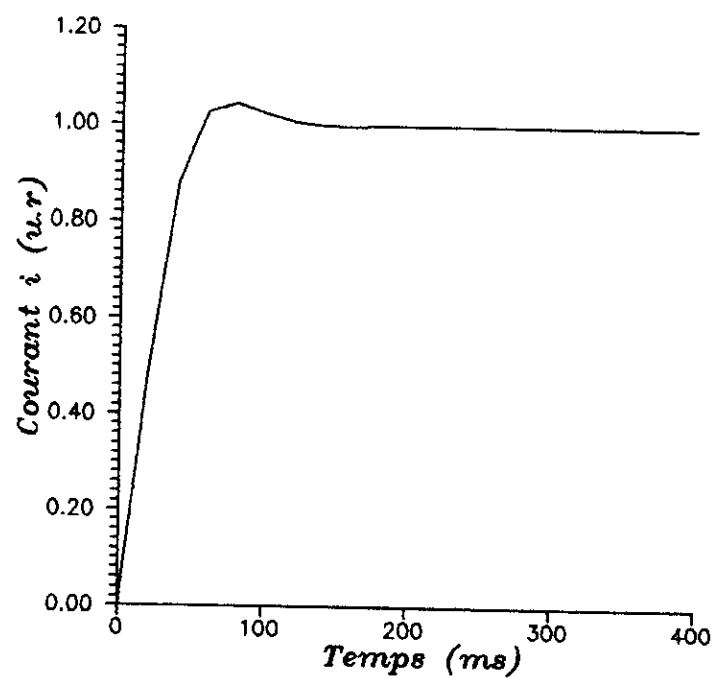


Fig 1.7 Reponse indicielle du reglage d'etat de la boucle de courant par rapport a la grandeur de consigne

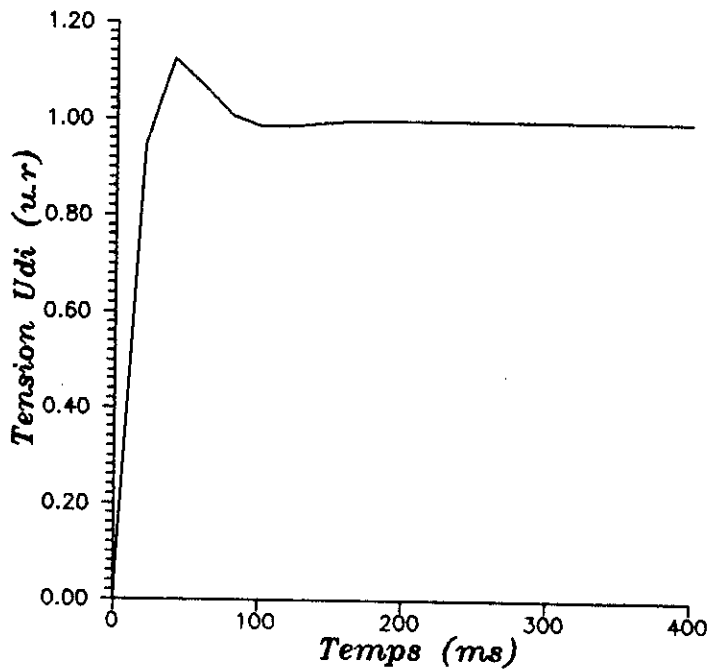
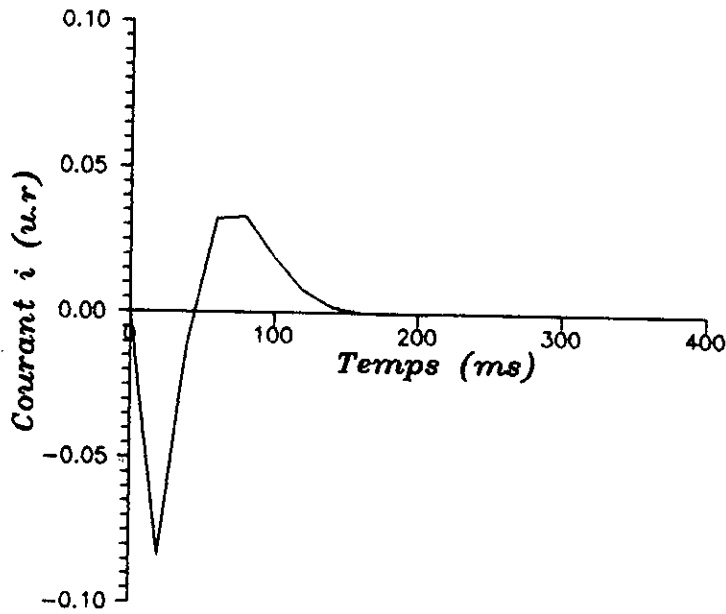


Fig 1.8 Reponse indicielle du reglage d'etat de la boucle de courant par rapport a la grandeur de perturbation

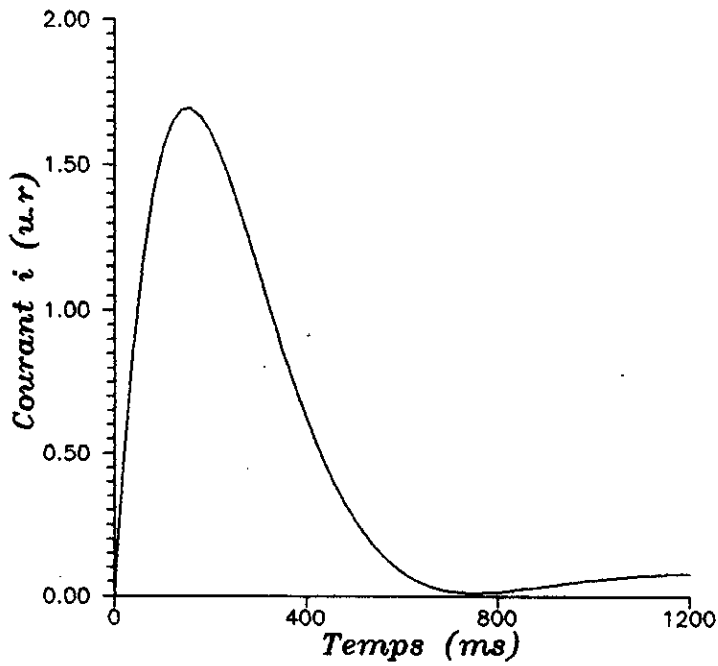
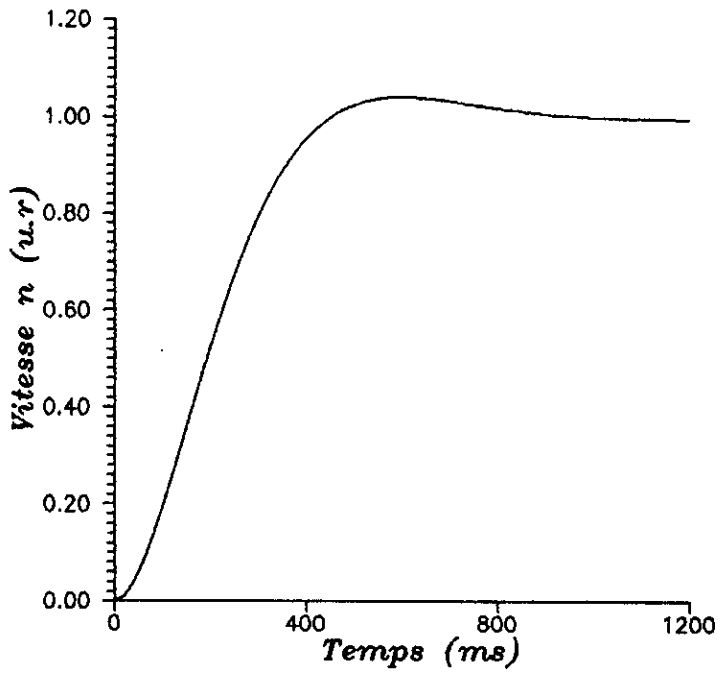


Fig 1.10 réponse indicielle du réglage d'état de la boucle de vitesse par rapport a la grandeur de consigne

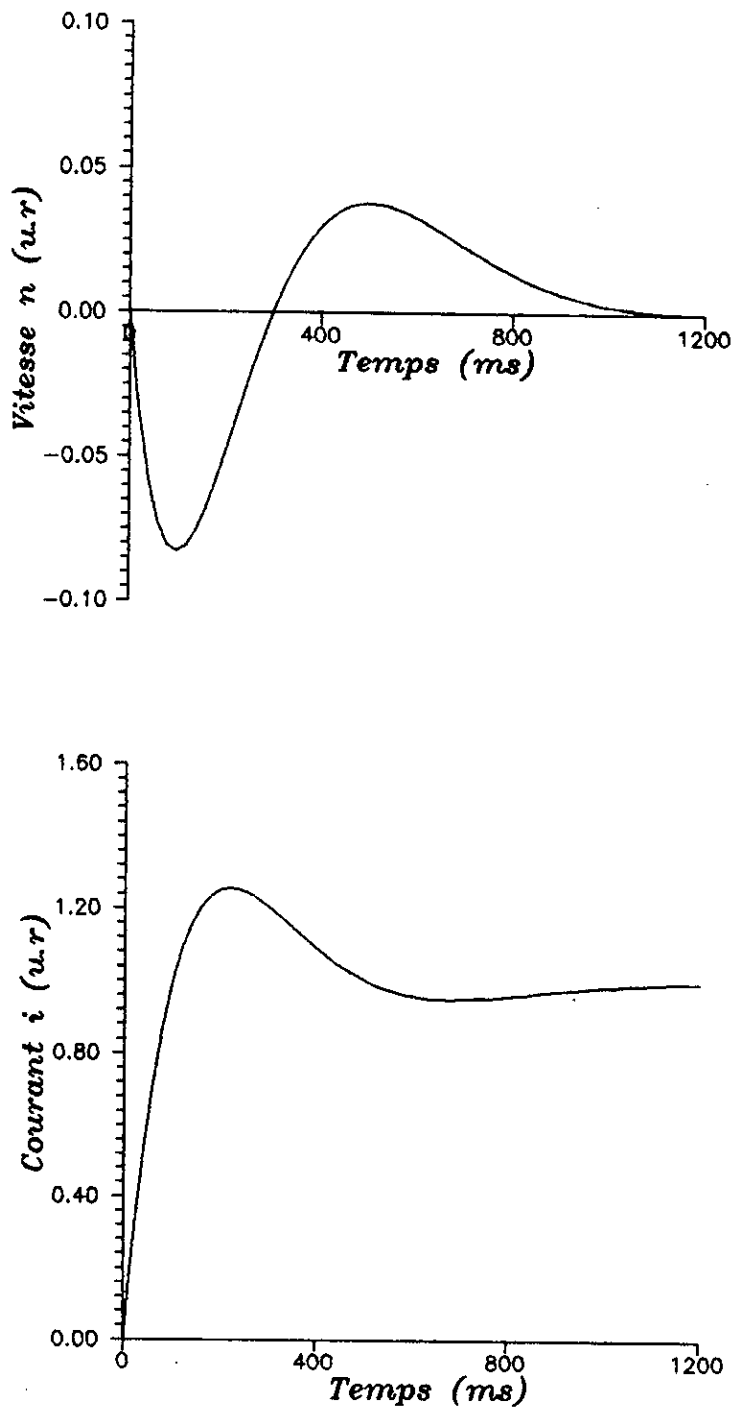


Fig 1.11 Réponse indicielle du réglage d'état de la boucle de vitesse par rapport à la grandeur de perturbation

OBSERVATEUR DE LUENBERGER

La reconstitution des états, non mesurables, d'un système peut se faire de deux façons :

La première méthode, c'est de construire un modèle du système et d'utiliser les états de ce modèle à la place des états réels. Cette méthode nécessite une identification parfaite et rapide pour pouvoir suivre les variations du système .

La deuxième, c'est par des différentielles successives des sorties, le vecteur d'état est reconstitué. Cette méthode évite les retards d'identification, mais introduit des problèmes de réalisation physique (réalisation des dérivateurs) .

Entre ces deux méthodes, on peut envisager une meilleur reconstruction des états du système d'une manière directe et rapide, en utilisant la théorie des observateurs de D.G.LUENBERGER [5] [6] [7] [8].

II-1-Structure de l'observateur de LUENBERGER :

La structure de l'observateur est la suivante [2] :

R: (n, s) .

II-1-2-Conditions d'existances du reconstructeur :

En régime stationnaire , on peut écrire [7] :

$$\forall x_s, u ; \text{ on a : } z = L x_s \quad (2-3)$$

$$\text{On peut donc écrire que } \forall k : z[k] = L x_s[k] + \epsilon[k] \quad (2-4)$$

avec ϵ tend vers 0 .

Soit le système à régler d'ordre n à m-entrées et s-sorties :

$$x_s[k+1] - F_s x_s[k] + H_s u[k] + H_{sv} v[k] \quad (2-5)$$

$$y[k] - C_s x_s[k] \quad (2-6)$$

La substitution de (2-4) dans (2-1,2-2) et (2-5,2-6) aboutit à:

$$(LA-FL-GCs)x_s[k] + (LHs-H_1)u[k] + (LHsv-H_2)v[k] + \epsilon[k+1] - F\epsilon[k] \quad (2-7)$$

D'où:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{On peut déduire les conditions d'existances :} & \\ \text{LFs-FL = GCs} & 2-8-a \\ \text{LHs = H}_1 & 2-8-b \\ \text{LHsv = H}_2 & 2-8-c \\ \text{\epsilon[k+1] = F\epsilon[k]} & 2-8-d \end{array} \right.$$

L'équation (2-8-a) est vérifiée si F_s et F n'ont pas de valeurs propres communes .

L'équation (2-8-d) permet de définir la dynamique du reconstructeur .

En régime établi ($\epsilon=0$) , nous aurons $\hat{x}=x_s$

$$\text{d'où : } QL+RCs = I \quad (2-10)$$

II-1-3-Détermination des matrices de l'observateur pour m=1:

La condition (2-10) montre que L est de dimension (n-1,n) donc l'observateur est d'ordre n-1 (ordre réduit) .

La matrice F est écrite sous sa forme compagne \tilde{F} de dimension $(n-1, n-1)$ [7] :

$$\tilde{F} = \begin{bmatrix} -f_{n-2} & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -f_{n-3} & 0 & 1 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -f_1 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 1 \\ -f_0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

LUENBERGER a proposé une solution simple, permettant de réaliser :

$$\tilde{L}\tilde{F}_s - \tilde{F}\tilde{L} - \tilde{G}\tilde{C}_s$$

avec :

$$\begin{cases} l_1 = -f_1 \\ g_k = f_{n-k-1} (a_{n-1} - f_{n-2}) - a_{n-k-1} + f_{n-k-2} & k=1..n-2 \\ g_{n-1} = -f_0(f_{n-2} - a_{n-1}) - a_0 \end{cases} \quad (2-11)$$

Les coefficients de \tilde{F} étant ceux du polynôme caractéristique de l'observateur :

$$f_{n-2}s^{n-2} + f_{n-3}s^{n-3} + \dots + f_1s + f_0$$

Le système étant linéaire unidimensionnel à n états, et observable, on peut trouver un observateur d'ordre n-1 dont la dynamique peut être choisie arbitrairement :

On a alors de l'équation (2-10) :

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ 1 & & \\ 0 & & \\ \vdots & & \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} ; R = \begin{bmatrix} 1 \\ f_{n-2} \\ \vdots \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

II-2-Structure générale de réglage avec Observateur :

La structure générale du réglage d'état avec observateur d'état est représentée par [2] :

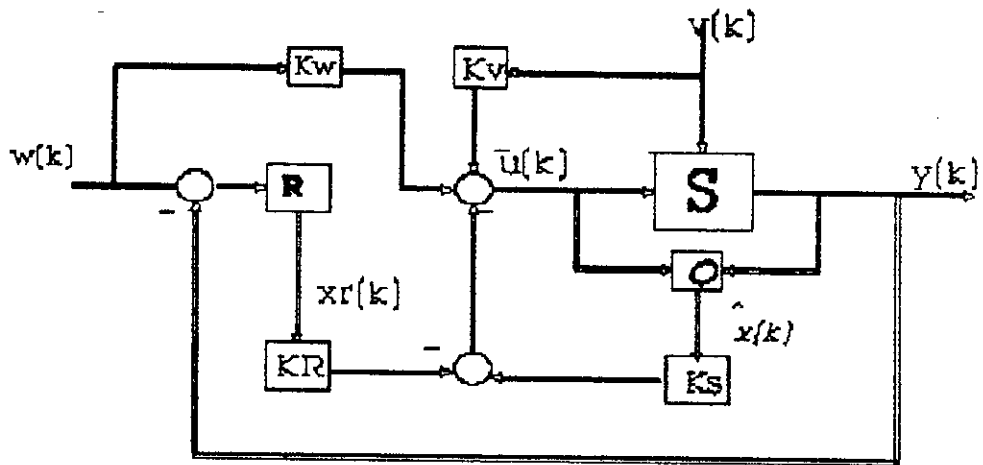


Figure 2.2 Structure de réglage avec observateur

Le vecteur de commande $u[k]$ et le vecteur de sortie $y[k]$ sont les entrées de l'observateur O qui fournit en sortie le vecteur $\hat{x}[k]$. Ce vecteur d'état est utilisé pour le réglage d'état par l'intermédiaire du bloc Ks . La perturbation $v[k]$ qui intervient au travers le bloc Kv n'est pas observée .

II-2-1-Systèmes d'équations :

pour le système à régler on a :

$$x_s[k+1] - F_s x_s[k] + H_s u[k] + H_{sv} v[k] \tag{2-13}$$

$$y[k] - C_s x_s[k] \tag{2-14}$$

Le régulateur intégrateur est décrit par la relation [2] :

$$x_R[k+1] - x_R[k] + w[k] - C_s x_s[k] \tag{2-15}$$

La grandeur de commande devient[2]:

$$u[k] = -K_s \hat{x}[k] + K_R x_R[k] + K_w w[k] - K_v v[k] \tag{2-16}$$

II-2-2-Equation d'état du système complet :

Transformons la relation (2-16) en exprimant $\hat{x}[k]$ en fonction de l'erreur d'observation :

$$\epsilon[k] = z[k] - L.x_s[k] \quad (2-17): \text{ erreur de l'observateur d'état}$$

$$e[k] = \hat{x}[k] - x_s[k] = Q.\epsilon[k] \quad (2-18): \text{ erreur de reconstruction}$$

On trouve :

$$u[k] = -K_s x_s[k] + K_R x_R[k] - K_o Q e[k] + K_v w[k] - K_v v[k] \quad (2-19)$$

Introduit dans (2-13) l'équation du système à régler devient:

$$x_s[k+1] = (F_s - H_s K_s) x_s[k] + H_s K_R x_R[k] - H_s K_o Q e[k] + H_s K_v w[k] + (H_{sv} - H_s K_v) v[k] \quad (2-20)$$

Pour le système complet , on introduit le vecteur d'état suivant : $x_c^T = [x_s \ x_r \ \epsilon]$

Les relations (2-20), (2-15) et (2-8-d) peuvent alors être réunies dans une seule équation d'état de la forme :

$$x_c[k+1] = F_c x_c[k] + H_{cw} w[k] + H_{cv} v[k] \quad (2-21)$$

avec les matrices juxtaposées :

$$F_c = \begin{bmatrix} F_s - H_s K_s & H_s K_R & -H_s K_o Q \\ -C_s & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & F \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

$$H_{cw} = \begin{bmatrix} H_s K_v \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad H_{cv} = \begin{bmatrix} H_{sv} - H_s K_v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

Pour le vecteur de sortie on obtient :

$$Y[k] = C_c x_c[k] \quad (2-24)$$

avec : $C_c^T = [C_s \ 0 \ 0]$

La matrice F_c peut être exprimée par :

$$F_c = \begin{bmatrix} F_g & H1 \\ 0 & F \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

On remarque que les valeurs propres du système global sont les racines de l'équation : $\det(\lambda I - F_g) \cdot \det(\lambda I - F) = 0$ (2-26)

Les n premières valeurs sont celles du système à régler, tandis que les $n-1$ secondes valeurs sont celles de l'observateur.

Ainsi, à partir de ces résultats, le principe de séparation peut être énoncer :

La commande par retour d'état et l'observateur peuvent être déterminés séparément .

II-3-Réglage avec observateur dans la boucle de courant:

II-3-1-Structure de réglage du courant:

La structure de réglage d'état avec observateur est la suivante:

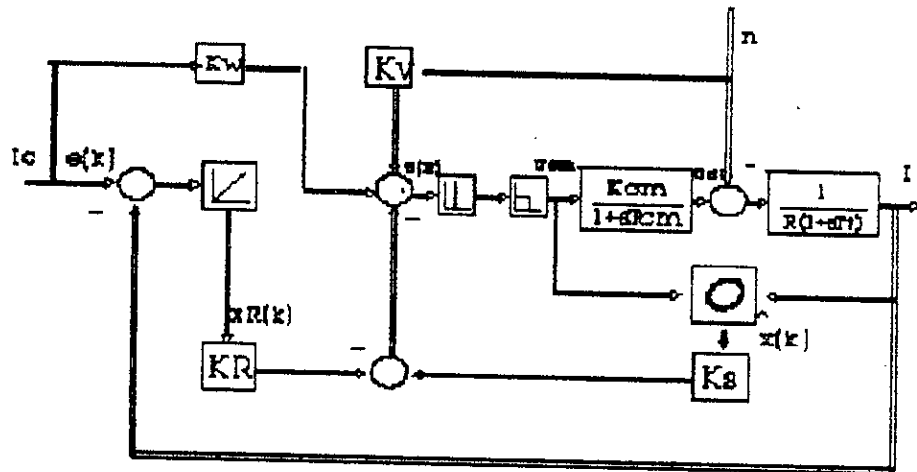


Figure 2.3 Structure de réglage d'état du courant avec observateur

II-3-2-Equation d'état du système global fermé:

L'équation d'état du système sans observateur est donnée par la relation suivante :

$$x[k+1] = F_c x[k] + K_{cw} I_c[k] + H_{cv} n[k] \tag{2-27}$$

Après l'introduction de l'observateur de Luenberger l'équation d'état du système global fermé devient :

$$x_c[k+1] = F_c x_c[k] + H_{cw} I_c[k] + H_{cv} n[k] \tag{2-28}$$

La matrice F_c et les vecteurs H_{cw} et H_{cv} sont données respectivement par les relations (2-22) et (2-23) .

$$x_c^T = [x_s \ x_r \ \epsilon] \text{ avec } x_s^T = [i \ u_d]$$

Lorsqu'on choisit un temps d'établissement fini pour le comportement dynamique de l'observateur, l'équation caractéristique de la matrice F doit avoir les pôles $Z_1 = 0$.

Les résultats du réglage obtenus au chapitre I sont utilisés.

II-3-3-Réponses indicielles:

La figure (2-4) représente l'influence de la grandeur de consigne $I[k]$, l'allure obtenue est identique à celle trouvée pour le réglage d'état sans observateur .

La figure (2-5) donne la réponse indicielle par rapport à la grandeur de perturbation , la sortie $I[k]$ est pratiquement la même que celle obtenue dans le réglage sans observateur .

II-3-4-Réglage de la boucle de vitesse:

Etant donné que les résultats du réglage avec observateur dans la boucle de courant sont pratiquement les mêmes que ceux trouvées dans le réglage sans observateur ,donc le réglage de la boucle de vitesse sera identique à celui du réglage de la vitesse étudié auparavant (la constante équivalente $T_e=45$ ms).

II-4-Réglage avec Observateur dans la boucle de vitesse:

Dans ce paragraphe , on mettra notre observateur dans la boucle externe seulement , le réglage de courant est sans observateur .

II-4-1-Réglage du courant d'induit:

Les résultats obtenues au paragraphe (I-3) sont valables .

II-4-2-Structure de réglage de la vitesse:

La structure de réglage de la vitesse avec observateur est la suivante :

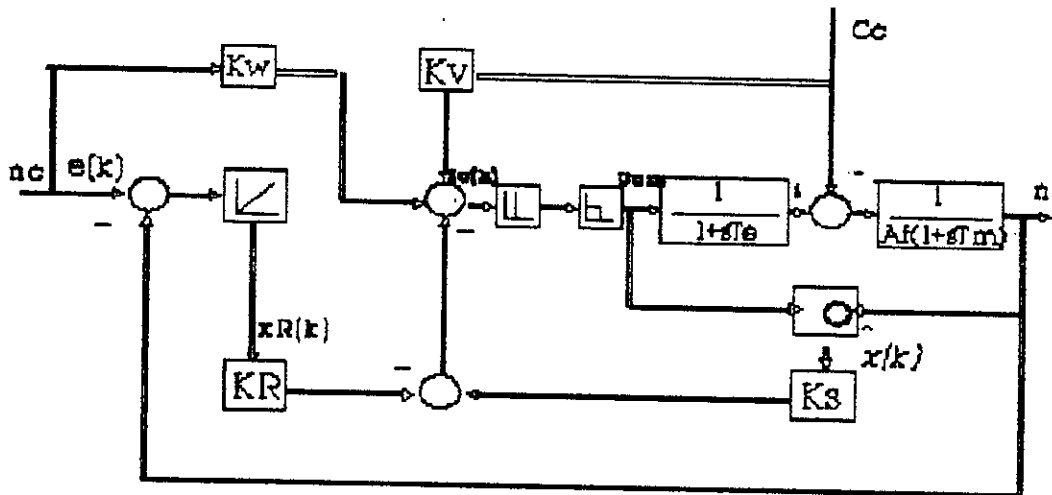


Figure 2.6 Structure de réglage d'état de la vitesse avec observateur

II-4-3 Equation d'état du système global fermé:

L'équation d'état du système global fermé est de la forme :

$$x_c[k+1] = F_c x_c[k] + H_{cw} n_c[k] + H_{cv} C_c[k] \quad (2-29)$$

avec $x_c^T = [x_s \ x_r \ \epsilon]$ $x_s^T = [n \ i]$

La matrice F_c et les vecteurs H_{cw} et H_{cv} dont données respectivement par les relations (2-22) et (2-23) .

Pour la détermination des matrices intervenant dans le réglage avec observateur, on procède de la même façon que dans le cas du réglage du courant avec observateur .

II-4-4-Réponses indicielles:

La figure (2-7) donne la réponse indicielle par rapport à la grandeur de consigne .

La figure (2-8) donne la réponse indicielle sous l'influence

d'une perturbation .On voit que les réponses sont identiques à ceux trouvées sans observateur (chap I) ,donc même remarque faite pour le réglage du courant avec observateur .

Cela veut dire que l'observateur de LUENBERGER n'influt pas sur le comportement du sysytème à régler .

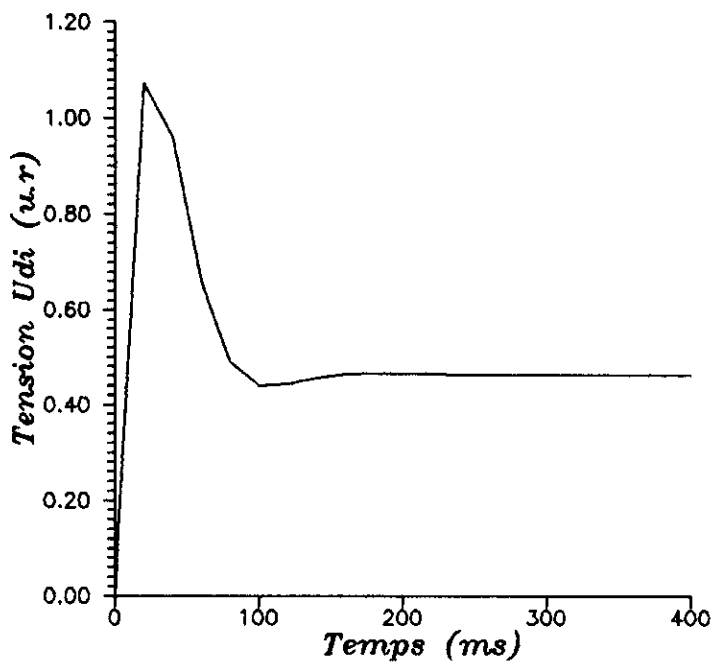
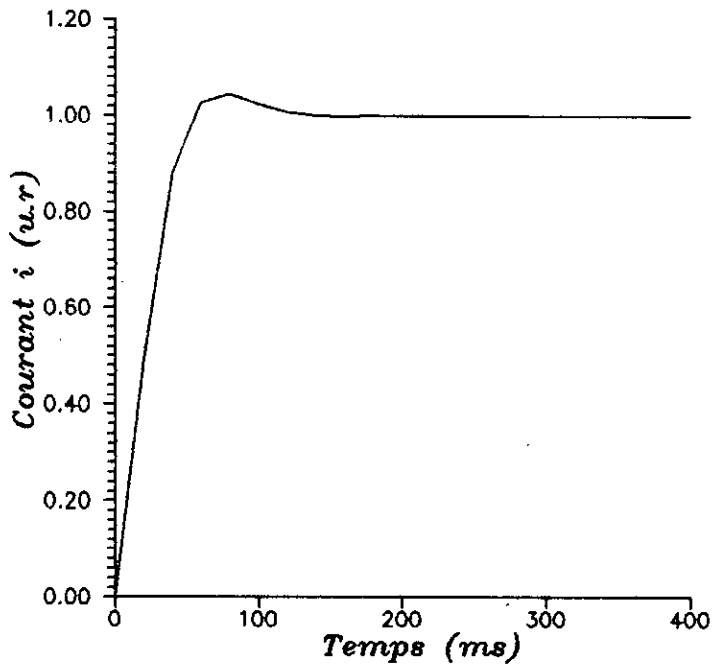


Fig 2.4 Reponse indicielle du reglage avec observateur de Luenberger de la boucle de courant par rapport a la grandeur de consigne

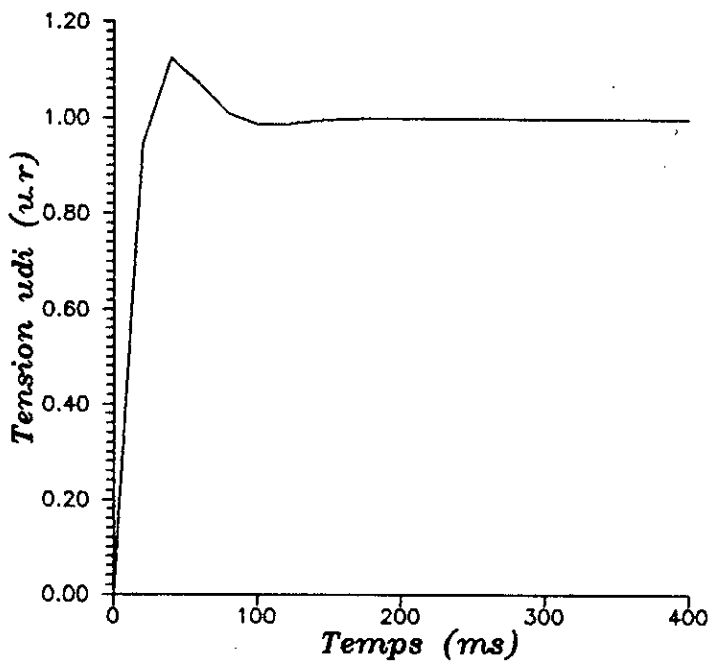
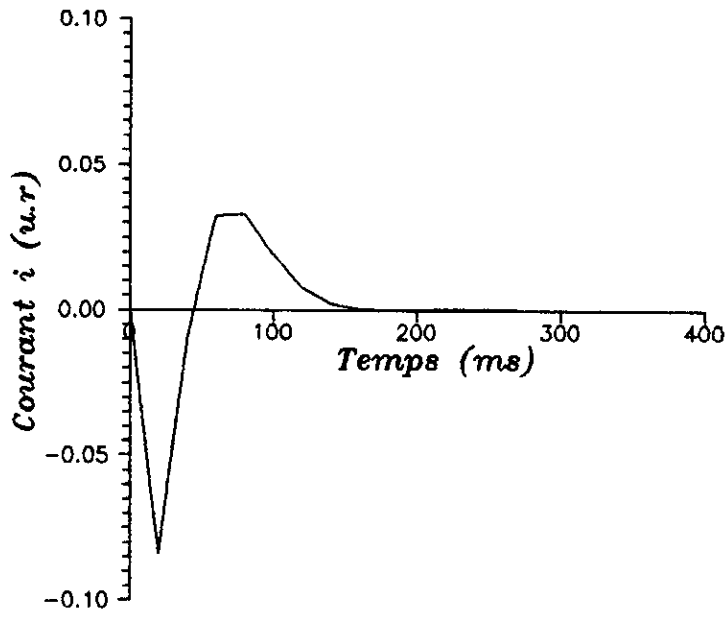


Fig 2.5 Reponse indicielle du reglage avec observateur de Luenberger de la boucle de courant par rapport a la grandeur de perturbation

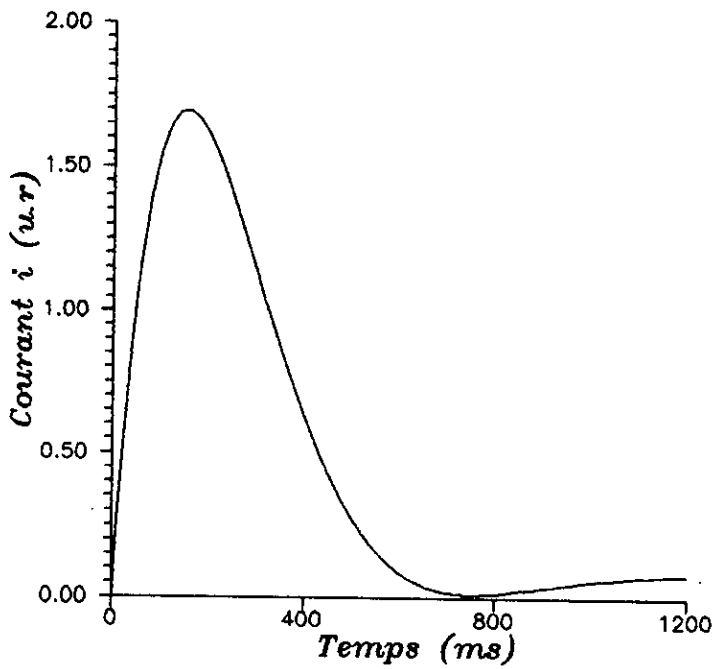
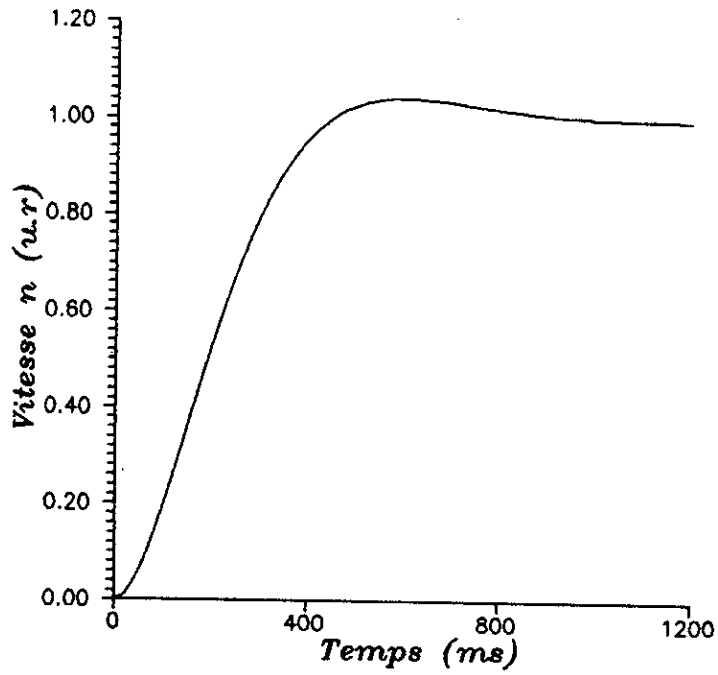


Fig 2.7 Reponse indicielle du reglage avec observateur de Luenberger de la boucle de vitesse par rapport a la grandeur de consigne

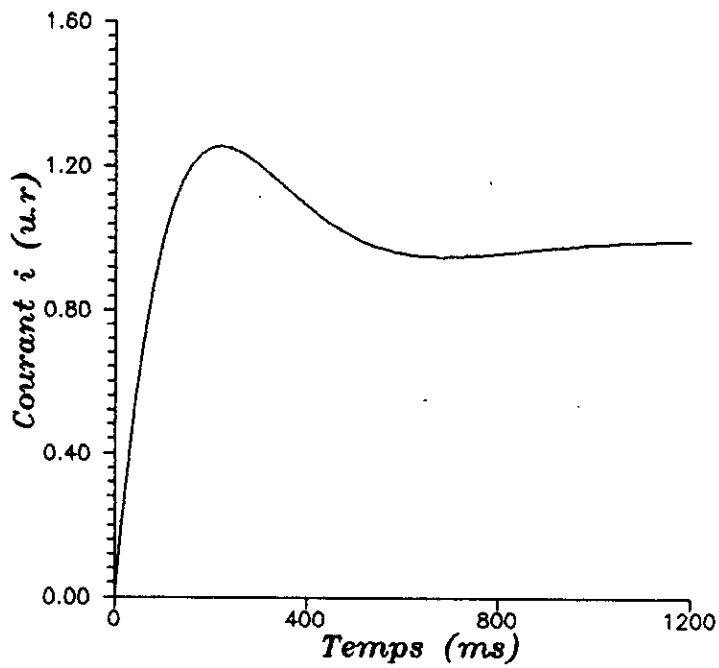
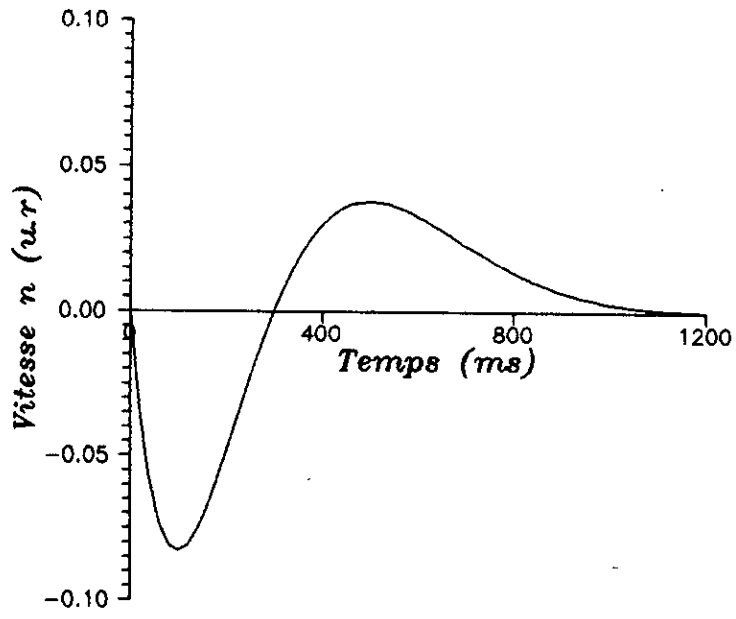


Fig 2.8 Reponse indicielle du reglage avec observateur de Luengerger de la boucle de vitesse par rapport a la grandeur de perturbation

ESTIMATEUR D'ETAT DE KALMAN

Comme les variables d'états ne sont en général pas disponibles, il est nécessaire de les reconstruire à l'aide d'un observateur pour pouvoir mettre en œuvre le réglage d'état, ceci nécessite évidemment que le système soit observable, et peut être effectué en calculant une estimation du vecteur d'état qui se comporterait comme un processus auxiliaire soumis aux signaux d'entrées et aux sorties du processus principale .

III-1-Structure de l'estimateur d'état de KALMAN:

La structure d'un estimateur d'état avec celle du système à régler est la suivante [4]:

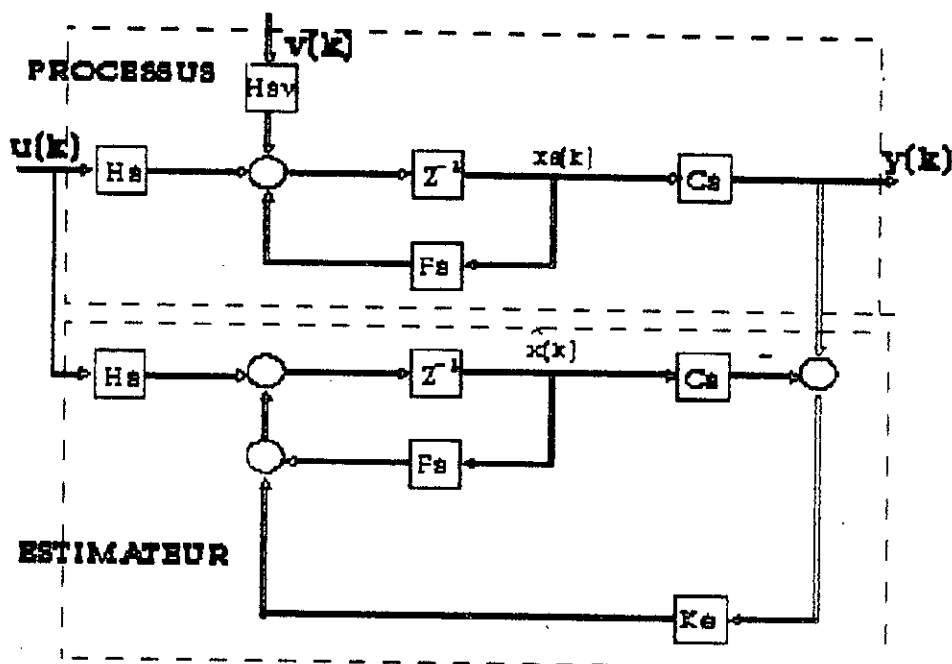


Figure 3.1 Diagramme structurel de l'estimateur d'état de KALMAN

III-1-1-Systèmes d'équations:

De la structure fig(3-1) ,l'estimateur d'état est donné par l'équation suivante [4] [9] :

$$\hat{x}[k] = F_s \hat{x}[k-1] + H_s u[k-1] + K_e (y[k] - \hat{y}^*[k]) \quad (3-1)$$

$$\hat{y}^*[k] = C_s (F_s \hat{x}[k-1] + H_s u[k-1]) \quad (3-2)$$

Par cet estimateur, on veut donc ,à l'instant k, estimer la valeur $\hat{x}[k]$ de $x[k]$ à l'aide des informations disponibles à l'instant k avant cette estimation ,soit avec $y[k]$, $u[k]$ et $\hat{x}[k-1]$.

Le terme correctif K_e est introduit pour les raisons suivantes:

- L'existence des bruits.
- Les mesures sont non-parfaitements précises.
- Les matrices F_s , H_s et les conditions initiales sont généralement non-parfaitement connues.

Soit le système a régler siuivant:

$$x_s[k+1] = F_s x_s[k] + H_s u[k] + H_{sv} v[k] \quad (3-3)$$

$$y[k] = C_s x_s[k] \quad (3-4)$$

En faisant la soustraction (3-3)-(3-1); on obtient l'erreur d'estimation:

$$\hat{e}[k+1] = (F_s - K_e C_s F_s) \hat{e}[k] + (H_{sv} - K_e C_s H_{sv}) v[k] \quad (3-5)$$

avec : $\hat{e}[k] = x_s[k] - \hat{x}[k]$

On voit que l'erreur d'estimation dépend du vecteur de perturbation $v[k]$.

En régime établi ,on a:

$$\hat{e}[k+1] = \hat{e}[k] = \hat{e}_\infty \text{ et } v[k] = v^\infty .$$

Ainsi ,on trouve :

$$\hat{\epsilon}_n = (1 - F_s)^{-1} H_s v_n \quad (3-6)$$

avec : $F_s = F_s - K_s C_s F_s$ et $H_s = H_{sv} - K_s C_s H_{sv}$

L'erreur d'estimation ne s'annule donc pas en régime établi et par conséquent, il n'est pas possible d'observer correctement le vecteur d'état du système à régler.

III-1-2-Détermination du gain K_e :

En général, on choisira les pôles, c.à.d les valeurs propres de l'observateur tous à l'origine [2] donc :

$$Z_1 = 0 \quad \text{ou bien} : \beta_1 = 0 \quad (3-7)$$

Ce choix garantit un temps d'établissement fini et l'erreur d'observation s'annule le plus rapidement possible.

Les coefficients du gain sont donnés [2] [4] [7] :

$$K_e T = T^{-1} K_{e0} \quad (3-8)$$

où $K_{e0i} = \beta_1 - a_i \quad i = 1..n$

La matrice T est défini par [2]:

$$T_n = C_s$$

$$T_i = T_{i+1} F_s + a_{i-1} T_n \quad i = 1..n-1.$$

III-2-Structure générale de réglage avec Estimateur d'état:

La structure de réglage d'état avec estimateur d'état de Kalman est la même structure représentée à la figure (2-2).

III-2-1-Equations d'états du système complet:

Pour le système à régler on a:

$$x_s[k+1] = F_s x_s[k] + H_s u[k] + H_{sv} v[k] \quad (3-9)$$

$$y[k] = C_s x_s[k] \quad (3-10)$$

Le régulateur intégrateur et la grandeur de commande sont donnés respectivement par les relations (2-15) et (2-16).

Transformons la relation (2-16) en exprimant $\hat{x}[k]$ par $x_s[k] - \hat{\epsilon}[k]$, on trouve:

$$u[k] = -K_s x_s[k] + K_R x_R[k] + K_e \hat{\epsilon}[k] - K_v v[k] \quad (3-11)$$

Introduit dans (3-9), l'équation d'état du système à régler devient:

$$x_s[k+1] = (F_s - H_s K_s) x_s[k] + H_s K_R x_R[k] + H_s K_s \hat{e}[k] + H_s K_w w[k] + (H_{sv} - H_s K_v) v[k] \quad (3-12)$$

Pour le système complet, on introduit le vecteur d'état suivant: $x_c^T = [x_s \ x_r \ \hat{e}]$..

On réunit les relations (3-12), (2-15) et (3-5) dans une seule équation d'état de la forme:

$$x_c[k+1] = F_c x_c[k] + H_{cw} w[k] + H_{cv} v[k] \quad (3-13)$$

avec les matrices juxtaposées:

$$F_c = \begin{bmatrix} F_s - H_s K_s & H_s K_R & H_s K_s \\ -C_s & 1 & 0 \\ 0 & 0 & F_e \end{bmatrix}; \quad H_{cw} = \begin{bmatrix} H_s K_w \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$H_{cv} = \begin{bmatrix} H_{sv} - H_s K_v \\ 0 \\ H_e \end{bmatrix} \quad \text{avec : } F_e = F_e - K_e C_e F_e \\ \text{et} \quad H_e = H_{ev} - K_e C_e H_{ev}$$

Pour le vecteur de sortie, on obtient:

$$Y[k] = C_c x_c[k] \\ \text{avec : } C_c = [C_s \ 0 \ 0 \ 0]$$

La matrice F_c peut être exprimé par:

$$F_c = \begin{bmatrix} F_G & F_{es} \\ 0 & F_e \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

Les $2n$ valeurs propres du système global sont les racines de l'équation : $\det(\lambda I - F_G) \cdot \det(\lambda I - F_e) = 0$.

Les n premières valeurs propres sont celles du système à régler, les n secondes valeurs propres sont celles de l'estimateur d'état, ainsi le principe de séparation sera appliqué .

III-3-Réglage avec Estimateur dans la boucle de courant:**III-3-1-Structure de réglage du courant:**

La structure de réglage d'état du courant avec estimateur d'état est la même structure utilisée au paragraphe (II-4-1) figure (2.3) .

III-3-2-Equation d'état du système global fermé:

L'équation d'état du système global fermée (3-13) devient:

$$\text{où } x_c^T = [x_s \ x_r \ \hat{e}] \quad \text{et} \quad x_s^T = [i \ u_{di}]$$

$$x_c[k+1] = F_c x_c[k] + H_{cv} I_c[k] + H_{cv} n[k]$$

Lorsqu'on choisit les pôles tous nuls (3-7) ,on trouve alors [10]:

$$K_e = [0.759 \quad 1.93 \cdot 10^{-6}]$$
III-3-3-Réponses indicielles:

La figure (3-2) donne la réponse indicielle du réglage d'état avec estimateur d'état de Kalman par rapport à la grandeur de consigne, les courbes obtenues sont similaires à ceux trouvées pour le réglage d'état .

La figure (3-3) représente la réponse indicielle du réglage avec estimateur par rapport à la grandeur de perturbation, la grandeur à régler $I[k]$ atteint un minimum de $9.69 \cdot 10^{-2}$ u.r , la grandeur d'état u_{di} atteint son régime établi après 8 périodes d'échantillonnages avec un dépassement de 2.7 % et un temps de réponse de 70 ms.

III-3-4-Réglage de la vitesse:

Les réponses indicielles de la boucle de courant par rapport à la grandeur de consigne sont identiques à ceux du réglage sans observateurs, donc le réglage de la boucle de vitesse sans observateur le sera aussi.

III-4-Réglage avec Estimateur dans la boucle de vitesse:

Dans ce paragraphe ,on placera l'estimateur dans la boucle de vitesse.

III-4-1-Réglage du courant:

Le réglage du courant se fera sans observateurs , donc les résultats obtenues au chapitre I seront valables.

III-4-2-Structure de réglage de la vitesse:

La structure de réglage avec estimateur d'état est la même structure utilisée au paragraphe (II-5-1) figure (2-4).

III-4-3-Equations d'états du système global fermé:

L'équation d'état du système global (3-15) devient:

$$x_c[k+1] = F_c x_c[k] + H_{cv} n_c[k] + H_{cv} C_c[k]$$

où : $x_c^T = [x_s \ x_r \ \dot{e}]$ et $x_s^T = [n \ i]$

Et de la même façon que dans la cas du réglage du courant avec estimateur ,on trouve [10] :

$$K_e = [1.63 \ 12.57]$$

III-4-4-Réponses indicielles:

La figure (3-4) représente l'influence de la grandeur de consigne $n_c[k]$, l'allure qu'on obtient est pratiquement la même que dans la cas du réglage sans observateur .

La figure (3-5) donne la réponse indicielle du vecteur d'état $[n \ i]^T$ lors d'une variation de la grandeur de perturbation, la vitesse $n[k]$ atteint un minimum de $8.82 \cdot 10^{-2}$ u.r, le courant $i[k]$ répond a 112 ms avec un dépassement de 21 % et se stabilise après 50 périodes d'échantillonnage .

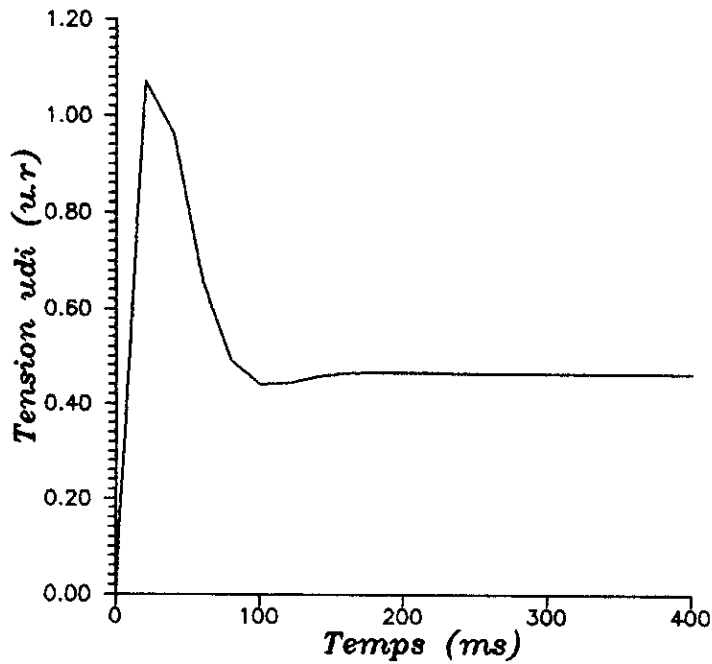
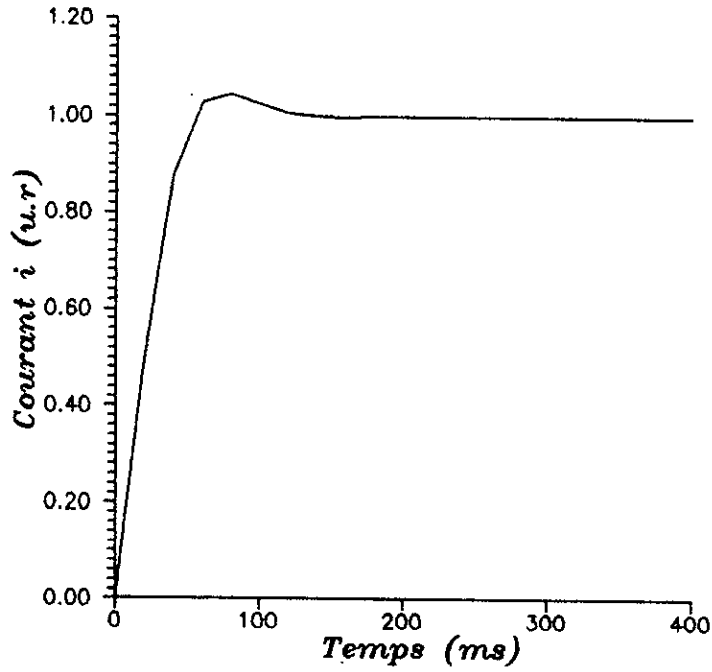


Fig 3.2 Reponse indicielle du reglage avec estimateur d'etat de la boucle de courant par rapport a la grandeur de consigne

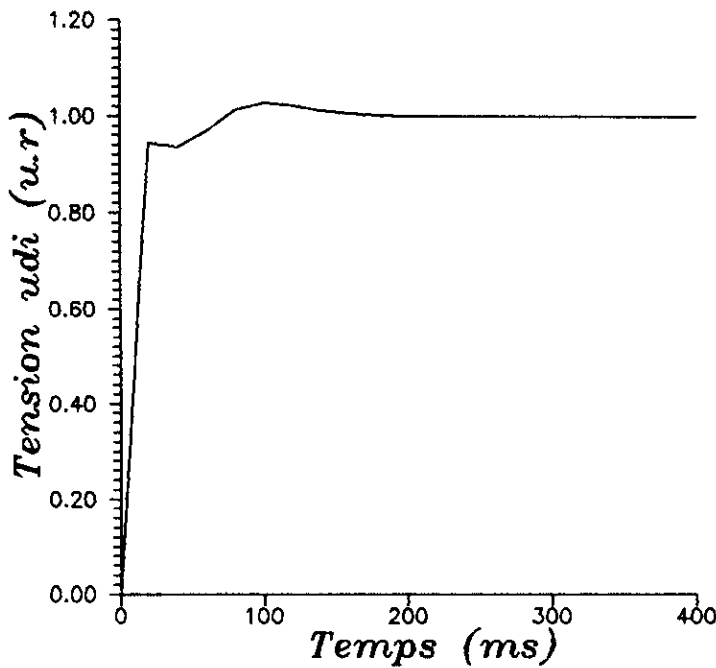
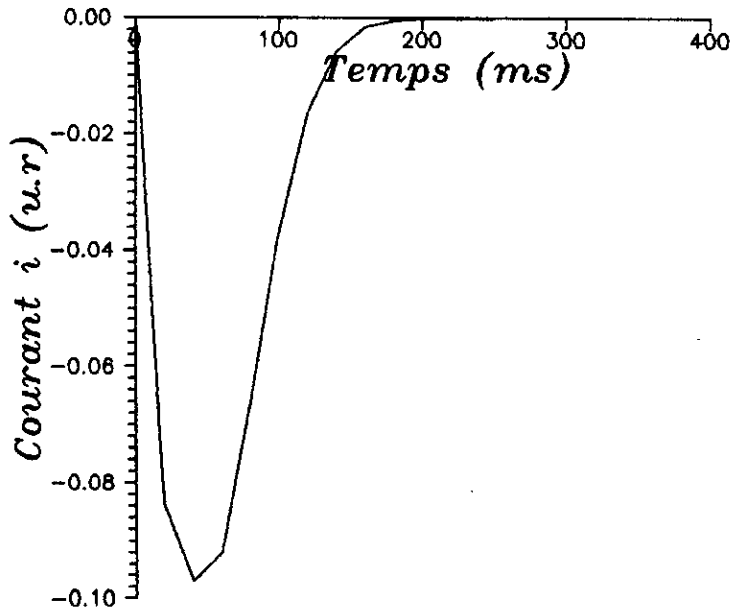


Fig 3.3 Reponse indicielle du reglage avec estimateur d'etat de la boucle de courant par rapport a la grandeur de perturbation

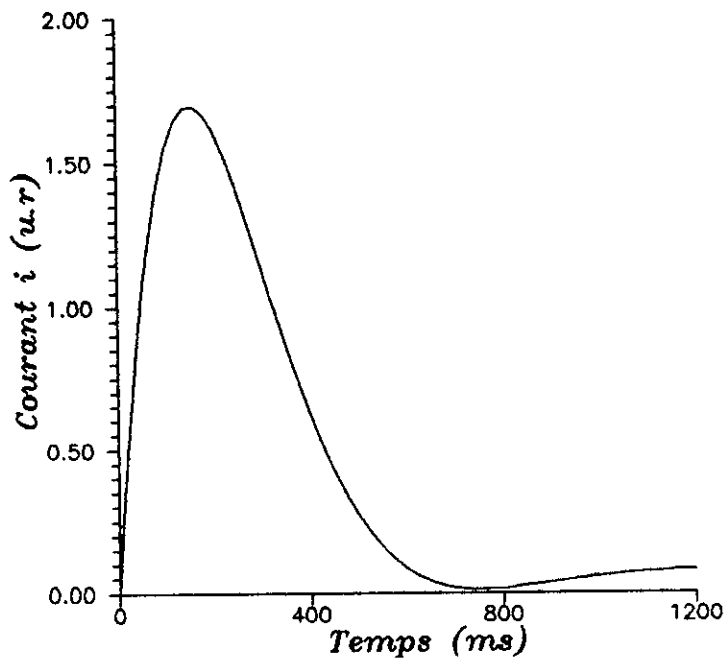
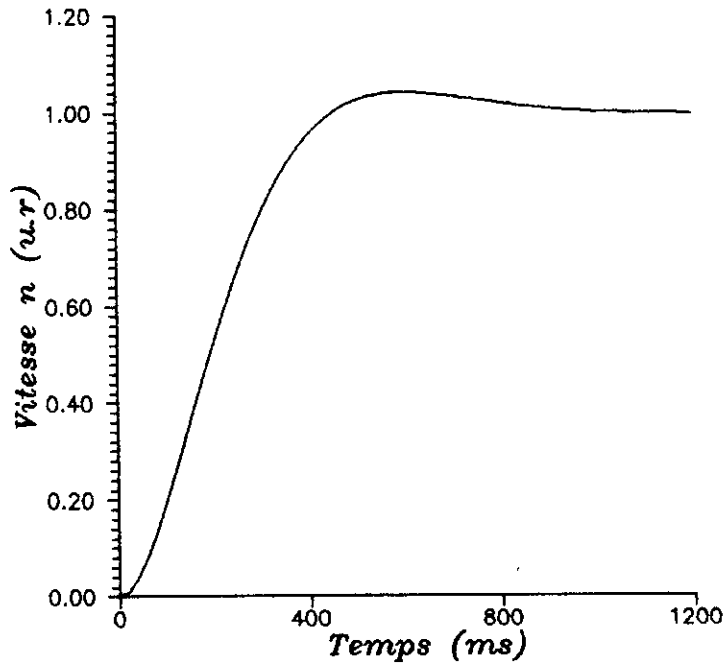


Fig 3.4 Reponse indicielle du reglage avec estimateur d'etat de la boucle de vitesse par rapport a la grandeur de consigne

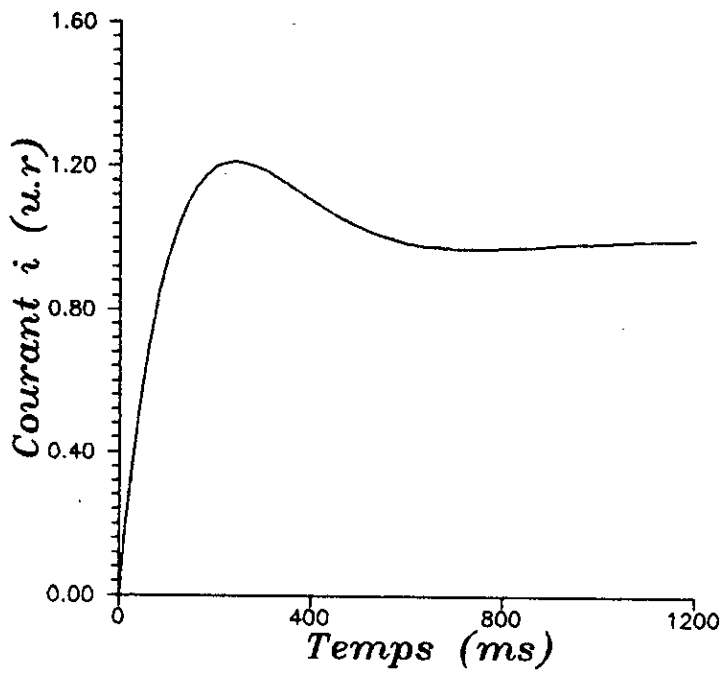
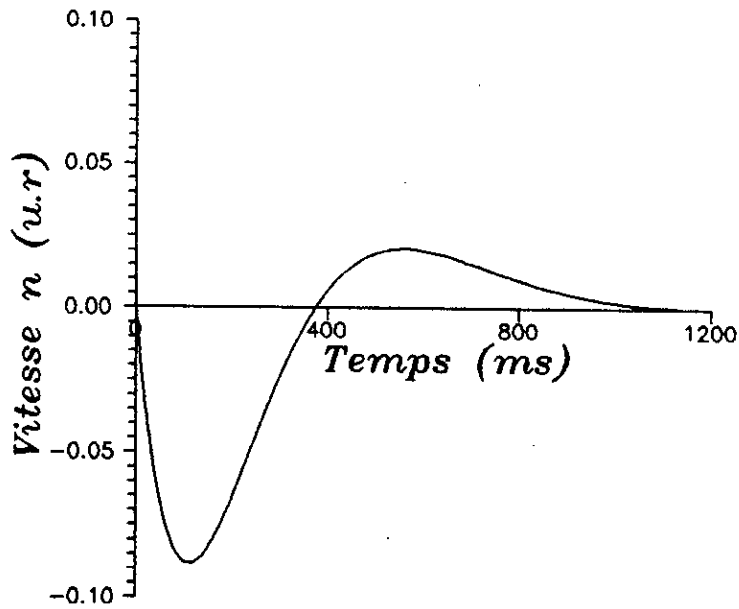


Fig 3.5 Reponse indicielle du reglage avec estimateur d'état de la boucle de vitesse par rapport a la grandeur de perturbation

PREDICTEUR D'ETAT DE KALMAN

Lorsque à l'instant k l'information $y [k]$ n'est pas disponible on utilisera un prédicteur d'état qui aura comme entrées la commande u et la sortie y .

IV-1-Structure du prédicteur d'état de Kalman:

La structure d'un prédicteur d'état avec celle du système à régler est la suivante[4]:

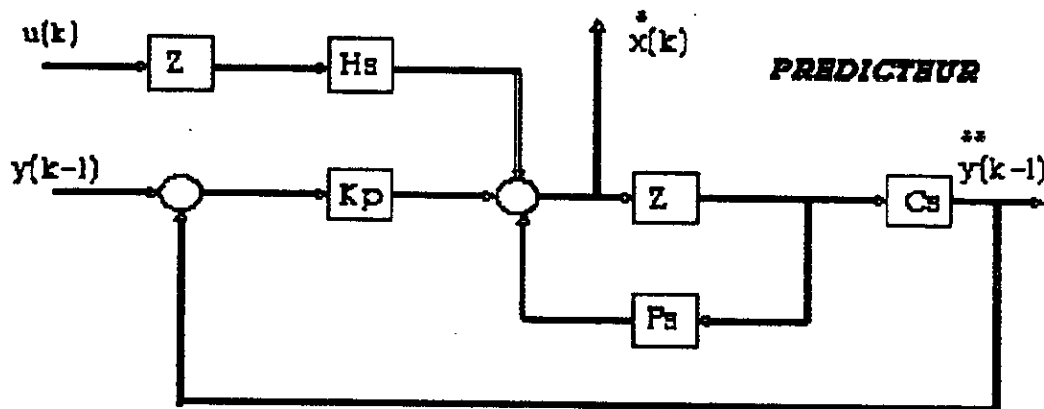


Figure 4.1 Diagramme structurel d'un prédicteur d'état de KALMAN

IV-1-1-Systèmes d'équation:

De la structure figure (4-1), le vecteur d'état du prédicteur sera de la forme [4] [9] :

$$x^*[k] - F_s x^*[k-1] + H_s u[k-1] + K_p (y[k-1] - y^{**}[k-1]) \quad (4-1)$$

$$\text{avec : } y^{**}[k-1] - C_s x^*[k-1] \quad (4-2)$$

$y^{**}[k-1]$ est la meilleure prédiction que l'on peut faire de la sortie à l'instant k à partir de $x^*[k-1]$.

Par ce prédicteur; on veut donc, à l'instant k prédire la valeur $x^*[k]$ de $x[k]$ à l'aide des informations disponibles à l'instant précédente i.e: $u[k-1]$, $y[k-1]$ et $x^*[k-1]$.

Et pour les mêmes raisons citées pour l'estimateur, le terme correctif K_p est introduit.

Soit le système à régler décrit par les équations d'états:

$$x_s[k+1] - F_s x_s[k] + H_s u[k] + H_{sv} v[k] \quad (4-3)$$

$$y[k] - C_s x_s[k] \quad (4-4)$$

L'erreur de prédiction est obtenue en faisant la soustraction (4-3)-(4-1), on trouve alors :

$$e^*[k+1] - (F_s - K_p C_s) e^*[k] + H_{sv} v[k] \quad (4-5)$$

$$\text{avec : } e^*[k] - x_s[k] - x^*[k]$$

En régime établi, on a:

$$e^*[k+1] = e^*[k] = e^*_{\infty} \quad \text{et} \quad v[k] = v_{\infty}$$

Ainsi, on trouve:

$$e^*_{\infty} = (1 - F_p)^{-1} H_{sv} v_{\infty} \quad (4-6)$$

$$\text{avec : } F_p = F_s - K_p C_s$$

On voit que l'erreur de prédiction ne s'annule pas en régime établi, et par conséquent, il n'est pas possible d'observer correctement le vecteur d'état du système à régler.

IV-1-2-Détermination du gain K_p :

Les coefficients du vecteur K_p sont déterminés de la même

façon que dans le cas de l'estimateur d'état [2] [4] [7]:

$$K_{pT} = T^{-1}K_{p0} \quad (4-7)$$

avec : $K_{p0i} = \beta_i - a_i \quad i = 1..n-1$

IV-2-Structure générale de réglage avec prédicteur d'état:

La structure de réglage avec prédicteur d'état de Kalman est la même structure représentée à la figure (2-2).

IV-2-1-Equation d'état du système complet:

Pour le système à régler on a:

$$x_s[k+1] = F_s x_s[k] + H_s u[k] + H_{sv} v[k] \quad (4-8)$$

$$y[k] = C_s x_s[k] \quad (4-9)$$

Le régulateur intégrateur et la grandeur de commande sont donnés respectivement par les relations (2-15) et (2-16).

En exprimant $x^*[k]$ en fonction de l'erreur de prédiction et en introduisant (2-15) dans (4-8), on obtient:

$$x_s[k+1] = (F_s - H_s K_s) x_s[k] + H_s K_R x_R[k] + H_s K_e e^*[k] + H_s K_w w[k] + (H_{sv} - H_s K_v) v[k] \quad (4-10)$$

Le système complet , sera décrit par le vecteur d'état suivant:

$$x_c^T = [x_s \ x_r \ e^*]$$

On réunit les relations (4-10), (4-5) et (2-15) dans une seule équation d'état de la forme:

$$x_c[k+1] = F_c x_c[k] + H_{cw} w[k] + H_{cv} v[k] \quad (4-11)$$

avec les matrices juxtaposées:

$$F_c = \begin{bmatrix} F_s - H_s K_s & H_s K_r & H_s K_e \\ -C_s & 1 & 0 \\ 0 & 0 & F_p \end{bmatrix} ; H_{cw} = \begin{bmatrix} H_s K_w \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$H_{cv} = \begin{bmatrix} H_{sv} - H_s.K_v \\ 0 \\ \dots \\ H_{sv} \end{bmatrix} \quad F_p = F_s - K_p.C_s$$

Le vecteur de sortie est de la forme:

$$Y[k] - C_c x_c[k] \\ \text{avec : } C_c = [C_s \ 0 \ 0 \ 0]$$

La matrice Fc peut s'exprimer par:

$$F_c = \begin{bmatrix} F_g & H_{ps} \\ \dots & \dots \\ 0 & F_p \end{bmatrix} \quad (4-12) \quad ; \quad H_{ps} = \begin{bmatrix} H_s.K_s \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les 2n valeurs propres du système globale sont les racines de l'équation : $\det(\lambda I - F_g) \cdot \det(\lambda I - F_p) = 0$

Les n premières valeurs sont celles du système à régler, les n secondes valeurs propres sont celles du prédicteur d'état, ainsi le principe de séparation sera utilisé.

IV-3-Réglage de la boucle de courant avec prédicteur d'état:

IV-3-1-Structure de réglage du courant:

La structure de réglage d'état du courant avec prédicteur d'état de Kalman est celle présentée à la figure (2-3).

IV-3-2-Equation d'état du système global fermé:

L'équation (3-13) devient:

$$x_c[k+1] - F_c x_c[k] + H_{cv} I_c[k] + H_{cv} n[k]$$

où : $x_c^T = [x_s \ x_r \ e^*]$

Si on choisit les pôles du prédicteur tous à l'origine ,on trouve [10]:

$$K_p = [0.759 \ 1.93 \ 10^{-6}]$$

IV-3-3-Réponses indicielles:

La réponse indicielle par rapport à la grandeur de consigne est représentée à la figure (4-2), son allure est identique à celle du réglage sans observateur .

La figure (4-3) donne la réponse indicielle par rapport à la grandeur de perturbation, la grandeur $i[k]$ possède un minimum de 0.413 u.r, la tension u_{di} se stabilise après 9 périodes d'échantillonnages, avec un dépassement de 15.5 % et un temps de réponse de 72 ms .

Donc ,le prédicteur d'état n'influt pas beaucoup sur le comportement du système à régler .

IV-3-4-Réglage de la vitesse:

On utilisera dans ce paragraphe le réglage d'état de la vitesse sans observateurs ,car les résultats de la boucle de courant nous donnent la même constante équivalente ($T_e=45ms$).

IV-4-Reglage de la boucle de vitesse avec prédicteur:

Le prédicteur est placé dans la bouclé de vitesse.

IV-4-1-Réglage du courant:

Les réponses obtenues au paragraphe (I-3), sont utilisés dans cette partie.

IV-4-2-Structure de réglage de la vitesse:

La structure de réglage de la vitesse avec le prédicteur d'état est représentée à figure (2-4).

IV-4-3-Equation d'état du système global fermé:

L'équation (3-13) devient:

$$x_c[k+1] = F_c x_c[k] + H_{cw} n_c[k] + H_{cw} C_c[k]$$

avec : $xc^T = [x_s \ x_r \ e^*]$

Si on choisit , les pôles tous nuls, on obtient [10] :

$$K_p = [1.63 \ 12.57]$$

IV-4-4-Réponses indicielles:

La réponse indicielle par rapport à la grandeur de consigne $nc[k]$ est représentée à la figure (4-4), son allure est identique au réglage d'état sans observateurs .

La figure (4-5) donne la réponse indicielle par rapport à la grandeur de perturbation, le dépassement du courant est de 19.2% avec un temps de réponse de 123 ms et se stabilise après 32 périodes d'échantillonnage , la grandeur à régler $n[k]$ a un maximum de $1.17 \cdot 10^{-2}$, et un minimum de $9.72 \cdot 10^{-2}$, la durée de l'influence de la perturbation est de 1100 ms .

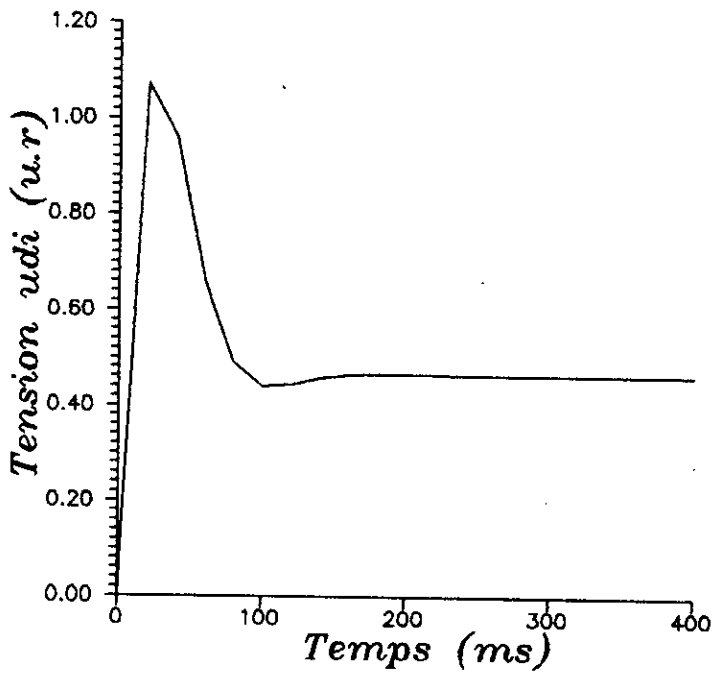
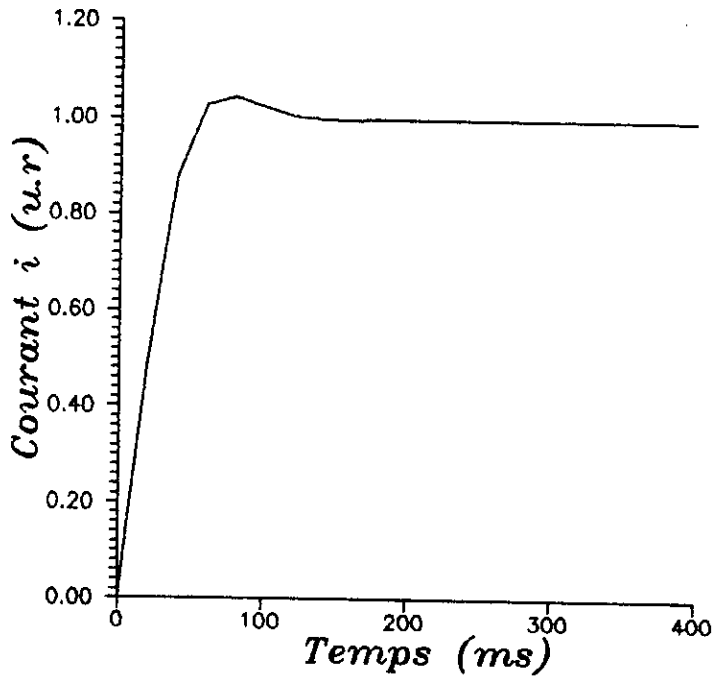


Fig 4-2 Reponse indicielle du reglage avec predicteur d'etat de la boucle de courant par rapport a la grandeur de consigne

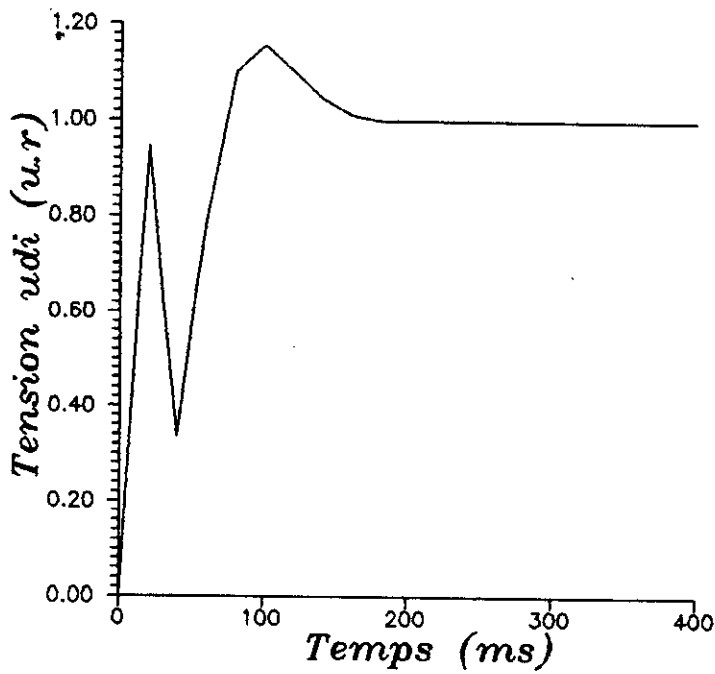
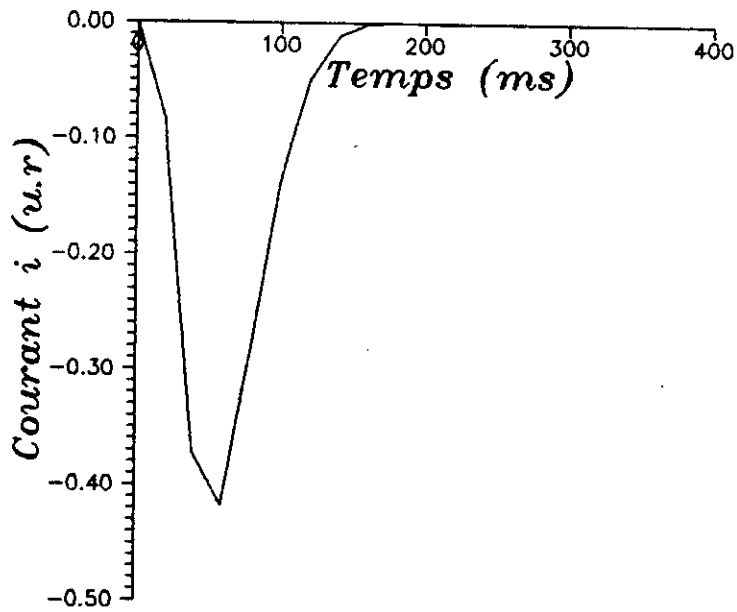


Fig 4.3 Reponse indicielle du reglage avec estimateur d'etat de la boucle de courant par rapport a la grandeur de perturbation

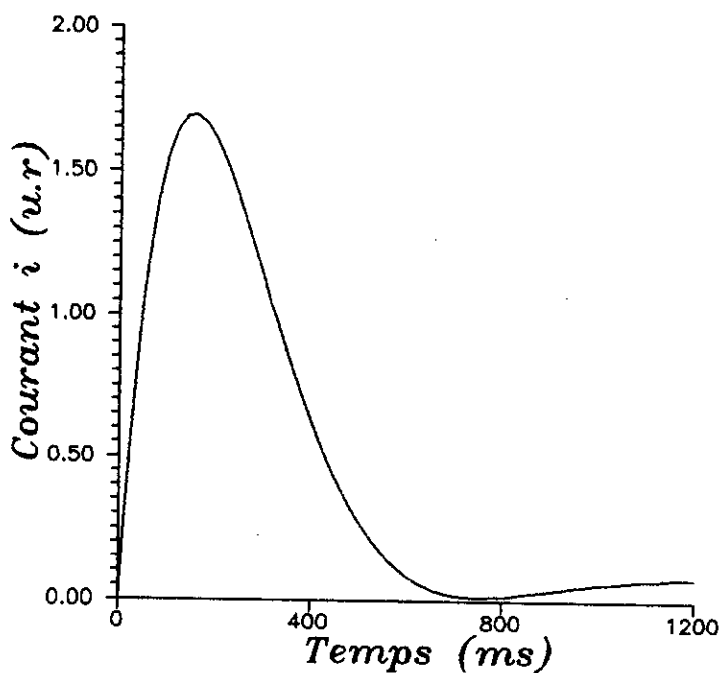
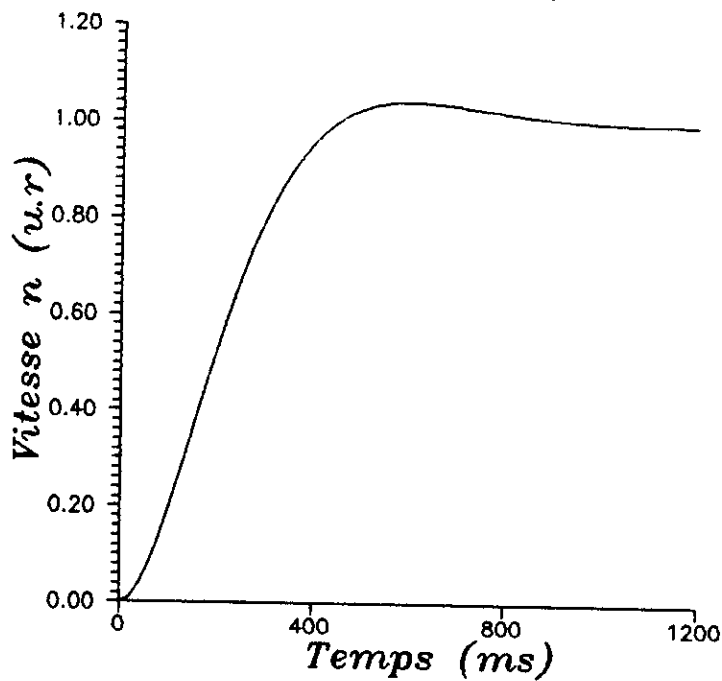


Fig 4.4 Reponse indicielle du reglage avec predicteur d'état de la boucle de vitesse par rapport a la grandeur de consigne

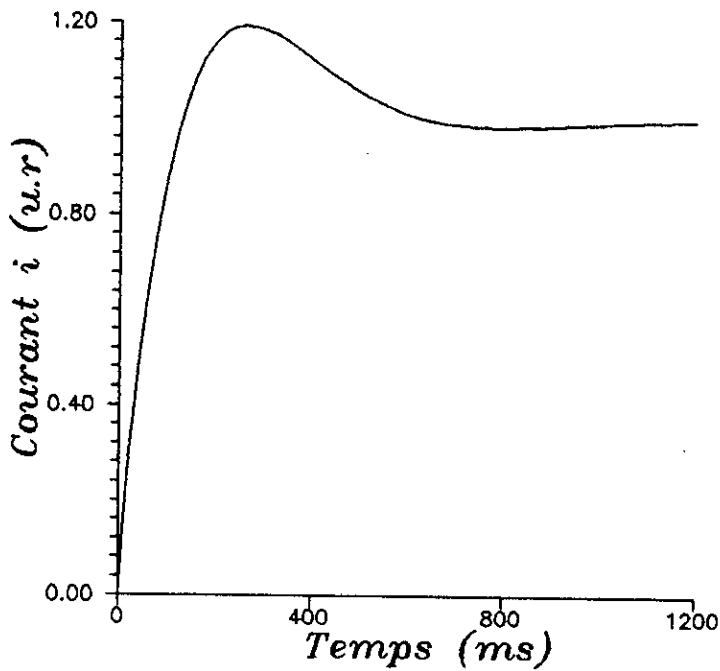
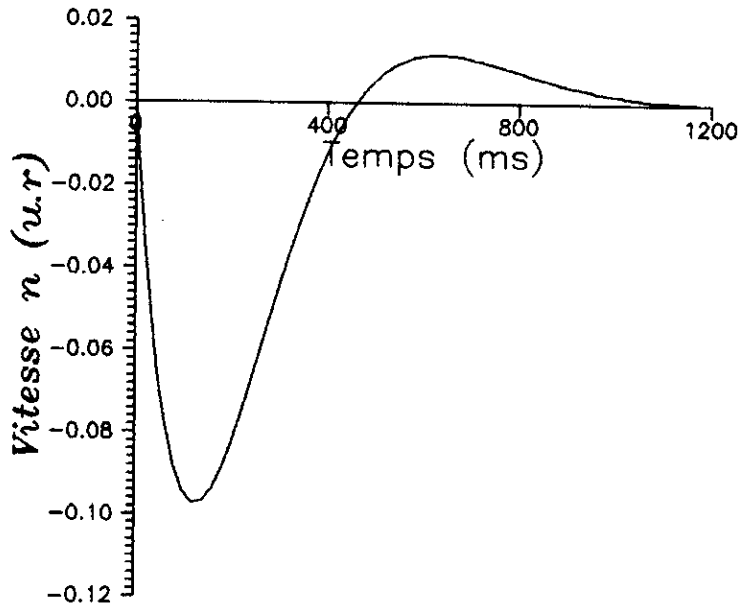


Fig 4.5 Reponse indicielle du réglage avec estimateur d'état de la boucle de vitesse par rapport a la grandeur de perturbation

OBSERVATEUR D'ETAT ET DE PERTURBATION

Lorsqu'il y'a des grandeurs de perturbations, les observateurs d'états établis précédemment ne permettent plus d'observer correctement le vecteur d'état du système à régler . Par contre, il est possible de reconstituer les grandeurs de perturbations en régime établi, à partir de l'écart d'observation, donc pour pouvoir observer correctement les grandeurs d'états et de perturbations, on doit compléter la structure de l'observateur, comme on le montrera dans ce chapitre [2].

V-1-Observateur d'état sous l'influence de perturbation:

Soit le système suivant :

$$x_s[k+1] = F_s x_s[k] + H_s u[k] + H_{sv} v[k] \quad (5-1)$$

$$y_s[k] = C_s x_s[k] \quad (5-2)$$

L'observateur d'état est décrit par [2] :

$$x_b[k+1] = F_b x_b[k] + H_s u[k] + K_b y_s[k] \quad (5-3)$$

avec: $F_b = F_s - K_b \cdot C_s$

Lorsqu'on détermine l'erreur d'observation selon définition:

$$x_b[k] - x_s[k] - x_p[k] \quad (5-4)$$

On obtient [2] :

$$X_b[k+1] = F_b X_b + H_{sv} v[k] \quad (5-5)$$

On voit que l'erreur d'observation dépend du vecteur de perturbation $v[k]$.

En régime établi, on obtient [2] :

$$\tilde{X}_{b\infty} = (1 - F_b)^{-1} H_{sv} v_{\infty}$$

L'erreur d'observation ne s'annule donc pas en régime établi et par conséquent, il n'est pas possible d'observer correctement le vecteur d'état du système à régler.

V-2-Structure de l'observateur d'état et de perturbation :

On a vu que l'observation des grandeurs d'états avec l'observateur d'état n'est plus correcte. Il est alors nécessaire de compléter l'observateur d'état afin d'observer correctement le vecteur d'état et les grandeurs de perturbation.

La structure d'un observateur d'état et de perturbation est représentée à la figure (5-1) avec la structure du système à régler. Sur ce dernier intervient le vecteur de perturbation $v[k]$ par l'intermédiaire du bloc contenant la matrice H_{sv} .

Dans l'observateur intervient le vecteur de perturbation $v_b[k]$ par l'intermédiaire du bloc contenant également la matrice H_{sv} .

Pour obtenir le vecteur de perturbation observé, on introduit un intégrateur discret constitué par les blocs contenant Z^{-1} et 1. Cet intégrateur est influencé par l'écart d'observation $e_b[k]$ au travers du bloc contenant la matrice L_b . La branche contenant la matrice M_b donne une contribution supplémentaire au vecteur $v_b[k]$ de sorte que le vecteur de perturbation observé est donné par $v'_b[k]$.

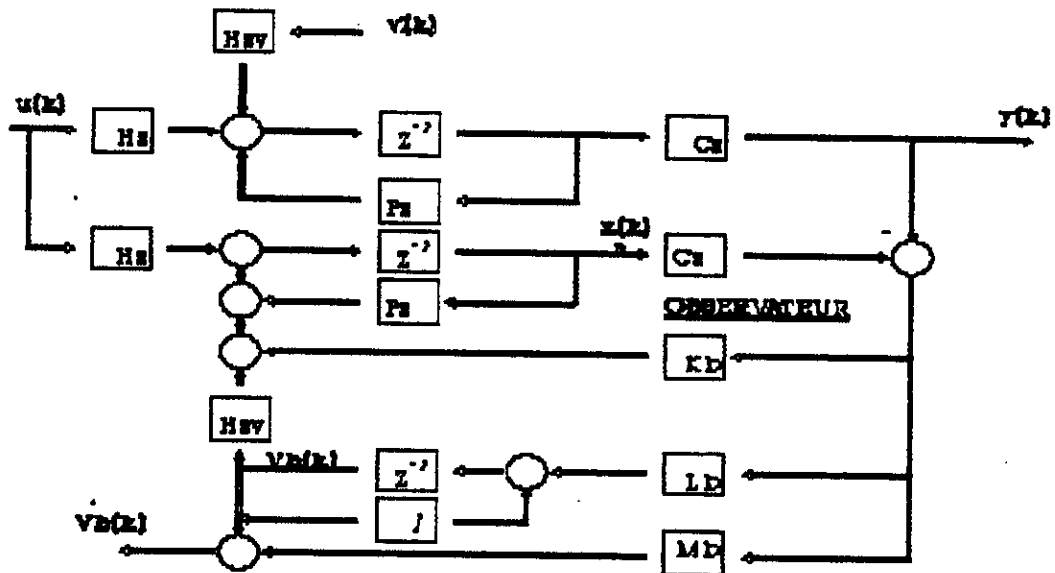


Figure 5.1 Diagramme structurel de l'observateur d'état et de perturbation

V-2-1-Systèmes d'équations :

Selon la structure présentée à la figure (5-1), le vecteur d'état $x_b[k]$ est donné par l'équation suivante [2] :

$$x_b[k+1] = F_b x_b[k] + H_{sv} v_b[k] + H_s u[k] + K_b y_s[k] \quad (5-6)$$

avec : $F_b = F_s - K_b C_s$

Pour le vecteur $v_b[k]$, on obtient l'équation [2] :

$$v_b[k+1] = v_b[k] + L_b y_s[k] - L_b C_s x_b[k] \quad (5-7)$$

L'erreur d'observation du vecteur d'état est donnée par :

$$\hat{x}_b[k+1] = F_b \hat{x}_b[k] - H_{sv} v_b[k] + H_{sv} v[k] \quad (5-8)$$

Le vecteur $v'_b[k]$ est défini par : $\dot{v}'_b[k] = v'_b[k] + M_b C_s \tilde{x}_b[k]$ (5.)

En introduisant le vecteur d'état global $x_{be}^T = [\tilde{x}_b \ v_b]$, on peut écrire : $v'_b[k] = C_b \cdot x_{be}[k]$ où $C_b = [M_b \cdot C_s \ 1]$

V-3-Structure générale de réglage avec observateur d'état et de perturbation:

La structure générale du réglage d'état avec observateur d'état et de perturbation est représentée schématiquement à la figure suivante :

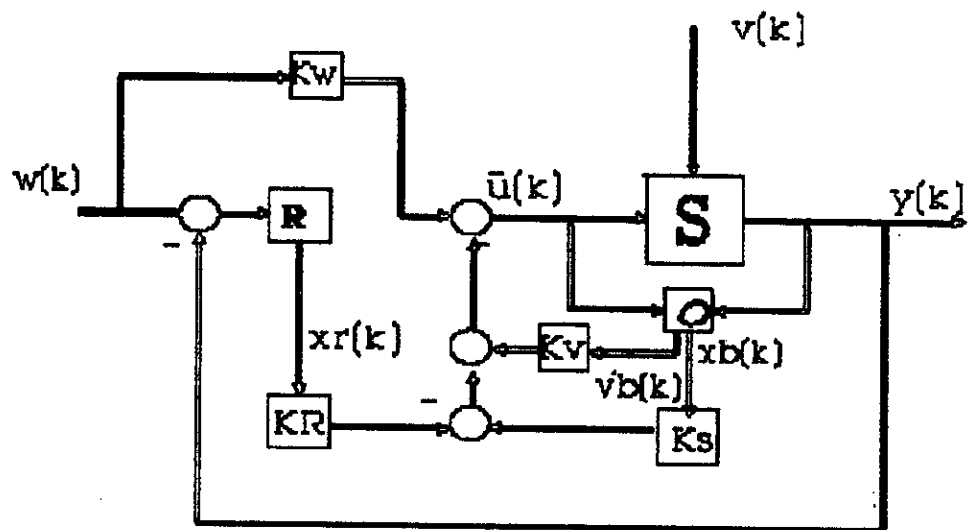


Figure 5.2 Représentation du réglage d'état avec observateur d'état et de perturbation

Le vecteur de commande $u[k]$ et le vecteur de sortie $y[k]$ interviennent sur l'observateur O qui fournit les deux vecteurs $x_b[k]$ et $v'_b[k]$.

Le vecteur d'état $x_b[k]$ est utilisé pour le réglage d'état par l'intermédiaire du bloc contenant K_s . Par contre, le vecteur d'état $v'_b[k]$ intervient au travers du bloc contenant la matrice K_v . Le régulateur intégrateur R contribue à la contre-réaction d'état par l'intermédiaire du bloc K_r en plus, il y'a l'intervention directe de la grandeur de consigne par l'intermédiaire du bloc K_w .

V-3-1-Système d'équation:

Les différentes équations qui sont utilisées pour le réglage d'état avec observateur d'état et de perturbation sont résumées dans ce paragraphe .

Pour le système à régler on a:

$$x_s[k+1] = F_s x_s[k] + H_s u[k] + H_{sv} v[k] \tag{5-10}$$

$$y[k] = C_s x_s[k] \tag{5-11}$$

Le régulateur intégrateur est décrit par la relation [2] :

$$x_R[k+1] = x_R[k] + w[k] - C_s x_s[k] \tag{5-12}$$

Pour la grandeur de commande [2] :

$$u[k] = -K_s x_b[k] + K_R x_R[k] + K_w w[k] - K_v v_b[k] \tag{5-13}$$

L'observateur d'état et de perturbation est décrit par les relations présentées en (V-2-1)

V-3-2-Equation d'état du système complet:

On transforme l'expression (5-13) en exprimant $x_b[k]$ par la relation (5-4) et $v_b[k]$ par la relation (5-9), on obtient alors:

$$u[k] = -K_s x_s[k] + K_R x_R[k] + (K_s - K_v M_b C_s) \hat{x}_b[k] - K_v v_b[k] + K_w w[k] \tag{5-14}$$

Introduit dans (5-10), l'équation d'état du système devient:

$$x_s[k+1] = (F_s - H_s K_s) x_s[k] + H_s K_R x_R[k] + H_s (K_s - K_v M_b C_s) \hat{x}_b[k] - H_s K_v v_b[k] + H_s K_w w[k] + H_{sv} v[k] \tag{5-15}$$

Pour le système complet ,on introduit le vecteur d'état suivant: $x_c^T = [x_s \ x_r \ \bar{x} \ v_b]$

Les relations (5-15),(5-12),(5-8) et (5-7)sont réunies dans l'équation suivante :

$$x_c[k+1] - F_c x_c[k] + H_{cw} w[k] + H_{cv} v[k] \tag{5-16}$$

avec les matrices juxtaposées :

$$F_c = \begin{bmatrix} F_s - H_s.K_s & H_s.K_r & H_s(K_s - K_v.M_b.C_s) & -H_s.K_v \\ -C_s & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & F_s - K_b.C_s & \\ 0 & 0 & L_b.C_s & 1 \end{bmatrix} \tag{5-17}$$

$$H_{cw} = \begin{bmatrix} H_s.K_w \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} ; H_{cv} = \begin{bmatrix} H_{sv} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5-18}$$

Le vecteur de sortie peut également être exprimer par le vecteur d'état $x_c[k]$ selon :

$$Y[k] - C_c x[k] \tag{5-19}$$

avec : $C_c = [C_s \ 0 \ 0 \ 0]$

La matrice F_c peut être exprimer par [2]:

$$F_c = \begin{bmatrix} F_g & H_{sb} \\ \hline 0 & F_{bg} \end{bmatrix} \tag{5-20}$$

L'équation caractéristique du système complet peut être décomposée de la manière suivante :

$$\det(zI - F_g). \det(zI - F_{bg}) = 0$$

Le principe de séparation mentionné dans les paragraphes précédents, est donc valable aussi dans le cas du réglage avec observateur d'état et de perturbation.

On peut donc dimensionner séparément le réglage d'état et l'observateur d'état et de perturbation .

V-3-3-Détermination des coefficients de l'observateur:

Les coefficients du vecteur K_{b0} de la contre-réaction global de l'observateur d'état et de perturbation s'écrivent:

$$\begin{cases} K_{b0} = T^{-1}K_b \\ k_b = \beta_{i-1} - a_{i-1} \end{cases} \quad (5-22)$$

β_i :coefficients du polynôme caractéristique de l'observateur
 a_i :coefficients du polynôme caractéristique du système à régler en boucle ouverte .

Pour déterminer le vecteur K_{b0} ,on doit choisir des pôles qui garantissent un temps d'établissement fini et l'erreur d'observation qui s'annule le plus rapidement possible, pour cela, en général ,on choisi les pôlestous à l'origine i.e $Z_i=0$

La grandeur liée à l'intégrateur formant la grandeur d'état observée est [2]: $L_b = -K_{b0}[3]$ (5-23)

Pour déterminer le scalaire M_b donné par la relation (5-9) , on impose que le vecteur observé v_b , prenne pour $k=1$ la valeur 1, ainsi on obtient [2] :

$$M_b = \frac{1}{\tilde{x}_{b1}[1]} \quad (5-24)$$

$\tilde{x}_{b1}[1]$ représente l'erreur d'observation

V-4-Réglage avec observateur dans la boucle de courant:

V-4-1-Structure de réglage de courant:

La structure de réglage d'état avec observateur d'état et de

perturbation est la suivante:

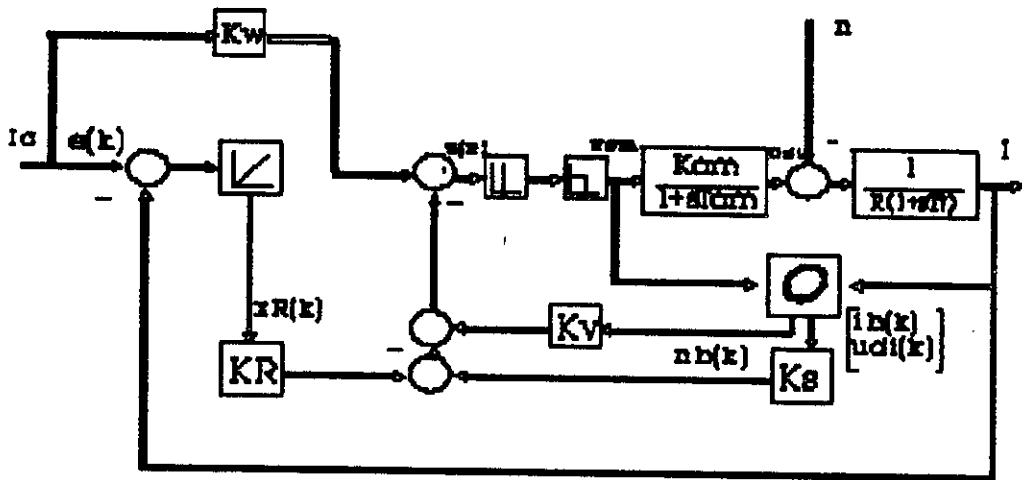


Figure 5.3 Structure de réglage du courant avec observateur d'état et de perturbation

V-4-2-Equation d'état du système global fermé:

L'équation d'état du système global avec observateur d'état et de perturbation est donnée par:

$$x_c[k+1] = F_c x_c[k] + H_{cw} I_c[k] + H_{cv} n[k] \tag{5-25}$$

avec : $x_c^T = [x_s \ x_r \ x_b \ n]$

La matrice F_c et les vecteurs H_{cw} et H_{cv} sont donnés respectivement par les relations (5-17) et (5-18).

Le vecteur K_{b0} de la contre-réaction globale de l'observateur d'état et de perturbation sera [10]:

$$K_{b0} = [1.75 \ -6.49 \cdot 10^{-10} \ 1.92] \quad \text{où } L_b = -1.92$$

Le scalaire M_b sera [10]:

$$M_b = 1/\tilde{I}_b[1] = -1.92$$

$\tilde{y}_b[1]$ représente l'erreur d'observation du courant à l'instant $k=1$.

V-4-3-Réponses indicielles:

La figure (5-4) représente l'influence de la grandeur de consigne $I_c[k]$, l'allure obtenue est similaire à celle du réglage sans observateur .

La figure (5-5) donne la réponse indicielle du vecteur d'état $[i \text{ udi}]^T$ lors d'une variation de la perturbation, dans ce cas présent l'observateur d'état et de perturbation nécessite une période d'échantillonnage pour détecter l'apparition d'une variation de la perturbation, c'est donc à $k=1$ que l'intervention directe de la grandeur de perturbation peut intervenir sur le réglage d'état, le maximum de la grandeur d'état u_{di} est de 47.4 %, se stabilise après 9 périodes d'échantillonnages, le courant possède un minimum de 0.447 u.r et un maximum de 0.357 u.r, et se stabilise après 9 périodes d'échantillonnages .

V-4-4-Réglage de la vitesse:

Les réponses indicielles par rapport à la consigne fig(5-4) sont identiques au réglage d'état ($T_e=45$ ms), donc on peut utiliser le réglage d'état sans observateur pour la vitesse .

V-5-Réglage avec observateur dans la boucle de vitesse:

V-5-1-Réglage du courant:

Les résultats du paragraphe (I-3) sont toujours valables .

V-5-2-Structure de réglage de la vitesse:

La structure de réglage avec observateur d'état et de perturbation est la suivante:

de la même façon que le paragraphe(V-4).

On aura alors [10]:

$$K_{b0} = [2.63 \quad -22.46 \quad 68.8]$$

$$L_b = -68.8$$

$$M_b = 1/\bar{h}_b[1] = -24.99$$

V-5-4-Réponses indicielles:

La figure (5-7) donne la réponse indicielle du vecteur d'état $[n \ i]^T$ par rapport à la grandeur de consigne $n_c[k]$, cette dernière est identique à la réponse du réglage d'état sans observateur .

La figure (5-8) donne la réponse indicielle par rapport à la grandeur de perturbation, c'est après une période d'échantillonnage que la grandeur de perturbation intervient sur le réglage d'état, la grandeur à régler $n[k]$ atteint un maximum de $3.5 \cdot 10^{-2}$ u.r et un minimum de $8.8 \cdot 10^{-2}$ u.r, le courant $i[k]$ possède un dépassement de 25.62 % avec un temps de réponse de 58 ms et se stabilise après 45 périodes d'échantillonnages .

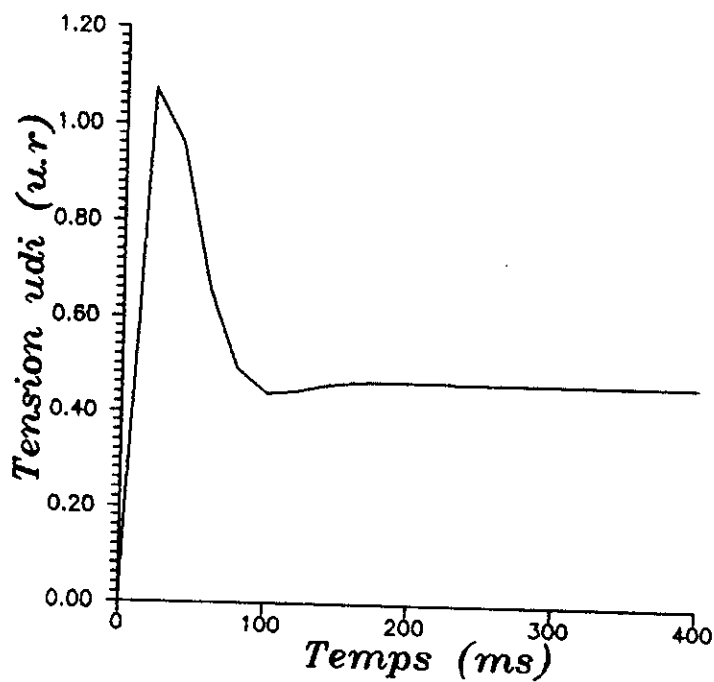
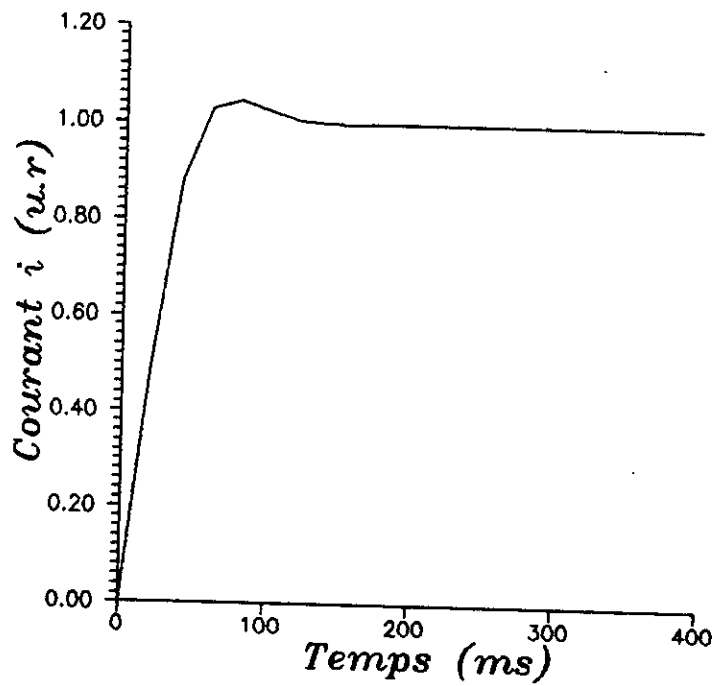


Fig 5.4 Reponse indicielle du reglage avec observateur d'état et de perturbation de la boucle de courant par rapport a la grandeur de consigne

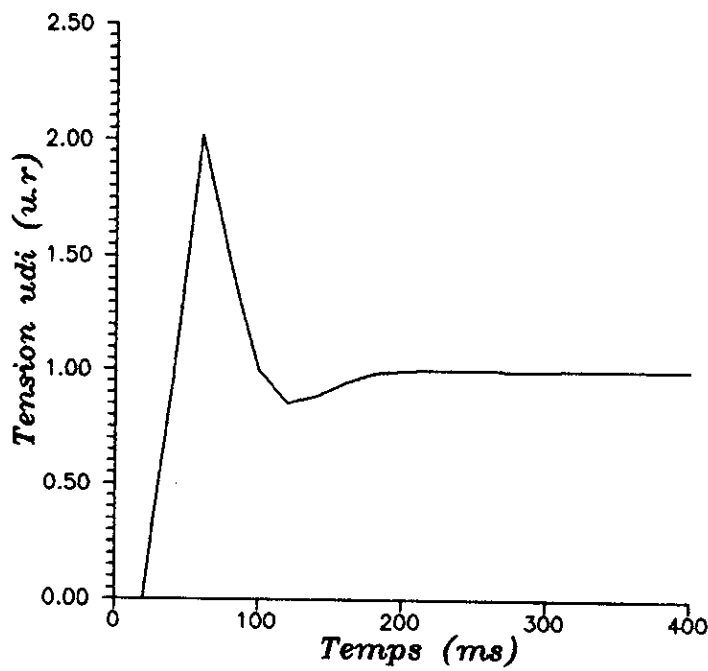
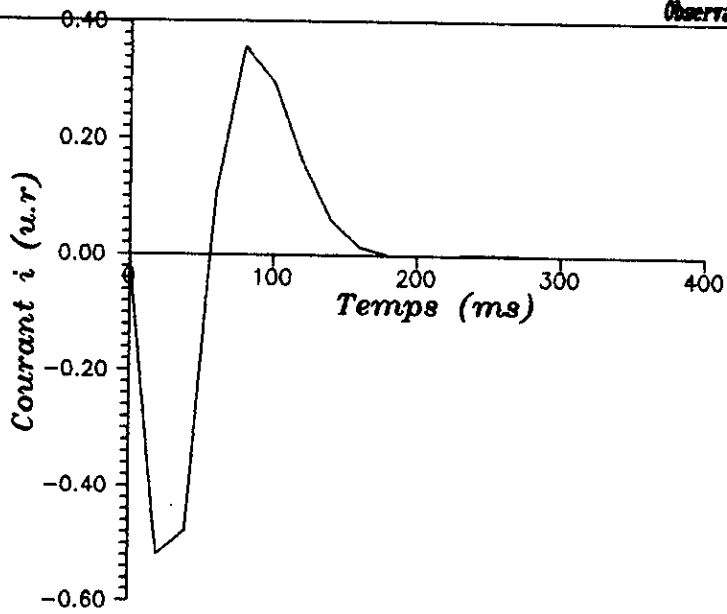


Fig 5.5 Reponse indicielle du reglage avec observateur d'etat et de perturbation de la boucle de courant par rapport a la grandeur de perturbation

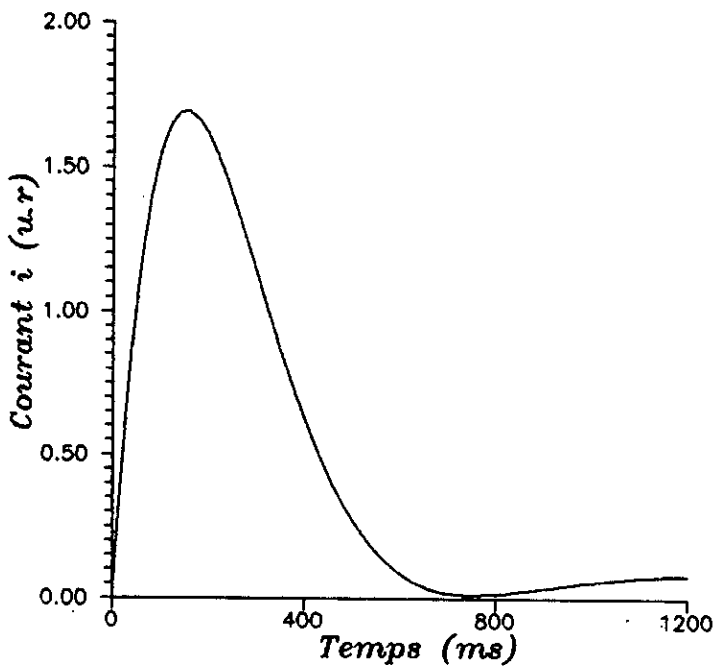
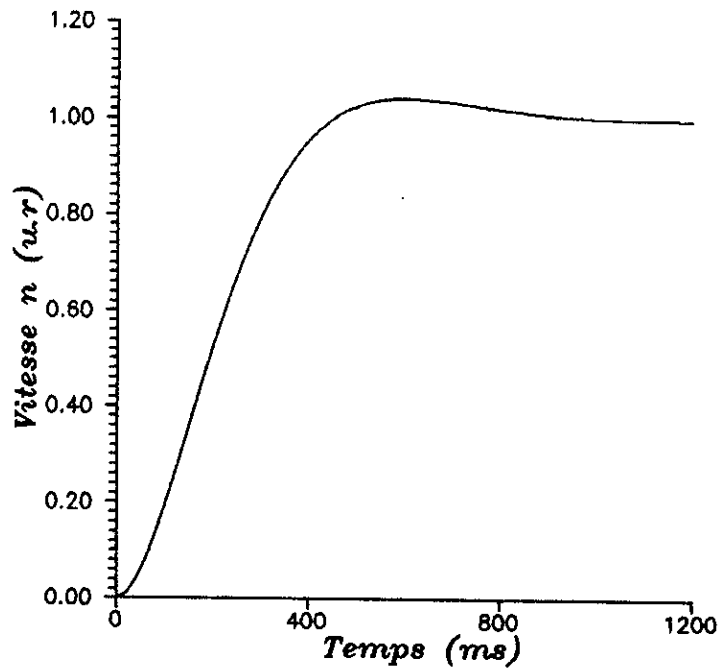


Fig 5.7 reponse indicielle du reglage avec observateur d'état et de perturbation de la boucle de vitesse par rapport a la grandeur de consigne

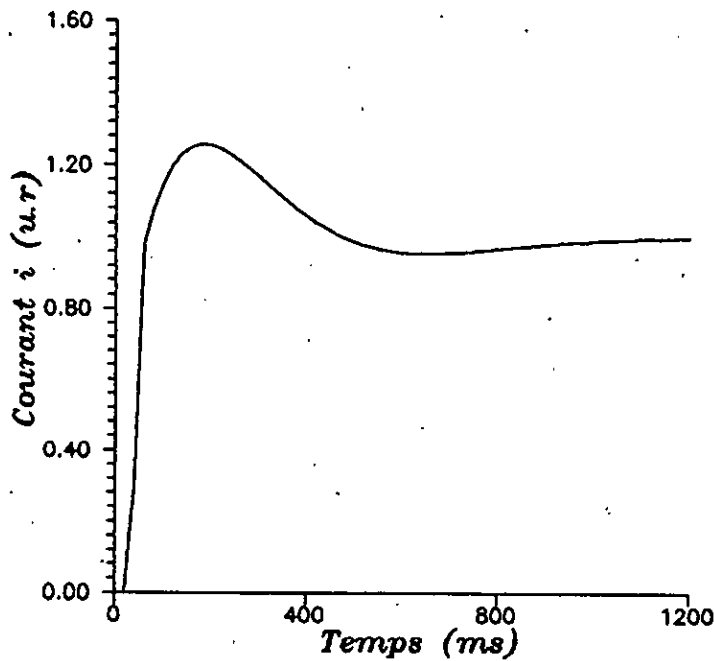
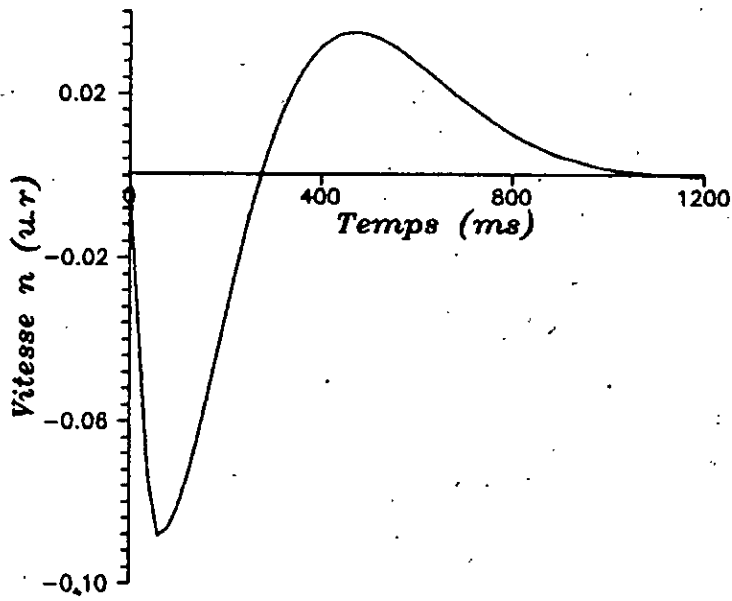


Fig 5.8 Reponse indicielle du reglage avec observateur d'état et de perturbation de la boucle de vitesse par rapport a la grandeur de perturbation

ETUDE COMPARATIVE

L'objectif de ce chapitre est de faire une synthèse sur les différents observateurs étudiés.

On commencera d'abord par une comparaison entre les réglages d'états avec observateurs et le réglage d'état sans observateurs dans la boucle de courant, ensuite dans la boucle de vitesse.

VI-1-Observateur sans la boucle de vitesse:

VI-1-1-Réglage du courant:

A partir des résultats obtenues aux chapitres précédents on peut dire:

Les réponses indicielles du réglage d'état et des réglages d'états avec observateurs par rapport à la grandeur de consigne sont tous identiques figures (1-7), (2-4), (3-2), (4-2) et (5-4).

Les résultats des réponses indicielles par rapport à la grandeur de perturbation sont résumés dans le tableau 1 .

tel que :

- _ Max_i : le maximum atteint par le courant I .
- _ Min_i : le minimum atteint par le courant I .
- _ Tf_i : la durée de l'influence de la perturbation sur le courant
- _ D_u : le dépassement de la tension U_{di} .
- _ Tr : le temps de réponse de la tension U_{di} .
- _ Td : le temps d'établissement de la tension U_{di} .

	REGLAGE D'ETAT	OBSERVATEUR DE LUENBERGER	ESTIMATEUR DE KALMAN	PREDICTEUR DE KALMAN	OBSERVATEUR D'ETAT ET DE PERTURBATION
Max _r (u.r)	3.27 10 ⁻²	3.27 10 ⁻²	—	—	3.75 10 ⁻¹
Min _r (u.r)	-8.39 10 ⁻²	-8.39 10 ⁻²	-9.69 10 ⁻²	-4.17 10 ⁻¹	-4.8 10 ⁻¹
Tf _r (ms)	160	160	200	180	180
D _u %	12.42	12.42	2.73	15.4	47.4
Tr (ms)	24.6	24.6	70	72	44
Td (ms)	160	160	170	170	200

TABLEAU 1

Interprétation du tableau 1 :

L'observateur de LUENBERGER donne des résultats satisfaisants, l'estimateur d'état de KALMAN approche les résultats du réglage d'état mais avec un temps de réponse plus grand, tandis que le prédicteur et l'observateur d'état et de perturbation ont des résultats sensiblement variables mais le régime permanent est atteint à la fin.

Cependant, leurs performances restent acceptables.

VI-1-2-Réglage de vitesse:

Pour la vitesse, on a appliqué le réglage d'état sans observateur, donc les résultats sont tous identiques à celle du réglage d'état figures (1-10) et (1-11) .

VI-2-Observateur dans la boucle de vitesse:

VI-2-1-Réglage du courant:

Puisque l'observateur est placé dans la boucle de vitesse, les réponses indicielles du réglage de la boucle de courant par rapport aux grandeurs de consigne et de perturbation sont représentés à la figure (1-7) et (1-8) .

VI-2-2-Réglage de vitesse:

Les réponses indicielles du réglage d'état et du réglage avec observateurs par rapport à la grandeur de consigne sont tous similaires figures (1-10), (2-7), (3-4), (4-4) et (5-7).

Les résultats des réponses indicielles par rapport à la grandeur de perturbation sont résumés dans le tableau 2.

	REGLAGE D'ETAT	OBSERVATEUR DE LUENBERGER	ESTIMATEUR DE KALMAN	PREDICTEUR DE KALMAN	OBSERVATEUR D'ETAT ET DE PERTURBATION
Max _n (u.r)	3.79 10 ⁻²	3.79 10 ⁻²	2.06 10 ⁻²	1.17 10 ⁻²	3.49 10 ⁻²
Min _n (u.r)	-8.29 10 ⁻²	-8.29 10 ⁻²	-8.82 10 ⁻²	-9.72 10 ⁻²	-8.8 10 ⁻²
Tf _n (ms)	1150	1150	1120	1100	1040
Dr %	25.63	25.63	21.14	19.2	25.62
Tr (ms)	100	100	112	123	58
Ep	1.82 10 ⁻³	1.82 10 ⁻³	1.63 10 ⁻³	1.64 10 ⁻³	0.9 10 ⁻³

TABEAU 2

Tel que:

- _ Max_n : le maximum atteint par la vitesse n .
- _ Min_n : le minimum atteint par la vitesse n .
- _ Tf_n : la durée de l'influence de la perturbation sur la vitesse

- _ D_1 : le dépassement du courant I .
- _ T_r : le temps de réponse du courant I .
- _ E_p : l'écart du courant en régime permanent .

Interprétation du tableau 2 :

Même remarque pour l'observateur de LUENBERGER, l'estimateur et le predicteur, cependant l'observateur d'état et de perturbation a des résultats mieux améliorés que ceux de la boucle de courant .

CONCLUSION:

Le travail fait dans ce chapitre est une étude comparative des performances du système à régler obtenues avec la structure du réglage d'état et l'introduction des observateurs dans le réglage d'état .

les résultats des tableaux 1 et 2 donnent des meilleurs résultats pour l'observateur de LUENBERGER, et même acceptable pour l'estimateur et le predicteur, mais l'observateur d'état et de perturbation a donner des résultats meilleurs dans la boucle de vitesse .

CONCLUSION

Ce travail est une étude comparative des performances statiques et dynamiques des observateurs vis à vis du réglage d'état.

Le réglage d'état permet d'obtenir de meilleures performances dynamiques, ceci se traduit par la rapidité du réglage .

Les résultats obtenus lors d'une variation de la grandeur de consigne du système à régler muni d'observateur sont très voisines du réglage d'état .

Néanmoins, les réponses indicielles par rapport à la grandeur de perturbation du système à régler avec observateurs sont sensiblement variables d'un observateur à autre et d'une boucle de réglage à une autre, mais les performances restent acceptables.

Donc, Les résultats du réglage d'état avec observateur de Luenberger sont bonnes, et mêmes acceptables pour l'estimateur et le prédicteur d'état de Kalman, cependant les résultats de l'observateur d'état et de perturbation varient d'une boucle à une autre et puisque la boucle de vitesse a donné des résultats satisfaisants malgré le retard d'une période d'échantillonnage, ce dernier observateur a aussi de meilleures performances .

Cette étude pourrait être poursuivie dans plusieurs voies:

- _ Soit par une simulation entre les instants d'échantillonnage afin d'améliorer les résultats.
- _ Soit par une simulation du fonctionnement réel pour pouvoir faire une comparaison des grandeurs estimées et des grandeurs réelles.

Et on peut aussi traiter d'autres systèmes plus compliqués (machines).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. BUHLER " Réglage Echantillonnés "
volume 1: " Traitement par la transformation en Z "
Presse Polytechnique Romande - 1982
- [2] H>BUHLER " Réglage Dans L'espace D'état "
volume 2: " Traitement dans l'espace d'état "
Presse Polytechnique Romande - 1983
- [3] M.S. BOUCHERIT " Réglage digital optimal de l'association
hacheur moteur à courant continu "
Thèse de Magister ENP - 1988
- [4] C. FOULARD, S. GENTIL, J.P. SANDRAZ " Commande et régulation par
calculateur numérique "
Edition Eyrolles Paris - 1984
- [5] Y. FAES, M. PELEGRIN " Commande des processus industriels par
calculateur "
Edition Masson Paris - 1981
- [6] A. FOSSARD " Observateur d'état "
Technique de l'ingénieur R7220-14
- [7] A. FOSSARD, C. GUENGUEN " Commande des systèmes
multidimensionnels "
Edition Dunod Paris - 1972
- [8] J. O'REILLY " Observers for linear systems "
Academic Press Inc (London) 1983
- [9] K.J. ASTROM, B. WITTENMARK " Computer controlled systems "
" Theory and design "
Prentice-Hall International, Inc 1990
- [10] D. TRABZI " Logiciels sur les observateurs "
Rapport de Laboratoire ENP 1992