4

Commande de la machine synchrone à aimants permanents par retour de sortie

1. Introduction.....44

2. Observateur flou 44

3. Cas des variables des prémisses mesurables.....46

3.1 Principe de séparation … 47

3.2 Application à la machine synchrone à aimants permanents 48

3.2.1 Stabilisation de la machine synchrone à aimants permanents avec observateur.....48

3.2.2 Suivi de trajectoire avec observateur.....54

4. Cas des variables des prémisses non mesurables.....63

4.1 Synthèse de la loi de commande 64

4.2 Application à la machine synchrone à aimants permanents 64

4.2.1 Stabilisation avec observateur.....64

4.2.1.1 Machine synchrone à aimants permanents décrite par un modèle flou à quatre règles.....64

4.2.1.2 machine synchrone à aimants permanents décrite par un modèle flou à deux règles 68

4.2.2 Suivi de trajectoire avec observateur.....73

4.2.2.1 machine synchrone à aimants permanents décrite par un modèle flou à quatre règles.....73

4.2.2.2 machine synchrone à aimants permanents décrite par un modèle flou à deux règles……..…….78
5. Interprétation des résultats…..…….....84
6. Conclusion …….……...……...85

1.Introduction

Les techniques de synthèse basées sur le retour d'état nécessitent que toutes les composantes du vecteur d'états soient mesurables. Comme cette condition est rarement vérifiée, l'usage d'un observateur devient nécessaire. Dans la plupart des travaux, on suppose que les variables de prémisse sont mesurables.

Certains travaux comme [21], ont cependant traité le cas où les variables des prémisses ne sont pas toutes mesurables. Une méthode basée sur le principe de séparation à permis dans le premier cas de synthétiser séparément les gains de l'observateur $\boldsymbol{L_i}$ et ceux de régulateur $\boldsymbol{F_i}$, cependant, le principe de séparation qui a été établi pour le premier cas, semble difficile à démonter pour le deuxième cas. Une méthode basée sur le placement de pôle et l'existence d'une matrice définie positive $\boldsymbol{P} > 0$ est abordée.

Nous proposons d'appliquer le problème de stabilisation et de suivi de trajectoire à la machine synchrone à aimants permanents dans les deux cas.

2. Observateur flou

Le but étant d'obtenir une convergence asymptotique de l'erreur d'observateur d'état, i.e. $\boldsymbol{x(t) - \hat{x}(t) \rightarrow 0}$ quand $\boldsymbol{t \rightarrow \infty}$ où $\boldsymbol{\hat{x}(t)}$ représente le vecteur d'état estimé par l'observateur. Le modèle flou TS augmenté est composé d'un modèle flou, d'un régulateur flou et d'un observateur flou [24], figure (4.1).

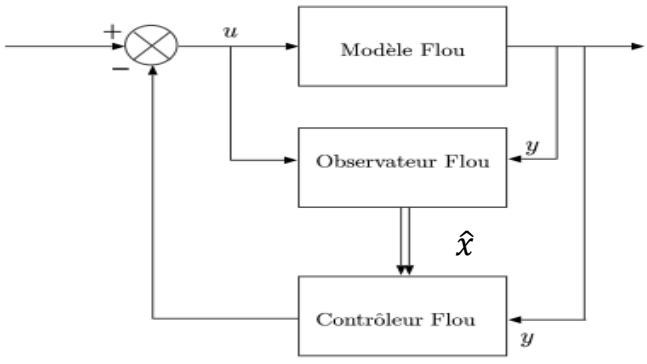

Figure 4.1 : Représentation du système augmenté

La i[ème] règle du modèle flou s'écrit :

$$Si\ \boldsymbol{z_1}\ est\ \boldsymbol{F_i^1}\ et\ \dots\ et\ \boldsymbol{z_p}\ est\ \boldsymbol{F_i^p}\ alors \begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{A_i x}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{B_i u}(\boldsymbol{t}) \\ \boldsymbol{y}(\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{C_i x}(\boldsymbol{t}) \end{cases}, \boldsymbol{i} = \boldsymbol{1} \dots \boldsymbol{r}\ (\boldsymbol{4.1})$$

pour une paire $(\boldsymbol{y}(\boldsymbol{t}), \boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}))$ donnée, l'inférence du système flou est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t}) = \dfrac{\sum_{i=1}^{r} \boldsymbol{w_i}(\boldsymbol{z}(\boldsymbol{t}))\{\boldsymbol{A_i x}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{B_i u}(\boldsymbol{t})\}}{\boldsymbol{w_i}(\boldsymbol{z}(\boldsymbol{t}))} \\ \boldsymbol{y}(\boldsymbol{t}) = \dfrac{\sum_{i=1}^{r} \boldsymbol{w_i}(\boldsymbol{z}(\boldsymbol{t}))\boldsymbol{C_i x}(\boldsymbol{t})}{\boldsymbol{w_i}(\boldsymbol{z}(\boldsymbol{t}))} \end{cases} \quad (\boldsymbol{4.2})$$

Les régles $\boldsymbol{R_i}$ de l'observateur flou sont basées sur les règles du modèle flou et sont définies comme suit [24] :

Règles d'observateur $\boldsymbol{i}$: Si $\boldsymbol{z_1}(\boldsymbol{t})$ est $\boldsymbol{F_{1i}}$ et ... $\boldsymbol{z_g}(\boldsymbol{t})$ est $\boldsymbol{F_{gi}}$ alors

$$\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{x}}} = \boldsymbol{A_i}\hat{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{B_i u}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{L_i}(\boldsymbol{y}(\boldsymbol{t}) - \hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{t})) \\ \hat{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{C_i}\hat{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t}), \boldsymbol{i} = \boldsymbol{1}, \boldsymbol{2}, \dots, \boldsymbol{r} \end{cases} \quad (\boldsymbol{4.3})$$

avec les notations :

$$\boldsymbol{h_i}(\hat{\boldsymbol{z}}(\boldsymbol{t})) = \frac{\boldsymbol{w_i}(\hat{\boldsymbol{z}}(\boldsymbol{t}))}{\sum_{i=1}^{r} \boldsymbol{w_i}(\hat{\boldsymbol{z}}(\boldsymbol{t}))} \text{ et } \sum_{i=1}^{r} \boldsymbol{h_i}(\hat{\boldsymbol{z}}(\boldsymbol{t})) = \boldsymbol{1}\ (\boldsymbol{4.4})$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(\boldsymbol{t}) = \sum_{i=1}^{r} \boldsymbol{h_i}(\hat{\boldsymbol{z}}(\boldsymbol{t}))\{\boldsymbol{A_i x}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{B_i u}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{L_i}(\boldsymbol{y}(\boldsymbol{t}) - \hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{t}))\} \\ \hat{\mathrm{y}}(\boldsymbol{t}) = \sum_{i=1}^{r} \boldsymbol{h_i}(\hat{\boldsymbol{z}}(\boldsymbol{t}))\boldsymbol{C_i}\hat{\mathrm{x}}(\mathrm{t}) \end{cases}$$

où $\boldsymbol{i} = \boldsymbol{1} \dots \boldsymbol{r}$ est le nombre de régles, $\boldsymbol{F_{ij}}$ sont les sous-ensembles flous du modèle du procédé, $\hat{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t}) \in \boldsymbol{R^{n\times n}}$ est le vecteur d'états estimé, $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}) \in \boldsymbol{R^m}$ est le vecteur d'entrée, $\boldsymbol{y}(\boldsymbol{t}) \in \boldsymbol{R^q}$, $\hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{t}) \in \boldsymbol{R^q}$ sont les vecteurs de sortie et estimés, $\mathrm{A_i} \in \boldsymbol{R^{n\times n}}$, $\boldsymbol{B_i} \in \boldsymbol{R^{n\times m}}$, $\boldsymbol{C_i} \in \boldsymbol{R^{m\times n}}$, $\boldsymbol{L_i}$ sont les matrices de gain d'observation, $\hat{\boldsymbol{z}}_1(\boldsymbol{t}) \sim \hat{\boldsymbol{z}}_p(\boldsymbol{t})$ sont les variables des prémisses estimées.

Le calcul des poids de chaque règle s'effectue à partir des variables des prémisses. Deux cas sont à envisager :

- **Cas 1** : Les variables des prémisses sont **mesurables** et il est possible de calculer les poids $\mathbf{h_i(\hat{z}(t)) \neq h_i(z(t))}$, [24], [30], [31].
- **Cas 2** : Les variables des prémisses **ne sont pas mesurables**, il faut donc les reconstruire et utiliser leurs estimées dans le calcul des poids des règles de l'observateur [24].

3. Cas des variables des prémisses mesurables

On suppose que les variables des prémisses dépendent uniquement des variables d'état mesurables, le régulateur possède une loi de retour d'état linéaire de la forme suivante [24] :

$$\boldsymbol{u(t) = -\sum_{i=1}^{r} h_i\big(z(t)\big)\, F_i \hat{x}(t)} \quad \mathbf{(4.6)}$$

en remplaçant (4.5) et (4.3) dans (4.1) le système augmenté est représenté par :

$$\boldsymbol{x_a = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i\big(z(t)\big)h_j\big(z(t)\big).\, G_{ij} x_a(t)} \quad \mathbf{(4.7)}$$

$$\boldsymbol{x_a = \sum_{i=1}^{r} h_i\big(z(t)\big)h_j\big(z(t)\big).\, G_{ii} x_a(t) + 2\sum_{i=1}^{r} h_i\big(z(t)\big)h_j\big(z(t)\big).\, \frac{G_{ij} + G_{ji}}{2} x_a(t)}$$

$$\boldsymbol{x_a = \begin{bmatrix} x(t) \\ \tilde{x}(t) \end{bmatrix}, \tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}}$$

$$\boldsymbol{G_{ij} = \begin{bmatrix} A_i - B_i F_j & B_i F_j \\ 0 & A_i - L_i C_j \end{bmatrix}}$$

Théorème 4.1 **:** L'équilibre du modèle flou continu donné par (4.7) est asymptotiquement stable, s'il existe une matrice $\boldsymbol{P = P^T}$ telle que :

$$\boldsymbol{G_{ii}{}^T P + P G_{ii} < 0 \; i = 1 \ldots, r} \quad \mathbf{(4.8)}$$

$\frac{(G_{ij}+G_{ji})^T}{2} P + P\frac{(G_{ij}+G_{ji})}{2} \leq 0\ i, j < j$

avec

$$h_i(z(t))h_j(z(t)) \neq 0, t > 0$$

$$G_{ij} = \begin{bmatrix} A_i - B_i F_j & B_i F_j \\ 0 & A_i - K_i C_j \end{bmatrix}$$

Preuve : En utilisant la fonction de Lyapunov candidate $V(t) = x^T{}_a P x_a$

On dérive $V(t)$, on obtient :

$$\dot{V}(x_a(t)) = \dot{x}^T{}_a P x_a + x^T{}_a P \dot{x}_a$$

$$\dot{V}(x_a(t)) = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(z(t))h_j(z(t)) . x^T{}_a (G^T{}_{ij} P + P G_{ij}) x_a$$

Si les LMIs (4.8) sont vérifiées alors $\dot{V}(x_a(t)) < 0$, le système augmenté (4.7) est globalement asymptotiquement stable.

3.1 Principe de séparation

Le principe de séparation peut être appliqué pour détermier les gains du régulateur et les gains de l'observateur séparement. Il est donc possible dans le cas des variables des prémisses mesurables, de déterminer séparement les gains de commande F_i et les gains de l'observateur L_i (pour la demonstration, voir l'annex A).

Pour mettre au point ces régulateurs, on se ramène à un problème de faisabilité des LMIs, on obtient les expressions suivantes :

$$P_1 A_i^T - M_{1i}^T B_i^T + A_i P_1 - B_i M_{1i} < 0,$$

$$A_i^T P_2 - C_i^T N_{2i}^T + P_2 A_i - N_{2i} C_i < 0, i, j = 1, 2 \ldots r$$

$$P_1 A_i^T - M_{1j}^T B_i^T + A_i P_1 - B_i M_{1j} + P_1 A_j^T - M_{1i}^T B_j^T + A_j P_1 - B_j M_{1i} < 0$$

$$A_i^T P_2 - C_j^T N_{2i}^T + P_2 A_i - N_{2i} C_j + A_i^T P_2 - C_i^T N_{2j}^T + P_2 A_j - N_{2j} C_i < 0, i < j$$

Si ces problèmes ont une solution, les gains de la commande PDC sont donnés par $\boldsymbol{F_i = M_i P_1^{-1}}$ et les gains de l'observateur sont donnés par $\boldsymbol{L_i = P_2^{-1} N_i}$.

3.2 Application à la machine synchrone à aimants permanents

3.2.1 Stabilisation de la machine synchrone à aimants permanents avec observateur

Le système d'équations, qui représente la dynamique de la machine synchrone à aimants permanents est :

$$\begin{cases} \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{3p}{2J}\phi_v i_q - \dfrac{B}{J}\omega \\ \dfrac{di_q}{dt} = -\dfrac{R}{L}i_q - p\omega i_d - \dfrac{p\phi_v}{L}\omega + \dfrac{1}{L}u_q \\ \dfrac{di_d}{dt} = p i_q \omega - \dfrac{R}{L}i_d + \dfrac{1}{L_d}u_d \end{cases}$$

Ce système peut s'écrire sous la forme :

$$\dot{x} = A(i_d, i_q)x + Bu$$

avec

$$A = \begin{bmatrix} \dfrac{B}{J} & \dfrac{3p\phi_v}{2J} & 0 \\ -pi_d - \dfrac{p\phi_v}{L} & -\dfrac{R}{L} & 0 \\ pi_q & 0 & -\dfrac{R}{L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dfrac{1}{L} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{L} \end{bmatrix}$$

$$x = [\omega \quad i_q \quad i_d], u = [u_q \quad u_d]$$

Si on suppose que les courants $\boldsymbol{i_d}$ et $\boldsymbol{i_q}$ sont bornés tels que :

$$i_q \in [q, Q] \text{ et } i_d \in [d, D]$$

alors on peut écrire :

$$i_q = F_{11}Q + F_{12}q \text{ et } i_d = F_{21}d + F_{22}D$$

avec

$$F_{11} = \frac{i_q - q}{Q - q} \; et \; F_{12} = \frac{Q - i_q}{Q - q}$$

$$F_{21} = \frac{i_d - D}{D - d} \; et \; F_{22} = \frac{D - i_q}{D - d}$$

La machine synchrone à aimants permanents peut être décrite par le modèle flou à quatre règles suivant :

Règle 1 : Si $z_1(t)$ est F_{11} et $z_2(t) est$ F_{21} alors

$$\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t)$$

Règle 2 : Si $z_1(t) est$ F_{11} et $z_2(t) est$ F_{22} alors

$$\dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 u(t)$$

Règle 3 : Si $z_1(t)$ est F_{12} et $z_2(t) est$ F_{21} alors

$$\dot{x}(t) = A_3 x(t) + B_3 u(t)$$

Règle 4 : Si $z_1(t)$ est F_{12} et $z_2(t) est$ F_{22} alors

$$\dot{x}(t) = A_4 x(t) + B_4 u(t)$$

avec : $z_1(t) = i_q$ et $z_2(t) = i_d$ sont les variables prémisses et F_{11}, F_{12}, F_{21} et F_{22} sont les fonctions d'appartenance, les matrices des sous modèles sont données par :

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{B}{J} & \frac{3p\phi_v}{2J} & 0 \\ -pD - \frac{p\phi_v}{L} & -\frac{R}{L} & 0 \\ pQ & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} A_2 = \begin{bmatrix} \frac{B}{J} & \frac{3p\phi_v}{2J} & 0 \\ -pD - \frac{p\phi_v}{L} & -\frac{R}{L} & 0 \\ pq & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \frac{B}{J} & \frac{3p\phi_v}{2J} & 0 \\ -pd - \frac{p\phi_v}{L} & -\frac{R}{L} & 0 \\ pQ & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} A_4 = \begin{bmatrix} \frac{B}{J} & \frac{3p\phi_v}{2J} & 0 \\ -pd - \frac{p\phi_v}{L} & -\frac{R}{L} & 0 \\ pq & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = B_2 = B_3 = B_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}.$$

L'observateur est représenté par :

$$\begin{bmatrix}\dot{\hat{\omega}}\\ \dot{\hat{i}}_q\\ \dot{\hat{i}}_d\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-\frac{B}{J} & -\frac{3p\phi_v}{2J} & 0\\ -p\hat{i}_d - \frac{p\phi_v}{L} & -\frac{R}{L} & 0\\ p\hat{i}_q & 0 & -\frac{R}{L}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{\omega}\\ \hat{i}_q\\ \hat{i}_d\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & 0\\ \frac{1}{L} & 0\\ 0 & \frac{1}{L}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_q\\ u_d\end{bmatrix} + L_i(y-\hat{y})$$

$$\hat{y} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{\omega}\\ \hat{i}_q\\ \hat{i}_d\end{bmatrix}$$

où $\hat{y} = [\hat{i}_q \quad \hat{i}_d]$, $y = [i_q \quad i_d]$, L_i sont les gains de l'observateur.

L'observateur peut être décrit par le modèle flou à quatre règles suivant :

règle d'observateur i : Si $z_1(t)$ est F_{1i} et $z_2(t)$ est F_{2i} alors

$$\begin{cases}\dot{\hat{x}}(t) = A_i\hat{x}(t) + B_i u(t) + L_i(y-\hat{y})\\ \hat{y} = C_i\hat{x}(t)\end{cases} \quad i = 1 \dots 4$$

avec

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$z_1(t) = i_q$ et $z_2(t) = i_d$ sont les varibles prémisses et F_{11}, F_{12}, F_{21} et F_{22} sont les fonctions d'appartenance.

Le régulateur possède une loi de commande de la forme suivante :

$$u(t) = -\sum_{i=1}^{4} h_i F_i(\hat{x}(t))$$

où

$$\hat{x}(t) = [\hat{\omega} \quad \hat{i}_q \quad \hat{i}_d]^T$$

La résolution des LMIs, nous a donné les résultats suivants :

$$P_1 = 10^{11}\begin{bmatrix}1.1737 & -0.0156 & -0.0031\\ -0.0156 & 0.0570 & -0.0009\\ -0.0031 & -0.0009 & 0.2576\end{bmatrix}$$

$$P_2 = 10^{11}\begin{bmatrix}0.4056 & 0.9658 & 0.0001\\ 0.9658 & 3.7780 & 0.0003\\ 0.0001 & 0.0003 & 0.2205\end{bmatrix}$$

Les gains du régulateur sont :

$$F_1 = \begin{bmatrix} 0.2262 & 4.4212 & 0.0349 \\ 0.0312 & 0.04554 & -2.1046 \end{bmatrix}$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} 0.1447 & -2.9195 & 0.0055 \\ -0.0432 & 0.0020 & -2.9203 \end{bmatrix}$$

$$F_3 = \begin{bmatrix} 0.3291 & 9.2230 & 0.0730 \\ 0.0141 & 0.1588 & -0.4203 \end{bmatrix}$$

$$F_4 = \begin{bmatrix} 0.2403 & 1.0573 & 0.0277 \\ -0.0440 & 0.0333 & -2.8906 \end{bmatrix}$$

Les gains de l'observateur sont :

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0.2758 & 0.0013 \\ -0.0788 & -0.0003 \\ 0.0000 & -0.0817 \end{bmatrix}$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} 0.2849 & -0.0017 \\ -0.0811 & 0.0004 \\ -0.0001 & -0.0828 \end{bmatrix}$$

$$L_3 = \begin{bmatrix} 0.2873 & 0.0022 \\ -0.0818 & -0.0006 \\ -0.0001 & -0.0830 \end{bmatrix}$$

$$L_4 = \begin{bmatrix} 0.2791 & 0.0017 \\ -0.0796 & 0.0005 \\ -0.0001 & -0.0828 \end{bmatrix}$$

Les figures 4.2, 4.3 et 4.4 montrent respectivement la variation des vitesses angulaires $\hat{\omega}(t)$ et $\omega(t)$, la variation des courants $\hat{\imath}_q$ et i_q, et la variation des courants $\hat{\imath}_d$ et i_d. Les figures 4.5 et 4.6 montrent la variation des tensions de commande u_q et u_d, pour les conditions initiales $[40\text{rad/s}, 2\text{A}, 0.2\text{A}]^T$.

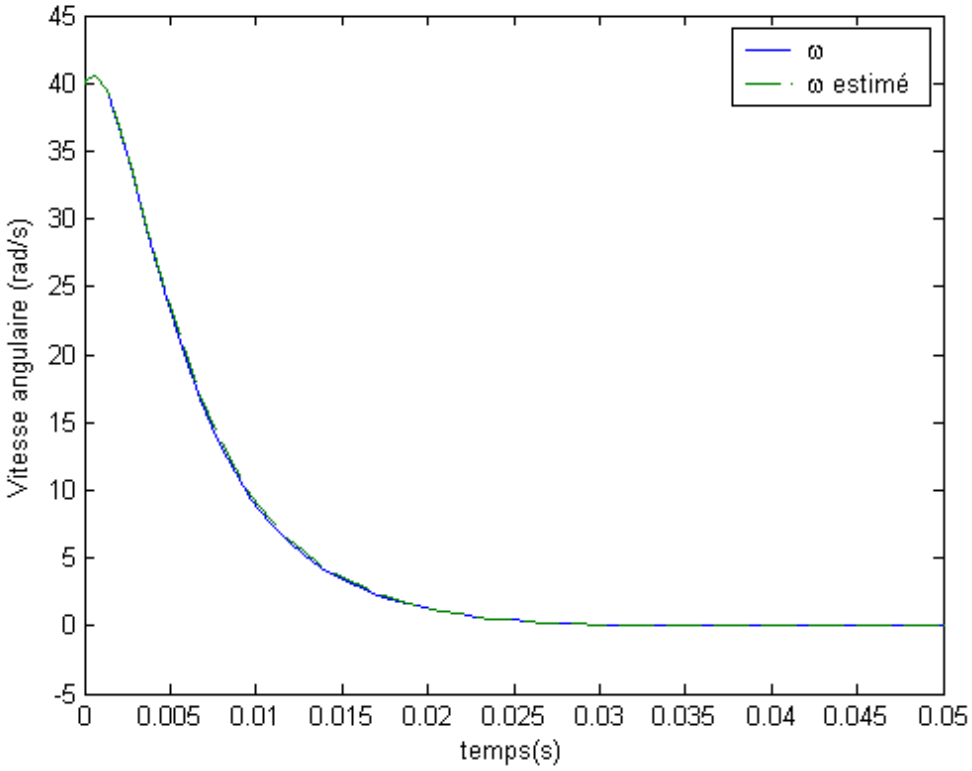

Figure 4.2 : Variation des vitesses angulaires $\hat{\omega}(t)$ et ω

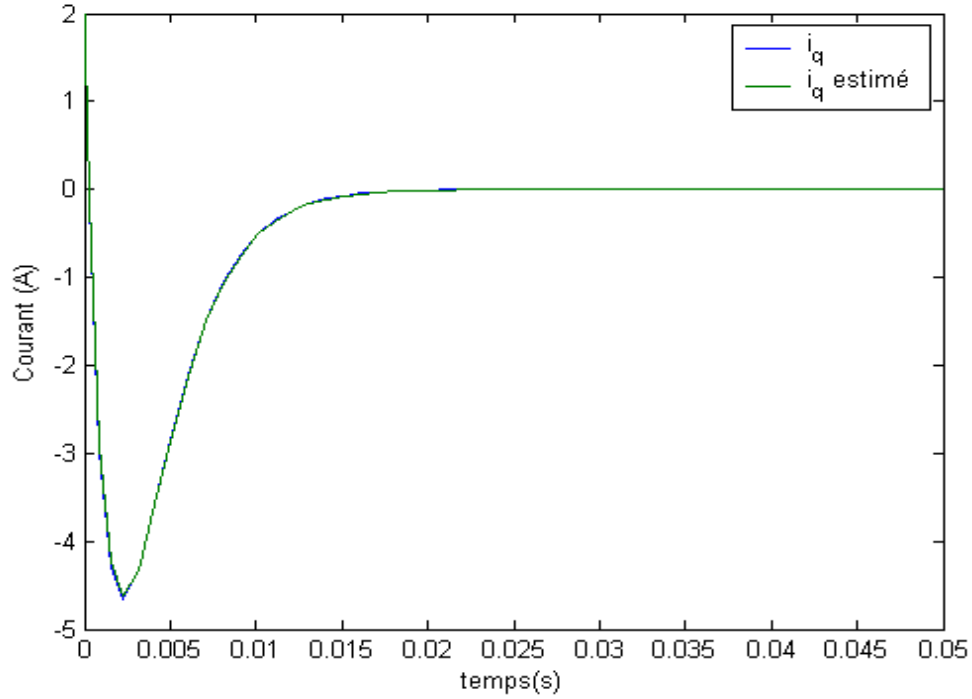

Figure 4.3 : Variation des courants $\hat{\imath}_q$ et i_q

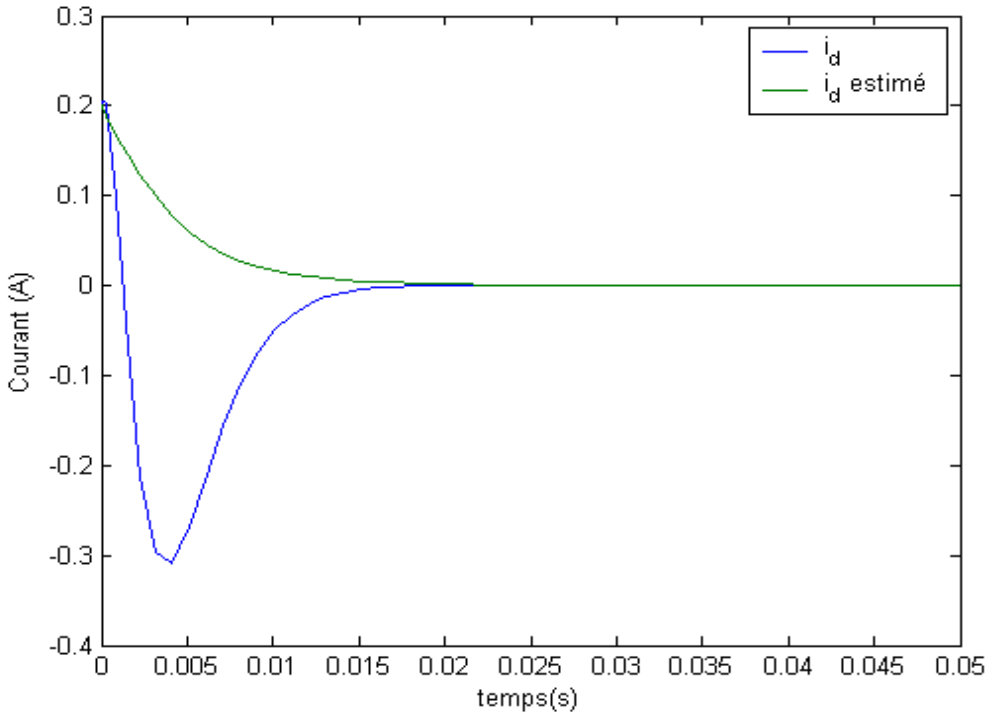

Figure 4.4 : Variation des courants $\hat{i}_d$ et i_d

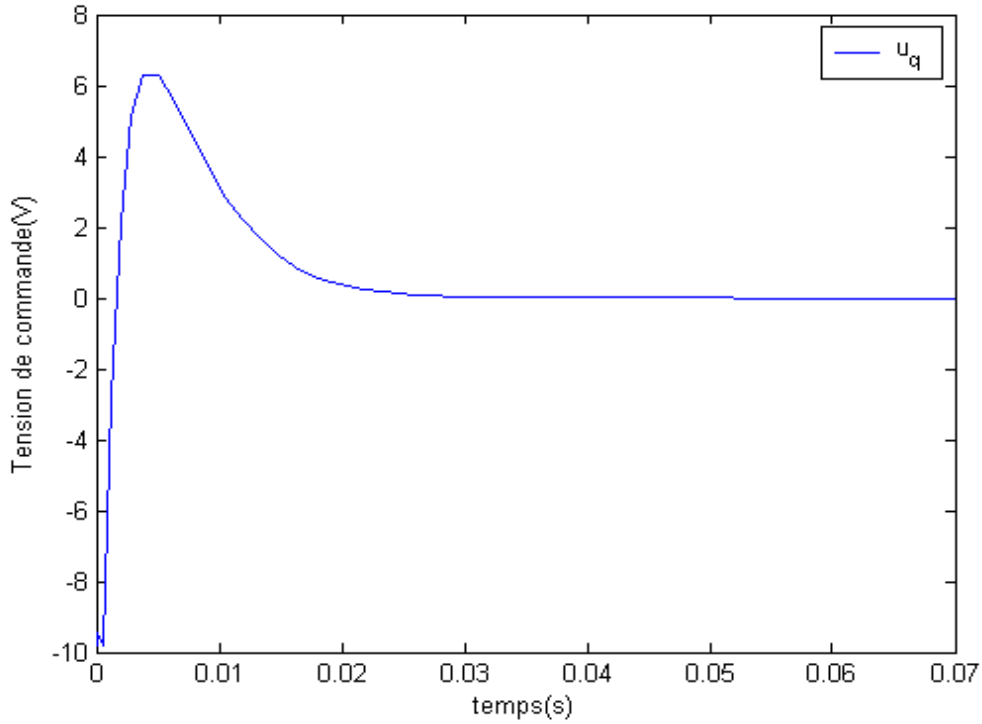

Figure 4.5 : Variation de la commande u_q

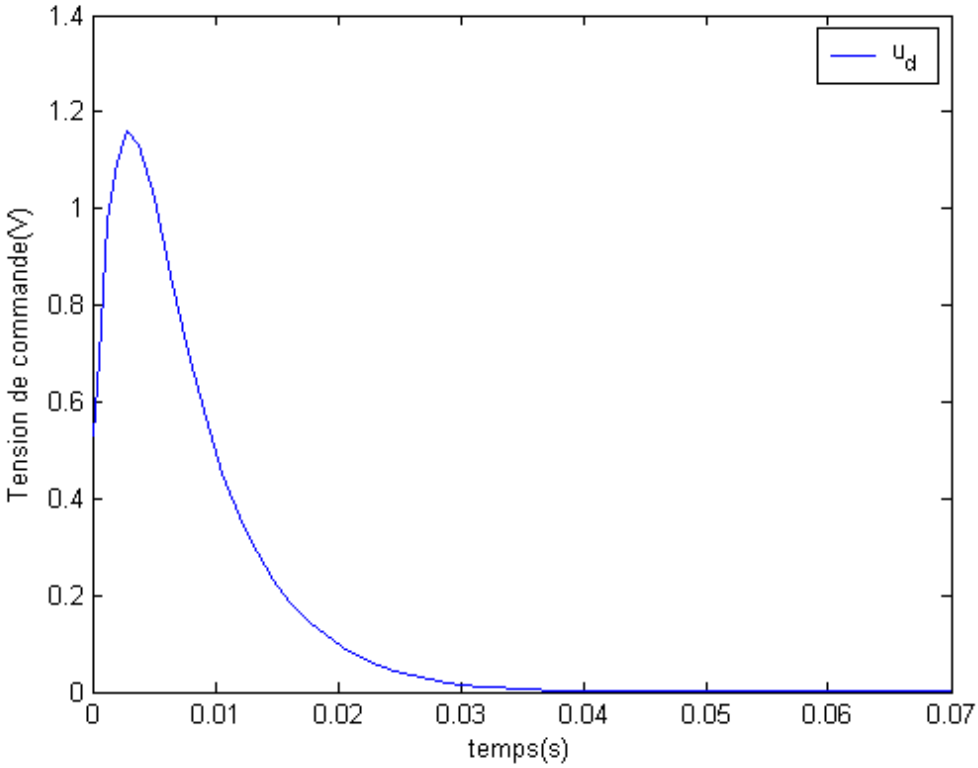

Figure 4.6 : Variation de la commande u_d

3.2.2 Suivi de trajectoire avec observateur

On calcule les variables désirées $\boldsymbol{x_d}$, en utilisant la formule suivante :

$$g(\hat{x})(u(t) - \tau(t)) = -A(\hat{x})x_d(t) + \dot{x_d}(t))$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{3p\phi_v}{2J} & 0 \\ -p\hat{\imath}_d - \frac{p\phi_v}{L} & -\frac{R}{L} & 0 \\ p\hat{\imath}_q & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_d \\ i_{qd} \\ i_{dd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\omega}_d \\ \dot{i}_{qd} \\ \dot{i}_{dd} \end{bmatrix}$$

Le second indice $\boldsymbol{d}$ désigne les états désirés. Selon la première équation, on obtient :

$$\dot{\omega_d} = -\frac{B}{J}\omega_d + \frac{3p\phi_v}{2J} i_{qd}$$

Ce qui montre que : $\quad i_{qd} = (\dot{\omega_d} + \frac{B}{J}\omega_d)\frac{2J}{3p\phi_v}$

$$\dot{\imath_{qd}} = (\ddot{\omega_d} + \frac{B}{J}\dot{\omega_d})\frac{2J}{3p\phi_v}$$

Puis, à partir de la deuxième et la troisième équation, nous pouvons obtenir la loi de commande suivante :

$$u_q = +L_s p\hat{\imath}_d \omega_d + p\phi_v \omega_d + Ri_{qd} + L_s i_{dd} + \tau_q$$

$$u_d = -p\hat{\imath}_q \omega_d + Ri_{dd} + L_s \dot{\imath}_{dd} + \tau_d$$

Puisque le rotor est un aimant permanent alors $i_{dd} = 0$.

$$u_q = L_s p\hat{\imath}_d \omega_d + p\phi_v \omega_d + Ri_{qd} + \tau_q$$

$$u_d = -p\hat{\imath}_q \omega_d + \tau_d$$

Où τ_q, τ_d sont les nouvelles commandes. La commande τ est donnée par :

$$\tau = -\sum_{i=1}^{4} h_i F_i(\hat{x} - x_d)$$

où $\tau = [\tau_q \ \tau_d]^T$

$$\hat{x} = [\hat{\omega} \ \hat{\imath}_q \ \hat{\imath}_d]^T$$

$$x_d = [\omega_d \ i_{qd} \ i_{dd}]^T$$

La simulation du système en utilisant les mêmes gains F_i et L_i obtenus dans la séction 3.4, nous a donné les résultats représentés sur les figures 4.7, 4.8, 4.9 et 4.10 qui montrent respectivement, la variation des vitesses angulaires $\hat{\omega}$, ω et ω_d, la variation des courants $\hat{\imath}_q$, i_q et i_{qd}, la variation des courants $\hat{\imath}_d$, i_d et i_{dd} et la variation des tensions de commande u_q et u_d, pour les conditions initiales $x = [0\text{rd/s}, 0\text{A}, 0\text{A}]^{\text{T}}$, $\hat{x} = [0\text{rd/s}, 0\text{A}, 0\text{A}]^{\text{T}}$ et la vitesse desirée $\omega_d = 25\,sin(0.5t) + 25$.

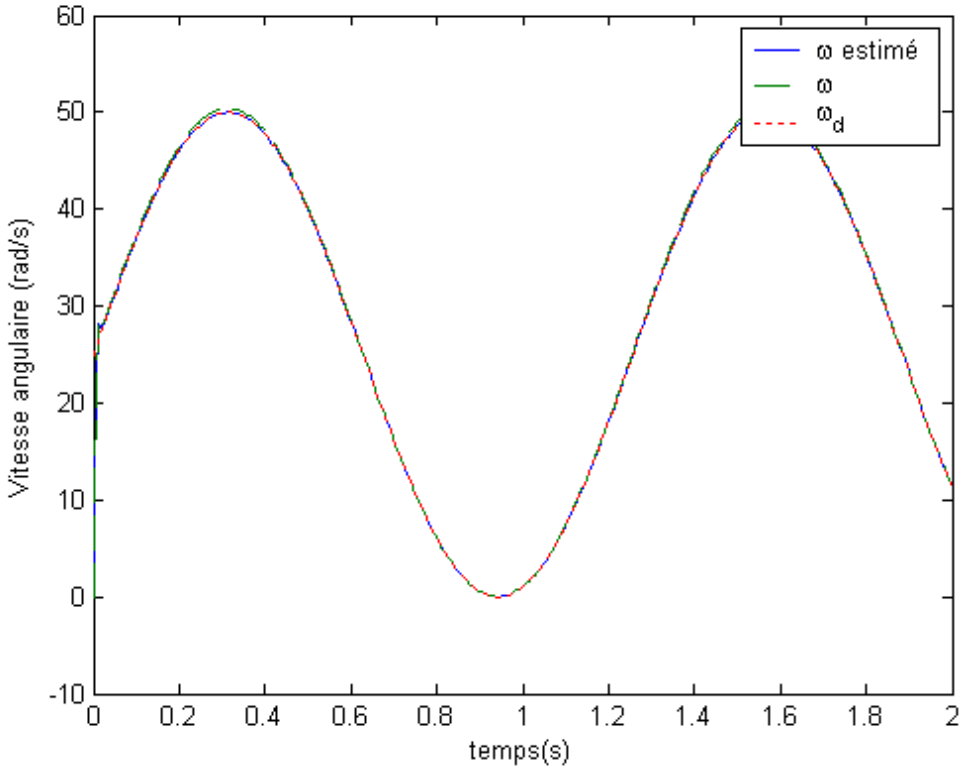

Figure 4.7 : Variation des vitesses angulaires $\hat{\omega}$, ω et ω_d

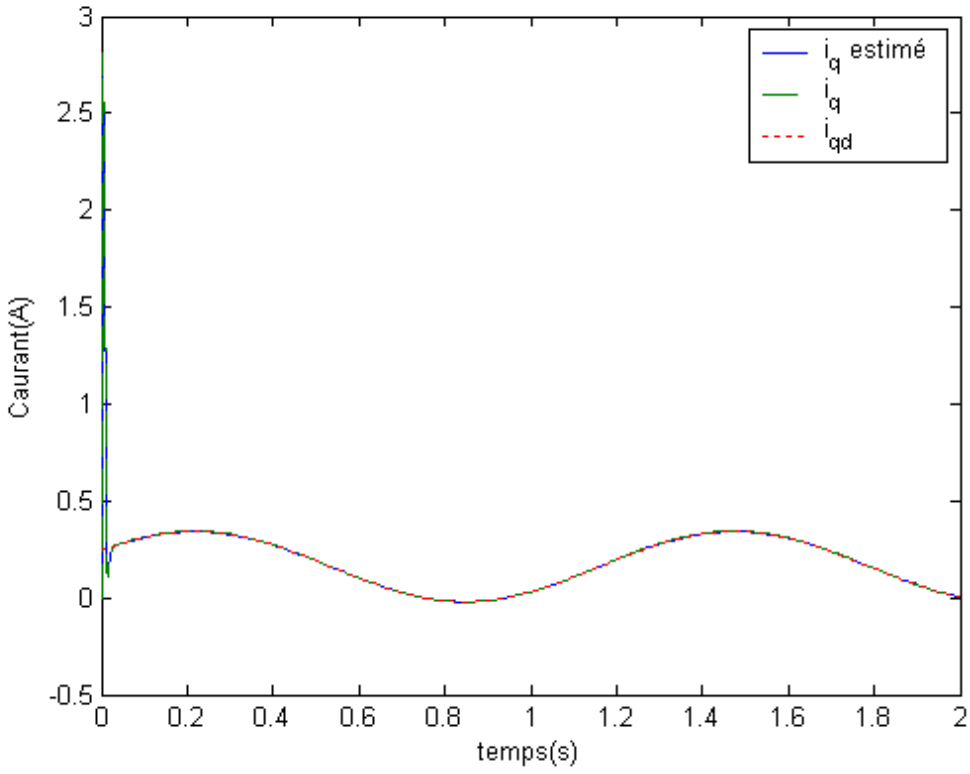

Figure 4.8 : Variation des courants $\hat{\imath}_q$, i_q et i_{qd}

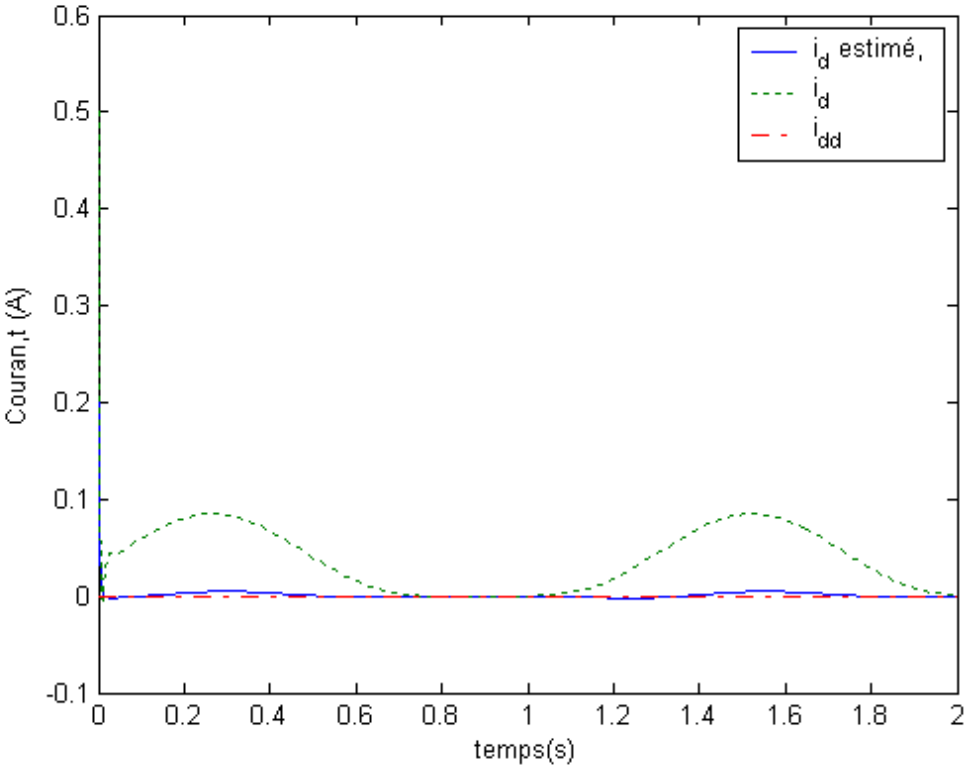

Figure 4.9 : Variation des courants $\hat{i}_d$, i_d et i_{dd}

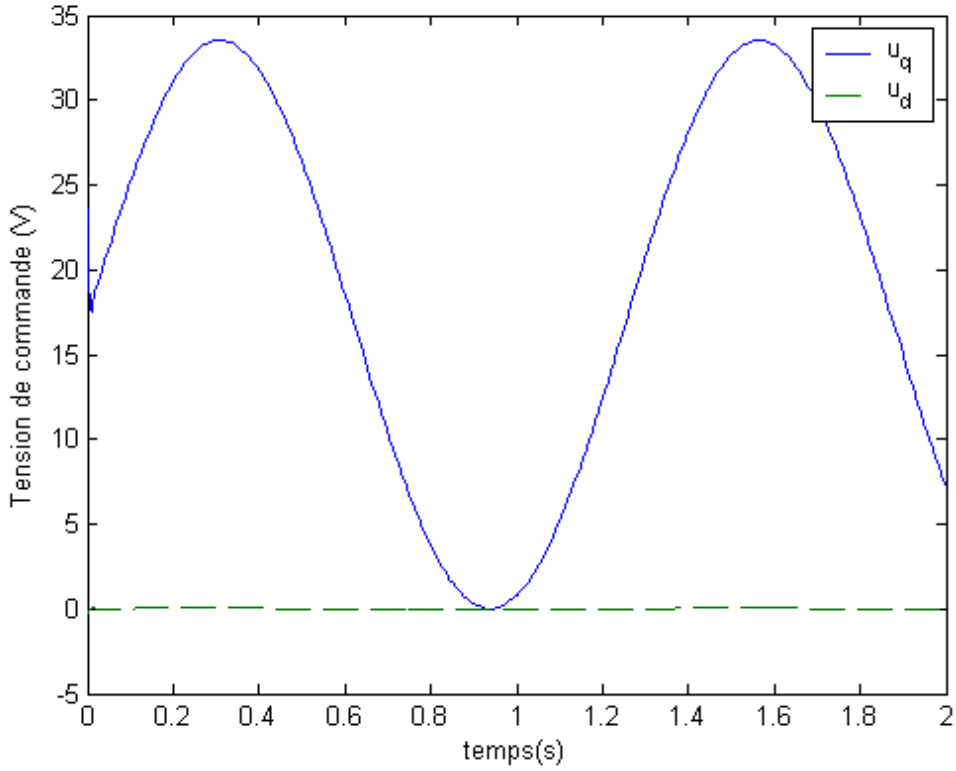

Figure 4.10 : Variation des tensions de commande u_q et u_d

La simulation du système, pour la vitesse desirée $\boldsymbol{\omega_d(t) = 50\,rad/s}$ et les conditions initiales $\boldsymbol{x = [0rd/s, 0A, 0A]^T}$, $\boldsymbol{\hat{x} = [0rd/s, 0A, 0A]^T}$, nous a donné les resultats représentés sur les figures 4.11, 4.12, 4.13 et 4.14, qui montrent respectivement, la variation des vitesses angulaires $\boldsymbol{\hat{\omega}}$, $\boldsymbol{\omega}$ et $\boldsymbol{\omega_d}$, la variation des courants $\boldsymbol{\hat{\imath}_q}$, $\boldsymbol{i_q}$ et $\boldsymbol{i_{qd}}$, la variation des courants $\boldsymbol{\hat{\imath}_d}$, $\boldsymbol{i_d}$ et $\boldsymbol{i_{dd}}$ et la variation des tensions de commande $\boldsymbol{u_q}$ et $\boldsymbol{u_d}$.

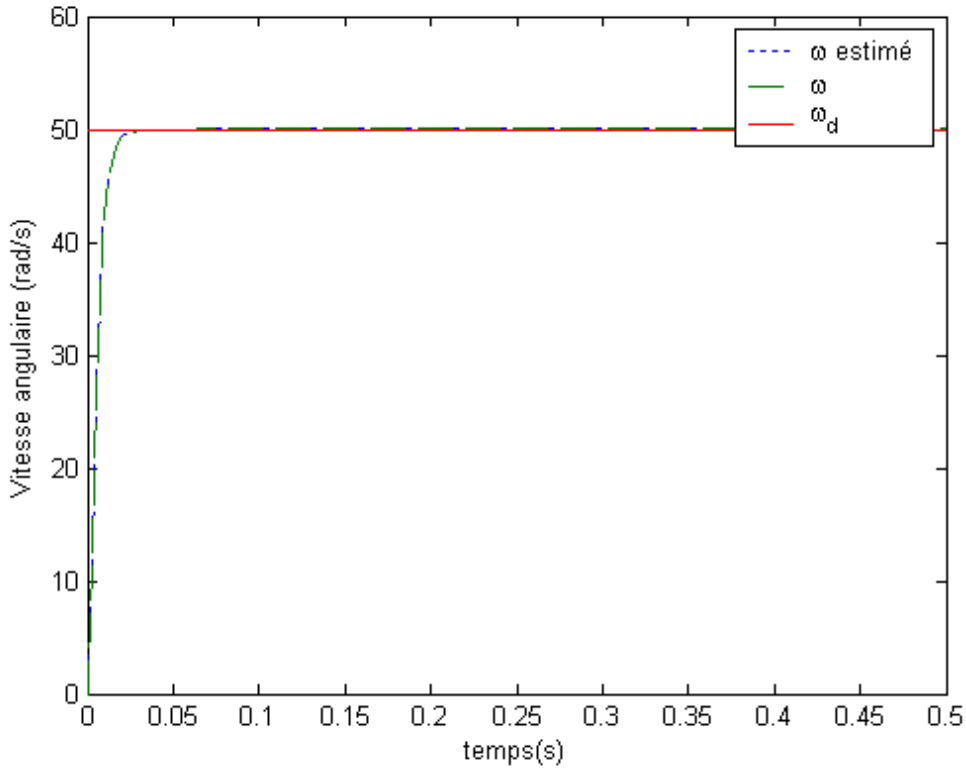

Figure 4.11 : Variation de la vitesse angulaire $\hat{\omega}$, ω et ω_d

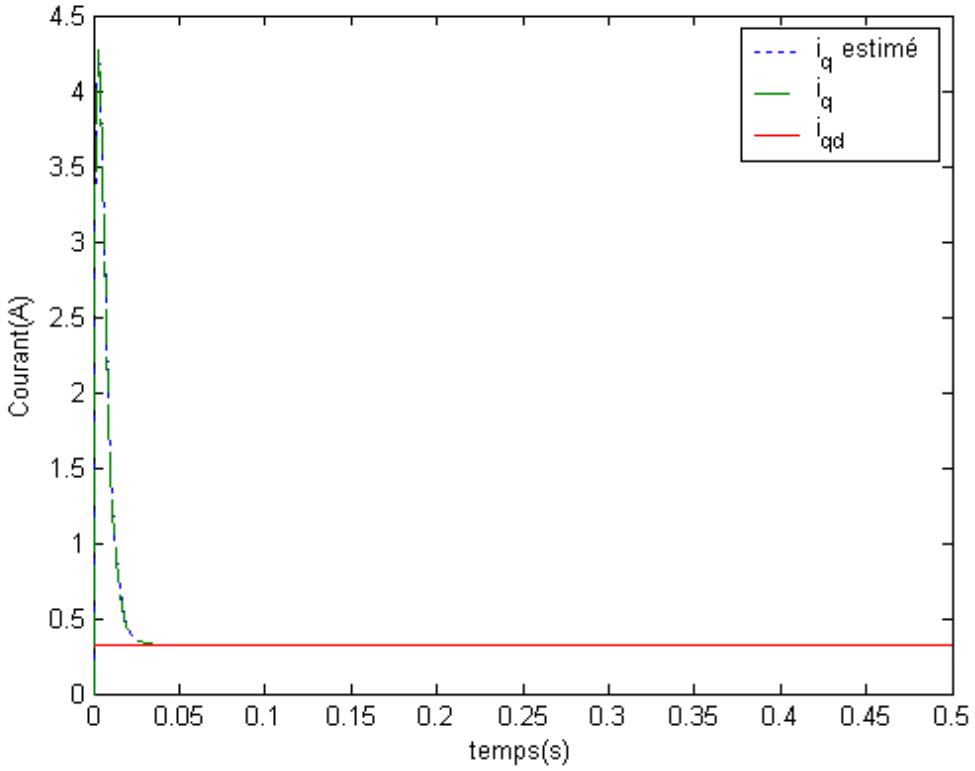

Figure 4.12 : Variation des courants $\hat{i}_q$, i_q et i_{qd}

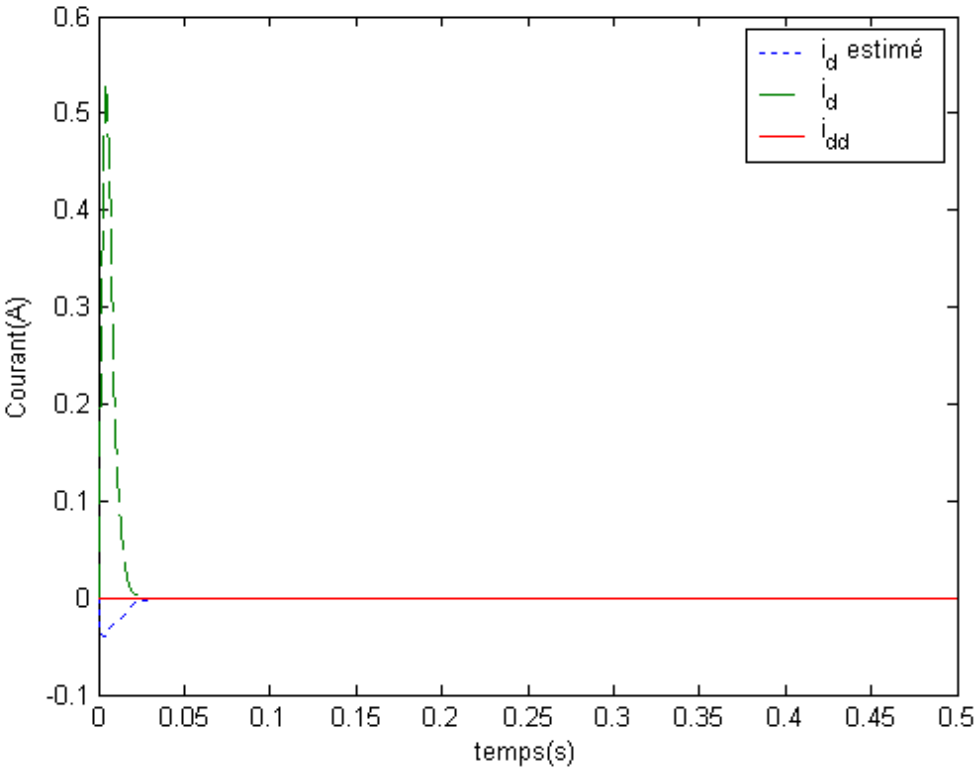

Figure 4.13 : Variation des courants $\hat{i}_d$, i_d et i_{dd}

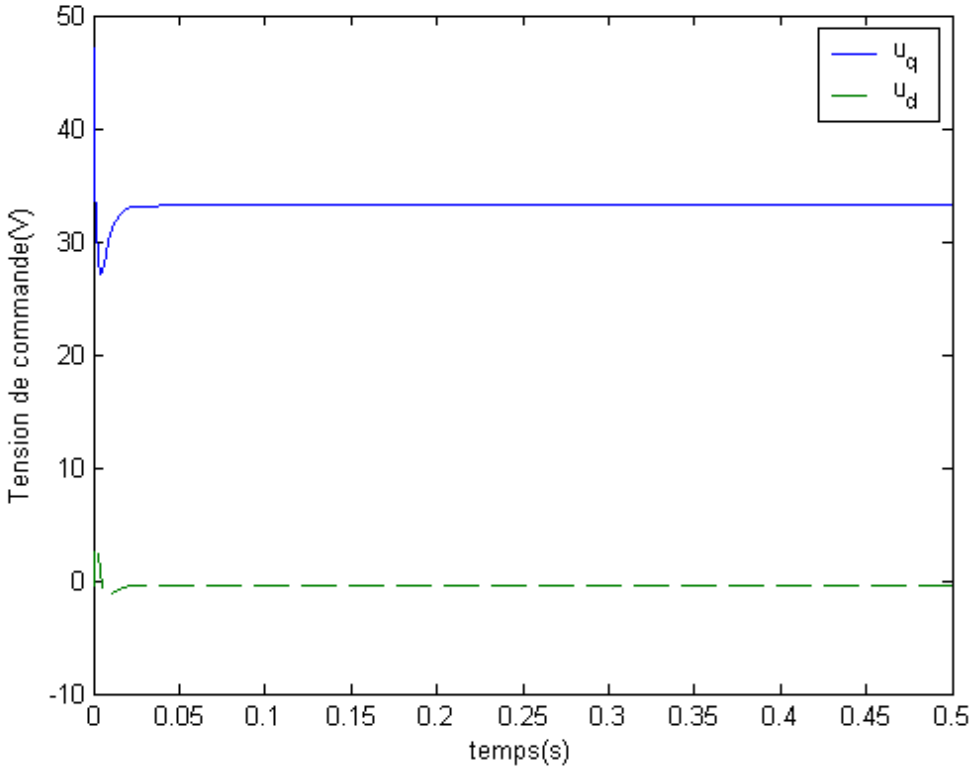

Figure 4.14 : Variation des tensions de commande u_q et u_d

La simulation du système pour la vitesse desirée, carée d'amplitude $\mathbf{50}\ \boldsymbol{rad/s}$ et de periode $\mathbf{0.5}\ \boldsymbol{s}$, et les conditions initiales $\boldsymbol{x} = [\mathbf{0\ rd/s}, \mathbf{0.A}, \mathbf{0.3\ A}]^{\mathbf{T}}$ et $\hat{\boldsymbol{x}} = [\mathbf{20rd/s}, \mathbf{0.1A}, \mathbf{0.2A}]^{\mathbf{T}}$, nous a donné les resultats représentés sur les figures 4.15, 4.16, 4.17 et 4.18, qui montrent respectivement, la variation des vitesses angulaires $\hat{\boldsymbol{\omega}}$, $\boldsymbol{\omega}$ et $\boldsymbol{\omega_d}$, la variation des courants $\hat{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{q}}$, $\boldsymbol{i_q}$ et $\boldsymbol{i_{qd}}$, la variation des courants $\hat{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{d}}$, $\boldsymbol{i_d}$ et $\boldsymbol{i_{dd}}$ et la variation des tensions de commande $\boldsymbol{u_q}$ et $\boldsymbol{u_d}$.

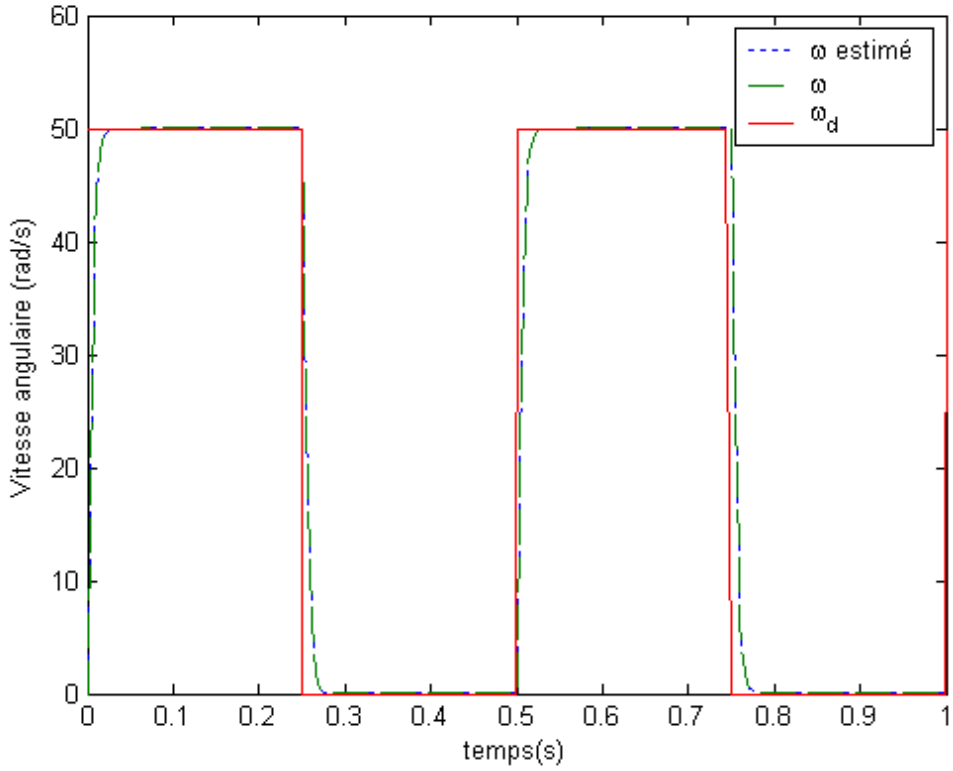

Figure 4.15 : Variation des vitesses angulaires $\hat{\omega}$, ω et ω_d

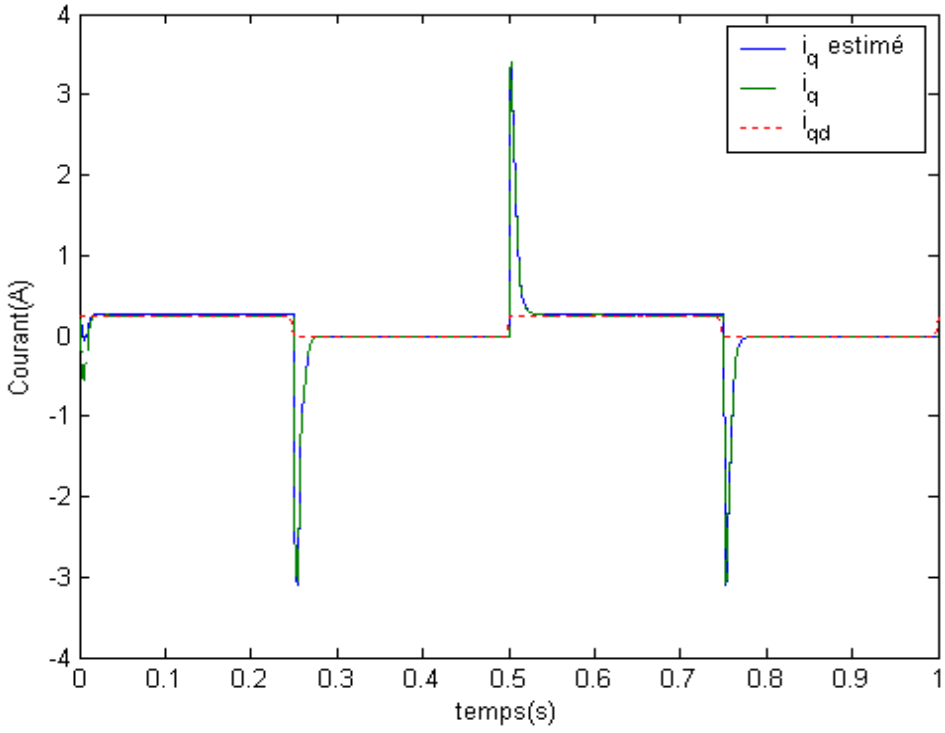

Figure 4.16 : Variation des courants $\hat{i}_q$, i_q et i_{qd}

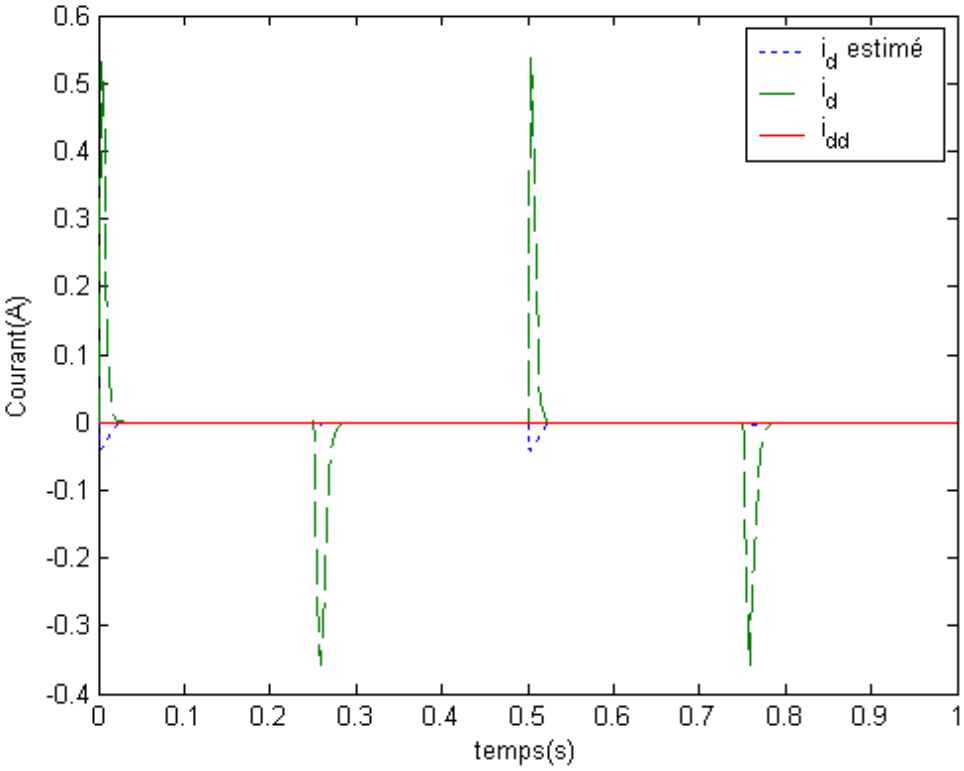

Figure 4.17 : Variation des courants $\hat{i}_d$, i_d et i_{dd}

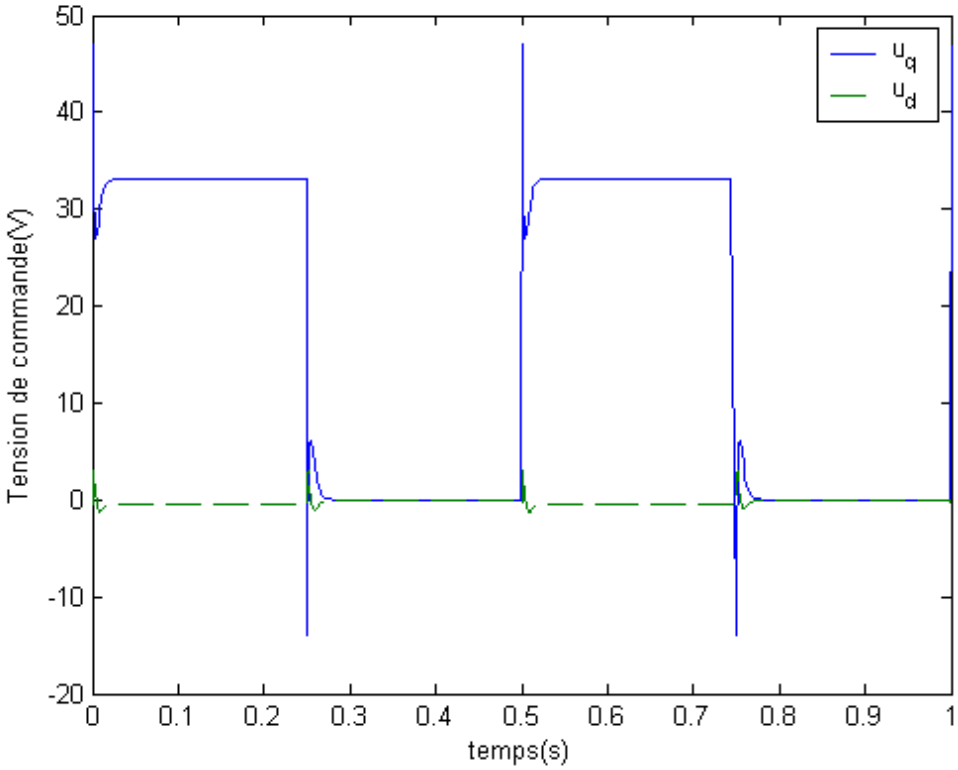

Figure 4.18 : Variation des tensions de commande u_q et u_d

4. Cas des variables des prémisses non mesurables

Dans cette section, nous supposons qu'une partie (ou la totalité) des variables des prémisses ne sont pas mesurables, le régulateur flou utilise les variables reconstruites et sa structure est modifiée par rapport à (4.3) qui s'écrit [24] :

$$\boldsymbol{u(t) = -\sum_{i=1}^{r} h_i(\hat{z}(t))\, F_i(\hat{x}(t))} \quad \textbf{(4.9)}$$

et en remplaçant (4.10), (4.11) et (4.21) dans (4.2), le système augmenté est réprésenté par :

$$\dot{x}_a(t) = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\sum_{s=1}^{r} h_i(z(t))h_j(\hat{z}(t))h_s(\hat{z}(t))\, G_{ijs}x_a \quad \textbf{(4.10)}$$

$$= \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(z(t))h_j(\hat{z}(t))h_j(\hat{z}(t))G_{ijj}x_a$$

$$+ 2\sum_{i=1}^{r}\sum_{j<s}^{r} h_i(z(t))h_j(\hat{z}(t))h_s(\hat{z}(t))\frac{G_{ijs} + G_{isj}}{2}x_a$$

avec $x_a(t) = \begin{bmatrix} x \\ \tilde{x} \end{bmatrix}$

$$\tilde{x} = x(t) - \hat{x}(t)$$

$$G_{ijs} = \begin{bmatrix} A_i - B_iF_s & B_iF_s \\ S_{ijs}^1 & S_{ijs}^2 \end{bmatrix}$$

$$S_{ijs}^1 = (A_i - A_j) - (B_i - B_j)F_s + K_j(C_s - C_i)$$

$$S_{ijs}^2 = A_j - K_jC_s + (B_i - B_j)F_s$$

***Théorème* 4.3** : Le systéme augmenté (4.10) est asymptotiquement stable s'il existe une matrice P définie positive telle que :

$$G_{ijj}^T P + PG_{ijj} < 0$$

$$\left(\frac{G_{ijs} + G_{isj}}{2}\right)^T P + P\left(\frac{G_{ijs} + G_{isj}}{2}\right) < 0 \; i,j < s \quad \textbf{(4.11)}$$

pour tous les i, j *et* s, sauf les paires (i, j, s) telles que : $h_i(z(t))h_j(\hat{z}(t))h_s(\hat{z}(t)) = 0$

4.1 Synthèse de la loi de commande

Les contraintes obtenues en 4.11 sont non convexes et peuvent avoir, par conséquent, plusieurs solutions. Elles sont difficiles à linéariser par les techniques classiques de changement de variables et le principe de séparation ne peut pas être appliqué. La méthode que nous proposons est basée sur l'utilisation de la technique de placement de pôle pour déterminer les gains de régulateur $\boldsymbol{F_i}$ et les gains de l'observateur $\boldsymbol{L_i}$ de telle sorte que le système ait les pôles désirés ou, plus rigoureusement, de telle sorte que la matrice d'états en boucle fermée ait les valeurs propres spécifiées. Les gains $\boldsymbol{F_i}$ et $\boldsymbol{L_i}$ sont ensuite remplacés dans (4.10) par leurs valeurs. En résolvant les LMIs (4.11) pour vérifier l'existence de la matrice commune $\boldsymbol{P} > 0$, si une matrice existe le problème est résolu, sinon on fait un autre choix des pôles jusqu'à l'obtention d'une matrice commune $\boldsymbol{P}$.

4.2 Application à la machine synchrone à aiments permanents

4.2.1 Stabilisation avec observateur

4.2.1.1 Machine synchrone à aimants permanents décrite par un modèle flou à quatre règles

Pour stabiliser la machine synchrone à aimants permanents décrite par le modèle flou présenté dans la section (3.4), nous utilisons une loi de commande PDC donnée par :

$$\boldsymbol{u(t)} = -\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{4}} \boldsymbol{h_i}\big(\hat{\boldsymbol{z}}(\boldsymbol{t})\big)\, \boldsymbol{F_i}(\hat{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t}))$$

Nous avons choisis $\mathbf{10^2}\ [-\mathbf{4}, -\mathbf{3}, -\mathbf{2}\ ]$ comme pôles désirés, la simulation a donné les résultats suivant :

La matrice $\boldsymbol{P}$ est :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0.0090} & \mathbf{0.0218} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0019} & \mathbf{0.0064} & \mathbf{0.0000} \\ \mathbf{0.0218} & \mathbf{0.6960} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0011} & \mathbf{0.0163} & \mathbf{0.0000} \\ \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0038} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0000} \\ \mathbf{0.0019} & \mathbf{0.0011} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0076} & \mathbf{0.0139} & \mathbf{00.000} \\ \mathbf{0.0064} & \mathbf{0.0163} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0139} & \mathbf{0.3770} & \mathbf{0.0000} \\ \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0085} \end{bmatrix}$$

Les gains du régulateur sont :

$$F_1 = \begin{bmatrix} -0.2144 & 1.1386 & 0 \\ 0.0464 & 0 & 0.0900 \end{bmatrix}$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} -0.2144 & 1.1386 & 0 \\ 0.0464 & 0 & 0.0900 \end{bmatrix}$$

$$F_3 = \begin{bmatrix} -0.1958 & 1.1386 & 0 \\ 0.0464 & 0 & 0.0900 \end{bmatrix}$$

$$F_4 = \begin{bmatrix} -0.1958 & 1.1386 & 0 \\ 0.0464 & 0 & 0.0900 \end{bmatrix}$$

Les gains de l'observateur sont :

$$L_1 = \begin{bmatrix} 210.3701 & 444.4743 \\ 181.5218 & -109.8067 \\ -29.6655 & -75.6115 \end{bmatrix}$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} 210.3701 & 444.4743 \\ 181.5218 & -109.8067 \\ -29.6655 & -75.6115 \end{bmatrix}$$

$$L_3 = \begin{bmatrix} 172.1223 & 454.1476 \\ 181.6051 & -108.8348 \\ -30.1258 & -75.6947 \end{bmatrix}$$

$$L_4 = \begin{bmatrix} 172.1223 & -454.1476 \\ 181.6051 & 108.8348 \\ 30.1258 & -75.6947 \end{bmatrix}$$

Les figures 4.19, 4.20 et 4.21 montrent respectivement la variation des vitesses angulaires $\hat{\omega}(t)$ et $\omega(t)$, la variation des courants $\hat{i}_q(t)$ et $i_q(t)$, la variation des courants $\hat{i}_d(t)$ et $i_d(t)$. les figures 4.22 et 4.23 montrent respectivement la variation des tensions de commande u_q et u_d, pour les conditions initiales $[20\text{rd/s}\ 0.5\text{A}\ 0.4\text{A}]^T$.

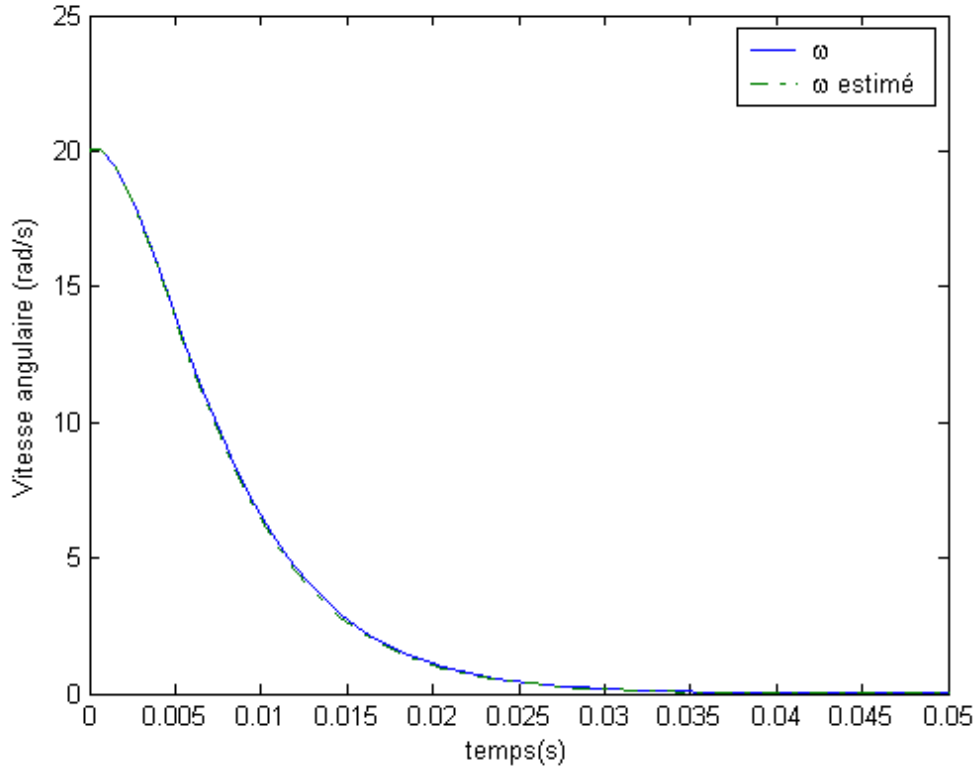

Figure 4.19 : Variation des vitesses angulaires $\hat{\omega}(t)$ et $\omega(t)$

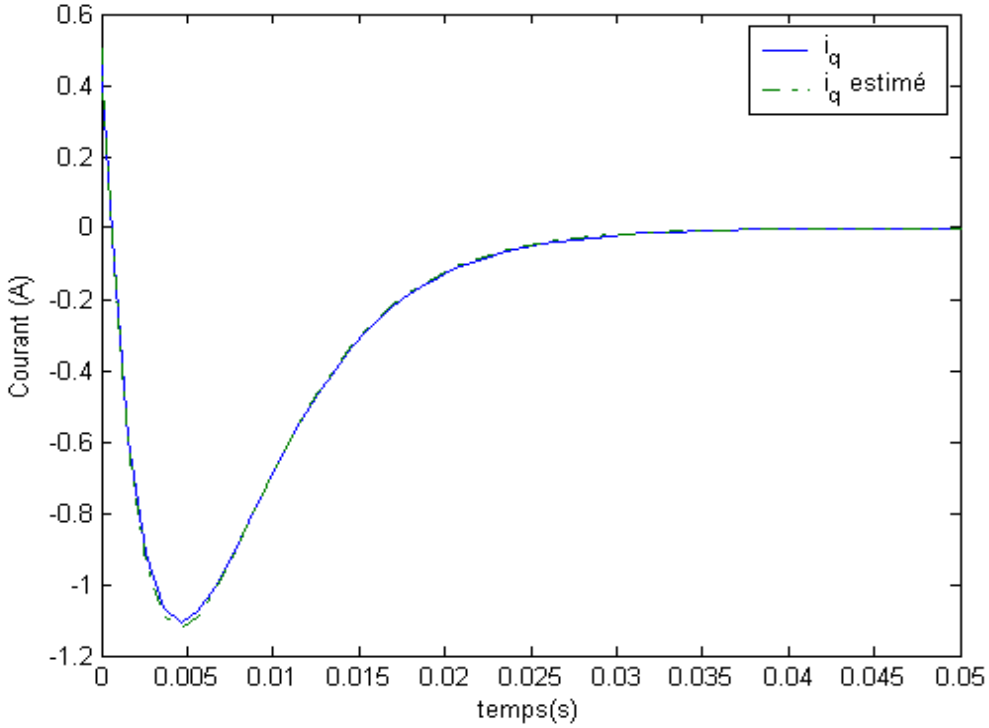

Figure 4.20 : Variation des courants $\hat{i}_q$ et i_q

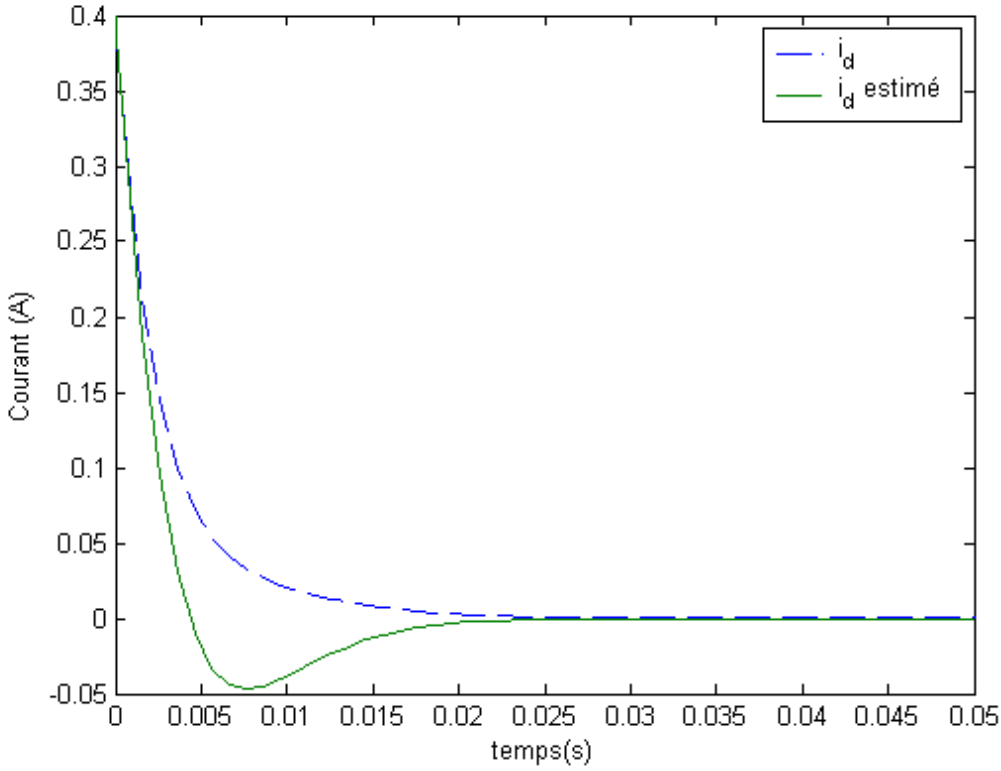

Figure 4.21 : Variation des courants $\hat{i}_d$ et i_d

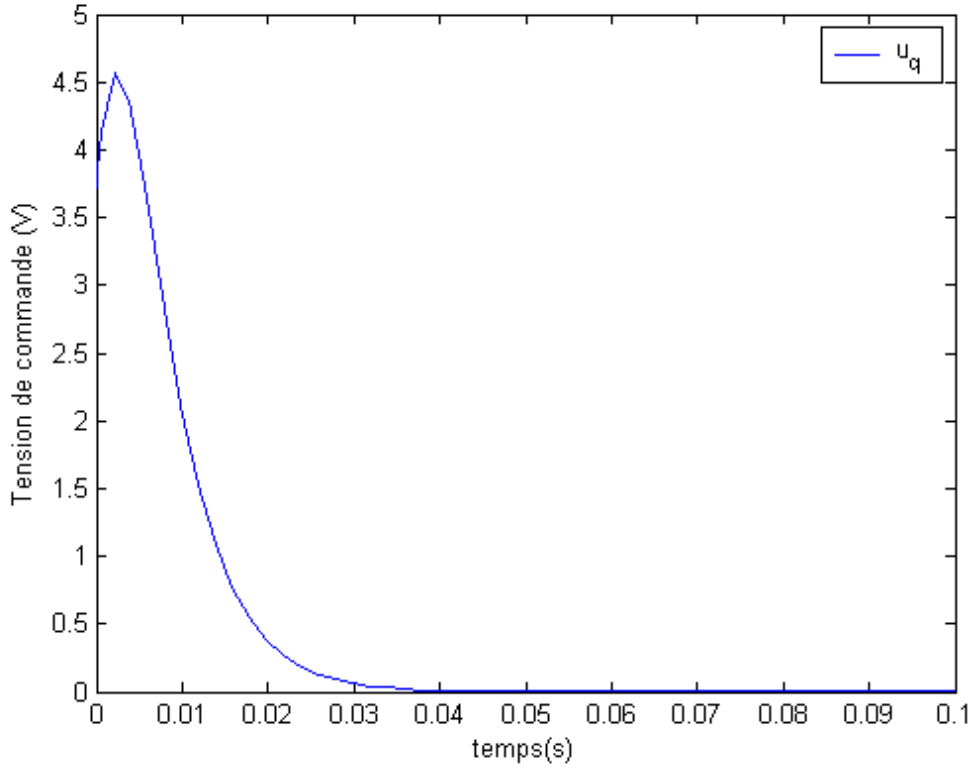

Figure 4.22 : Variation de la commande u_q

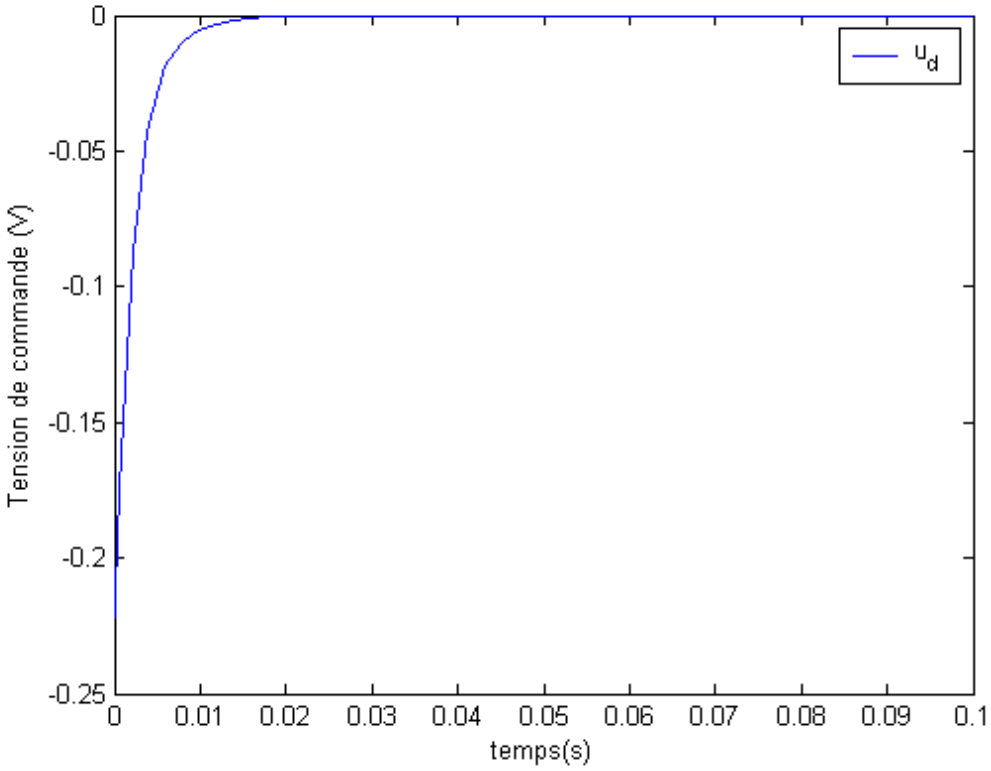

Figure 4.23 : Variation de la commande u_d

4.2.1.2 Machine synchrone à aimants permanents décrite par un modèle flou à deux règles

L 'observateur est représenté par :

$$\begin{bmatrix}\dot{\hat{\omega}}\\ \dot{\hat{i}}_q\\ \dot{\hat{i}}_d\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\frac{B}{J} & \frac{3p\phi_v}{2J} & 0\\ -\frac{p\phi_v}{L} & -\frac{R}{L} & -p\hat{\omega}\\ 0 & p\hat{\omega} & -\frac{R}{L}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{\omega}\\ \hat{i}_q\\ \hat{i}_d\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & 0\\ \frac{1}{L} & 0\\ 0 & \frac{1}{L}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_q\\ u_d\end{bmatrix} + L_i(y-\hat{y})$$

$$\hat{y} = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{\omega}\\ \hat{i}_q\\ \hat{i}_d\end{bmatrix}$$

où $\hat{y} = [\hat{\omega} \quad \hat{i}_q]$, $y = [\omega \quad i_q]$, L_i sont les gains de l'observateur.

L'observateur peut être décrit par le modèle flou à deux règles suivants :

Règle d'observateur $\boldsymbol{i}$: Si $\hat{\boldsymbol{z}}_{\boldsymbol{1}}(\boldsymbol{t})$ est $\boldsymbol{F_{1i}}$ alors

$$\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{A_i}\hat{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{B_i}\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{L_i}(\boldsymbol{y} - \hat{\boldsymbol{y}}) \\ \hat{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{C_i}\hat{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t}) \end{cases} \quad \boldsymbol{i = 1..2}$$

$\hat{\boldsymbol{\omega}}$ est la vitesse angulaire éstimée supposée bornée telle que $\boldsymbol{\omega} \in [\boldsymbol{d}, \boldsymbol{D}]$, $\hat{\boldsymbol{z}}_{\boldsymbol{1}} = \hat{\boldsymbol{\omega}}$ est la variable prémisse éstimée, $\boldsymbol{F_{11}}$, $\boldsymbol{F_{12}}$ sont les fonctions d'appartenances, $\boldsymbol{B_i}$ sont les matrices de commande, $\boldsymbol{A_i}$ sont les matrices d'etats, $\boldsymbol{C_i}$ sont les matrices de sorties.

avec

$$\boldsymbol{F_{11}} = \frac{\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{d}}{\boldsymbol{D} - \boldsymbol{d}} \; et \; \boldsymbol{F_{12}} = \frac{\boldsymbol{D} - \boldsymbol{\omega}}{\boldsymbol{D} - \boldsymbol{d}}$$

$$\boldsymbol{A_1} = \begin{bmatrix} \frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{J}} & \frac{\boldsymbol{3p\phi_v}}{\boldsymbol{2J}} & \boldsymbol{0} \\ -\frac{\boldsymbol{p\phi_v}}{\boldsymbol{L}} & -\frac{\boldsymbol{R}}{\boldsymbol{L}} & \boldsymbol{-pD} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{pD} & -\frac{\boldsymbol{R}}{\boldsymbol{L}} \end{bmatrix}, \boldsymbol{A_2} = \begin{bmatrix} \frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{J}} & \frac{\boldsymbol{3p\phi_v}}{\boldsymbol{2J}} & \boldsymbol{0} \\ -\frac{\boldsymbol{p\phi_v}}{\boldsymbol{L}} & -\frac{\boldsymbol{R}}{\boldsymbol{L}} & \boldsymbol{-pd} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{pd} & -\frac{\boldsymbol{R}}{\boldsymbol{L}} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C_1} = \boldsymbol{C_2} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{1} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{1} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B_1} = \boldsymbol{B_2} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{L}} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{L}} \end{bmatrix}$$

Le régulateur possède une loi de commande de la forme suivante :

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}) = -\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{2}} \boldsymbol{h_i}(\hat{\boldsymbol{z}})\, \boldsymbol{F_i}\big(\hat{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t})\big)$$

où

$$\hat{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t}) = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\omega}} & \hat{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{q}} & \hat{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{d}} \end{bmatrix}^{\boldsymbol{T}}$$

Lors de l'utilisation de placement de pôle, nous avons choisi le vecteur $\boldsymbol{90}\,[\boldsymbol{-6}, \boldsymbol{-5}, \boldsymbol{-3}\,]^{\boldsymbol{T}}$ comme pôles désirés. La simulation a ainsi donné les résultats suivants :

La matrice $\boldsymbol{P}$ est :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0.0010} & \mathbf{0.0015} & \mathbf{-0.0001} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0007} & \mathbf{0.0000} \\ \mathbf{0.0013} & \mathbf{0.0042} & \mathbf{-0.0002} & \mathbf{0.0001} & \mathbf{0.0023} & \mathbf{0.0000} \\ \mathbf{-0.0001} & \mathbf{-0.0002} & \mathbf{0.0014} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{-0.0002} & \mathbf{0.0002} \\ \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0001} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0014} & \mathbf{0.0001} & \mathbf{0.0002} \\ \mathbf{0.0007} & \mathbf{0.0023} & \mathbf{-0.0002} & \mathbf{0.0001} & \mathbf{0.0039} & \mathbf{0.0000} \\ \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0002} & \mathbf{0.0002} & \mathbf{0.0000} & \mathbf{0.0025} \end{bmatrix}$$

Les gains du régulateur sont :

$$\boldsymbol{F_1} = \begin{bmatrix} \mathbf{0.2556} & \mathbf{3.6906} & \mathbf{-1.1600} \\ \mathbf{0.000} & \mathbf{1.1600} & \mathbf{1.7140} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{F_2} = \begin{bmatrix} \mathbf{0.2556} & \mathbf{3.6906} & \mathbf{1.1600} \\ \mathbf{0.000} & \mathbf{-1.1600} & \mathbf{1.7140} \end{bmatrix}$$

Les gains de l'observateur sont :

$$\boldsymbol{L_1} = \mathbf{10^3} \begin{bmatrix} \mathbf{0.4770} & \mathbf{1.5648} \\ \mathbf{0.0112} & \mathbf{-0.0111} \\ \mathbf{-0.0012} & \mathbf{0.2097} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{L_2} = \mathbf{10^3} \begin{bmatrix} \mathbf{0.4770} & \mathbf{1.4258} \\ \mathbf{-0.1205} & \mathbf{-0.0111} \\ \mathbf{-0.0012} & \mathbf{-0.2097} \end{bmatrix}$$

Les figures 4.24, 4.25 et 4.26 montrent respectivement, la variation des vitesses angulaires $\hat{\boldsymbol{\omega}}(\boldsymbol{t})$ et $\boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{t})$, la variation des courants $\hat{\boldsymbol{\imath}}_{\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{t})$ et $\boldsymbol{\imath}_{\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{t})$, la variation des courants $\hat{\boldsymbol{\imath}}_{\boldsymbol{d}}(\boldsymbol{t})$ et $\boldsymbol{\imath}_{\boldsymbol{d}}(\boldsymbol{t})$, les figures 4.27 et 4.28 montrent respectivement la variation des tensions de commande $\boldsymbol{u_q}$ et $\boldsymbol{u_d}$, pour les conditions initiales $[\mathbf{20rd/s\ 0.5A\ 0.4A}]^{\mathbf{T}}$.

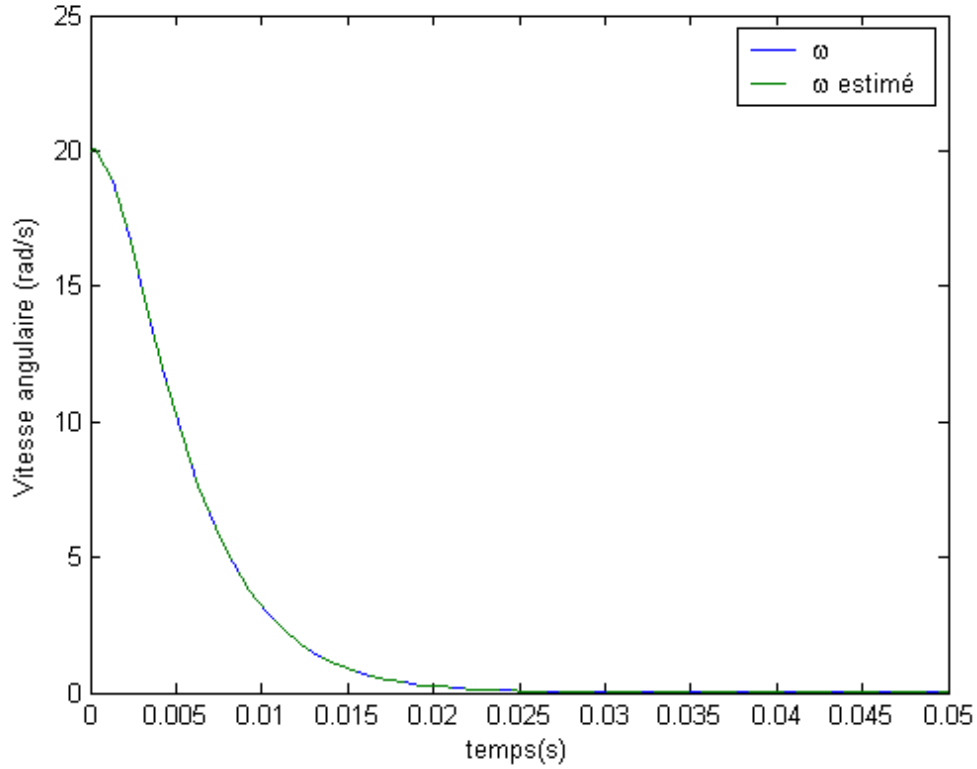

Figure 4.24 : Variation des vitesses angulaires $\hat{\omega}(t)$ et $\omega(t)$

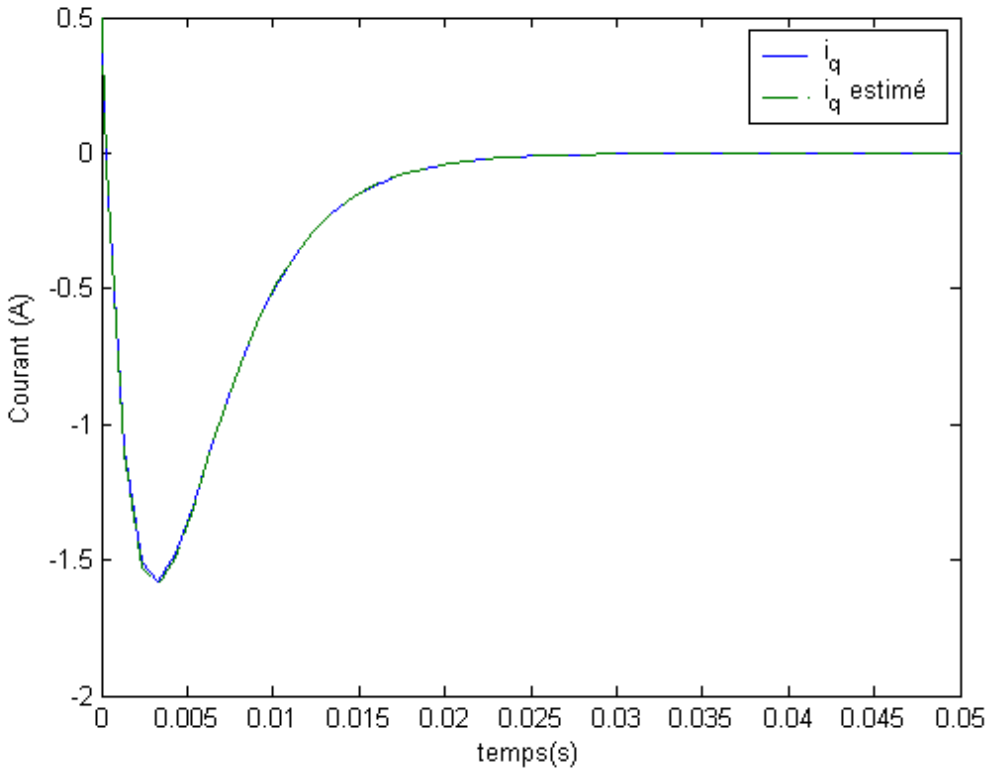

Figure 4. 25 : Variation des courants $\hat{i}_q$ et i_q

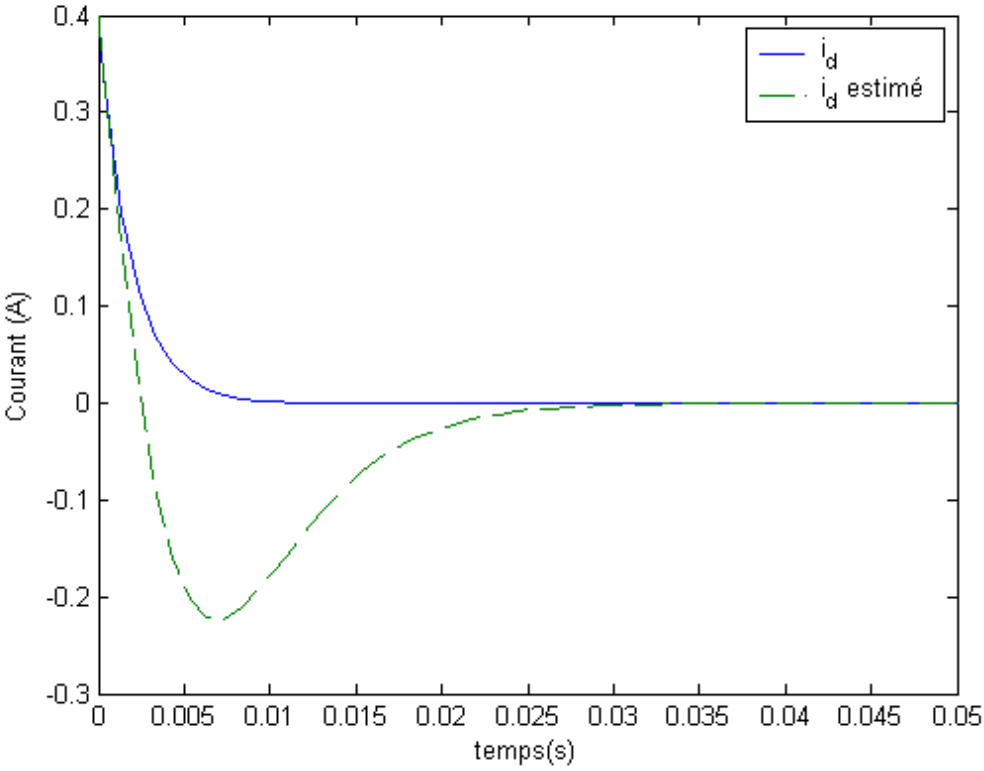

Figure 4.26 : Variation des courants $\hat{i}_d$ et i_d

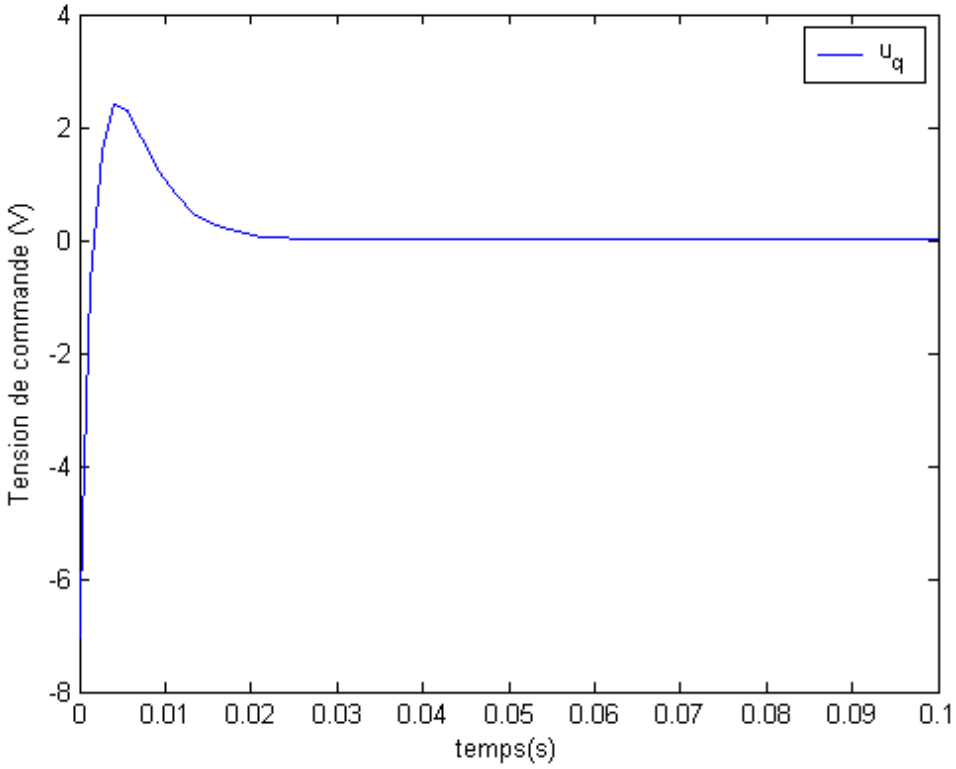

Figure 4.27 : Variation de la commande u_q

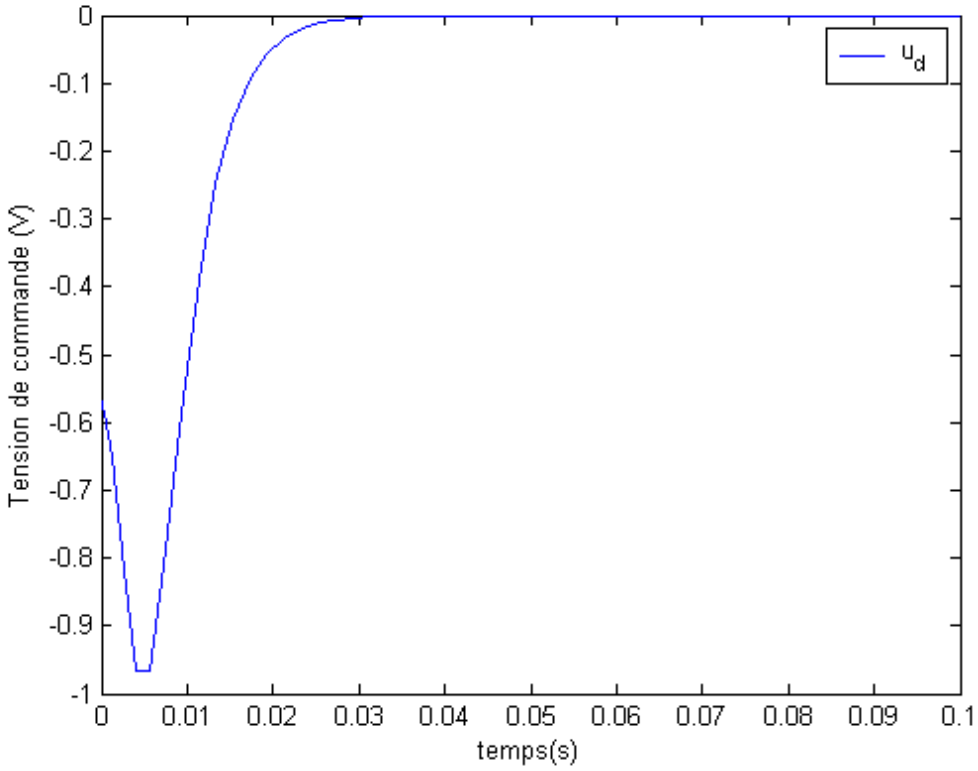

Figure 4.28 : Variation de la commande u_d

4.2.2 Suivi de trajectoire avec observateur

4.2.2.1 Machine synchrone à aimants permanents décrite par un modèle flou à quatre règles

La simulation du système, pour les conditions initiales $\boldsymbol{x = [0rd/s, 0A, 0A]^T}$, $\boldsymbol{\hat{x} = [0rd/s, 0A, 0A]^T}$ et pour la vitesse desirée $\boldsymbol{\omega_d = 25sin(0.5t) + 25}$, nous a donné les resultats représentés sur les figures 4.29, 4.30, 4.31 et 4.32, qui montrent respectivement, la variation des vitesses angulaires $\hat{\omega}$, ω et ω_d, la variation des courants $\hat{i}_q$, i_q et i_{qd}, la variation des courants $\hat{i}_d$, i_d et i_{dd} et la variation des tensions de commande u_q et u_d.

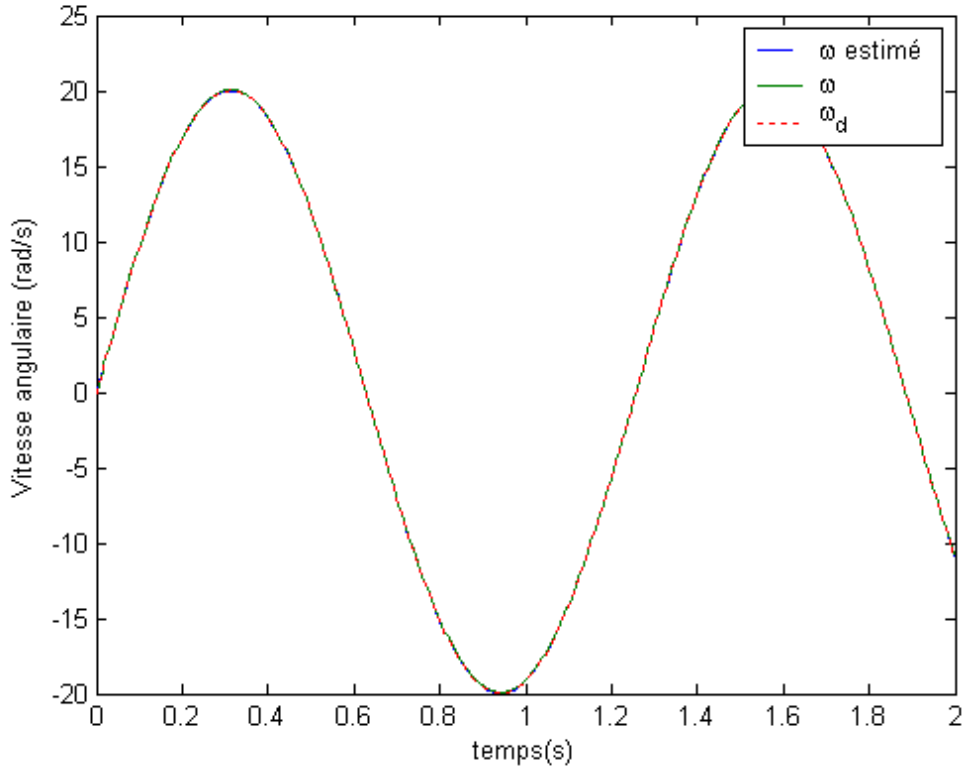

Figure 4.29 : Variation des vitesses angulaires $\hat{\omega}$, ω et ω_d

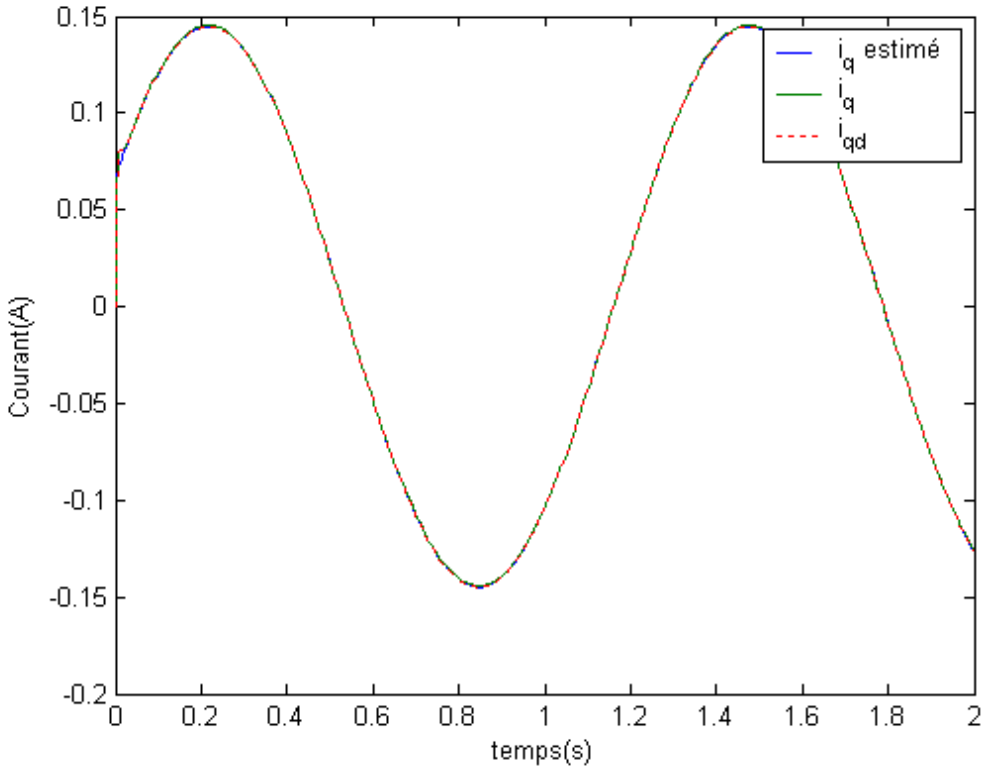

Figure 4.30 : Variation des courants i_{qd}, i_q et $\hat{i}_q$

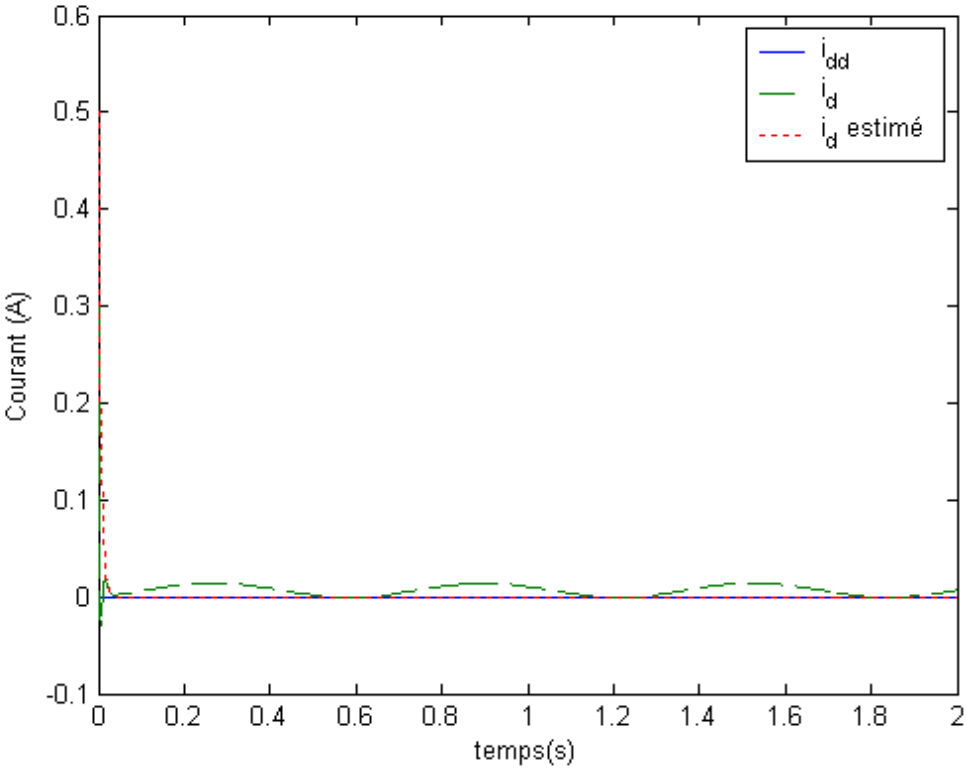

Figure 4.31 : Variation des courants i_{dd}, i_d et $\hat{i}_d$

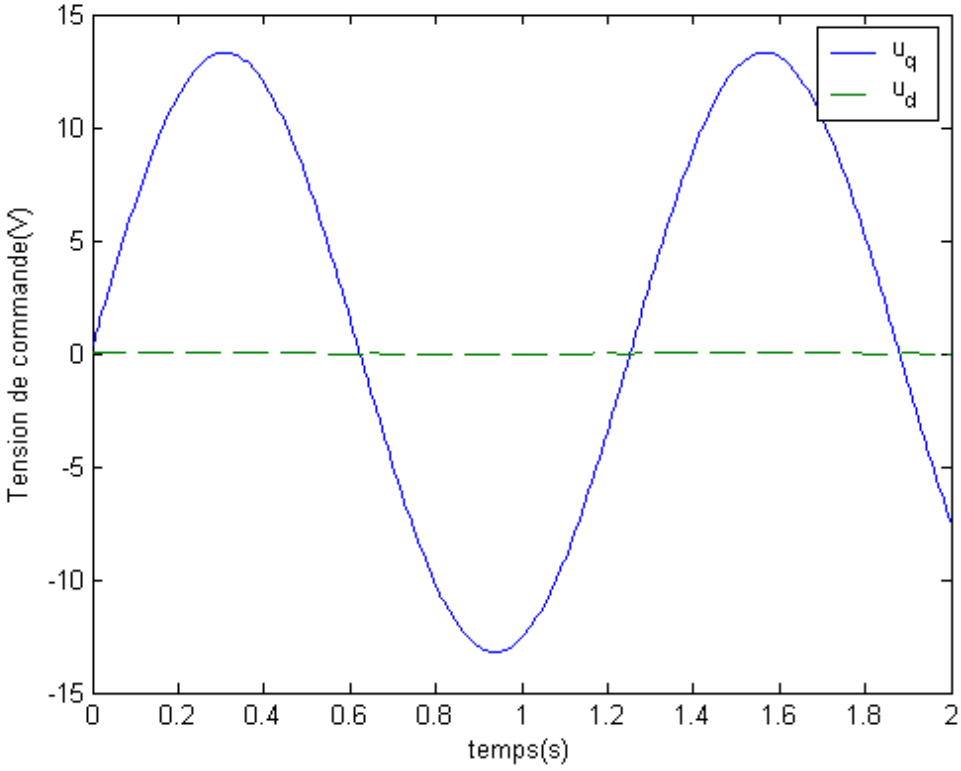

Figure 4.32 : Variation des tensions commande $u_q$et u_d

La simulation du système , pour les conditions initiales $\boldsymbol{x = [0rd/s, 0A, 0A]^T}$, $\boldsymbol{x = [0rd/s, 0A, 0A]^T}$, et pour la vitesse desirée $\boldsymbol{\omega_d = 50/0.2t}$ pour $\boldsymbol{t < 0.2s}$ et $\boldsymbol{\omega_d = 50\, rad/s}$ pour $\boldsymbol{t \geq 0.2s}$, nous a donné les resultats représentés sur les figures 4.33, 4.34, 4.35, et 4.36 qui montrent respectivement, la variation des vitesses angulaires $\boldsymbol{\hat{\omega}}$, $\boldsymbol{\omega}$ et $\boldsymbol{\omega_d}$, la variation des courants $\boldsymbol{\hat{\imath}_q}$, $\boldsymbol{i_q}$ et $\boldsymbol{i_{qd}}$, la variation des courants $\boldsymbol{\hat{\imath}_d}$, $\boldsymbol{i_d}$ et $\boldsymbol{i_{dd}}$, et la variation des tensions de commande $\boldsymbol{u_q}$ et $\boldsymbol{u_d}$.

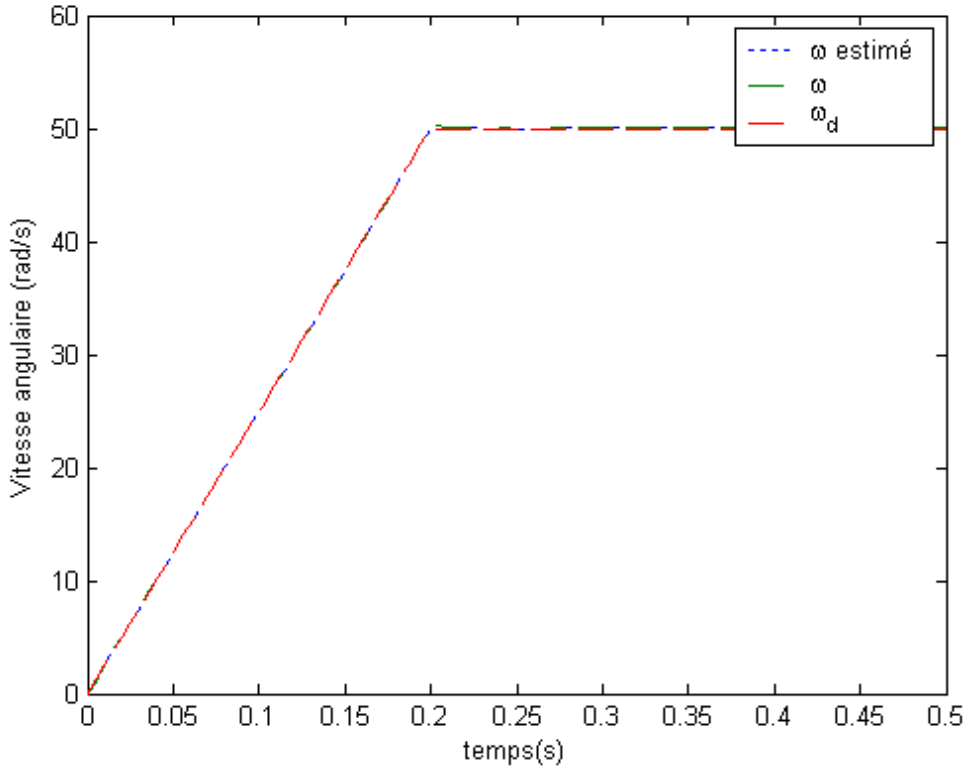

Figure 4.33 : Variation des vitesses angulaires $\hat{\omega}$, ω et ω_d

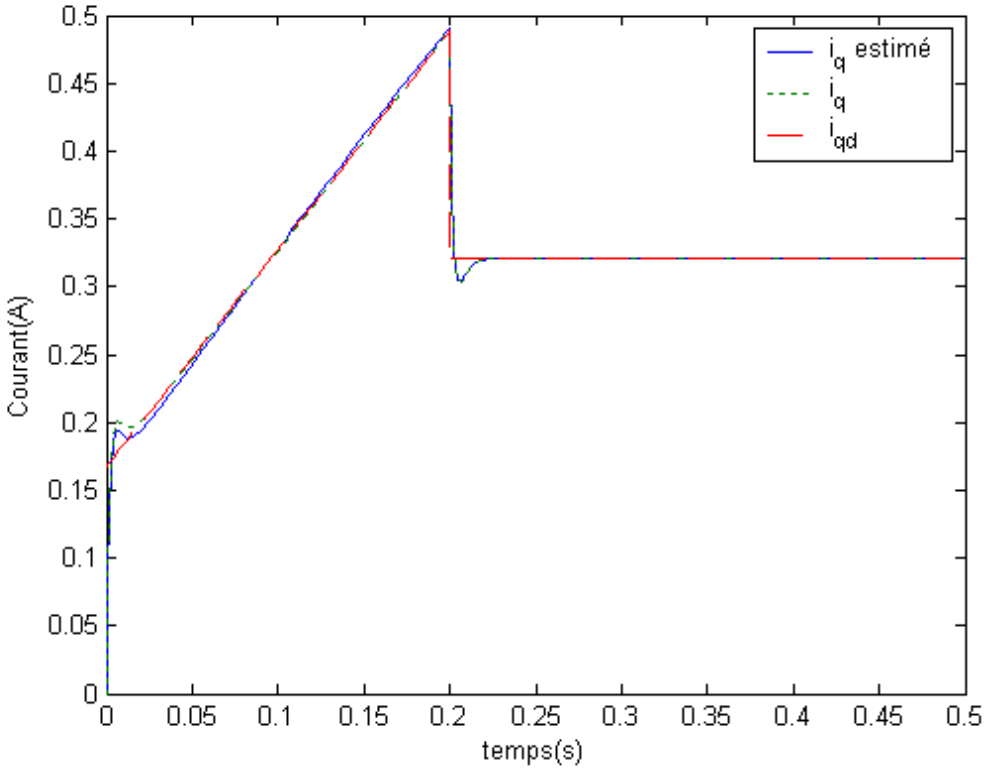

Figure 4.34 : Variation des courants $\hat{i}_q$, i_q et i_{qd}

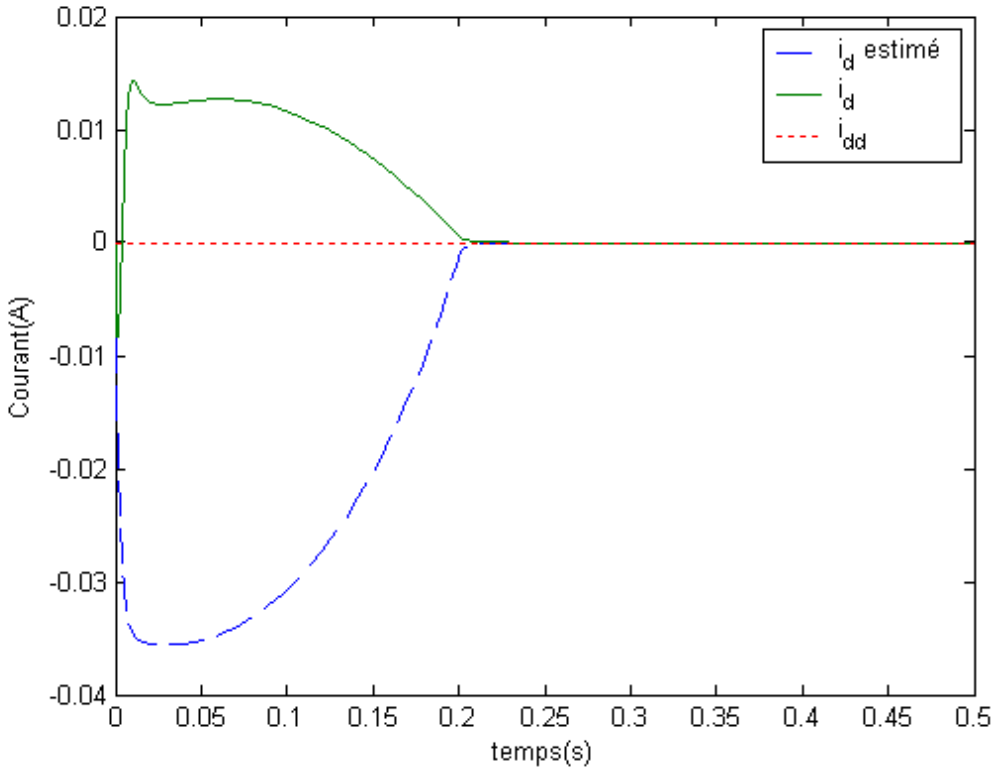

Figure 4.35 : Variation des courants $\hat{i}_d$, i_d et i_{dd}

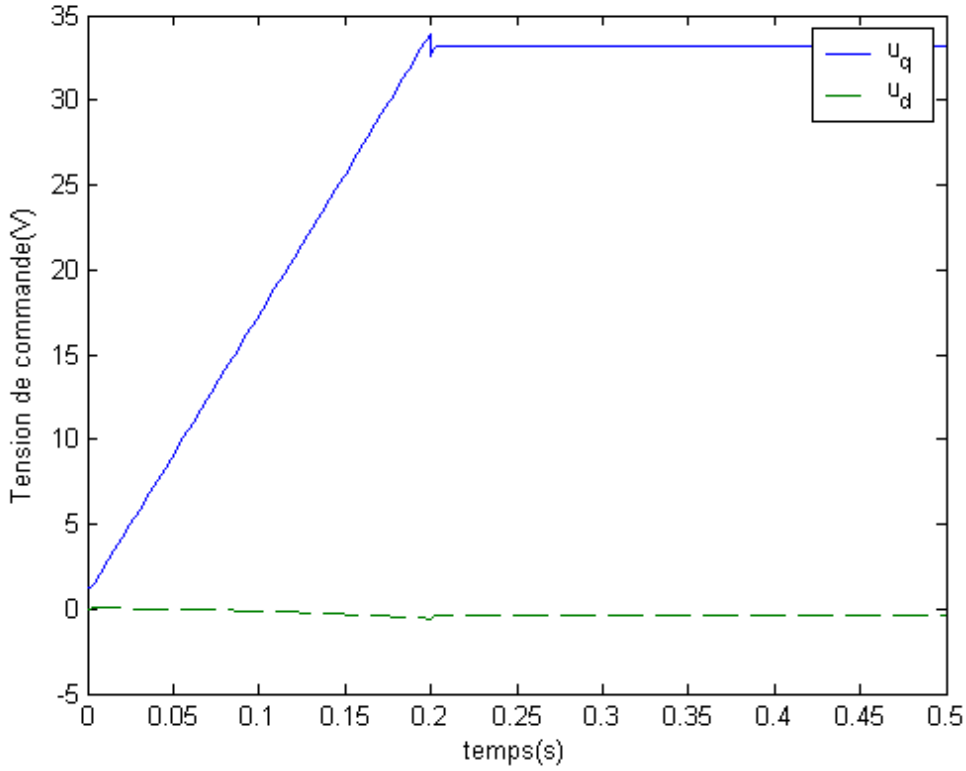

Figure 4.36 : Variation des tensions de commande $u_q$et u_d

4.2.2.2 machine synchrone à aimants permanents décrite par un modèle flou à deux règles

Nous calculons d'abord $\boldsymbol{x_d}$, en utilisant la formule suivante :

$$g(\hat{x})(u(t) - \tau(t)) = -A(\hat{x})x_d(t) + \dot{x_d}(t))$$

Nous avons alors la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \big(u(t) - \tau(t)\big) = -\begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{3P\phi_v}{2J} & 0 \\ -\frac{p\phi_v}{L_s} & -\frac{R_s}{L_s} & -p\hat{\omega} \\ 0 & p\hat{\omega} & \frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_d \\ i_{qd} \\ i_{dd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\omega_d} \\ \dot{\iota_{qd}} \\ \dot{\iota_{dd}} \end{bmatrix}$$

Le second indice $\boldsymbol{d}$ désigne les états désirés. Selon la première équation, on obtient :

$$\dot{\omega_d} = -\frac{B}{J}\omega_d + \frac{3p\phi_v}{2J} i_{qd}$$

Ce qui montre que :

$$i_{qd} = (\dot{\omega}_d + \frac{B}{J}\omega_d)\frac{2J}{3p\phi_v}$$

$$\dot{\imath}_{qd} = (\ddot{\omega}_d + \frac{B}{J}\dot{\omega}_d)\frac{2J}{3p\phi_v}$$

Puis, à partir de la deuxième et la troisième équation, nous pouvons obtenir la loi de commande suivante :

$$u_q = p\phi_v\omega_d + R_s i_{qd} + L_s\dot{\imath}_{qd} + L_s p\hat{\omega} i_{dd} + \tau_q$$

$$u_d = -pL_s\hat{\omega} i_{qd} + R_s i_{dd} + L_s\dot{\imath}_{dd} + \tau_d$$

Puisque le rotor est un aimant permanents alors $i_{dd} = 0$.

$$u_q = p\phi_v\omega_d + R_s i_{qd} + L_s\dot{\imath}_{qd} + \tau_q$$

$$u_d = -pL_s\hat{\omega} i_{qd} + \tau_d$$

Où τ_q, τ_d sont les nouvelles commandes. La commande τ est donnée par :

$$\tau = -\sum_{i=1}^{2} h_i F_i(\hat{x} - x_d)$$

où $\tau = [\tau_q\ \tau_d]^T$

$$\hat{x} = [\hat{\omega}\ \hat{\imath}_q\ \hat{\imath}_d]^T$$

$$x_d = [\omega_d\ i_{qd}\ i_{dd}]^T$$

La simulation du système , pour la vitesse desirée $\omega_d(t) = 25\,sin(0.5t) + 25$ et les conditions initiales $x = [0rd/s, 0A, 0A]^T$, $\hat{x} = [0rd/s, 0A, 0A]^T$, nous a donné les resultats représentés sur les figures 4.37, 4.38, 4.39 et 4.40 qui montrent respectivement, la variation des vitesses angulaires $\hat{\omega}$, ω et ω_d, la variation des courants $\hat{\imath}_q$, i_q et i_{qd}, la variation des courants $\hat{\imath}_d$, i_d et i_{dd} et la variation des tensions de commande u_q et u_d.

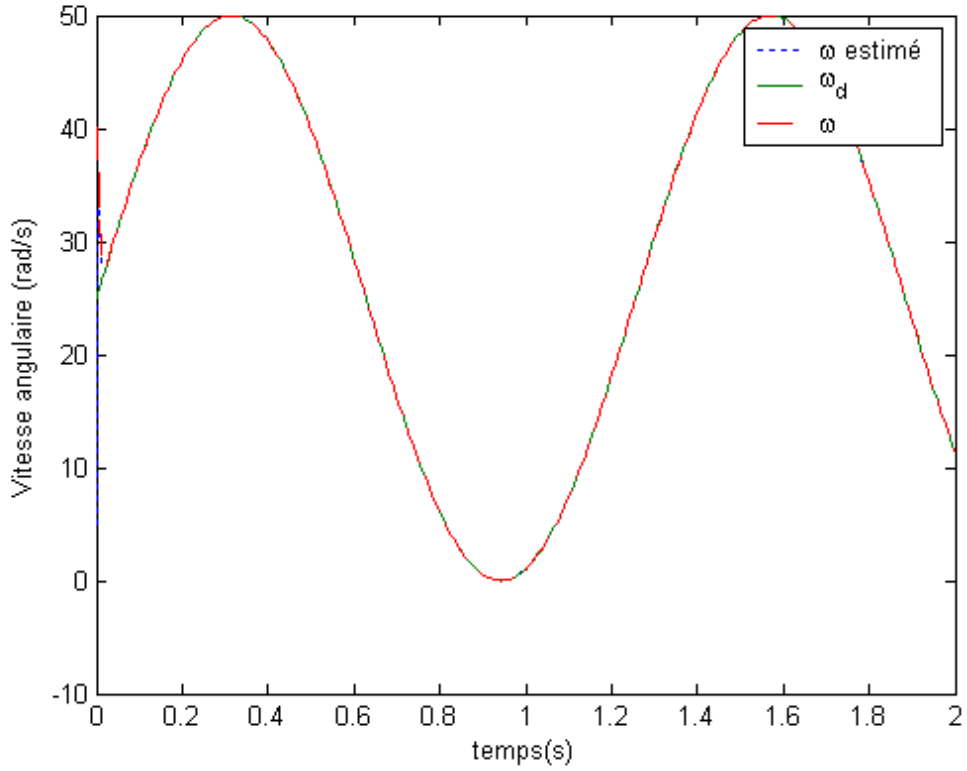

Figure 4.37 : Variation des vitesses angulaires ω_d, ω et $\hat{\omega}$

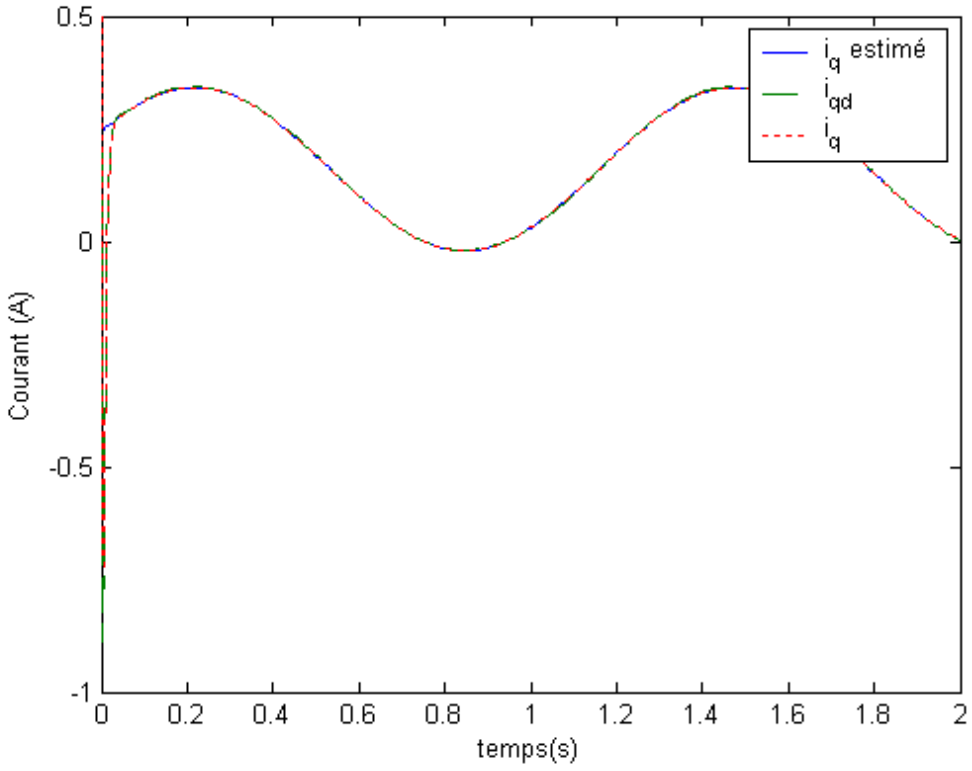

Figure 4.38 : Variation des courants i_q, $\hat{i}_q$ et i_{qd}

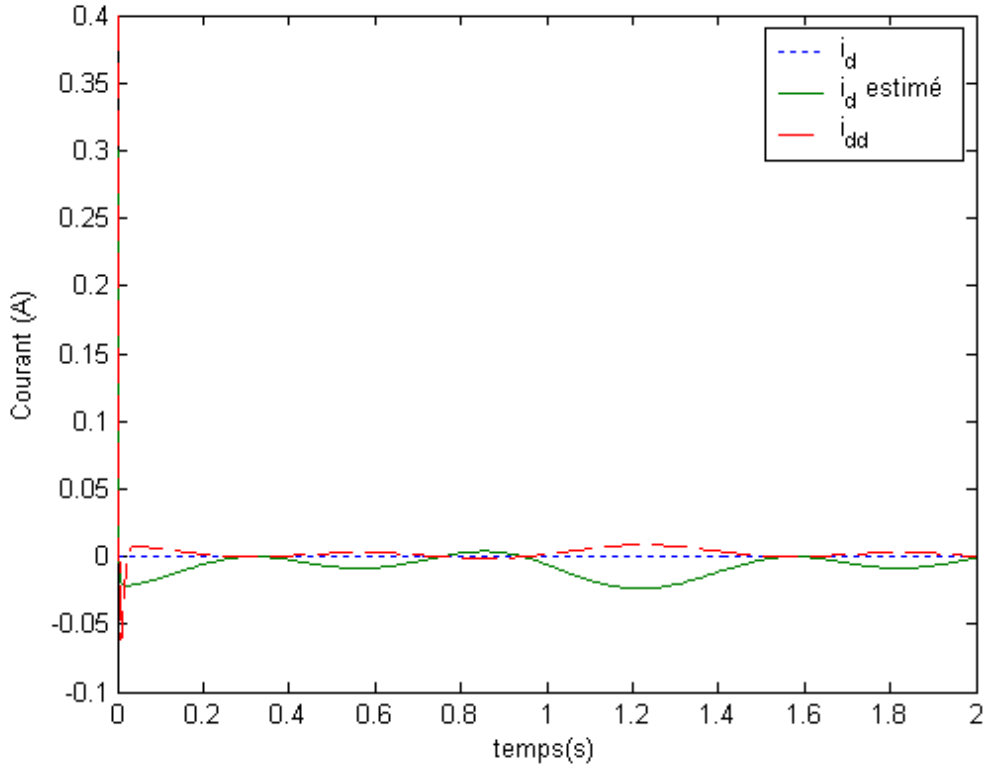

Figure 4.39 : Variation des courants i_d, i_{dd} et $\hat{i}_d$

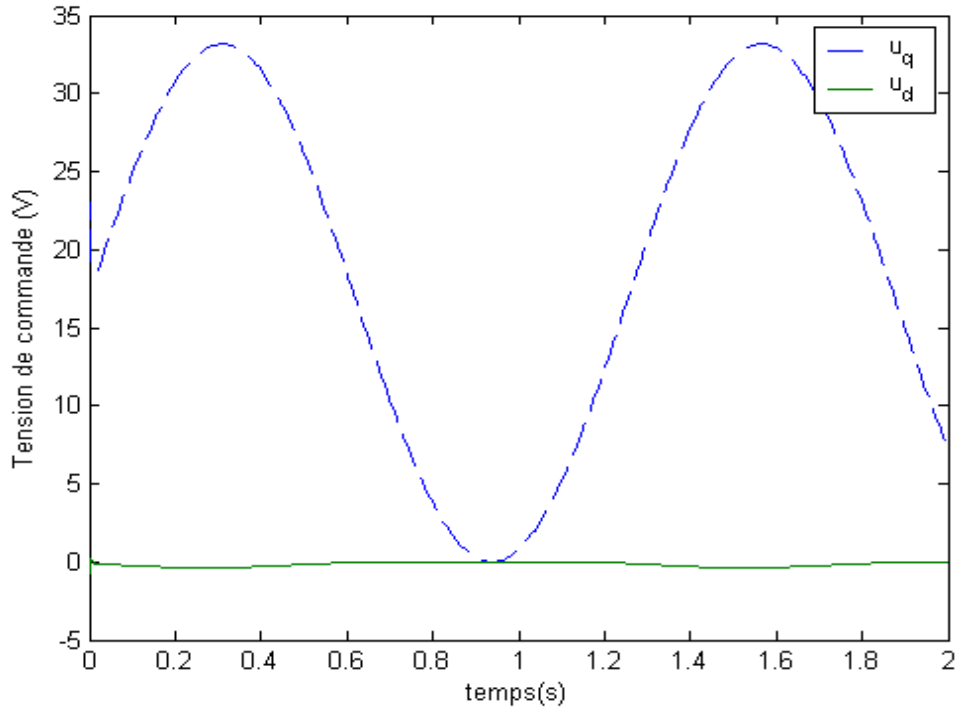

Figure 4.40 : Variation des tensions de commande u_q et u_d

La simulation du système pour les conditions initiales $\boldsymbol{x} = [\mathbf{5\ rd/s}, \mathbf{0.2\ A}, \mathbf{0.2\ A}]^{\mathbf{T}}$, $\hat{\boldsymbol{x}} = [\mathbf{20rd/s}, \mathbf{0.5A}, \mathbf{0.5A}]^{\mathbf{T}}$ et la vitesse desirée, carrée d'amplitude $\mathbf{50}\ \boldsymbol{rad/s}$ et de période $\mathbf{1}\ \boldsymbol{s}$, nous a donné les résultats représentés sur les figures 4.41, 4.42, 4.43 et 4.44, qui montrent respectivement la variation des vitesses angulaires $\hat{\boldsymbol{\omega}}$, $\boldsymbol{\omega}$ et $\boldsymbol{\omega_d}$, la variation des courants $\hat{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{q}}$, $\boldsymbol{i_q}$ et $\boldsymbol{i_{qd}}$, la variation des courants $\hat{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{d}}$, $\boldsymbol{i_d}$ et $\boldsymbol{i_{dd}}$ et la variation des tensions de commande $\boldsymbol{u_q}$ et $\boldsymbol{u_d}$.

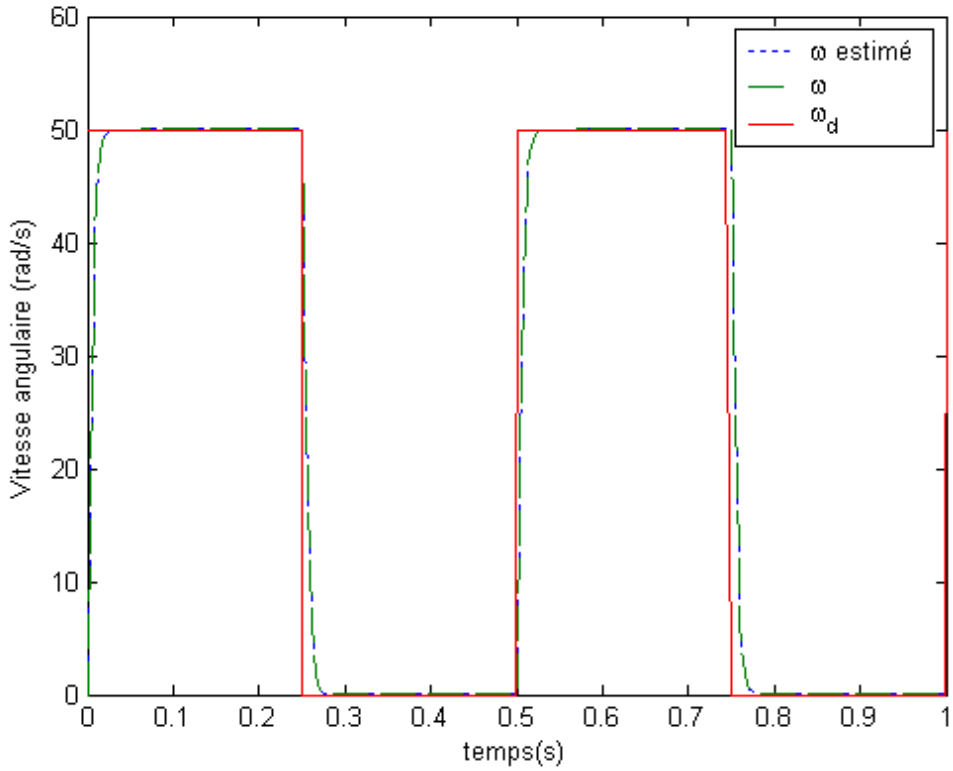

Figure 4.41 : Variation des vitesses angulaires ω_d, ω et $\hat{\omega}$

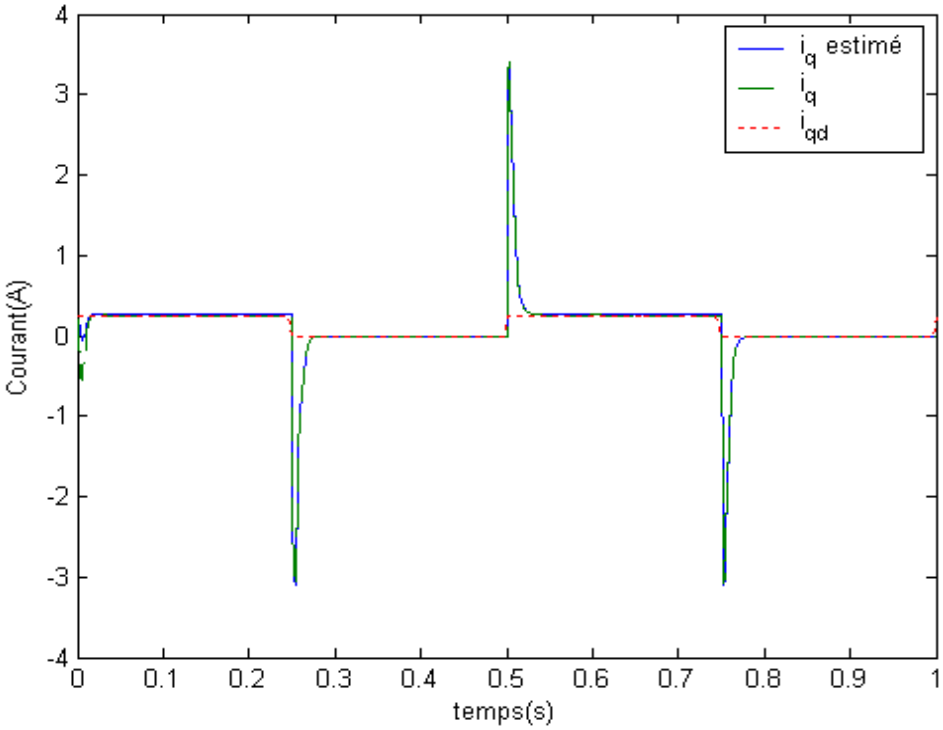

Figure 4.42 : Variation des courants i_q, $\hat{i}_q$ et i_{qd}

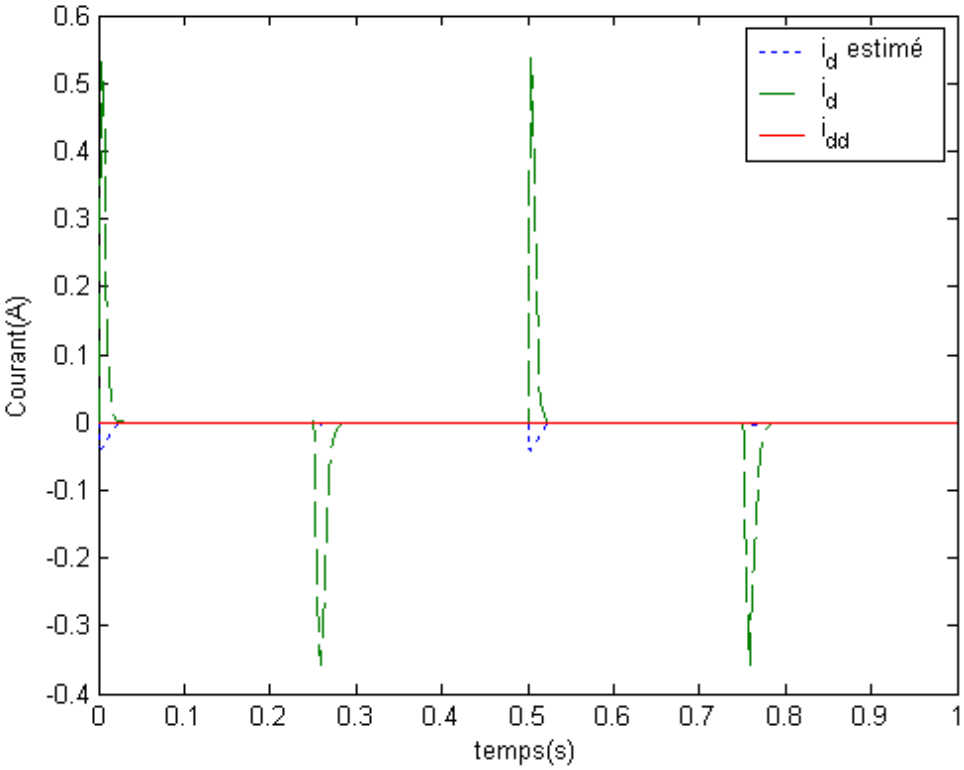

Figure 4.43 : Variation des courants i_d, $\hat{i}_d$ et i_{dd}

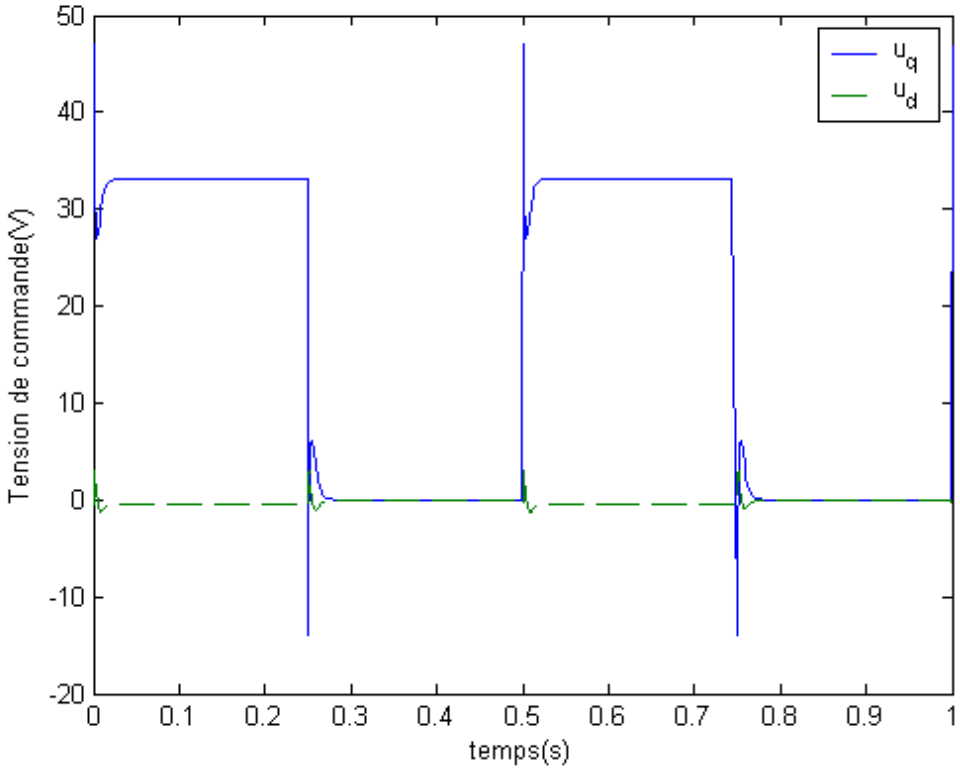

Figure 4.44 : Variation des tensions de commande u_q et u_d

5. Interprétation des résultats

En ce qui concerne la stabilisation de la machine synchrone à aimants permanents, les simulations ont montré que toutes les trajectoires du système convergent vers zéro, et les valeurs des états estimées convergent vers les valeurs des états de la machine.

Pour le suivi de trajectoires, les simulations ont aussi montré que toutes les trajectoires du système et les trajectoires estimées suivent les trajectoires désirées.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons etudié la stabilisation des modèles flous TS et le problème de suivi de trajectoire avec un observateur.

Deux cas ont été étudiés :

- Des variables des prémisses mesurables où nous avons pu appliquer le principe de séparation, pour calculer les gais de commande et les gains de l'observateur séparément.
- Des variables des prémisses non mesurables où le principe de séparation est non applicable. C'est une autre méthode basée sur le placement de pôle et l'existence d'une matrice définie positive est appliquée.

Ensuite, une application à la machine synchrone à aimants permanents est abordée. Dans le cas de la stabilisation de la MSAP, nous avons montré que toutes les trajectoires du système convergent vers le zéro. En ce qui concerne le suivi de trajectoire, nous avons pu montré que toutes les trajectoires du système font partie des trajectoires désirées.