

# *Chapitre III*

## *Commande floue de la MSAP alimentée par un convertisseur matriciel direct*

### **III.1. Introduction**

De nos jours, la logique floue (en anglais « fuzzy logic ») est un axe de recherche important sur lequel se focalisent de nombreuses recherches scientifiques. Les bases théoriques de la logique floue ont été mise au point au milieu des années soixante à l'université de Berkeley en Californie par le professeur Lotfi A. ZADEH. L'intérêt de la logique floue réside premièrement dans sa similitude avec le raisonnement humain. Elle trouve notamment sa place dans le domaine de la commande pour une large gamme de systèmes et plus généralement dans les domaines de l'électrotechnique et de l'industrie afin de résoudre les problèmes d'identification, de régulation de processus, d'optimisation, de détection de défauts ou de prise de décision.

Dans ce sens, les correcteurs à base de la logique floue améliorent de façon globale aussi bien les performances que la robustesse des systèmes commandés, en s'appuyant sur la connaissance de ceux-ci [51].

Le régulateur flou est intéressant car il permet la prise de décision malgré l'absence d'une modélisation du système amont complexe comme le cas pour les autres régulateurs [52]. L'objectif de ce chapitre est l'application de la commande floue pour le réglage en vitesse d'une MSAP alimentée par un convertisseur matriciel direct.

### **III.2. Principe de la logique floue**

Le concept de logique floue vient de la constatation que la variable booléenne, qui ne peut prendre que deux valeurs (vraie ou fausse) est mal adaptée à la représentation de la plupart des phénomènes courants. En effet, cette logique classique considère qu'une

proposition est soit vraie soit fausse. En revanche, la logique floue distingue une infinité de valeurs de vérité (entre 0 et 1).

### III.3. Fonctions d'appartenance

Le choix de la forme des fonctions d'appartenance est subjectif et soumis aux préférences du concepteur [53][54]. On utilise le plus souvent, pour les fonctions d'appartenance, des formes triangulaires, trapézoïdales dont les expressions mathématiques sont données par les équations l'équation (III.1) et (III.3). Leurs allures complètes sont définies par trois points (A, B et C) pour la forme triangulaire et par quatre points (A, B, C et D) pour la forme trapézoïdale, comme l'indique la figure (III.1).

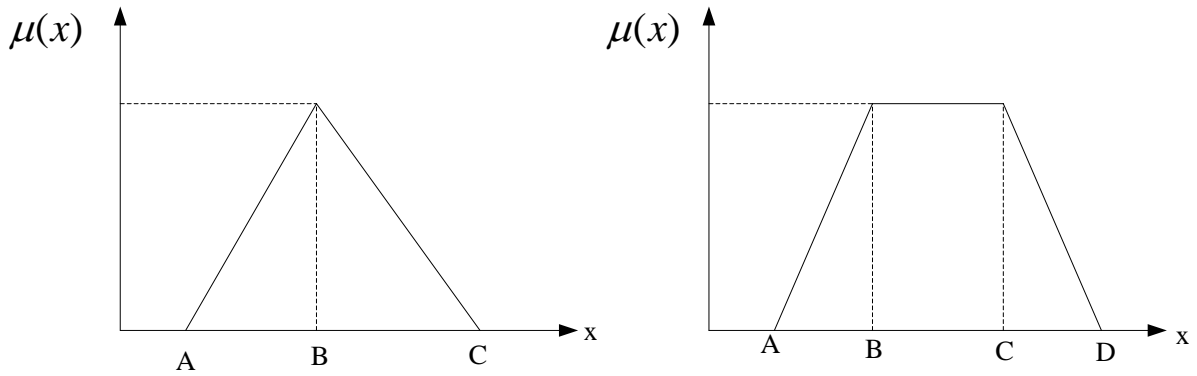


Figure (III.1) : Formes usuelles des fonctions d'appartenances

Le degré d'appartenance à chacune des formes précédentes, est défini par les deux expressions suivantes :

Pour la forme triangulaire :

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{(x-A)}{(B-A)} & \text{si } A \leq x < B \\ \frac{(C-x)}{(C-B)} & \text{si } B \leq x < C \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Pour la forme trapézoïdale :

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{(x-A)}{(B-A)} & \text{si } A \leq x < B \\ 1 & \text{si } B \leq x < C \\ \frac{(D-x)}{(D-C)} & \text{si } C \leq x < D \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Notons que les fonctions d'appartenance se chevauchent et que ce chevauchement est tout à fait logique. Pour une commande à base de la logique floue, la problématique sera donc de choisir le nombre et le type de sous-ensembles flous pour chacune des variables [55].

### III.4. Opérateurs des ensembles flous

La théorie mathématique sur les ensembles flous définit de nombreuses opérations sur ces ensembles et sur les fonctions d'appartenance qui rendent ces notions utilisables. Nous présentons ici quelques opérations de base qui sont : L'intersection, l'union des ensembles flous ainsi que le complémentaire d'un ensemble.

#### III.4.1. Operateur ET

L'opérateur « ET » correspond à l'intersection de deux ensembles et on écrit :

$$C=A \cap B \quad (\text{III.3})$$

Dans le cas de la logique floue, l'opérateur « ET » est réalisé dans la plupart des cas par la formation du minimum, qui est appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(x)$  des ensembles  $A$  et  $B$ , à savoir :

$$\mu_C = \min \{ \mu_A, \mu_B \} \quad (\text{III.4})$$

$$\mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III.5})$$

Où  $\mu_A(x)$ ,  $\mu_B(x)$  et  $\mu_C(x)$  signifient respectivement le degré d'appartenance à l'ensemble  $A$ ,  $B$  et  $C$ .

#### III.4.2. Operateur OU

L'opérateur « OU » correspond à l'union de deux ensembles et on écrit :

$$C=A \cup B \quad (\text{III.6})$$

Dans le cas de la logique floue, l'opérateur « OU » est réalisé dans la plupart des cas par la formation du maximum, qui est appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_A(x)$ ,  $\mu_B(x)$  des ensembles  $A$  et  $B$ , à savoir :

$$\mu_C = \max \{ \mu_A, \mu_B \} \quad (\text{III.7})$$

$$\mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III.8})$$

### III.4.3. Operateur NON

Le complément d'un ensemble flou dans un univers de discours est dénommé comme :

$$\bar{A} = \text{non}(A) \quad (\text{III.9})$$

$$\text{non}(\mu_A(x)) = \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{III.10})$$

La figure (III.3) nous montre les opérations logiques qui sont cités ci-dessus.

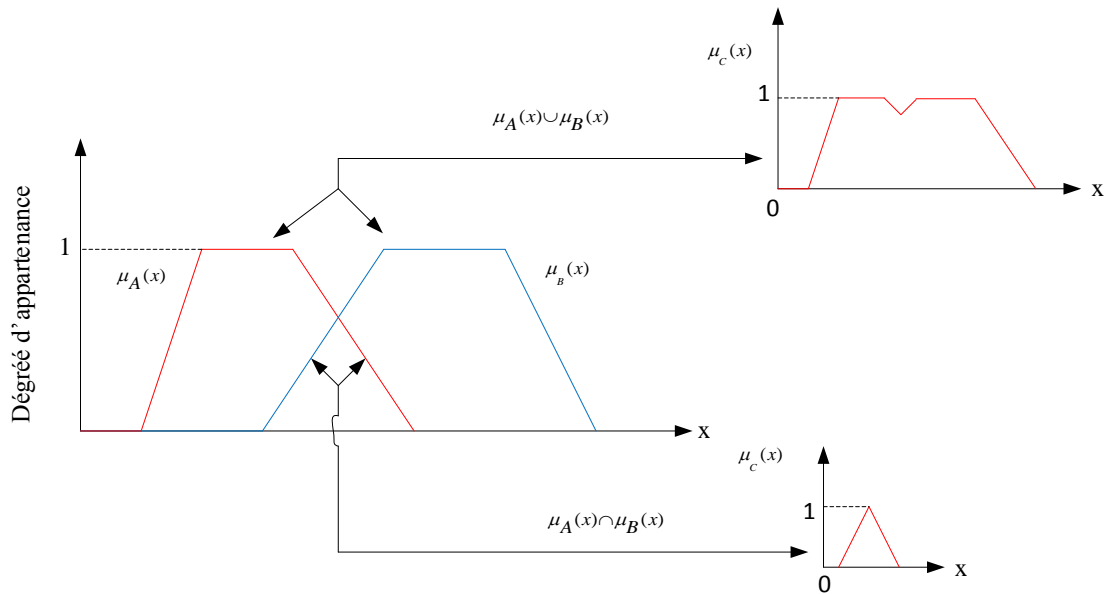


Figure (III.2) : Opérations logiques.

### III.5. Système flou

Un système flou peut être interprété selon deux points de vue : mathématique ou logique. D'un point de vue mathématique, un système flou est une fonction non linéaire reliant un vecteur de données, d'entrée à un vecteur de sortie. Du point de vue logique, un système flou est un système à structure particulière, composé de quatre modules principaux à savoir : la base de connaissance, la fuzzification, bloc de décision (Inférence) et la défuzzification [56-59]. La figure (III.3) représente la structure d'un système flou.

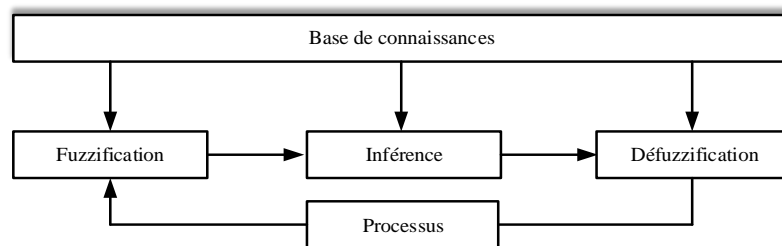


Figure (III.3) : Structure interne d'un système flou.

### III.5.1 Base de connaissances

Elle contient les informations du domaine d'application et du contrôle. Elle est définie par les deux bases suivantes [60] [61] :

a) Base de données

Elle fournit des informations qui sont utilisées pour l'exploration des règles de contrôle flou ainsi que la manipulation des données dans le contrôleur flou.

b) Base de règle

Elle caractérise le but et la politique du contrôle flou via un ensemble de règles de contrôle flou.

### III.5.2. Fuzzification

La fuzzification permet de transformer les variables réelles à l'entrée de la commande floue, en variables floues [62] [63]. Elle permet la génération des degrés d'appartenance à chaque valeur linguistique définie par sa fonction d'appartenance [64].

### III.5.3. Inférence

L'inférence ou la logique de prise de décision est le noyau du contrôleur flou, elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférence en logique floue [65]. Pour le réglage par logique floue, il est utilisé en général une des méthodes suivantes [66] :

- Méthode d'inférence Max-Min (contrôleur de type Mamdani) ;
- Méthode d'inférence Max-Prod (contrôleur de type Larsen) ;
- Méthode d'inférence Somme-Prod (contrôleur de type Zadeh).

### III.5.4. Défuzzification

La défuzzification définit la loi de commande du régulateur flou; elle réalise donc la conversion inverse de la fuzzification.

On distingue trois méthodes de défuzzification différentes [55] :

- Méthode par centre de gravité ;
- Méthode par valeur maximale ;
- Méthode par valeur moyenne des maximas.

### III.6. Conception d'un contrôleur à logique floue de type MAMDANI

MAMDANI a présenté pour la première fois, la technique de réglage par la logique floue et il a conçu le premier contrôleur flou. Ce contrôleur est construit autour d'un organe de décision manipulant des règles subjectives et imprécises. Pour les experts, qui connaissent

bien le système, l'obtention de ces règles est assez facile. Dans ce qui suit, nous nous intéressons principalement aux régulateurs de vitesse et des courants  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$ .

### III.6.1 Régulateur flou de vitesse

La structure du régulateur flou de la vitesse est illustrée sur la figure (III.4).

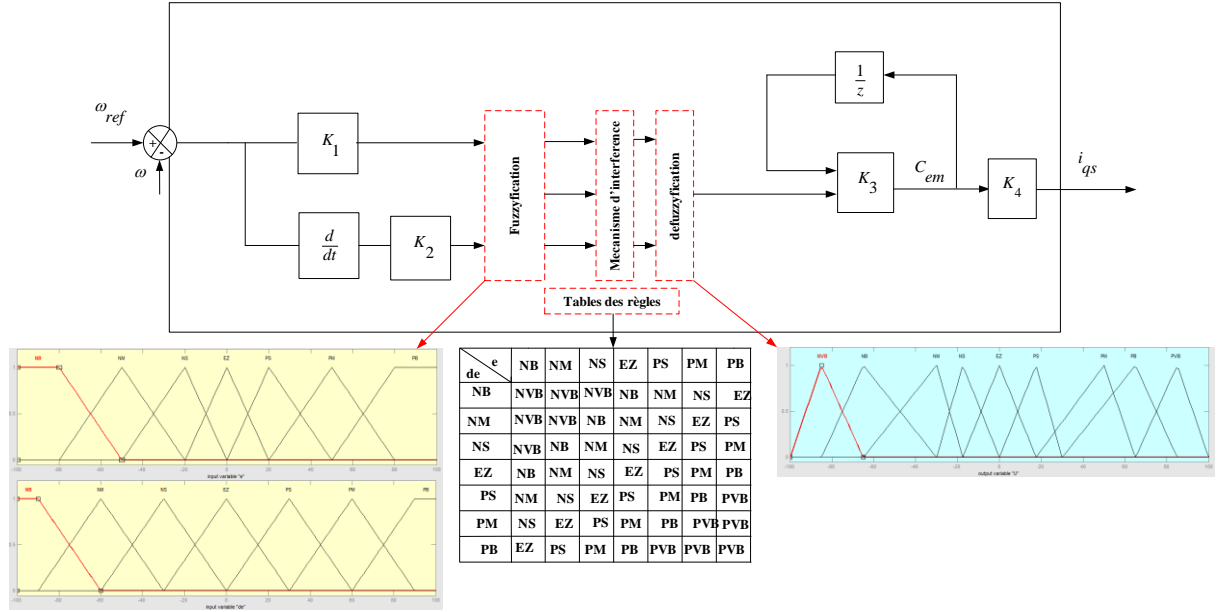


Figure (III.4) : Diagramme d'un régulateur flou de vitesse.

Les entrées du régulateur par logique floue (RLF) se calculent à l'instant d'échantillonnage  $t$  de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 e_{\omega}(t) &= \omega_{ref}(t) - \omega(t) \\
 \Delta e_{\omega}(t) &= e_{\omega}(t) - e_{\omega}(t-1)
 \end{aligned}
 \tag{III.10}$$

### III.6.2 Régulateurs flous des courants

La structure du régulateur flou des courants est illustrée sur la figure (III.5).

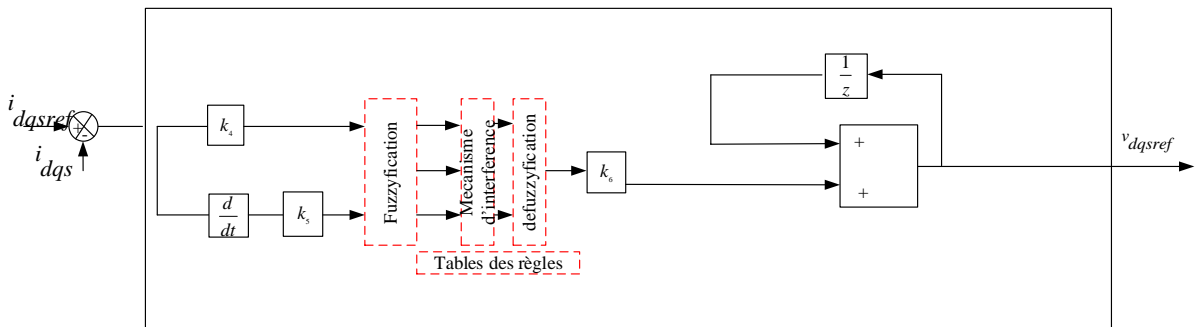


Figure (III.5) : Diagramme d'un régulateur flou des courants.

Les entrées du régulateur par logique floue (RLF) se calculent à l'instant d'échantillonnage  $t$  de la manière suivante :

$$\begin{aligned} e_{dqs}(t) &= i_{dqsref}(t) - i_{dqs}(t) \\ \Delta e_{dqs}(t) &= e_{dqs}(t) - e_{dqs}(t-1) \end{aligned} \quad (III.11)$$

Pour pouvoir fuzzifier les grandeurs d'entrées, il faut procéder par leurs normalisations, ce qui induit un échelonnement de l'erreur de vitesse et de sa variation, ainsi leurs limitations dans un intervalle bien défini  $[-1,1]$ . Pour répartir ces grandeurs dans les espaces flous, il faut d'abord définir des ensembles flous en adoptant les appellations suivantes : Négatif grand (NG), négatif moyen (NM), négatif petit (NP), environ de zéro (EZ), positif petit (PP), positif moyen (PM), positif grand (PG), négative très grand (NTG), positive très grand (PTG).

#### a. Fonctions d'appartenance utilisées

Figure (III.6) représente les fonctions d'appartenance du régulateur de vitesse

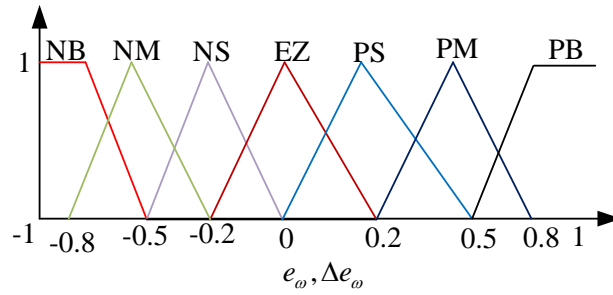


Figure (III.6) : Fonctions d'appartenance des entrées.

Le Figure (III.7) montre la distribution des fonctions d'appartenance de la sortie.

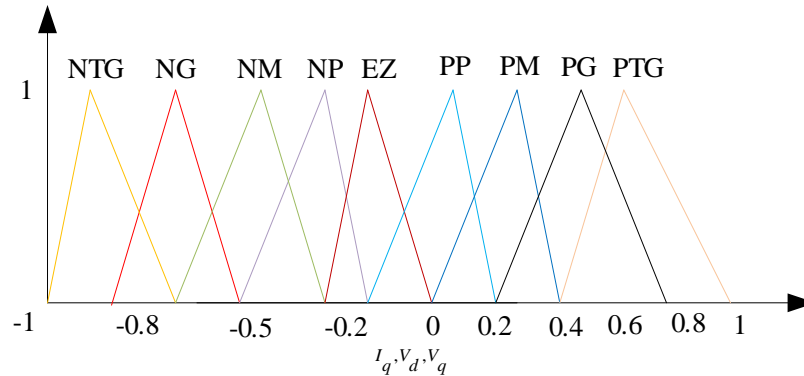


Figure (III.7) : Fonctions d'appartenance de la sortie.

## b. Règles floues

Pour un régulateur de vitesse (par exemple), la règle de commande est une fonction floue de la variation instantanée de l'erreur de vitesse et sa variation. Ces règles sont obtenues à l'aide de l'analyse du comportement du système pendant le fonctionnement. Alors un ensemble de règles a été formulé, on cite par exemple :

Règle 1 : si ( $e_\omega$  est NG) ET ( $\Delta e_\omega$  est NG) ALORS ( $\Delta i_q$  est NTG)

Règle 2 : si ( $e_\omega$  est NG) ET ( $\Delta e_\omega$  est NM) ALORS ( $\Delta i_q$  est NTG)

Pour simplifier la description des inférences, on a utilisé la matrice des règles d'inférences récapitulée dans le Tableau (III.1).

Tableau (III.1) : Matrice d'inférence.

$\Delta e \backslash e$	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG	NTG	NTG	NTG	NG	NM	NS	EZ
NM	NTG	NTG	NG	NM	NP	EZ	PP
NP	NTG	NG	NM	NP	EZ	PP	PM
EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
PP	NM	NP	EZ	PP	PM	PG	PTG
PM	NP	EZ	PP	PM	PP	PTG	PTG
PG	EZ	PP	PM	PG	PTG	PTG	PTG

L'étape de la défuzzification est la dernière étape pour la conception d'un régulateur flou. Elle consiste à transformer une valeur floue (fonction d'appartenance résultante) en une valeur physique (déterministe).

La méthode de défuzzification par le centre de gravité [66] est la méthode la plus utilisée en commande floue du fait qu'elle fournit intuitivement la valeur la plus représentative de l'ensemble flou issu de l'agrégation des règles. Elle consiste à calculer le centre de gravité de la surface formée par la fonction d'appartenance résultante. Elle est exprimée par :

$$\mu_{ref} = \frac{\int_{-1}^1 x_r \mu_{res}(x_r) dx_r}{\int_{-1}^1 \mu_{res}(x_r) dx_r} \quad (III.12)$$

Où  $x_r$  est la variable de sortie et  $\mu_{res}(x_r)$  est la fonction d'appartenance résultante.



### III.7. Résultats de simulation

Pour évaluer les performances des trois stratégies de modulation, Venturini, Roy et la modulation vectorielle ISVM appliquées au convertisseur matriciel, une commande vectorielle associée à des régulateurs flous de vitesse et des courants  $i_{qs}$ ,  $i_{ds}$  est adoptée. Les gains des régulateurs flous sont (pour la vitesse :  $k_1=0.015$ ,  $k_2=0.00016$ ,  $k_3=0.09$  et pour les courants  $i_{dqs}$  :  $k_4=0.099$ ,  $k_5=0.001$ ,  $k_6=0.099$ ). La fréquence de commutation est égale à 6kHz. On montre, pour chaque cas, l'allure de la vitesse, le couple électromagnétique, les courants  $i_{qs}$ ,  $i_{ds}$  et le courant de sortie d'une phase statorique.

Pour les trois stratégies de modulation, après un démarrage à vide du moteur à 100 rad/s, une charge de 5 Nm est appliquée entre 0.25s et 0.8s. Un test d'inversion du sens de rotation (de 100 à -100 rad/s) est réalisé en charge à l'instant  $t=0.6s$ .

#### a. Résultats des méthodes de Venturini et Roy

La Figure (III.8) représente le schéma de la commande floue d'un MSAP alimentée par un convertisseur direct contrôlé soit par la méthode de Venturini soit par la méthode de Roy.

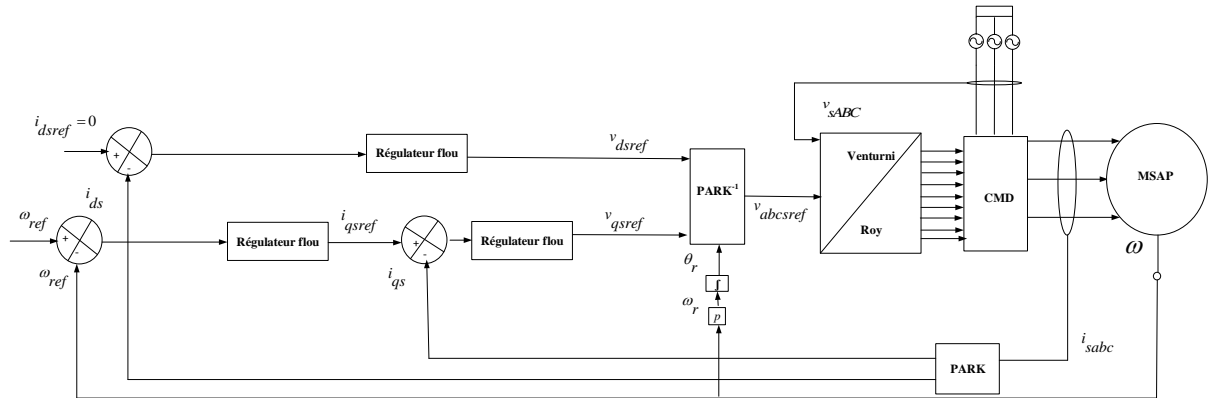


Figure (III.8) : Structure de la commande floue d'une MSAP alimentée par un CMD commandé par la méthode de Venturini ou de Roy.

#### b. Méthode de Venturini

Les résultats représentés sur la Figure (III.9) montrent les performances de la commande floue de la MSAP alimentée par un CMD contrôlé par la méthode de Venturini. On peut constater d'après la Figure (III.9.a) que lorsqu'on applique le couple résistant à l'instant  $t=0.25s$  la vitesse admet une chute de vitesse égale 4.8 rad/s et lors de l'inversion de la vitesse à l'instant  $t=0.6s$  un pic de vitesse égal à 27.7 rad/s de durée de 0.013s. Mise à part ces moments, la vitesse suit parfaitement sa référence. La Figure (III.9.b) nous montre une ondulation assez élevée du couple du moteur de 3.2 N.m. Le courant direct est nul et le courant

en quadrature à la même forme du couple ce qui implique que le couplage est réalisé. Le courant de phase  $i_{sa}$  montre un pique très important à l'instant d'inversion de la vitesse.

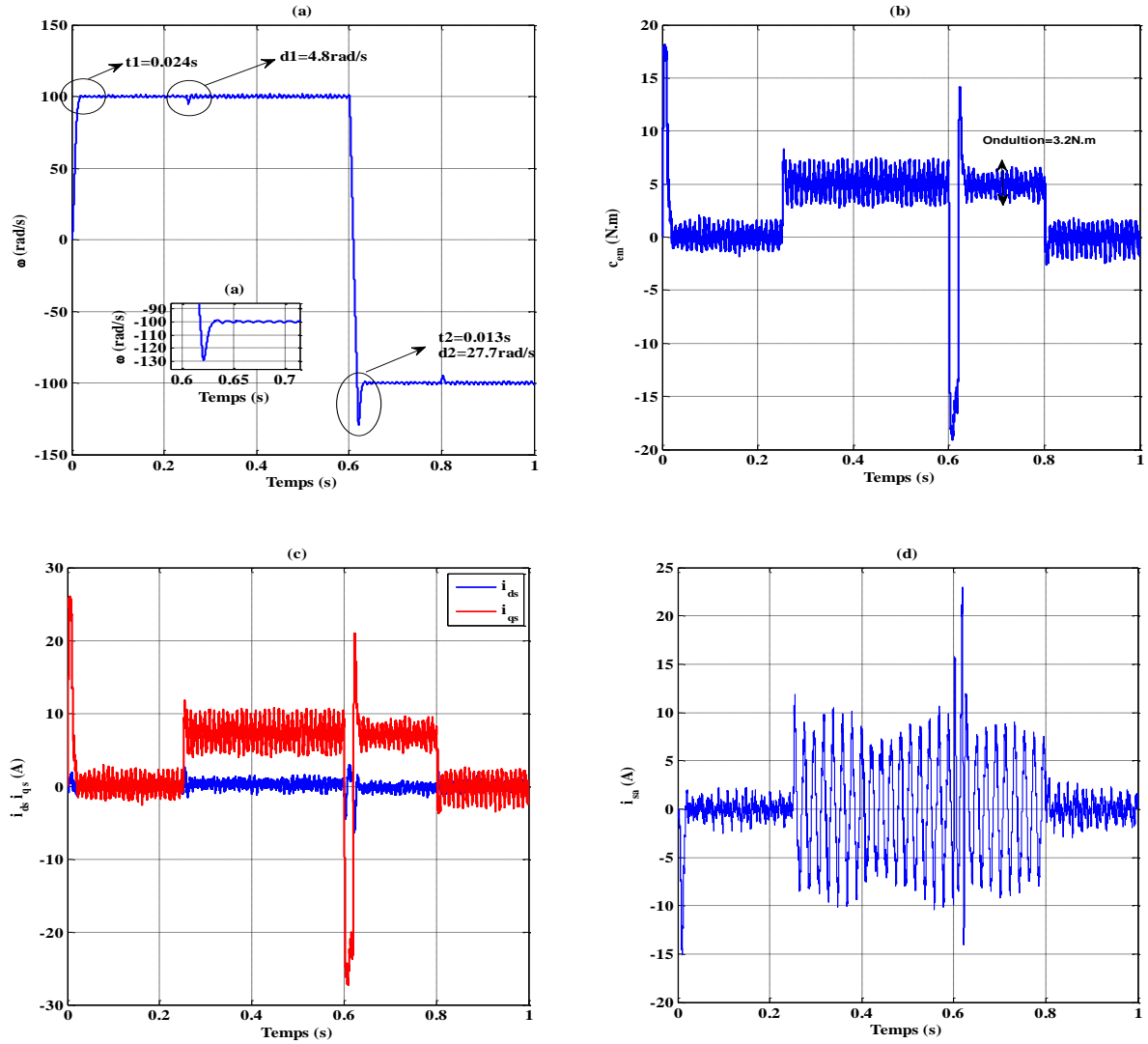


Figure (III.9) : Performances de la commande vectorielle à base de régulateurs flous de la MSAP alimentée par un CMD contrôlé par la méthode de Venturini : (a) vitesse de rotation, (b) couple électromagnétique, (c) courants direct et en quadrature, (d) courant d'une phase statorique.

### c. Méthode de Roy

On va présenter dans cette partie les résultats de simulation de la méthode de Roy qui contrôle le convertisseur matriciel alimentant une machine MSAP commandée vectoriellement à l'aide de régulateurs flous. Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure (III.10).

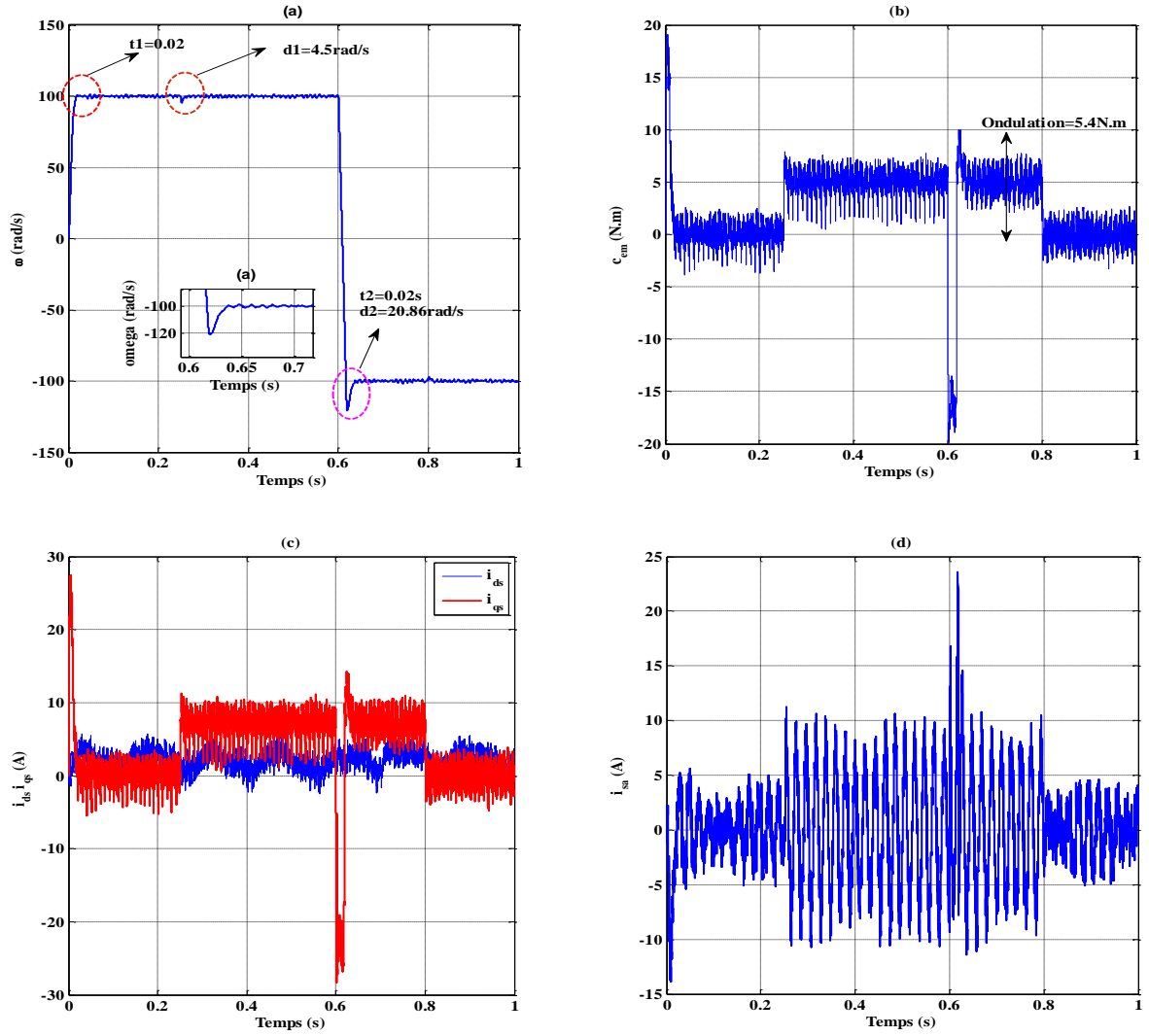


Figure (III.10) : Performances de la commande vectorielle à base de régulateurs flous de la MSAP alimentée par un CMD contrôlé par la méthode de Roy : (a) vitesse de rotation, (b) couple électromagnétique, (c) courants direct et en quadrature, (d) courant d'une phase statorique.

Lors de l'application d'une charge de 5N.m à l'instant  $t=0.25s$ , la Figure (III.10.a) montre une chute de vitesse égale à 4.5 rad/s et au moment d'inversion de la vitesse on constate un pic de 20.86 rad/s. Après un régime transitoire très court de  $t= 0.02s$ , la vitesse rejoint sa référence. La Figure (III.10.b) montre une ondulation très élevée égale à 5.4 N.m. la Figure (III.10 .c) montre que le découplage est parfaitement réalisé est que le courant  $i_{qs}$  suit bien l'allure du couple. Le courant de phase  $i_{sa}$  présente un pic important a l'instant d'inversion de vitesse.

#### d. Résultats de la méthode ISVM

Dans cette section on va tester les performances du contrôle flou de la machine synchrone à aimants permanents alimentée par un convertisseur matriciel direct commandé par la méthode ISVM selon la structure de la figure (III.11).

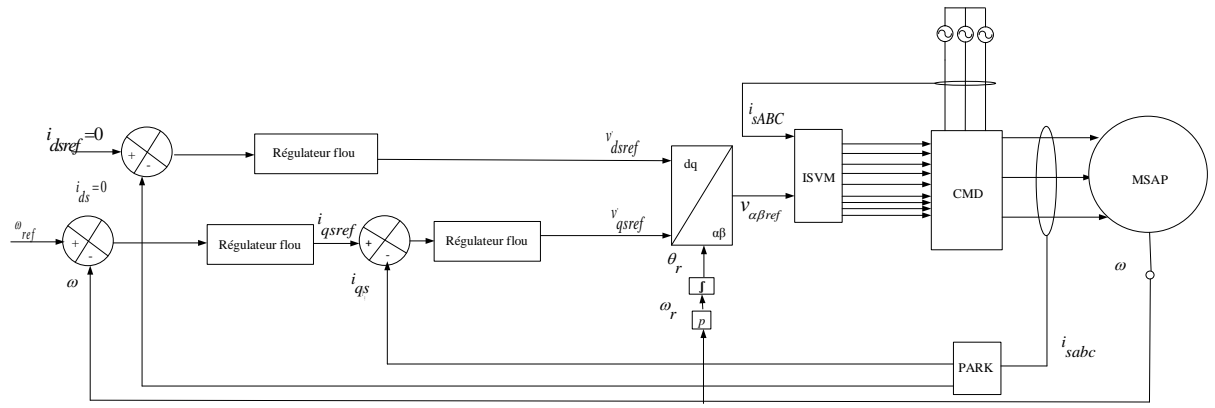


Figure (III.11) : Structure de la commande floue d'une machine synchrone alimentée par un convertisseur matriciel direct commandé par la méthode ISVM.

Les résultats de simulation de la commande floue d'une MSAP alimentée par un CMD contrôlé par la technique ISVM sont représentés sur la Figure (III.12). D'après la Figure (III.12.a), la vitesse a une très bonne dynamique avec un temps de réponse très court au démarrage ainsi que lors de l'inversion du sens de rotation. Nous remarquons aussi une chute de 30rad/s lors de l'application d'une charge de 5N.m à l'instant  $t=0.25s$  et après un temps court égal à  $t=0.016s$  la vitesse rejoint de nouveau sa référence. Le résultat de simulation illustré sur la figure (III.12. b) montre une bonne dynamique du couple, avec une ondulation égale à 2.6 N.m.

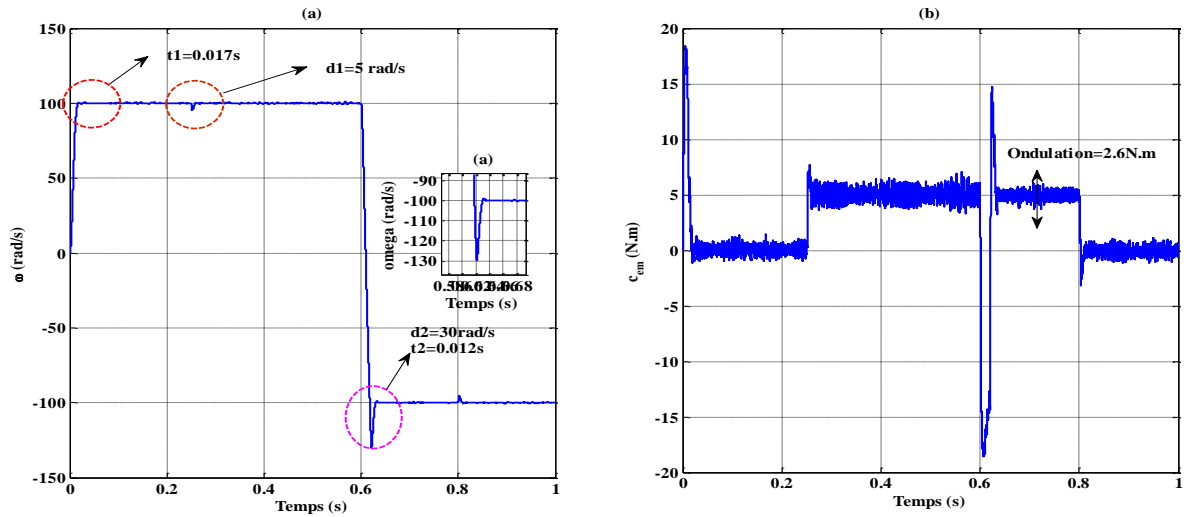


Figure (III.12) : Performances de la commande vectorielle à base de régulateurs flous de la MSAP alimentée par un CMD contrôlé par la méthode ISVM : (a) vitesse de rotation, (b) couple électromagnétique.

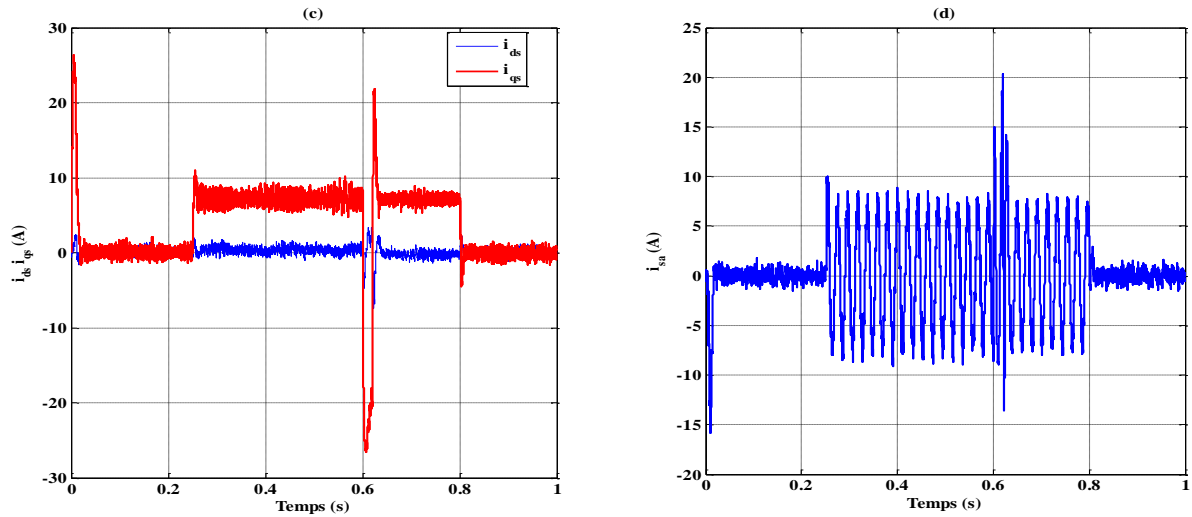


Figure (III.12) : Performances de la commande vectorielle à base de régulateurs flous de la MSAP alimentée par un CMD contrôlé par la méthode ISVM : (c) courants direct et en quadrature, (d) courant d'une phase statorique.

### III.8 Etude comparative entre les régulateurs flous et régulateurs classiques de type PI

Le tableau (III.2) montre les chutes de vitesse lors de l'application de la charge pour les deux types de régulateurs pour les trois stratégies de modulation. On peut conclure d'après ces résultats que le régulateur flou est le meilleur par rapport au régulateur PI classique en termes de chute de vitesse et rapidité du système comme le témoigné le Tableau (III.2).

Méthode Réglage	Venturini			Roy			ISVM		
	$T_r$	$D$	Inversion vitesse	$T_r$	$D$	Inversion vitesse	$T_r$	$D$	Inversion vitesse
Régulateur PI	0.02s	21.2rad/s	32.3rad/s	0.02s	21.75rad/s	29.35rad/s	0.02s	21.5rad/s	27rad/s
Régulateur flou	0.02s	4.8rad/s	27.7rad/s	0.02s	4.5rad/s	20.86rad/s	0.017s	5rad/s	30rad/s

Tableau (III.2) : Performance des régulateurs de vitesse.

Avec  $T_r$  est le temps de réponse et  $D$  est le dépassement lors d'application de la charge.

### III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu une étude théorique sur la logique floue puis la régulation de vitesse ainsi que celle des courants par la logique floue d'une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un convertisseur matriciel direct.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que les régulateurs flous possèdent de très bonnes performances dynamiques. En effet, ils permettent d'avoir des réponses sans

dépassement avec réduction du temps de montée ainsi que le temps d'inversion du sens de rotation, ceci revient au fait que la synthèse d'un régulateur flou ne se repose pas sur le modèle de la machine.