

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Thèse de MAGISTER en Automatique

Présentée par
MELAHI Ahmed

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Ingénieur d'Etat en Automatique de l'ENP

THEME

COMMANDE DECENTRALISEE PAR LOGIQUE FLOUE
DES PROCESSUS COMPLEXES:
APPLICATION AUX RESEAUX ELECTRIQUES

Soutenu le 24 / 02 / 2001 devant le jury composé de:

| | | |
|-------------|-----------------|------------------------------|
| Président | M. S. BOUCHERIT | Maître de conférence à l'ENP |
| Rapporteur | D. BOUKHETALA | Chargé de cours à l'ENP |
| Examineurs: | F. BOUDJEMA | Professeur à l'ENP |
| | A. HELLAL | Maître de conférence à l'ENP |
| | M. TADJINE | Docteur à l'ENP |

Ecole Nationale Polytechnique,
10 Avenue Hassen badi, B. P. 182, El-Harrach, Alger,
Tel: (02) 52 14 94 ; Fax: (02) 52 29 73

ملخص :

في هذا البحث تطور طريقتين للتحكم اللامركزي بالمنطق الغامض. التحكم المتعدد النموذج عمم بإدخال المنطق الغامض. تم الحصول على نموذج ديناميكي غامض انطلاقا من نماذج خطية محلية تم الحصول عليها بواسطة التقريب الخطي Cao et al. هذه الأخيرة غيرت بغرض إبعاد التقريب الخطي و من ثم عممت من أجل متغيرات أخرى غير متغيرات الحالة. قانون التحكم المطبق هو تجميع غامض لجميع قوانين التحكم المشكلة من أجل النماذج الخطية المحلية بتقنية (LQ). هذا القانون طُبق على شبكتين كهربائيتين و المنظمات المتحصل عليها قادرة على التحكم في التوتر النهائي و كذا تحسين الاستقرار الانتقالي.

كلمات مفاتيح: الأنظمة المركبة، التحكم اللامركزي، التحكم المتعدد النماذج، الشبكات الكهربائية.

Abstract:

In this thesis, two decentralized fuzzy control approaches are developed. Multi-model control is generalized by the introduction of fuzzy logic. A fuzzy dynamic model is constructed from local linear models which are obtained by linearization (Cao et al.). First, this approach is modified so as to avoid linearization. Second, it is generalized for any functions of state variables. The applied control law is the fuzzy aggregation of different control laws generated by the LQ technique for local linear models. The developed approaches are applied to two multi-machine power systems to ensure terminal voltage regulation and stability enhancement.

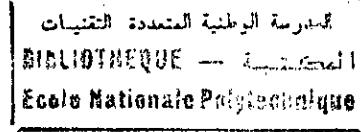
Keywords: Large scale systems, Decentralized control, Multi-model control, Power system.

Résumé:

Dans ce travail, nous développons deux approches de commande décentralisée par logique floue. La commande multi-modèle est généralisée par l'introduction de la logique floue. Un modèle dynamique flou est construit à partir de modèles linéaires locaux obtenus par linéarisation (Cao et al.). L'approche donnée par Cao a été modifiée pour éviter la linéarisation. De plus, elle a été généralisée pour des fonctions quelconques de variables d'état. La loi de commande appliquée est l'agrégation floue de différentes lois de commande générées par la technique LQ pour les modèles locaux. Les approches développées sont, ensuite, appliquées à deux types de réseaux multi-machines et les régulateurs obtenus permettent le réglage de la tension terminale ainsi que l'amélioration de la stabilité transitoire. Des tests de robustesse ont été également obtenus.

Mots clés: Systèmes complexes, Commande décentralisée, Commande multi-modèle, Réseaux électriques

AVANT PROPOS



Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire de Commande des Processus (LCP) de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) sous la direction de Monsieur D. Boukhetala, Chargé de Cours à l'ENP, qu'il trouve ici l'expression de toute ma gratitude pour les conseils avisés et l'encouragement constant qu'il n'a cessé de prodiguer tout au long de cette étude.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à Monsieur, M.S. Boucherit, Maître de Conférence à l'ENP, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence de jury de cette thèse, et aussi pour ses vifs encouragements durant la préparation de ce travail.

Mes vifs remerciements vont aussi à Monsieur, A. Hellal, Maître de Conférence à l'ENP, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de faire partie de ce jury, ainsi que pour son aide précieuse et ses intéressants éclaircissements qui m'ont bien guidé au cours de la réalisation de ce travail.

J'exprime ma gratitude à Monsieur, F. Boudjema, Professeur à l'ENP, et je suis très honoré de sa présence dans le jury de cette thèse.

Je remercie également Monsieur, M. Tadjine, Docteur à l'ENP, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur de participer à ce jury.

Que mes amis, T. Osmani et H. Yahia trouvent ici toute ma gratitude pour leur encouragement moral.

Je n'oublie pas de remercier les amis A. Boulahia, M. Djebiri, T. Madani, F. Allou, A. Haddouch et A. Guechtouli pour leur aide morale et l'ambiance sympathique qu'ils ont manifestés.

Que tous ceux qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre soient assurés de ma reconnaissance. Je remercie tous, particulièrement ma famille, ainsi que le personnel de la bibliothèque de l'ENP.

Enfin, je ne pourrais terminer ces remerciements sans une pensée à mes enseignants, du lycée de Khemis El Khechna, qui se sont intéressés à mes études et mes efforts.

Que les autres enseignants, qui sont à l'origine de mon savoir, reçoivent mes plus sincères remerciements.

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| Chapitre I: RESEAUX ELECTRIQUES: MODELISATION ET STABILITE | |
| I.1. INTRODUCTION | 3 |
| I.2. PRESENTATION GENERALE | 4 |
| I.3. MODELISATION | 4 |
| I.3.1. Générateurs | 4 |
| I.3.2. Lignes de transmission | 10 |
| I.3.3. Régulateurs de tension, stabilisateur et régulateurs de vitesse | 13 |
| I.3.4. Récapitulatif | 15 |
| I.4. STABILITE DES RESEAUX ELECTRIQUES | 15 |
| I.4.1. Introduction | 15 |
| I.4.2. Stabilité statique, stabilité dynamique | 16 |
| I.4.3. Stabilité transitoire | 16 |
| I.5. SIMULATION | 17 |
| I.6. CONCLUSION | 19 |
| Chapitre II: LOGIQUE FLOUE: MODELISATION ET COMMANDE | |
| II.1. INTRODUCTION | 24 |
| II.2. BASES MATHÉMATIQUES DE LA LOGIQUE FLOUE | 24 |
| II.2.1. Sous-ensembles flous | 24 |
| II.2.2. Variable linguistique floue | 26 |
| II.2.3. Opérations sur les sous-ensembles flous | 26 |
| II.2.4. Logique floue | 28 |
| II.2.5. Règles floues | 29 |
| II.2.6. Raisonnement | 29 |
| II.3. MODELISATION PAR LOGIQUE FLOUE | 30 |
| II.3.1. Introduction | 30 |
| II.3.2. Structure générale d'un modèle flou | 31 |
| II.3.3. Modélisation floue par modèles flous de Takagi-Sugeno | 32 |
| II.3.4. Modèle dynamique flou | 33 |
| II.4. COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE | 34 |
| II.4.1. Types de régulateurs flous | 34 |
| II.4.2. Synthèse des régulateurs flous | 35 |
| II.4.3. Régulateur flou multi-modèle | 35 |
| II.5. CONCLUSION | 36 |

Chapitre III: COMMANDE FLOUE MULTI-MODELE A MODELES LOCAUX LINEARISES

| | |
|--|----|
| III.1. INTRODUCTION | 37 |
| III.2. METHODE DE CAO <i>et al.</i> | 38 |
| III.2.1. Fonctions d'appartenance en cloche | 38 |
| III.2.2. Partitionnement de l'espace d'état | 39 |
| III.2.3. Modèle dynamique flou | 39 |
| III.2.4. Approximation d'un système non linéaire par un système flou | 40 |
| III.3. APPLICATION ET SIMULATION | 44 |
| III.3.1. Première approche | 44 |
| III.3.1.1. Application | 45 |
| III.3.1.2. Synthèse du régulateur flou | 46 |
| III.3.1.3. Résultats de simulation | 51 |
| III.3.2. Deuxième approche | 60 |
| III.3.2.1. Application | 60 |
| III.3.2.2. Synthèse du régulateur flou | 61 |
| III.3.2.3. Résultats de simulation | 64 |
| III.4. CONCLUSION | 64 |

Chapitre IV: COMMANDE FLOUE MULTI-MODELE A MODELES LOCAUX LINEARES PAR QUANTIFICATION

| | |
|--|----|
| IV.1. INTRODUCTION | 72 |
| IV.2. METHODE DE CAO MODIFIEE | 72 |
| IV.3. APPLICATION ET SIMULATION | 78 |
| IV.3.1. Première approche | 78 |
| IV.3.1.1. Application | 78 |
| IV.3.1.2. Synthèse du régulateur flou | 79 |
| IV.3.1.3. Résultats de simulation | 81 |
| IV.3.2. Deuxième approche | 88 |
| IV.3.2.1. Application | 88 |
| IV.3.2.2. Synthèse du régulateur flou | 88 |
| IV.3.2.3. Résultats de simulation | 89 |
| IV.4. CONCLUSION | 90 |

Chapitre V: **COMMANDE FLOUE MULTI-MODELE A MODELES LOCAUX LINEAIRES PAR QUANTIFICATION GENERALISEE**

| | |
|--|-----|
| V.1. INTRODUCTION | 96 |
| V.2. LINEARISATION PAR QUANTIFICATION GENERALISEE | 96 |
| V.3. APPLICATION ET SIMULATION | 99 |
| V.3.1. Première approche | 99 |
| V.3.1.1. Application | 100 |
| V.3.1.2. Synthèse des régulateurs flous | 100 |
| V.3.1.3. Résultats de simulation | 105 |
| V.3.2. Deuxième approche | 114 |
| V.3.2.1. Application | 114 |
| V.3.2.2. Synthèse du régulateur flou | 115 |
| V.3.2.3. Résultats de simulation | 117 |
| V.4. CONCLUSION | 117 |
| CONCLUSION GENERALE | 126 |
| BIBLIOGRAPHIE | 129 |
| ANNEXES | |
| ANNEXE I. LES PARAMETRES DU RESEAU A DEUX MACHINES | 133 |
| ANNEXE II. LES PARAMETRES DU RESEAU A TROIS MACHINES | 138 |
| ANNEXE III. NORMES ET CONORMES TRIANGULAIRES | 141 |
| ANNEXE IV. REGLAGE FLOU BASE SUR LE MODELE DYNAMIQUE FLOU | 143 |

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, les problèmes liés au fonctionnement des systèmes complexes ont pris une importance considérable. Vu leur caractère complexe, leur taille considérable et le nombre important de variables intervenant dans leur fonctionnement, les méthodes de commande classiques dites centralisées sont en général difficilement synthétisées et pratiquement irréalisables.

Pour remédier à ces problèmes, une nouvelle structure de commande a été développée. Dans cette structure, dite décentralisée [SIL 76], [MAT 88], [SER 89], le système est décomposé en plusieurs sous-systèmes interconnectés; chacun commandé par une station de commande locale qui n'a accès qu'aux variables intervenant au niveau du sous-système.

Parmi les techniques modernes connues par leur robustesse, nous pouvons citer: la commande par mode de glissement [MAT 88] et la commande par logique floue [LEE 90a] [LEE 90b]. Cette dernière technique a été appliquée avec succès dans divers processus industriels [MAM 74], [LIU 93]. Dans cette approche, différentes méthodes pour la synthèse des régulateurs flous ont été proposées [MEN 95], [BEN 97], [JAN 95]. Parmi ces méthodes, on peut citer celle de Sugeno [TAK 83] basée sur l'extraction de règles floues à partir d'un ensemble de données entrée/sortie du système [JAN 95] et celle de Cao [CAO 96], [CAO 97a], [CAO 97b] basée sur la technique multi-modèle qui aboutit à une commande multi-modèle floue reposant sur les modèles dynamiques flous construits de modèles locaux du système linéarisés dans un ensemble de parties de l'espace d'état.

Dans le présent travail, nous présentons la méthode de Cao et *al.* En suite nous proposons deux méthodes permettant son amélioration pour en faciliter la synthèse et réduire le nombre de règles floues nécessaires. La première méthode conduit à la commande multi-modèle floue à modèles linéaires obtenus par la quantification de quelques variables d'état et la deuxième conduit à sa généralisation pour des fonctions quelconques de variables d'état.

Vu leur caractère interconnecté et le nombre de variables intervenant dans leur fonctionnement, les réseaux d'énergie électrique semblent être parmi les meilleurs exemples de systèmes complexes [AND 77], [ZHU 98]. Afin de valider les méthodes proposées, notre choix est porté sur deux types de réseaux électriques sur lesquels nous avons appliqué les différentes approches pour le réglage de la tension terminale et l'amélioration de la stabilité transitoire.

Le présent mémoire est structuré en cinq chapitres:

Le premier chapitre concerne la modélisation des réseaux électriques en considérant une représentation à deux axes pour les machines synchrones. De plus, les différents types de stabilité rencontrés dans les études des réseaux électriques, à savoir la stabilité statique, la stabilité dynamique et la stabilité transitoire, sont présentés et l'accent est mis sur l'étude de la stabilité transitoire sous l'effet des perturbations rapides et d'amplitudes importantes. Des simulations montrant les effets d'un court-circuit triphasé et de l'accroissement de la puissance mécanique, sont présentées à la fin de ce chapitre.

Le deuxième chapitre traite la théorie de la logique floue, ainsi que son utilisation dans la modélisation et la commande des systèmes dynamiques. Les notions élémentaires de la logique floue sont d'abord présentées suivies par leur utilisation dans la structure de différents types de régulateurs flous.

Dans le troisième chapitre, nous exposons la méthode de Cao et *al.* pour l'obtention du modèle dynamique flou qui se base sur l'approximation par les développements limités de Taylor d'ordre 1. Ce modèle est utilisé pour la synthèse des régulateurs flous décentralisés. Pour valider cette méthode, des applications sur deux types de réseaux électriques sont effectuées et des résultats de simulation sont présentés.

Le quatrième chapitre a pour objectif l'amélioration de la méthode de Cao et *al.* en remplaçant le développement limité de Taylor par des quantifications de quelques variables d'état. Ainsi, des modèles dynamiques flous sont obtenus pour un type de réseau électrique et des résultats de simulation sont présentés.

Le dernier chapitre constitue une généralisation de la méthode précédente en quantifiant des fonctions de variables d'état. Ce qui permet, en général, la réduction du nombre de règles floues. Cette méthode est appliquée à deux types de réseaux électriques et les résultats de simulation sont présentés.

RESEAUX ELECTRIQUES:
MODELISATION ET STABILITE

CHAPITRE I

RESEAUX ELECTRIQUES: MODELISATION ET STABILITE

1.1. INTRODUCTION

Le réseau électrique est un système dynamique décrit généralement par un modèle mathématique complexe et de dimension élevé. Dans la plupart des cas, le réseau électrique est caractérisé par plusieurs sous-systèmes géographiquement éloignés.

Les éléments constituant un réseau électrique sont en général:

- Stations de génération de la puissance électrique.
- Stations de transformation ou de distribution de l'énergie électrique générée, vers les consommateurs (usines, cités, éclairage publique,...)
- Les consommateurs utilisant la puissance électrique dans leurs champs de travail.
- Les lignes de transmission, qui acheminent l'énergie électrique vers les consommateurs.

Vu de cette manière, le réseau électrique est un système fortement interconnecté, qui nécessite un traitement délicat et compliqué aussi bien sur le plan de planification que sur celui de l'optimisation et de la commande.

A cause de la structure interconnectée et l'éloignement géographique des sous-systèmes, la décentralisation du réseau électrique pour l'étude et la conception s'impose. Ainsi, dans la suite de ce travail, l'approche décentralisée sera utilisée.

Le présent chapitre sera consacré à la modélisation du réseau électrique en commençant par une description succincte de ses différents composants. Un modèle non linéaire assez complet sera obtenu pour l'étude de la stabilité du réseau électrique sous ses différentes formes et l'accent sera mis sur la stabilité transitoire.

I.2. PRESENTAION GENERALE

La figure (I.1) montre un type de réseaux électriques multi-machines. Les générateurs sont présentés par des tensions après une impédance, connectés aux lignes de transmission par les nœuds dits "nœuds générateurs". Les charges, quant à elles, sont présentées par des impédances (cas des charges statiques ou variant peu). Celles-ci sont connectées aux lignes de transmission via les nœuds dits "nœuds charges".

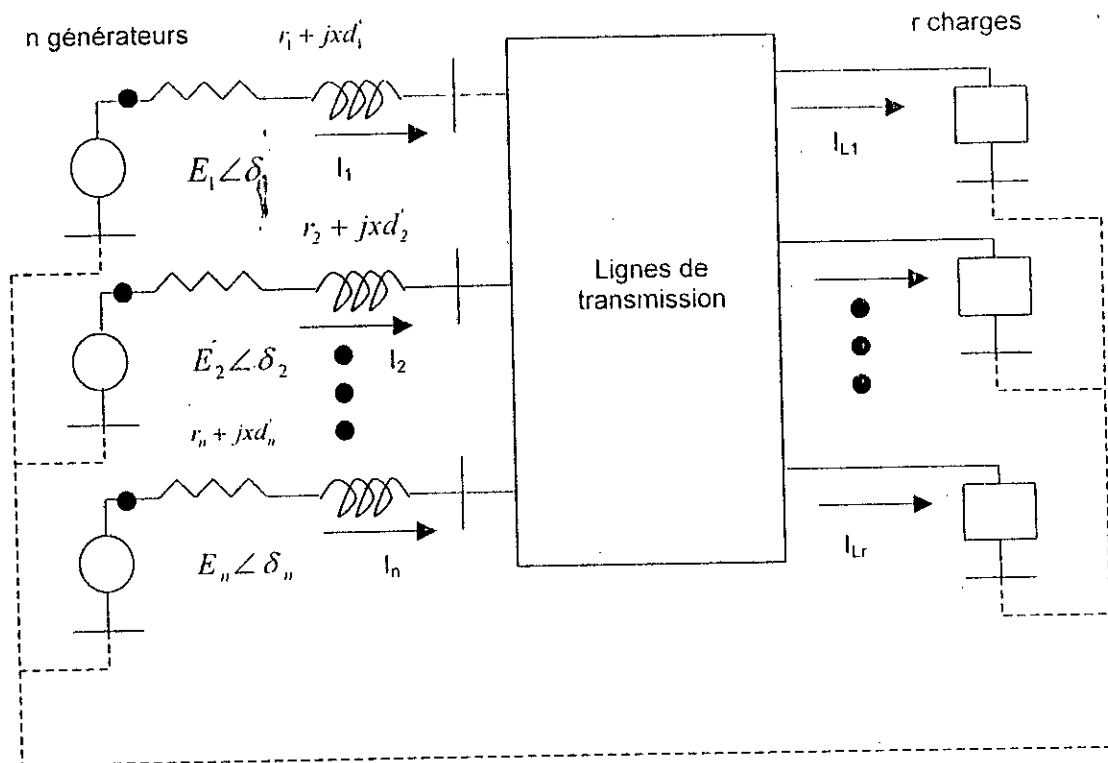


Fig. I.1 Schéma représentatif d'un réseau électrique multi-machine.

I.3. MODELISATION

Dans cette section, nous allons modéliser quelques constituants des réseaux électriques, à savoir, les générateurs, les lignes de transmission, les charges, et montrer quelques types de régulateurs utilisés.

I.3.1. Générateurs

Les générateurs, dits aussi alternateurs, sont des machines synchrones utilisées pour la génération du courant électrique à partir de la puissance mécanique fournie par des

turbines ou autres dispositifs. Les alternateurs possèdent deux parties: une partie statique dite stator et une partie tournante dite rotor. Ces parties-ci sont équipées d'un ensemble de bobines bien placées utilisées pour la générations d'un courant électrique de forte puissance à partir d'un champs magnétique et d'une puissance mécanique fournie.

Aussi, l'alternateur peut être vue d'une autre manière, nous constatons bien qu'il comporte une partie mécanique et une partie électrique.

A. Modèle de la partie mécanique

L'équation mécanique de la machine synchrone est bien déterminée. Pour l'obtenir, nous utilisons les trois hypothèses de base suivantes:

- la vitesse du rotor de la machine ne varie pas trop par rapport à celle du synchronisme.
- la puissance mécanique reste constante sans l'action du gouverneur.
- Les pertes en puissance par le frottement sont négligées.

La première hypothèse permet d'égaliser la puissance mécanique et le couple en grandeurs relatives.

Les courants induits dans les bobines du rotor génèrent un couple qui s'oppose au mouvement relatif du rotor par rapport à la vitesse du synchronisme.

De ces hypothèses, nous pouvons formuler les deux équations différentielles de première ordre suivantes:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{2H}(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e) \end{cases} \quad (1.1)$$

avec :

δ : l'angle électrique,

ω : la pulsation instantanée, vitesse instantanée,

$\omega_0 = 2\pi f_0$: la pulsation de base, vitesse de synchronisme,

f_0 : la fréquence de base,

H : constante d'inertie électrique,

D : coefficient d'amortissement,

P_m : puissance mécanique,

P_e : puissance électrique générée.

B. Modèle de la partie électrique

Le modèle de la partie électrique est trop compliqué à établir à cause de la distribution des effets magnétiques dans l'espace et dans le temps. Ceci est dû, à la fois, à la rotation du rotor et à la géométrie des bobines et leurs emplacements dans la machine.

- **Transformation de Park**

La transformation de Park simplifie la modélisation des machines à courant alternatif en substituant les enroulements de phases a, b et c, fixés par rapport au stator, par deux enroulements d, pour l'axe direct et, q pour l'axe en quadrature, tournant à la même vitesse que le rotor.

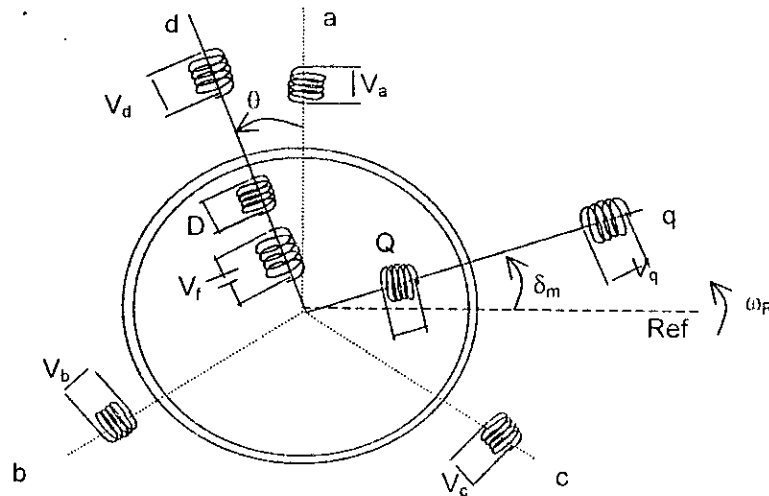


Fig. I.2 Principe de la transformation de Park.

La matrice de transformation de Park s'écrit [OUR 95]

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

• Equations électriques de la machine

Appliquée aux équations électriques de la machine, la transformation de Park conduit aux équations suivantes [OUR 95]

$$\begin{aligned}
 V_d &= -r I_d - \omega \lambda_q - \frac{d\lambda_d}{dt} \\
 V_q &= -r I_q + \omega \lambda_d - \frac{d\lambda_q}{dt} \\
 V_f &= r_f I_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \\
 0 &= r_D I_D + \frac{d\lambda_D}{dt} \\
 0 &= r_Q I_Q + \frac{d\lambda_Q}{dt}
 \end{aligned} \tag{I.3}$$

avec

V_d, V_q et V_f : les tensions aux bornes des enroulements d, q et f;

$\lambda_d, \lambda_q, \lambda_f, \lambda_D, \lambda_Q$: les flux dans les enroulements d, q, f, D et Q;

I_d, I_q, I_f, I_D, I_Q : les courants dans les enroulements d, q, f, D et Q;

r, r_f, r_D, r_Q : les résistances des enroulements d, q, f, D et Q.

Les flux $\lambda_d, \lambda_q, \lambda_f, \lambda_D$ et λ_Q sont liés aux courants I_d, I_q, I_f, I_D et I_Q par la relation matricielle suivante

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_f \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & kM_f & kM_D & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ kM_f & 0 & L_f & M_R & 0 \\ kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \tag{I.4}$$

avec

L_d, L_q, L_f, L_D, L_Q : les inductances propres des enroulements d, q, f, D et Q;

M_R : l'inductance mutuelle entre les enroulements f et D;

M_f, M_D et M_Q : les inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et les enroulements rotoriques f, D et Q;

k : coefficient constant induit par la transformation de Park, $k=(3/2)^{1/2}$.

• **Hypothèses simplificatrices**

Afin de donner un modèle simplifié du générateur, les hypothèses suivantes seront considérées

- La vitesse du rotor est toujours proche de celle de synchronisme de telle manière qu'elle peut être considérée comme constante.
- Toutes les inductances utilisées sont indépendantes des courants.
- Les inductances des bobines de la machine peuvent être présentées par une constante plus des harmoniques sinusoïdales de l'angle du rotor.
- Les bobines distribuées peuvent être considérées comme concentrées.
- La machine peut être considérée comme une tension après une impédance.
- Pas de pertes dues à l'hystérésis.
- Les réactances mutuelles existent seulement au niveau du stator.
- l'effet des amortisseurs est négligé.
- la saturation du circuit magnétique est négligée.
- les résistances statoriques sont négligeables.

• **Modèle électrique**

Nous allons faire un changement de variables qui nous permet d'obtenir les équations électriques de la machine. Ce changement de variable va ramener toutes les grandeurs électriques du rotor au stator.

$$E'_q = \frac{I}{\sqrt{3}} \left(\omega_R \frac{kM_f}{L_f} \right) \lambda_f \quad (1.5)$$

$$E = \frac{I}{\sqrt{3}} (\omega_R kM_f) i_f \quad (1.6)$$

$$E_{fd} = \frac{I}{\sqrt{3}} \left(\omega_R \frac{kM_f}{r_f} \right) v_f \quad (1.7)$$

où

E'_q : la f.e.m. transitoire d'axe directe;

E : la f.e.m. transitoire à vide;

E_{fd} : la f.e.m d'excitation.

Sous les hypothèses précédentes, nous pouvons obtenir les équations suivantes pour la tension terminale ainsi que pour ses composantes directe et en quadrature

$$V_q = E'_q + x'_d I_d \quad (1.8)$$

$$V_d = -x'_d I_d \quad (1.9)$$

$$V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (1.10)$$

avec:

- V_d : composante de la tension terminale sur l'axe d,
- V_q : composante de la tension terminale sur l'axe q,
- I_d : composante du courant sur l'axe d,
- I_q : composante du courant sur l'axe q,
- x'_d : réactance transitoire sur l'axe d.

Dans le modèle dynamique de la partie électrique de la machine, nous pouvons prendre plusieurs choix, suivant la considération des régimes transitoires, sub-transitoire et aussi les axes d et q. Dans ce qui suit nous allons considérer seulement l'axe d et le régime transitoire. Ce choix réduit le nombre d'équations différentielles de la partie électrique à une seule équation [ZHU 98], [OUR 95].

$$E'_q = \frac{1}{T_{d0}} (E_{fd} - E'_q + (x_d - x'_d) I_d) \quad (1.11)$$

avec

- E_{fd} : f.e.m d'excitation,
- E'_q : f.e.m transitoire,
- x_d : réactance sur l'axe d.

Pour la puissance électrique développée, nous avons plusieurs formules et celle correspondant à notre choix est la suivante

$$Pe = E'_q I_q \quad (1.12)$$

I.3.2. Lignes de transmission

A. Le repère D-Q

Dans un réseau électrique multi-machine, les générateurs sont interconnectés via un réseau de lignes de transmission. Afin d'établir les expressions des courants générés, la modélisation de ceux-ci doit être ramenée à un repère D-Q lié au mouvement de l'ensemble des machines qui tournent à la vitesse de synchronisme.

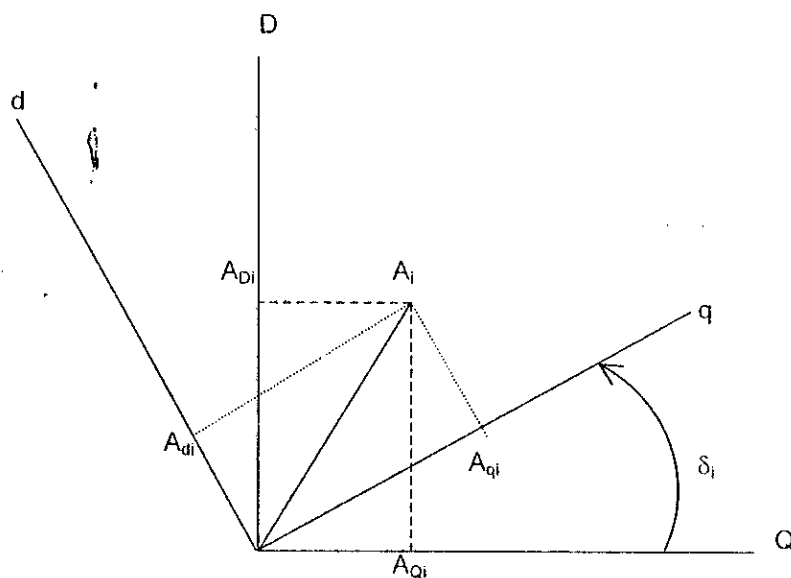


Fig. I.3 Les repères (d-q) et (D-Q).

Le passage d'un repère local $(d-q)_i$ lié au générateur (G_i) au repère D-Q se fait par une simple transformation linéaire.

Soit A_i une grandeur dans le repère $(d-q)_i$, nous pouvons écrire

$$\vec{A}_i = A_{dq} = A_{qi} + jA_{di} \tag{I.13}$$

Cette même grandeur, dans le repère D-Q, peut être écrite comme suit

$$\vec{A}_i = A_{DQ} = A_{Qi} + jA_{Di} \tag{I.14}$$

et l'équation du passage sera

$$\bar{A}_{DQi} = \bar{A}_{dq} \cdot e^{j\delta_i} \quad (1.15)$$

L'application de cette transformation au différents repères (d-q) conduit à la transformation linéaire de matrice $[T]$ définie par

$$[\bar{A}_{DQ}] = [T] \cdot [\bar{A}_{dq}] \quad (1.16)$$

avec

$$[\bar{A}_{dq}] = [\bar{A}_{dq1} \quad \dots \quad \bar{A}_{dqm}]^T \quad (1.17)$$

$$[\bar{A}_{DQ}] = [\bar{A}_{DQ1} \quad \dots \quad \bar{A}_{DQm}]^T \quad (1.18)$$

et

$$[T] = [T_{ik}] \quad (1.19)$$

telle que

$$\begin{cases} T_{ii} = e^{j\delta_i} \\ T_{ik} = 0, \text{ pour } i \neq k \end{cases} \quad (1.20)$$

B. Calcul de la matrice admittance

La matrice d'admittance $[\bar{Y}]$ est calculée suivant les étapes ci-après [AND 77]

- les impédances (admittances) équivalentes aux charges sont connectées entre les nœuds de charges et le nœud de référence,
- des nœuds additionnels sont ajoutés pour les tensions internes des générateurs,
- les inductances transitoires des générateurs sont connectées entre ces nœuds additionnels et les nœuds terminaux des générateurs,
- toutes les impédances sont converties en admittances,
- les éléments de la matrice $[\bar{Y}]$ seront calculés comme suit

- Y_{ii} est la somme de toutes les admittances connectées au nœud i ,
- Y_{ij} est l'opposé de l'admittance qui lie le nœud i et le nœud j .

C. Calcul de la matrice admittance réduite

Soit le réseau électrique multi-machine comportant n nœuds liés aux générateurs et m nœuds liés aux charges. Les courants électriques, au niveau des nœuds, sont liés aux tensions par la formule suivante

$$[\bar{I}] = [\bar{Y}] \cdot [\bar{V}] \quad (1.21)$$

Décomposons les vecteurs $[\bar{I}]$ et $[\bar{V}]$ en deux sous-vecteurs, les premiers sous-vecteurs liés aux nœuds des générateurs, notés $[\bar{I}_G]$ et $[\bar{V}_G]$ et les autres liés aux nœuds des charges, notés $[\bar{I}_L]$ et $[\bar{V}_L]$.

Utilisant le fait que les courants injectés aux nœuds des charges sont nuls

$$[\bar{I}] = \begin{bmatrix} [\bar{I}_G] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

nous obtenons

$$\begin{bmatrix} [\bar{I}_G] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\bar{Y}_{GG}] & [\bar{Y}_{GL}] \\ [\bar{Y}_{LG}] & [\bar{Y}_{LL}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\bar{V}_G] \\ [\bar{V}_L] \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Donc, pour les courants aux nœuds des générateurs, nous pouvons écrire

$$[\bar{I}_G] = [\bar{Y}_{GG}] \cdot [\bar{V}_G] + [\bar{Y}_{GL}] \cdot [\bar{V}_L] \quad (1.23)$$

et au niveau des nœuds des charges, nous aurons

$$[0] = [\bar{Y}_{LG}] \cdot [\bar{V}_G] + [\bar{Y}_{LL}] \cdot [\bar{V}_L] \quad (1.24)$$

En tirant l'expression de $[\bar{V}_L]$ à partir de (1.24) et en la substituant dans (1.23), nous obtenons l'expression qui lie les courants et les tensions au niveau des nœuds des générateurs

$$[\bar{I}_G] = \left\{ [\bar{Y}_{GG}] - [\bar{Y}_{GL}] \cdot [\bar{Y}_{LL}]^{-1} \cdot [\bar{Y}_{LG}] \right\} [\bar{V}_G] \quad (1.25)$$

La matrice réduite $[\bar{Y}_r]$ est définie par

$$[\bar{Y}_r] = [\bar{Y}_{GG}] - [\bar{Y}_{GL}] \cdot [\bar{Y}_{LL}]^{-1} \cdot [\bar{Y}_{LG}] \quad (I.26)$$

D. Calcul des courants

De ce qui précède, nous pouvons calculer les courants aux nœuds des générateurs par l'équation matricielle suivante

$$[\bar{I}_G] = [\bar{Y}_r] \cdot [\bar{V}_G] \quad (I.27)$$

Le calcul doit être fait dans le repère global (D-Q), puis les résultats seront ramenés aux repères locaux (d-q)_i. Nous trouvons, pour $[V_G] = [E'_q]$ et en négligeant les effets transitoires sur l'axe q, les expressions des composantes d et q des courants au niveau des nœuds des générateurs [ZHU 98]

$$I_{qi} = \sum_{k=1}^n E'_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad (I.28)$$

$$I_{di} = \sum_{k=1}^n E'_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad (I.29)$$

$$i = 1, \dots, n$$

avec

$$[\bar{Y}_r] = [\bar{Y}_{ik}]_{\substack{i=1, \dots, n \\ k=1, \dots, n}} \quad (I.30)$$

$$\bar{Y}_{ik} = Y_{ik} \cdot e^{j\theta_{ik}} \quad (I.31)$$

1.3.3. Régulateurs de tension, stabilisateurs et régulateurs de vitesse

Pour la simulation des réseaux électriques en vue de l'évaluation de la stabilité transitoire, les différents régulateurs doivent être pris en compte. Les deux régulateurs principaux d'un générateur sont les régulateurs de la tension terminale (AVR, Automatic Voltage Regulator) et les gouverneurs de vitesse. Nous pouvons aussi citer les stabilisateurs qui améliore la stabilité du réseau électrique.

A. Régulateurs de tension, (AVR, Automatic Voltage Regulators)

Il en existe plusieurs types classiques [AND 77], [ARR 90], mais ceux-ci sont peu fiables car ils sont dimensionnés en linéarisant autour d'un point de fonctionnement et une forte perturbation risque de déstabiliser le système.

Le régulateur de la tension terminale génère un signal de commande pour l'appliquer aux bornes du circuit d'excitation de la machine. Ce signal de commande est établi à partir de l'erreur qui existe entre la valeur instantanée de la tension terminale et la valeur de consigne. D'autres signaux peuvent être utilisés par les régulateurs de la tension terminale.

De nouvelles techniques de l'automatique sont actuellement utilisées pour dimensionner des régulateurs de tensions. La commande par logique floue en est une [HIY 96], [SEN 96], [GHA 96], [SAD 98], [WEN 98].

B. Stabilisateurs, (PSS, Power System Stabilizers)

Les stabilisateurs améliorent la stabilité du réseau électrique en développant une commande à partir du signal de l'erreur de la vitesse, donc de la fréquence. Cette commande est appliquée au circuit d'excitation de la machine. En fait, l'excitation de la machine est la somme de deux commandes: la première due au régulateur de tension, et l'autre due au stabilisateur.

L'objectif des stabilisateurs est de ramener la vitesse, donc la fréquence, à sa valeur de synchronisme d'une manière plus rapide que les gouverneurs de vitesse. Ceci est réalisé en utilisant le fait qu'un effet électrique est plus rapide qu'un effet mécanique. D'ailleurs, les nouveaux régulateurs de tension sont équipés de stabilisateurs [HIY 96], [SEN 96], [GHA 96], [SAD 98], [WEN 98].

C. Gouverneurs (GOV, GOVERNORS)

Les gouverneurs qui sont des régulateurs de vitesse, donc de fréquence, agissent sur la puissance mécanique fournie à la machine. Ils sont lents par rapport aux stabilisateurs, de sorte que parfois, la puissance mécanique est considérée comme constante. D'ailleurs, c'est ce qui est généralement considéré pour l'étude d'un effet rapide comme dans le cas de la stabilité transitoire par exemple.

1.3.4. Récapitulatif

Soit le réseau électrique à n générateurs. Le modèle non linéaire est le suivant [ZHU 98]

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = -\frac{D_i}{2H_i}(\omega_i - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H_i}(Pm_i - Pe_i) \\ E'_{qi} = \frac{1}{T_{d0i}}(E_{fi} - E'_{qi} + (x'_{di} - x_{di})I_{di}) \end{cases} \quad (I.32)$$

$$I_{qi} = \sum_{k=1}^n E'_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad (I.33)$$

$$I_{di} = \sum_{k=1}^n E'_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad (I.34)$$

$$Pe_i = E'_{qi} I_{qi} \quad (I.35)$$

$$V_{qi} = E'_{qi} + x'_{di} I_{di} \quad (I.36)$$

$$V_{di} = -x'_{di} I_{di} \quad (I.37)$$

$$V_{ii} = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \quad (I.38)$$

avec $i=1, \dots, n$, le numéro du générateur.

1.4. STABILITE DES RESEAUX ELECTRIQUES

1.4.1. Introduction

La stabilité d'un réseau d'énergie électrique est définie comme étant l'aptitude de celui-ci à fonctionner au voisinage du synchronisme lorsqu'il est sollicité par une ou plusieurs perturbations [OUR 95].

La perturbation crée un déséquilibre entre la production et la consommation dans le réseau électrique. Ce déséquilibre induit la variation de l'énergie cinétique provoquant ainsi l'évolution des angles rotoriques accompagnées par des oscillations dynamiques.

Les perturbations sont causées par des défauts qui surviennent sur le réseau électrique. Parmi ces défauts, nous pouvons citer: les court-circuit mono ou polyphasés, suivis généralement d'ouverture de lignes; les modifications de charges; la rupture d'une interconnexion et le déclenchement accidentel d'une machine ou d'un transformateur. Les défauts peuvent être classés par leur rapidité et par leur amplitude.

Le but de cette partie est de montrer les différents types de stabilité rencontrés dans les réseaux électriques. La stabilité statique et la stabilité dynamique sont traitées brièvement et l'accent est mis sur la stabilité transitoire.

I.4.2. Stabilité statique, stabilité dynamique

A. Stabilité statique

Elle correspond à la stabilité d'un réseau électrique sujet à une perturbation lente et de faible amplitude. Le système reste stable sous l'action des dispositifs de régulation conventionnels.

L'utilisation d'un modèle linéaire pour l'étude de ce type de stabilité et pour le dimensionnement des régulateurs est suffisante.

B. Stabilité dynamique

Dans ce cas le réseau électrique est sujet à une perturbation rapide mais de faible amplitude. L'utilisation d'un modèle linéaire est acceptable et le système est stabilisé par des dispositifs de commande supplémentaires (stabilisateurs).

I.4.3. Stabilité transitoire

- **Définition**

Elle correspond à la stabilité d'un réseau électrique siège d'une perturbation rapide et sévère. Cette perturbation allant, le plus souvent, jusqu'à dépasser la capacité des dispositifs de commande. L'utilisation d'un modèle non linéaire du réseau électrique est nécessaire pour l'évaluation de la stabilité transitoire.

Pour la stabilisation du réseau électrique, il est nécessaire d'utiliser des régulateurs non linéaires ainsi que d'autres dispositions particulières.

• **L'étude de la stabilité transitoire**

Pour étudier la stabilité transitoire, il faut

- établir le modèle non linéaire du système,
- trouver l'écoulement de l'énergie (généralement donné),
- trouver le régime établi (le point de fonctionnement),
- connaître les paramètres nécessaires
 - constante d'inertie H ,
 - les réactances transitoires x_d' ,
 - les impédances des lignes de transmission avant, pendant et après le défaut,
 - la matrice réduite $[Y_r]$ pour chaque cas,
 - la durée du défaut,
 - l'instant d'ouverture de ligne pour un court-circuit,
 - l'instant de la fermeture de ligne pour un court-circuit.

1.5. SIMULATION

Dans notre application nous allons utiliser deux types de réseaux électriques. Le premier est constitué par deux machines connectées entre elles ainsi qu'à un bus infini (Fig. I.4). Les paramètres de ce réseau électrique sont donnés dans l'annexe I.

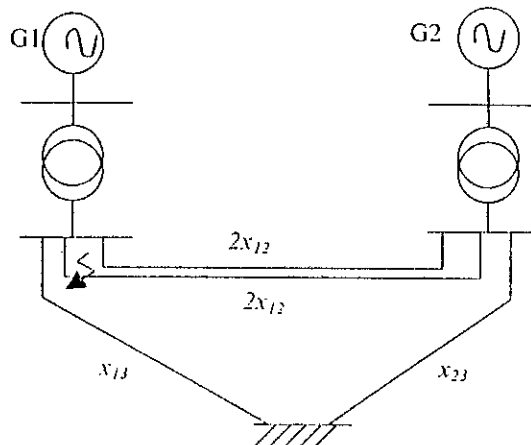


Fig. I.4 Topologie du réseau électrique à deux machines utilisé.

Le second réseau électrique est constitué par trois machines et un bus infini connectés entre eux (Fig. I.5). les paramètres de ce réseau électrique sont donnés dans l'annexe II.

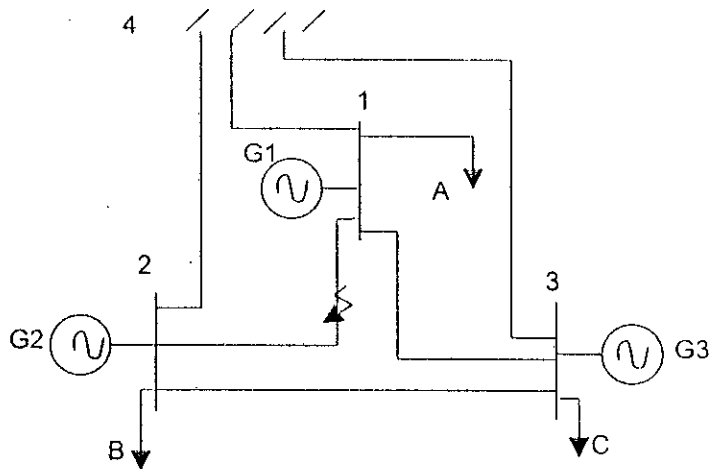


Fig. I.5 Topologie du réseau électrique à trois machines utilisé.

Nous avons choisis deux défauts pour tester la stabilité des réseaux électriques. Le premier est un court-circuit triphasé et l'autre est un accroissement brutal de la valeur de la puissance mécanique fournie à une des machines constituant le réseau électrique.

NB: Sur les représentations graphiques des simulations, lire $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \Delta w_1, \Delta w_2, \Delta w_3, V_{t1}, V_{t2}$ et V_{t3} au lieu de $d1, d2, d3, dw1, dw2, dw3, Vt1, Vt2$ et $Vt3$ respectivement.

A. Réseau électrique à deux machines

L'effet d'un court-circuit triphasé

Le réseau électrique étant en régime permanent, un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t=0.1 \text{ sec}$ sur l'une des deux lignes liant les nœuds (1) et (2) à une distance du nœud (1) égale à 20% de la longueur de cette ligne. La durée de ce court-circuit est de 0.15 sec , ce qui implique qu'il y aura l'ouverture de cette ligne à l'instant $t=0.25 \text{ sec}$. La ligne reste ensuite ouverte.

La figure (I.6) montre que le système se déstabilise sous l'effet de ce défaut.

L'effet d'un accroissement brutal de la puissance mécanique

Le réseau électrique étant en régime permanent, un accroissement brutal de 20% de la puissance mécanique fournie à la machine (G1) est appliqué à l'instant $t=0.1 \text{ sec}$, et demeure à cette valeur.

La figure (I.7) montre que le système se déstabilise et le point de fonctionnement change.

B. Réseau électrique à trois machines

L'effet d'un court-circuit triphasé

Un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t=0.1 \text{ sec}$ sur la ligne liant les nœuds (1) et (2) à une distance du nœud (1) égale à 20% de la longueur de cette ligne. La durée de ce court-circuit est de 0.1 sec , ce qui implique qu'il y aura l'ouverture de cette ligne à l'instant $t=0.2 \text{ sec}$. La ligne reste ensuite ouverte.

La figure (I.8) montre que le système se déstabilise sous l'effet de ce défaut.

L'effet d'un accroissement brutal de la puissance mécanique

Un accroissement brutal de 20% de la puissance mécanique fournie à la machine (G1) est appliqué à l'instant $t=0.1 \text{ sec}$ et demeure à cette valeur.

La figure (I.9) montre que le système se déstabilise sous l'effet de ce défaut, et le point de fonctionnement change.

Notons que tous les essais sont effectués sans aucun réglage.

1.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les éléments nécessaires pour notre travail. Dans la modélisation du réseau électrique, l'accent est mis sur le modèle non linéaire des machines qui permet l'évaluation de la stabilité transitoire.

Dans l'étude de la stabilité, nous avons vu les différents types de stabilité rencontrés dans le réseau électrique et nous avons insisté sur la stabilité transitoire dont les étapes de son évaluation ont été données.

Une simulation sur deux réseaux électriques a montré l'effet d'un court-circuit triphasé et aussi l'effet d'un accroissement brutal de la puissance mécanique fournie à une machine et nous avons pu voir qu'un réglage est nécessaire pour maintenir la tension terminale à sa valeur de consigne et aussi pour garantir la stabilité des réseaux électriques.

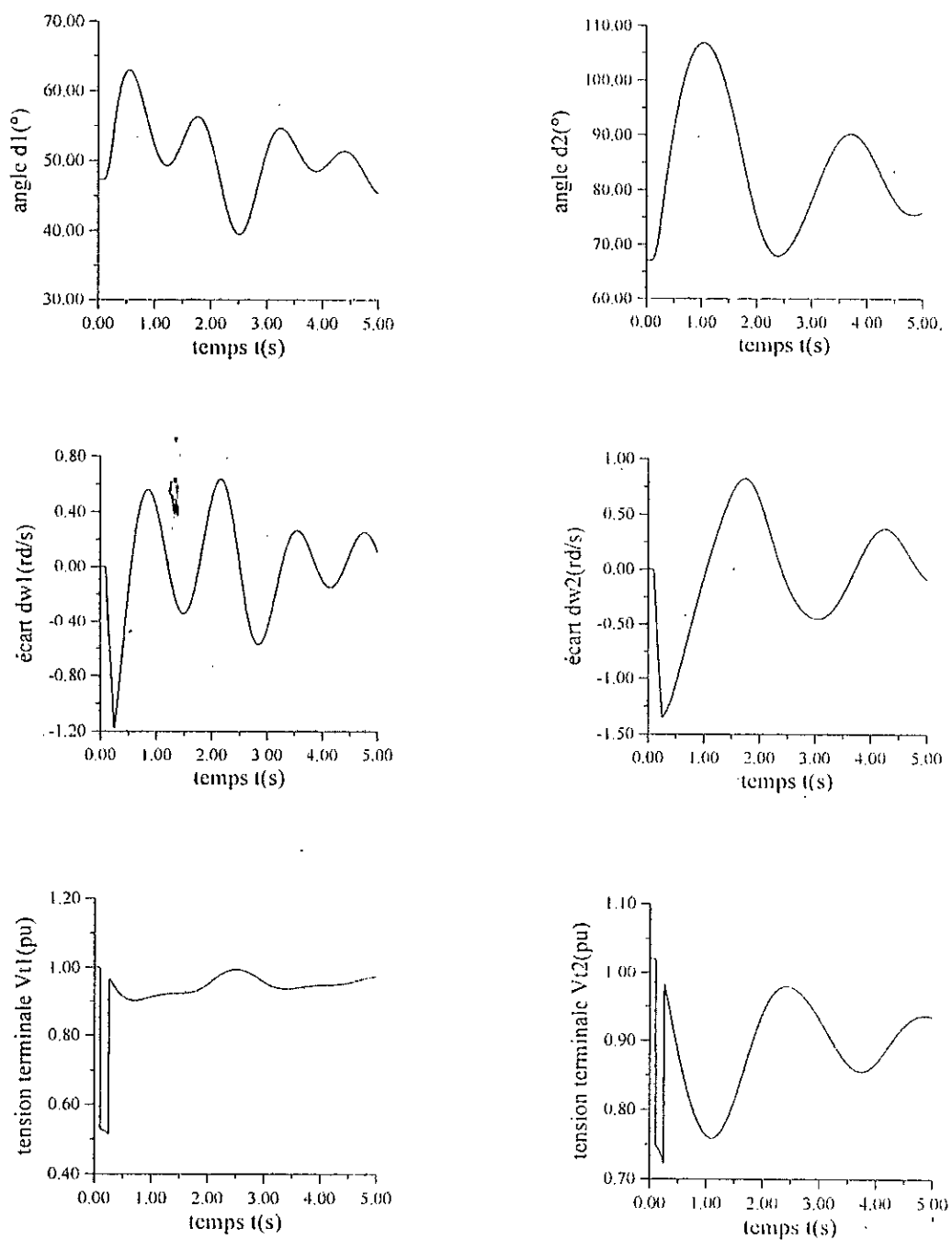


Fig. I.6 Réseau électrique à 2 machines avec court-circuit triphasé et sans réglage.

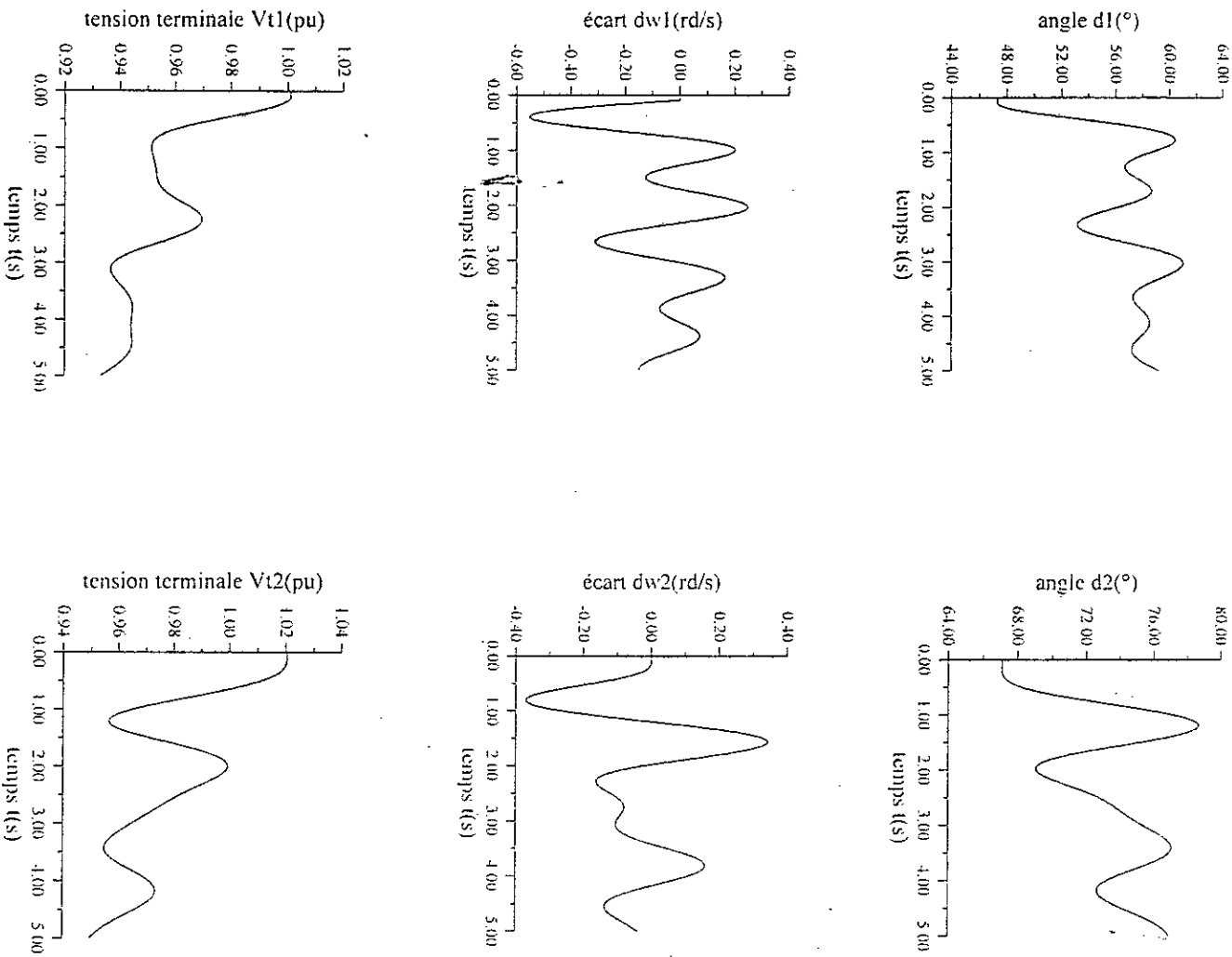


Fig. I.17 Réseau électrique à 2 machines avec accroissement de 20% de la puissance mécanique et sans réglage.

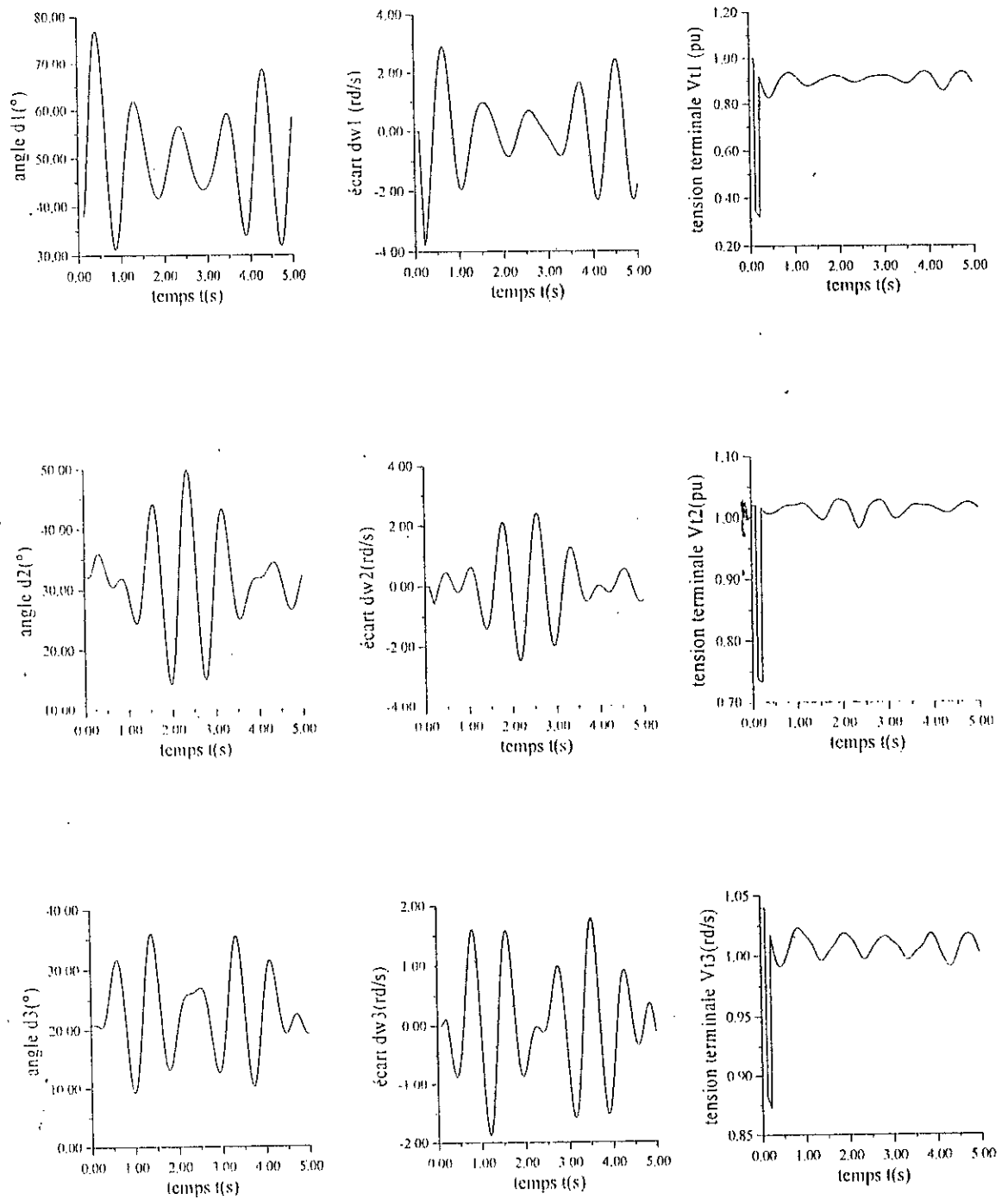


Fig. I.8 Réseau électrique à 3 machines avec court-circuit triphasé et sans réglage.

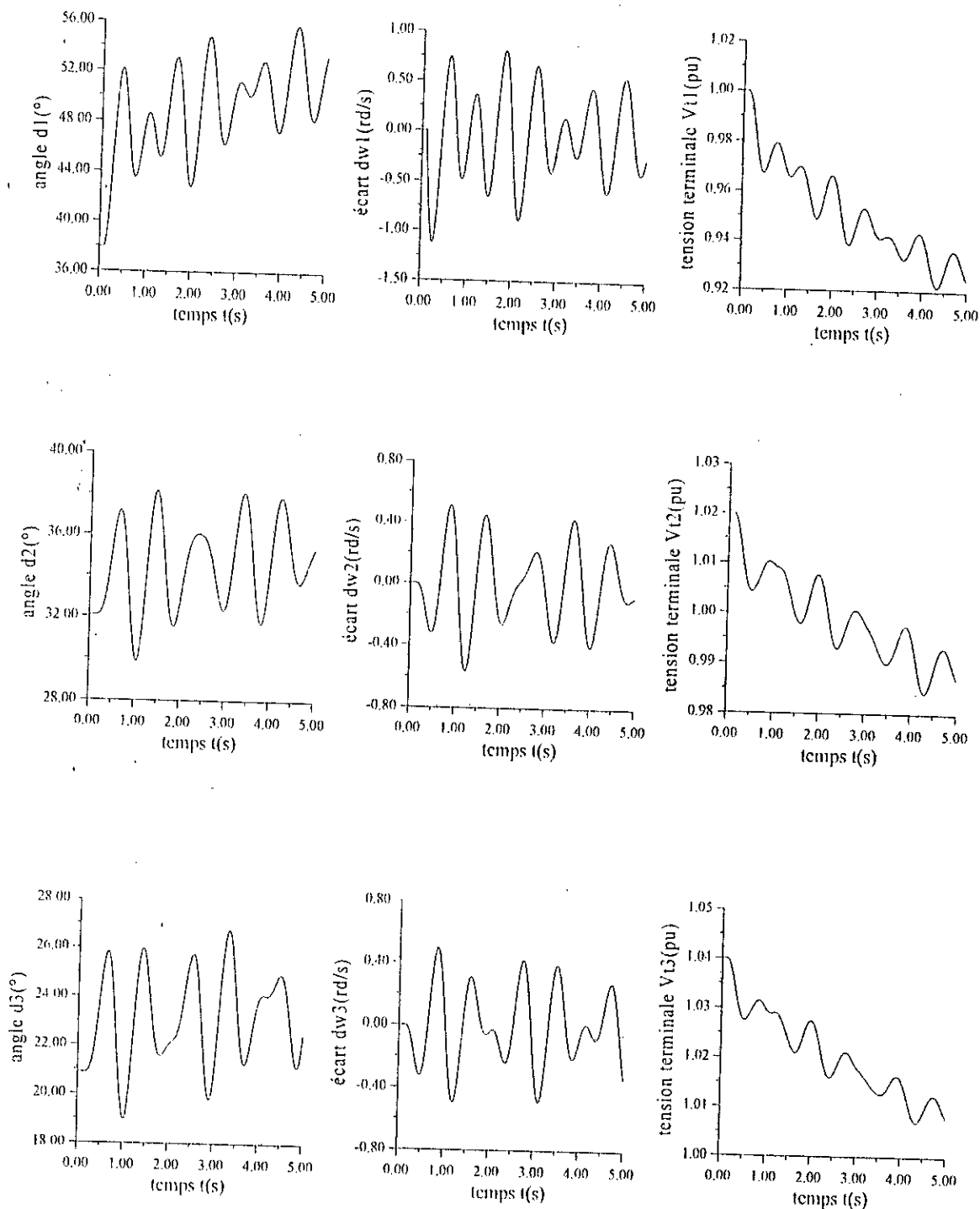


Fig. I.9 Réseau électrique à 3 machines avec accroissement de 20% de la puissance mécanique et sans réglage.

LOGIQUE FLOUE:
MODELISATION ET COMMANDE

CHAPITRE II

LOGIQUE FLOUE MODELISATION ET COMMANDE

II.1. INTRODUCTION

La commande par logique floue a été introduite à Queen Mary College de Londres par E. Mamdani en 1974 [MAM 74]. Elle se base sur les notions fondamentales de la logique floue et des sous-ensembles flous. Ces notions ont été introduites au milieu des années soixante à L'Université de Berkely en Californie, par Le Professeur L. A. Zadeh.

En fait, la logique floue est une extension de la logique classique qui permet la traduction et la manipulation de propositions ou de données incertaines, vagues ou imprécises en utilisant des degrés de vérité appartenant à l'intervalle $[0,1]$.

Dans le présent chapitre, nous donnons les principes et les notions de base de la logique floue ainsi que ses applications à la modélisation et à la commande des systèmes dynamiques.

II.2. BASES MATHÉMATIQUES DE LA LOGIQUE FLOUE

II.2.1. Sous-ensembles flous

Cette notion permet l'appartenance partielle d'un élément à un ensemble donné [KAU 87],[DUB 87]. Cette appartenance est pondérée par un coefficient dit degré d'appartenance. De ce fait, chaque ensemble est caractérisé par une fonction, dite *fonction d'appartenance*, dont les formes usuelles sont: triangulaire, trapézoïdale, cloche, gaussienne ...

La figure (II.1) présente quelques types de fonctions d'appartenance usuelles. Nous y trouvons

- les fonctions d'appartenance de type triangulaire, correspondant au sous-ensemble flou Z de l'ensemble de référence X . Cette fonction d'appartenance est composée de deux segments de deux droites, et elle est caractérisée par trois paramètres a , b et c qui sont les valeurs prises par l'élément x de l'ensemble de référence X au niveau des sommets du triangle formé par ces deux segments de droites avec l'axe horizontal;

- les fonctions d'appartenance de type trapézoïdal, correspondant au sous-ensemble flou Z de l'ensemble de référence X . Ce type de fonction d'appartenance est caractérisé par quatre paramètres a, b, c et d qui sont les valeurs prises par l'élément x de l'ensemble de référence X au niveau des sommets du trapèze;
- les fonctions d'appartenance en cloche, c'est une forme générale qui peut regrouper d'autres types de fonctions d'appartenance;
- les fonctions d'appartenance de type gaussien sont un cas particulier des fonctions d'appartenance en cloche. Elles sont caractérisées par deux paramètres qui sont le centre et la variance d'une fonction gaussienne.

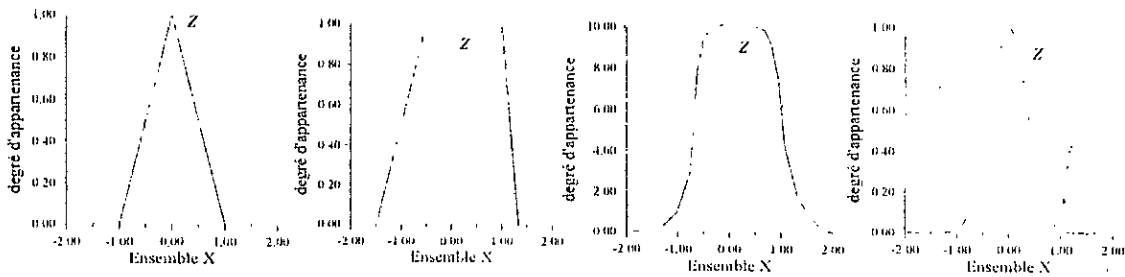


Fig. II.1 Quelques types de fonctions d'appartenance.

En fait, la fonction d'appartenance n'est rien d'autre qu'une application de l'ensemble de référence X dans l'intervalle $[0,1]$ définie comme suit

$$\begin{aligned} \mu_A : X &\rightarrow [0,1] \\ x &\mapsto \mu_A(x) \end{aligned} \tag{II.1}$$

Un sous-ensemble flou A dans l'ensemble de référence X est souvent noté par

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \tag{II.2}$$

Si l'ensemble de référence X est continu, la notation intégrale suivante est préférée

$$A = \int_X \mu_A(x) / x \tag{II.3}$$

alors que pour le cas où X est un ensemble discret, c'est la notation suivante qui est souvent utilisée

$$A = \sum_{x \in X} \mu_A(x) / x \tag{II.4}$$

Remarque

L'ensemble de référence X est souvent appelé univers de discours, pour le fait qu'il contient tous les sous-ensembles flous pris en considération.

II.2.2. Variable linguistique floue

Les sous-ensembles flous permettent d'exprimer en termes mathématiques les différents attributs qualificatifs du langage commun (petit, grand,...)[ZAD 88]. Ceci est effectué par l'introduction d'un nouveau type de variables dites variables linguistiques qui, contrairement à une variable numérique dont la valeur est un nombre, prennent comme valeurs des termes du langage humain, qu'on appelle valeurs floues.

Comme exemple de variables linguistiques, nous pouvons citer la variable linguistique "TEMPERATURE" qui peut prendre pour valeurs floues les attributs qualificatifs suivants "CHAUD", "TIEDE" et "FROID" et la variable linguistique "TAILLE" qui prend pour valeurs floues les attributs qualificatifs "GRAND", "MOYEN" et "PETIT".

La représentation mathématique d'une valeur floue est réalisée par les sous-ensembles flous. En effet, une valeur floue n'est rien d'autre qu'un sous-ensemble flou dans un univers de discours.

II.2.3. Opérations sur les sous-ensembles flous

Afin de manipuler les sous-ensembles flous, il est nécessaire de définir certaines opérations élémentaires.

Soit A et B deux sous-ensembles flous dans X caractérisés respectivement par $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$.

a. Egalité

On dit que A et B sont égaux si et seulement si

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (\text{II.5})$$

b. Inclusion

On dit que A est inclus dans B si et seulement si

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (\text{II.6})$$

c. Complément

Le complément A^c de A est défini par

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X \quad (II.7)$$

d. Intersection

L'intersection de A et B est définie par

$$\mu_{A \cap B}(x) = T(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in X \quad (II.8)$$

où T (en général l'opérateur Min) est une norme triangulaire (voir l'annexe III).

e. Union

L'union de A et B est définie par

$$\mu_{A \cup B}(x) = \perp(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in X \quad (II.9)$$

où \perp (en général l'opérateur Max) est une conorme triangulaire (voir l'annexe III).

f. Produit cartésien

Soient A_1, A_2, \dots, A_n des sous-ensembles flous dans X_1, X_2, \dots, X_n respectivement. Le produit cartésien de A_1, A_2, \dots, A_n , est un sous-ensemble flou dans l'espace produit de X_1, X_2, \dots, X_n , ayant pour fonction d'appartenance

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \text{Min}(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)) \quad (II.10)$$

g. Relation floue

Soient U_1, U_2, \dots, U_n des univers de discours. Une relation floue est un sous-ensemble flou dans $U_1 * U_2 * \dots * U_n$, exprimé comme suit

$$R_{U_1 \times \dots \times U_n} = \left\{ \left((x_1, \dots, x_n), \mu_R(x_1, \dots, x_n) \right) / (x_1, \dots, x_n) \in U_1 \times \dots \times U_n \right\} \quad (II.11)$$

II.2.4. Logique floue

Dans la suite de notre exposé, nous donnerons quelques définitions concernant la logique floue et ses éléments de base.

Soient X une variable floue et A une caractéristique.

a. La proposition floue

Une proposition floue est une description de la variable floue, donnée sous la forme suivante

$$"X \text{ est } A"$$

A cette proposition est associé un degré de vérité appartenant à l'intervalle $[0,1]$.

b. La conjonction

La conjonction de deux propositions est une autre proposition réalisée à l'aide de l'opérateur et. Par exemple

$$"X_1 \text{ est } A_1" \text{ et } "X_2 \text{ est } A_2"$$

Mathématiquement, le degré de vérité de la conjonction de deux propositions est obtenue par une norme triangulaire agissant sur les degrés de vérité des deux propositions initiales.

c. La disjonction

La disjonction de deux propositions est une autre proposition réalisée en utilisant l'opérateur ou. Par exemple

$$"X_1 \text{ est } A_1" \text{ ou } "X_2 \text{ est } A_2"$$

En termes mathématiques, le degré de vérité associé à cette proposition est le résultat de l'application d'une norme triangulaire sur les deux degrés de vérité associés aux deux propositions initiales.

d. L'implication

L'implication construit une proposition à l'aide des opérateurs si et alors comme suit

$$\text{si } "X_1 \text{ est } A_1" \text{ alors } "X_2 \text{ est } A_2"$$

CHAPITRE II

Le degré de vérité associé à cette dernière proposition est le résultat de l'application d'une norme triangulaire sur les degrés de vérité des deux propositions initiales.

II.2.5. Règles floues

Une règle floue est une relation exprimée à l'aide d'une implication. Par exemple

*SI "ERREUR est POSITIVE" ET "VARIATION D'ERREUR est NEGATIVE"
ALORS "COMMANDE est GRANDE"*

Cette règle est constituée de trois propositions

La proposition (1) est *"ERREUR est POSITIVE"*.

La proposition (2) est *"VARIATION D'ERREUR est NEGATIVE"*.

La proposition (3) est *"COMMANDE est GRANDE"*,

Les deux premières propositions forment les prémisses alors que la dernière proposition forme la conséquence de la règle floue. La conjonction des prémisses, l'implication et la conséquence forment la règle floue.

II.2.6. Raisonnement

Cela consiste à manipuler des propositions floues par des règles floues dans le but d'obtenir une décision. Deux modes de raisonnement inspirés de la logique classique sont utilisés: le MP (modus ponens) et le MT (modus tollens).

Soient P et C deux propositions logiques.

- **le MP** est défini par $P \Rightarrow C$ qui signifie que si P est vraie alors C sera vraie aussi,
- **le MT** est défini par $\bar{C} \Rightarrow \bar{P}$ qui signifie que si C est fausse alors P sera fausse.

En logique floue, ces deux modes de raisonnement sont généralisés pour traiter les propositions floues.

- **le GMP (Generalized Modus Ponens)**

règle floue : si X est A alors Y est B

μ_A μ_B

fait observé: X est A'

$\mu_{A'}$

conclusion : Y est B'

$\mu_{B'}$

• **le GMT (Generalized Modus Tollens)**

règle floue: si X est A alors Y est B

μ_A μ_B
fait observé: Y est B'

$\mu_{B'}$
conclusion: X est A'

$\mu_{A'}$

Remarque

En commande, on utilise le GMP pour respecter la causalité.

II.3. MODELISATION PAR LOGIQUE FLOUE

II.3.1. Introduction

Les tentatives de modélisation des événements imprécis ont été déjà commencées avec Le Professeur L. A. Zadeh en 1971, mais le travail a été limité aux systèmes discrets. Dès cette date, des travaux traitant de la modélisation des systèmes en utilisant les concepts de la logique floue ont été conduits. D'abord, la modélisation a été traitée par les ensembles flous (modélisation floue symbolique). Ensuite, l'utilisation des nouveaux concepts a conduit à d'autres types de modèles flous.

Le problème de la modélisation floue est résolu par le théorème de l'approximation universelle. Ce problème consiste à trouver les conditions pour lesquelles un modèle flou peut être trouvé pour approcher un système non linéaire préalablement donné avec une précision arbitraire imposée a priori. La réponse à ce problème est l'objet du théorème sur l'approximation universelle.

Récemment, des résultats ont été obtenus. Parmi lesquels, nous pouvons citer :

- modélisation floue en utilisant les modèles de type de Mamdani [BUC 92], [WAN 92], [ZEN 94],
- modélisation floue en utilisant les modèles de types de Takagi-Sugeno [CAO 96], [CAO 97], [JAN 95], [TAK 96],
- modélisation floue en utilisant les nombres flous [BEN 97].

II.3.2. Structure générale d'un modèle flou

Comme le montre la figure (II.2) un modèle flou d'un système dynamique se compose de

- un bloc de fuzzification
- un bloc pour le moteur d'inférence
- une base de règles ou de connaissances
- un bloc de defuzzification

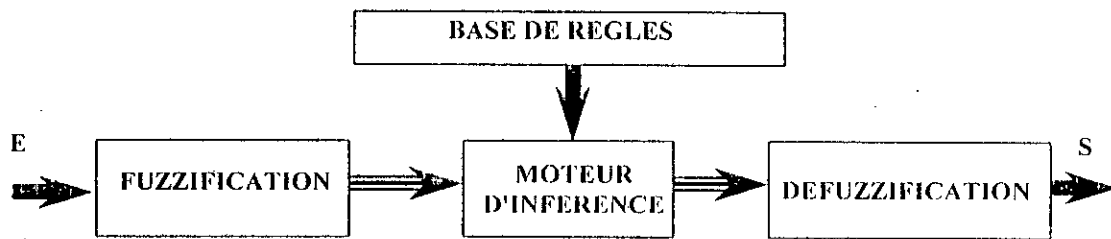


Fig. II.2 Structure générale d'un modèle flou d'un système dynamique.

a. Fuzzification

C'est l'étape qui permet de transformer les grandeurs mesurées sur le processus en un ensemble de valeurs floues [MEN 95].

b. Inférence

C'est un mécanisme de décision qui, en manipulant des règles floues, établit une décision sous forme d'un sous-ensemble flou. Il existe plusieurs stratégies d'inférence [MEN 95], par exemple

| | |
|---------|-----------------|
| Mamdani | (Max. , Min.) |
| Larsen | (Max. , Prod.) |
| Sugeno | (Somme , Prod.) |

c. Defuzzification

Elle consiste à obtenir les valeurs numériques de la sortie du système dynamique à partir du sous-ensemble flou obtenu par le moteur d'inférence.

Il existe plusieurs stratégies de defuzzification [HEL 93], parmi lesquelles nous pouvons citer

- méthode du maximum qui donne comme valeur celle qui a le plus grand degré d'appartenance,
- méthode du centre de gravité qui donne comme valeur le centre du sous-ensemble flou calculé suivant la formule

$$Z_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_Z(w_j) \cdot w_j}{\sum_{j=1}^n \mu_Z(w_j)} \quad (\text{II.12})$$

avec

Z : le sous-ensemble flou obtenu par le moteur d'inférence,

Z_0 : le centre du sous-ensemble flou Z ,

$w_j, j=1, \dots, n$: n points uniformément répartis sur l'univers de discours,

μ_Z : fonction d'appartenance associée au sous-ensemble flou Z .

d. Base de règles

La base de règles est construite à partir de

- l'expérience des opérateurs, formulées en termes de règles,
- l'utilisation des méthodes d'apprentissage et/ou d'identification,
- l'utilisation du partitionnement de l'espace d'état,

II.3.3. Modélisation floue par modèles flous de Takagi-Sugeno

L'idée principale de la modélisation floue de Takagi-Sugeno est de décomposer l'espace des variables d'état du système en un ensemble de régions et d'établir dans chaque région une équation linéaire qui représente le système. Ainsi, est formé un ensemble d'équations linéaires qui, une fois pondérées par les fonctions d'appartenance à chaque région et connectées entre elles par le biais du raisonnement flou, forme une fonction non linéaire représentant d'une manière approchée le système initial.

Nous pouvons distinguer deux types de ces modèles flous

- les modèles flous statiques: qui ne présentent pas d'équations récurrentes ou d'équation différentielles dans la partie conséquence des règles floues mais seulement des équations algébriques linéaires [JAN 92];
- les modèles flous dynamiques: qui présentent quant à eux des équations différentielles linéaires ou des équations récurrentes linéaires en plus des équations algébriques linéaires dans la partie conséquence des règles floues [CAO 96] [CAO 97a] [CAO 97b].

II.3.4. Modèle dynamique flou

Système dynamique non linéaire

Soit donné le système dynamique suivant

$$\dot{x} = f(x, u) \tag{II.13}$$

$x \in \mathcal{R}^n$ et $u \in \mathcal{U}^p$, et f satisfaisant les hypothèses suivantes

1.

$$\exists x_0 = 0 \in \mathcal{R}^n / f(0,0) = 0, f \in C^2 \tag{II.14-a}$$

2.

$$\frac{\partial f}{\partial x} \neq 0, \frac{\partial f}{\partial u} \neq 0, \forall x \in \mathcal{R}^n, \forall u \in \mathcal{U}^p \tag{II.14-b}$$

Modèle dynamique flou

Soit l'ensemble de règles floues

$R^l : SI (x_i \text{ est } X_i^l) ET \dots ET (x_n \text{ est } X_n^l) ALORS$

$$\dot{x} = A_l x + B_l u + C_l \tag{II.15}$$

$$l=1, \dots, m.$$

n est la dimension de l'espace d'état et $X_i^l, i=1, \dots, n$ et $l=1, \dots, m$ sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance μ_i^l .

Définissons $\mu_l, l=1, \dots, m$ comme suit

$$\mu_l = \prod_{i=1}^n \mu_i^l \tag{II.16}$$

et formons le vecteur μ

$$\mu = [\mu_1 \quad \dots \quad \mu_m]^T \tag{II.17}$$

En utilisant le produit pour l'inférence et le centre de gravité pour la défuzzification, nous obtenons

$$\dot{x} = A(\mu)x + B(\mu)u + C(\mu) \tag{II.18}$$

Avec

$$\begin{aligned}
 A(\mu) &= \sum_{l=1}^m \mu_l A_l \\
 B(\mu) &= \sum_{l=1}^m \mu_l B_l \\
 C(\mu) &= \sum_{l=1}^m \mu_l C_l
 \end{aligned}
 \tag{II.19}$$

Le modèle (II.18) est appelé modèle dynamique flou alors que le modèle (A_l, B_l, C_l) est appelé *lième* modèle local dans la région R_l associée à la règle floue R^l .

Remarque

Nous pouvons construire un modèle dynamique flou pour le système dynamique non linéaire donné par l'équation (II.13) et ceci n'est pas unique car il dépend du choix des fonctions d'appartenance, du nombre de règles ainsi que des méthodes d'obtention des modèles linéaires locaux.

II.4. COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE

L'objectif de la commande par logique floue consiste à piloter un système en utilisant les connaissances et/ou l'expérience d'un opérateur humain qualifié. Ces connaissances sont formulées à l'aide d'un ensemble de règles de conduite basées sur un vocabulaire symbolique [LEE 90a], [LEE 90b]. En fait, un régulateur flou n'est rien d'autre qu'un système flou.

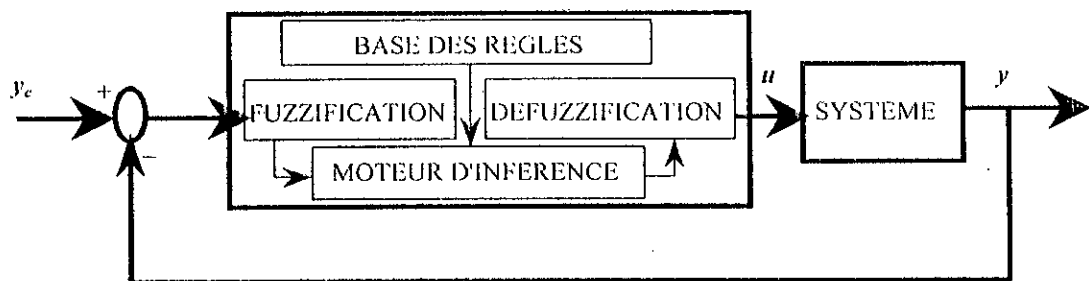


Fig. II.3 Schéma de commande par logique floue.

II.4.1. Types de régulateurs flous

Il existe plusieurs types de régulateurs flous, parmi lesquels nous pouvons citer:

a. Régulateur de Mamdani

Les régulateurs de type de Mamdani utilisent des règles à prémisses et conclusions symboliques, l'inférence (max., min.) et la défuzzification par la méthode du centroïde, Par exemple

Si (" Erreur est Négative ") Alors (" Commande est Grande ")

b. Régulateur de Sugeno

Les régulateurs de type de Sugeno reposent sur des règles, dont les prémisses sont symboliques, tandis que les conclusions sont numériques, par exemple

Si (" Erreur est Négative ") Alors ($U=1+3e-2de$)

II.4.2. Synthèse des régulateurs flous

La synthèse des régulateurs flous passe par les étapes suivantes

- choix des variables d'entrée et des variables de sortie du régulateur,
- détermination de la plage de variation de chaque variable d'entrée et chaque variable de sortie,
- construction des sous-ensembles flous dans chaque plage,
- choix des fonctions d'appartenance associées aux sous-ensembles flous,
- choix des méthodes d'inférence, et de defuzzification,
- construction de la base de règles,
- si nécessaire, faire une normalisation des plages de variation des variables d'entrée ou de sortie.

La dernière étape nécessite la fixation d'un ensemble de gains dits gains de normalisation [LIU 93],[BOS 92],[HRE 92].

II.4.3. Régulateur flou multi-modèle

A partir du modèle dynamique flou (voir II.3.4) nous pouvons construire un régulateur flou en se basant sur les modèles linéaires locaux. Pour chaque modèle linéaire local, nous

synthétisons des régulateurs linéaires locaux en utilisant les techniques de synthèse des régulateurs linéaires (placement de pôles, LQ, ...). Les effets des régulateurs linéaires locaux seront combinés par le raisonnement flou pour produire l'effet global d'un régulateur flou appelé régulateur flou multi-modèle associé au modèle dynamique flou et il est donné par

$$u = K(\mu)x = \left[\sum_{l=1}^m \mu_l K_l \right] \cdot x \quad (\text{II.20})$$

avec K_l , $l=1, \dots, m$ les gains de retour d'état calculés pour les modèles linéaires locaux dans les régions R_l , $l=1, \dots, m$.

Ce régulateur flou est de type de Sugeno, et pour qu'il soit capable à stabiliser le système il doit remplir quelques conditions (voir l'annexe IV).

Dans les chapitres suivants, nous allons utiliser ce type de régulateurs pour la commande décentralisée de deux types de réseaux électriques.

II.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons donné une description succincte de la logique floue avec quelques notions juste nécessaires pour les développements qui suivent. Différents types de régulateurs flous ont été présentés à savoir

- régulateur de type de Mamdani
- régulateur de type de Sugeno
- régulateur multi-modèle flou

Notons que les deux premiers types de régulateurs ne permettent pas d'exploiter le modèle du système à commander lorsque celui-ci est disponible alors que la commande floue multi-modèle, en plus de l'exploitation du modèle du système, permet d'utiliser les techniques linéaires pour chaque modèle local. Ainsi, la logique floue permet de coordonner entre les différentes commandes locales pour pouvoir commander le système dans le domaine de fonctionnement.

Ce dernier type de régulateur a été adopté pour la commande décentralisée des réseaux électriques dont les développements seront donnés dans les chapitres qui suivent.

COMMANDE FLOUE MULTI-MODELE
A MODELES LOCAUX LINEARISES

CHAPITRE III

COMMANDE FLOUE MULTI-MODELE A MODELES LOCAUX
LINEARISES

III.1. INTRODUCTION

La commande par logique floue s'est avérée intéressante pour le contrôle des systèmes complexes et a été largement utilisée afin d'avoir de bonnes performances pour les systèmes ayant des modèles mal définis ou bien ayant de nombreuses variables qui entrent en jeu. Si ces systèmes sont complexes, la décentralisation de la commande par logique floue s'avère nécessaire car elle permet de diminuer le nombre de règles floues d'une manière considérable.

De plus, plusieurs techniques utilisant la commande par logique floue ont été développées et de nouvelles méthodes de modélisation des systèmes permettant de voir autrement le problème de la commande ont été proposées. La modélisation floue par l'approche de Cao *et al.* en est une [CAO 96], [CAO 97a],[CAO 97b].

Dans cette dernière, le système ayant un grand nombre de variables d'état sera vue de manières approchées dans des régions définies préalablement dans l'espace d'état. En fait, le système sera linéarisé autour d'un ensemble de points (chacun appartenant à une seule région) et la logique floue sera utilisée pour grouper ces différents modèles linéaires par le biais d'un ensemble de fonctions d'appartenances accordées aux régions déjà définies dans l'espace d'état.

Une fois les lois de commandes linéaires, locales aux régions, sont déterminées par les techniques linéaires (LQ, placement de pôles,...), elles seront combinées entre elles par le biais des mêmes fonctions d'appartenance accordées aux mêmes régions.

Pour tester les techniques que nous allons présenter, nous avons opté pour deux types de réseaux électriques dont l'objectif est d'assurer la stabilité transitoire et le réglage de la tension terminale. Vu la structure complexe de ces réseaux électriques, les régulateurs utilisés seront basés sur la décentralisation de la commande.

Dans ce qui suit, nous allons utiliser la technique de Cao *et al.* telle qu'elle est conçue associée à un régulateur PI flou et ensuite nous allons faire un petit astuce pour la modifier afin de se débarrasser de ce PI flou.

La technique sera d'abord présentée pour un système simple ensuite généralisée pour les systèmes complexes (décentralisation) et enfin appliquée sur les deux types de réseaux électriques. Des résultats de simulation et des commentaires seront donnés pour valider la méthode.

III.2. METHODE DE CAO *et al.*

III.2.1. Fonctions d'appartenance en cloche

Définition:[CAO 96]

Les fonctions d'appartenance $\mu_l, l=1, \dots, m$, satisfaisant les conditions suivantes, sont appelées fonctions d'appartenance en cloche. (voir Fig.III.1)

1.

$$0 \leq \mu_l \leq 1 \tag{III.1-a}$$

2.

$$\sum_{l=1}^m \mu_l = 1 \tag{III.1-b}$$

3. pour $\varepsilon_\mu > 0$ suffisamment petit, il existe des domaines D_{1l}, D_{2l} et D_{3l} tels que :

$$\begin{aligned} \mu_l &\geq 1 - \varepsilon_\mu \text{ pour } D_{1l} \\ \varepsilon_\mu &< \mu_l < 1 - \varepsilon_\mu \text{ pour } D_{2l} \\ \mu_l &\leq \varepsilon_\mu \text{ pour } D_{3l} \end{aligned} \tag{III.1-c}$$

Remarques :

1. nous pouvons voir que la fonction μ_l découpe l'espace en trois régions D_{1l}, D_{2l} et D_{3l} telles que :

$$\begin{aligned} D_{il} \cap D_{jl} &= \phi, \quad i \neq j \quad \text{et } i, j = 1, 2, 3 \\ D_{1l} \cup D_{2l} \cup D_{3l} &= E \end{aligned}$$

E étant tout l'espace.

2. l'équation (III.1-c) montre que:

$$\Delta\mu_l < \varepsilon_\mu \tag{III.2}$$

dans le domaine D_{1l} , avec, par définition,

$$\Delta\mu_l = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l}}^m \mu_i \tag{III.3}$$

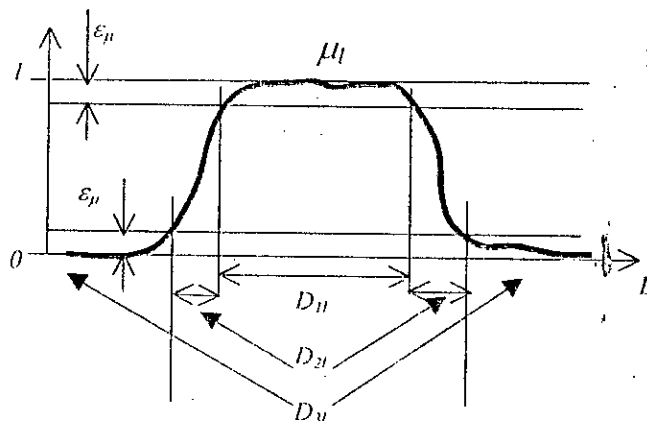


Fig.III.1 Fonction d'appartenance en cloche.

II.2.2. Partitionnement de l'espace d'état

Définition:[CAO 96]

Le partitionnement de l'espace E (voir Fig.III.2) est dit bon s'il satisfait :

1. il existe une région et une seule, D_{i_0} , qui contient $0 \in E$, telle que :

$$\mu_{i_0}(0) = 1 \tag{III.4}$$

2. l'espace E est l'union de toutes les régions, D_l

$$E = \bigcup_{l=1}^m D_l \tag{III.5-a}$$

$$D_l = D_{li} \cup D_l' \tag{III.5-b}$$

$$D_l' = \{v / \mu_i(v) \geq \mu_l(v), \quad i = 1, \dots, m, i \neq l, v \notin D_{li}\} \tag{III.5-c}$$

3. les régions $D_l, l=1, \dots, m$, sont fermées et convexes.

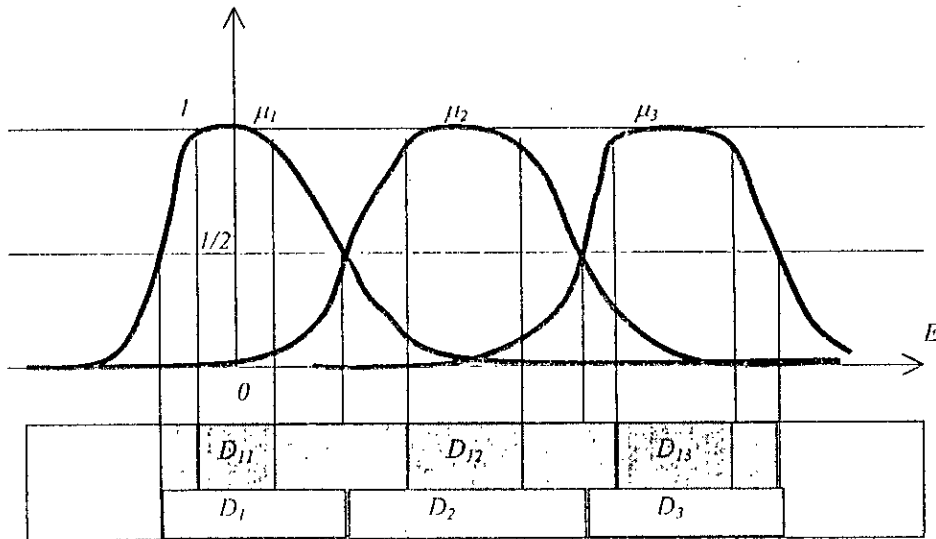


Fig.III.2 Partitionnement de l'espace.

III.2.3. Modèle dynamique flou

Système dynamique non linéaire:

Soit donné le système dynamique suivant :

$$\dot{x} = f(x, u) \tag{III.6}$$

$x \in \mathcal{X}$ et $u \in \mathcal{U}$, et f satisfaisant les hypothèses suivantes :

Hyp1.

$$\exists x_0 = 0 \in \mathcal{X} / f(0,0) = 0, f \in C^2 \tag{III.7-a}$$

Hyp2.

$$\frac{\partial f}{\partial x} \neq 0, \frac{\partial f}{\partial u} \neq 0, \forall x \in \mathcal{X}, \forall u \in \mathcal{U} \tag{III.7-b}$$

Système dynamique flou:

Soit l'ensemble de règles floues :

$$R^l : \text{SI } (x_1 \text{ est } X_1^l) \text{ ET } \dots \text{ ET } (x_n \text{ est } X_n^l) \text{ ALORS} \\ \dot{x} = A_l x + B_l u + C_l \quad (III.8) \\ l=1, \dots, m.$$

$X_j^l, j=1, \dots, n$ et $l=1, \dots, m$: sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance μ_j^l .

Définissons $\mu_l, l=1, \dots, m$ comme suit :

$$\mu_l = \prod_{j=1}^n \mu_j^l \quad (III.9)$$

et formons le vecteur μ :

$$\mu = [\mu_1 \quad \dots \quad \mu_m]^T \quad (III.10)$$

En utilisant le produit pour l'inférence et le centre des moyennes pour la défuzzification, nous obtenons :

$$\dot{x} = A(\mu)x + B(\mu)u + C(\mu) \quad (III.11)$$

avec:

$$A(\mu) = \sum_{l=1}^m \mu_l A_l \\ B(\mu) = \sum_{l=1}^m \mu_l B_l \\ C(\mu) = \sum_{l=1}^m \mu_l C_l \quad (III.12)$$

Le modèle (III.11) est appelé modèle flou dynamique alors que le modèle (A_l, B_l, C_l) est appelé *lème* modèle local dans la région R_l associée à la règle floue R^l .

III.2.4. Approximation d'un système non linéaire par un système flou

- **Système simple**

Théorème: [Cao 96]

Pour tout système dynamique non linéaire avec f , vérifiant les hypothèses hyp1 et hyp2 précédentes, donnée sur le compact $X \times U \subset \mathcal{R}^n \times \mathcal{R}^p$, et pour $\varepsilon > 0$ arbitraire, il existe une fonction \hat{f} telle que

$$\hat{f}(x, u) = A(\mu)x + B(\mu)u + C(\mu) \quad (III.13)$$

avec

$$\begin{aligned} A(\mu) &= \sum_{l=1}^m \mu_l A_l \\ B(\mu) &= \sum_{l=1}^m \mu_l B_l \\ C(\mu) &= \sum_{l=1}^m \mu_l C_l \end{aligned} \tag{III.14}$$

assurant la condition

$$d_\infty(f(x,u) - \hat{f}(x,u)) = \sup_{x \in X, u \in U} \|f(x,u) - \hat{f}(x,u)\| < \varepsilon \tag{III.15}$$

Preuve: [Cao 96]

D'abord, définissons la distance suivante:

$$d_\infty(f(x,u) - \hat{f}(x,u)) = \sup_{x \in X, u \in U} \|f(x,u) - \hat{f}(x,u)\| \tag{III.16}$$

Etant donné le système dynamique

$$\dot{x} = f(x,u) \tag{III.17}$$

où f est de la classe C^2 par rapport à x et à u .

Soit f_l le développement de première ordre de f en série de Taylor dans la région R_l autour du point \bar{x}_l .

Nous aurons donc

$$f_l(x,u) = A_l x + B_l u + C_l \tag{III.18}$$

Nous allons montrer que $f(x,u)$ peut être approchée par

$$\hat{f}(x,u) = \sum_{l=1}^m \mu_l f_l(x,u) \tag{III.19}$$

avec μ_l , des fonctions d'appartenance en cloche.

Dè (III.1-b), (III.11), (III.12), (III.13) et (III.18), nous pouvons écrire

$$f(x,u) - \hat{f}(x,u) = \sum_{l=1}^m \mu_l(x) (f(x,u) - f_l(x,u)) \tag{III.20}$$

Du théorème de Taylor, nous déduisons

$$\begin{aligned} \|f(x,u) - f_l(x,u)\| &\leq \frac{\bar{\lambda}_l}{2} \|x - \bar{x}_l\|^2 \quad x, \bar{x}_l \in R_l \\ l &= 1, \dots, m \end{aligned} \tag{III.21}$$

Par un choix du nombre entier m et des points $\bar{x}_l, l=1, \dots, m$, nous pouvons avoir

$$\|x - \bar{x}_l\|^2 \leq \frac{1}{M_1} \cdot \varepsilon \quad (III.22)$$

$$l=1, \dots, m$$

Puisque f et f_l sont continues sur le compact $X \times U$, elles seront bornées. Nous pouvons donc avoir

$$\sup_{x \in X, u \in U} \|f_l(x, u)\| \leq \bar{M}_2, \quad l=1, \dots, m \quad (III.23)$$

$$\sup_{x \in X, u \in U} \|f(x, u)\| \leq \bar{M}_2$$

De (II.13-c) et (III.23), nous tirons

$$\sum_{l=1, l \neq i}^m d_\infty(f(x, u) - f_l(x, u)) \cdot \mu_l(x) \leq 2\bar{M}_2(1 - \mu_i(x)) \leq 2\bar{M}_2 \varepsilon_\mu \leq \frac{\varepsilon}{2} \quad (III.24)$$

De (III.20), (III.21), (III.22) et (III.24) nous déduisons

$$d_\infty(f(x, u) - \hat{f}(x, u)) \leq \varepsilon \quad (III.25)$$

Régulateur flou multi-modèle associé:

Le régulateur flou multi-modèle associé à un modèle dynamique flou est une combinaison de tous les régulateurs linéaires obtenus dans les régions locales choisies dans l'espace d'état. Ces régulateurs peuvent être déterminés par n'importe quelle méthode linéaire, mais on préfère les méthodes linéaires robustes comme par exemple la technique LQ qui assure une marge de phase supérieure à 60° et une marge de gain allant jusqu'à l'infini. La combinaison de ces régulateurs linéaires est faite par le biais des fonctions d'appartenance associées aux régions déjà choisies dans l'espace d'état.

Ce régulateur flou multi-modèle est décrit par l'équation suivante

$$u = K(\mu)x = \left[\sum_{l=1}^m \mu_l K_l \right] \cdot x \quad (III.26)$$

avec $K_l, l=1, \dots, m$ les gains de retour d'état calculés pour les modèles linéaires locaux dans les régions $R_l, l=1, \dots, m$. Il est de type de Sugeno, et pour qu'il soit capable à stabiliser le système il doit remplir quelques conditions (voir l'annexe A.4).

- **Système complexe**

Dans ce qui suit, nous allons généraliser pour le cas décentralisé.

Etant donné le système dynamique

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (III.27)$$

où f est de la classe C^2 par rapport à x et à u .

Supposons qu'on peut décomposer ce système en r sous-systèmes interconnectés, nous aurons donc $x^T = [x_1^T \dots x_r^T]$, $u^T = [u_1^T \dots u_r^T]$ et $f^T = [f_1^T \dots f_r^T]$.

Le i ème sous-système sera donné par:

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, u_i, X_i) \quad (III.28)$$

avec $X_i^T = [x_1^T \dots x_{i-1}^T \ x_{i+1}^T \dots x_r^T]$ et $i=1, \dots, r$.

Soit f_{il} le développement de première ordre de f_i en série de Taylor dans la région R_{il} autour du point \bar{x}_{il} avec $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$.

Nous aurons donc

$$f_i(x_i, u_i, X_i) = A_{il}x_i + B_{il}u_i + C_{il} \quad (III.29)$$

avec tous les X_i , $i=1, \dots, r$ ramenés dans les C_{il} , $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$.

Nous allons montrer que $f_i(x_i, u_i, X_i)$, $i=1, \dots, r$ peuvent être approchées par

$$\hat{f}_i(x_i, u_i, X_i) = \sum_{l=1}^{m_i} \mu_{il} f_{il}(x_i, u_i, X_i) \quad (III.30)$$

avec μ_{il} , $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$ des fonctions d'appartenance en cloche.

Utilisant le fait que toutes les interconnexions sont ramenées aux termes C_{il} , $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$, nous constatons que les termes X_i , $i=1, \dots, r$ apparaissent comme des paramètres auxiliaires ce qui nous facilite la démonstration qui sera d'ailleurs la même que pour le cas d'un système simple. En fait, de (III.1-b), (III.28), (III.29) et (III.30) nous pouvons écrire

$$f_i(x_i, u_i, X_i) - \hat{f}_i(x_i, u_i, X_i) = \sum_{l=1}^{m_i} \mu_{il}(x_i) (f_i(x_i, u_i, X_i) - f_{il}(x_i, u_i, X_i)) \quad (III.31)$$

Du théorème de Taylor, nous déduisons

$$\|f_i(x_i, u_i, X_i) - f_{il}(x_i, u_i, X_i)\| \leq \frac{\bar{M}_{il}}{2} \cdot \|x_i - \bar{x}_{il}\|^2 \quad x_i, \bar{x}_{il} \in R_{il} \quad (III.32)$$

$i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$

Par un choix du nombre entier m_i et des points \bar{x}_{il} , $i=1, \dots, r$, et $l=1, \dots, m_i$, nous pouvons avoir

$$\|x_i - \bar{x}_{il}\|^2 \leq \frac{1}{M_{il}} \cdot \varepsilon \quad (III.33)$$

$i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$

Puisque f_i et f_{il} sont continues sur le compact $X \times U$, elles seront bornées. Nous pouvons donc avoir

$$\begin{aligned} \sup_{x \in X, u \in U} \|f_{il}(x_i, u_i, X_i)\| &\leq \bar{M}_{i2}, \quad l = 1, \dots, m_i \\ \sup_{x \in X, u \in U} \|f_i(x_i, u_i, X_i)\| &\leq \bar{M}_{i2} \end{aligned} \quad (\text{III.34})$$

De (III.1-c) et (III.34), nous tirons

$$\sum_{k=1, k \neq l}^{m_i} d_\infty(f_i(x_i, u_i, X_i) - f_{ik}(x_i, u_i, X_i)) \cdot \mu_{il}(x_i) \leq 2\bar{M}_{i2}(1 - \mu_{il}(x_i)) \leq 2\bar{M}_{i2}\varepsilon_\mu \leq \frac{\varepsilon}{2} \quad (\text{III.35})$$

De (III.31), (III.32), (III.33) et (III.35) nous déduisons

$$d_\infty(f_i(x_i, u_i, X_i) - \hat{f}_i(x_i, u_i, X_i)) \leq \varepsilon \quad (\text{III.36})$$

Régulateur flou multi-modèle associé:

Comme dans le cas d'un système simple (i.e. centralisé), le régulateur flou multi-modèle associé au modèle dynamique flou est donné par

$$u_i = K_i(\mu_i)x_i = \left[\sum_{l=1}^{m_i} \mu_{il}(x_i) K_{il} \right] \cdot x_i \quad (\text{III.37})$$

avec K_{il} , $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$ les gains de retour d'état calculés pour les modèles linéaires locaux dans les régions R_{il} , $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$.

III.3. APPLICATION ET SIMULATION

III.3.1. Première approche

Les variables d'état utilisées pour le modèle dynamique flou du sous-système i , $i=1, \dots, r$ (i.e. le générateur G_i , $i=1, \dots, r$) et pour son régulateur flou associé sont l'erreur $\Delta w_i = w_i - w_{i0}$, et l'erreur $\Delta E_{qi}' = E_{qi}' - E_{qi0}'$. De plus, l'erreur $\Delta V_i = V_{ii} - V_{ci}$ et son accroissement $c\Delta V_i$ seront utilisés pour un PI flou assurant l'annulation de ΔV_i . Il faut, donc, trouver les équations d'état en ces variables à partir de celles données au chapitre I.

Dans cette approche nous allons utiliser un régulateur flou multi-modèle pour assurer le réglage de la fréquence (donc de la vitesse) et puisque ce régulateur n'assure pas le réglage de la tension terminale (existence de l'erreur statique) nous ferons recours au PI flou.

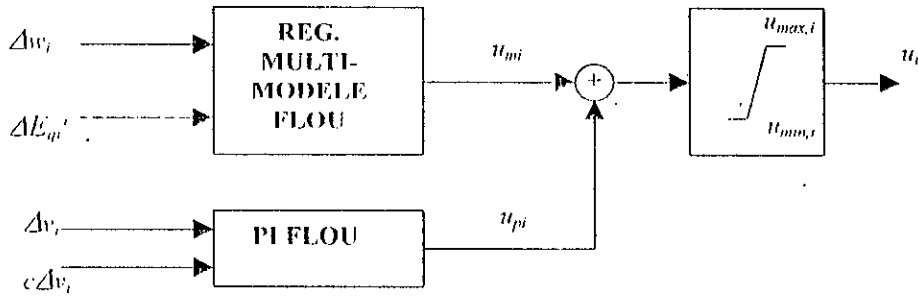


Fig.III.3 Schéma du régulateur flou pour le sous-système i (première approche).

III.3.1.1. Application

A partir du modèle non linéaire du générateur G_n , $i=1, \dots, r$, nous construisons le modèle suivant

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta \dot{w}_i &= -\frac{D_i}{2H_i} \cdot \Delta w_i - \frac{w_0}{2H_i} \cdot G_n \cdot \Delta E'_{qi} - \frac{w_0}{2H_i} \cdot (G_n \cdot E'_{qi0} + \eta_{li}) \cdot \Delta E'_{qi} \\ \Delta \dot{E}'_{qi} &= -\frac{J}{T'_{doi}} \cdot (1 - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_n) \cdot \Delta E'_{qi} + \frac{k_{ci}}{T'_{doi}} \cdot u_i - \\ &\quad - \frac{J}{T'_{doi}} \cdot (1 - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_n) \cdot E'_{qi0} - \frac{(x_{di} - x'_{di})}{T'_{doi}} \cdot \eta_{2i} \end{aligned} \right. \quad (III.38)$$

Les termes η_{li} et η_{2i} sont liés aux interconnexions. Aussi, nous pouvons constater que la non linéarité est liée à la variable $\Delta E'_{qi}$, ce qui nous conduit à considérer les régions R_{il} autour des points $\Delta \bar{E}'_{qi}$ et de fonctions d'appartenance μ_{il} , $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m$.

L'application de la méthode de Cao *et al.* conduit au modèle linéaire local dans la région R_{il} :

$$A_{il} = \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{2H_i} & -\frac{w_0}{2H_i} \cdot (2 \cdot G_n \cdot \Delta \bar{E}'_{qi} + G_n \cdot E'_{qi0} + \eta_{li}) \\ 0 & -\frac{J}{T'_{doi}} \cdot (1 - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_n) \end{bmatrix} \quad (III.39)$$

$$B_{il} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_{ci}}{T'_{doi}} \end{bmatrix}$$

et le modèle dynamique flou du sous système $i, i=1, \dots, r$ sera

Si $\Delta E'_{qi}$ est dans R_{il} Alors

$$\dot{x}_i = f_{il}(x_i, u_i) = A_{il}x_i + B_{il}u_i + C_{il} \quad (III.40)$$

où $C_{il}, i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m$, représentent les termes indépendants de x_i [$\Delta w_i \Delta E'_{qi}$].

III.3.1.2. Synthèse du régulateur flou

Le régulateur flou associé à ce modèle dynamique flou est donné par

Si $\Delta E'_{qi}$ est dans R_{il} Alors

$$u_{il} = K_{il} \cdot x_i \quad (III.41)$$

$i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m$.

et la commande appliquée sera

$$u_{mi} = \sum_{l=1}^m \mu_{il} u_{il} = \left[\sum_{l=1}^m \mu_{il} K_{il} \right] \cdot x_i = K_i(\mu_i) x_i \quad (III.42)$$

$i=1, \dots, r$

avec $K_{il}, i=1, \dots, r, l=1, \dots, m$ les gains de retour calculés par la technique LQ [CAO 97] pour les modèles linéaires locaux des sous-systèmes $G_{il}, i=1, \dots, r$, dans les régions $R_{il}, i=1, \dots, r, l=1, \dots, m$.

A. Réseau électrique à 2 machines

A cause de la valeur nulle de $G_{ii}, i=1, 2$ les régulateurs linéaires locaux aux régions sont identiques.

- **Régulateur de la machine G_1**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{11} Alors $u_{11} = -9.3944 \Delta w_1 + 38.6547 \Delta E'_{q1}$

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{12} Alors $u_{12} = -9.3944 \Delta w_1 + 38.6547 \Delta E'_{q1}$

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{13} Alors $u_{13} = -9.3944 \Delta w_1 + 38.6547 \Delta E'_{q1}$

Avec R_{11}, R_{12} et R_{13} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{11}, μ_{12} et μ_{13} sont gaussiennes de centres $-0.2, 0.0, +0.2$ respectivement et de variance 0.05 .

Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R_i=1$ et

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$$

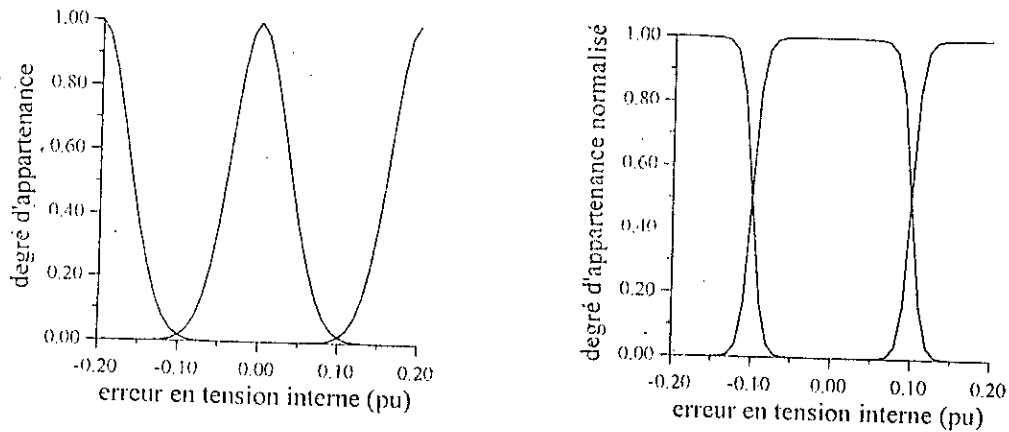


Fig. III.4 Fonctions d'appartenance du premier régulateur multi-modèle flou.

Le régulateur PI flou est donné par les règles:

| $\Delta V_1 \setminus c\Delta V_1$ | N | Z | P |
|------------------------------------|-------|-------|------|
| N | -0.06 | -0.05 | 0.00 |
| Z | -0.05 | 0.00 | 0.05 |
| P | 0.00 | 0.05 | 0.06 |

Avec N , Z et P sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1 , 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59 .

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.01$ et $g_2=0.001$ pour ΔV_1 et $c\Delta V_1$ respectivement.

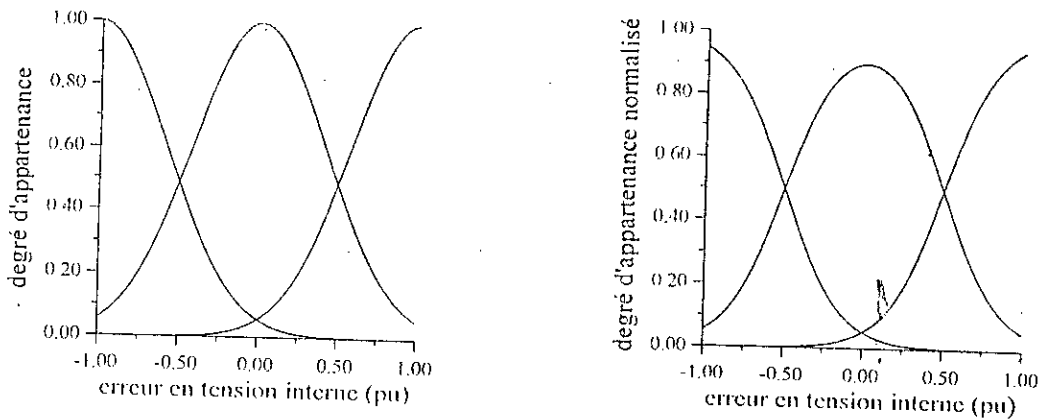


Fig. III.5 Fonctions d'appartenance du régulateur PI flou.

• **Régulateur de la machine G_2**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{21} Alors $u_{21} = -9.7887 \Delta w_2 + 22.0878 \Delta E'_{q2}$

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{22} Alors $u_{22} = -9.7887 \Delta w_2 + 22.0878 \Delta E'_{q2}$

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{23} Alors $u_{23} = -9.7887 \Delta w_2 + 22.0878 \Delta E'_{q2}$

Avec R_{21} , R_{22} et R_{23} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{21} , μ_{22} et μ_{23} sont gaussiennes de centres -0.2 , 0.0 , $+0.2$ respectivement et de variance 0.07 .

Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=1$

et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

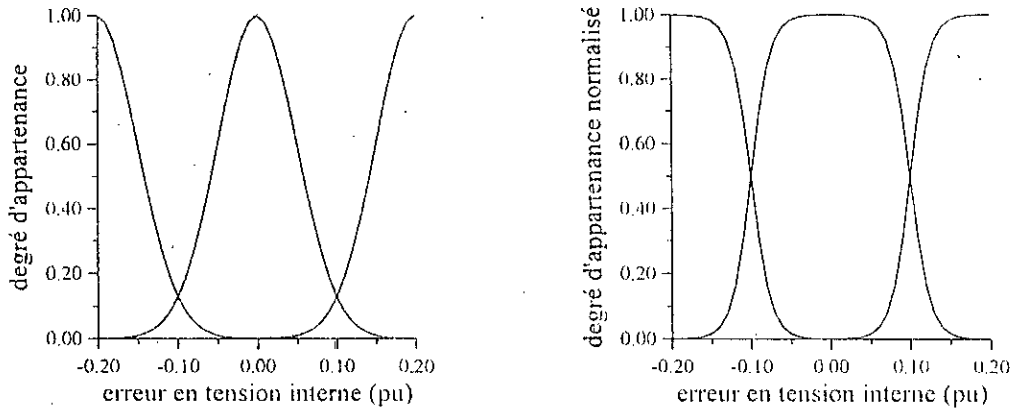


Fig. III.6 Fonctions d'appartenance du deuxième régulateur multi-modèle flou.

Le régulateur PI flou est donné par les règles

| $\Delta V_2 \backslash c\Delta V_2$ | N | Z | P |
|-------------------------------------|---------|--------|--------|
| N | -0.12 | -0.1 | 0.00 |
| Z | -0.1 | 0.00 | 0.1 |
| P | 0.00 | 0.1 | 0.12 |

Avec N , Z et P sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1 , 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59 .

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.01$ et $g_2=0.001$ pour ΔV_2 et $c\Delta V_2$ respectivement.

B. Réseau électrique à 3 machines

• Régulateur de la machine G_1

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{11} Alors $u_{11} = -1.0000 \Delta w_1 + 5.3574 \Delta E'_{q1}$

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{12} Alors $u_{12} = -3.1623 \Delta w_1 + 10.2952 \Delta E'_{q1}$

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{13} Alors $u_{13} = -1.0000 \Delta w_1 + 5.7067 \Delta E'_{q1}$

avec R_{11} , R_{12} et R_{13} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{11} , μ_{12} et μ_{13} sont gaussiennes de centres -0.2 , 0.0 , $+0.2$ respectivement et de variance 0.05 . Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10$, 1 et 10 pour les tris règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

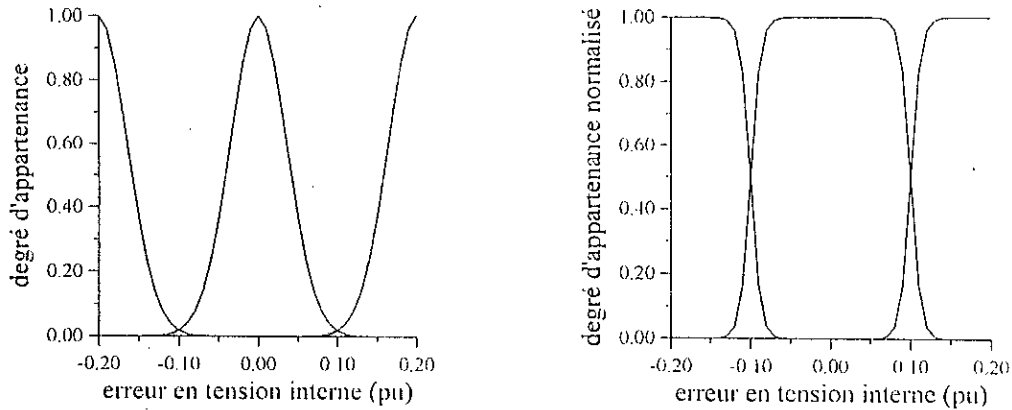


Fig. III.7 Fonctions d'appartenance du premier régulateur multi-modèle flou.

Le régulateur PI flou est donné par les règles

| $\Delta V_1 \backslash c\Delta V_1$ | N | Z | P |
|-------------------------------------|----------|----------|---------|
| N | -0.030 | -0.025 | 0.00 |
| Z | -0.025 | 0.00 | 0.025 |
| P | 0.00 | 0.025 | 0.030 |

avec N , Z et P sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1 , 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59 .

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.01$ et $g_2=0.001$ pour ΔV_1 et $c\Delta V_1$ respectivement.

• **Régulateur de la machine G_2**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{21} Alors $u_{21} = -3.1621 \Delta w_2 + 11.0548 \Delta E'_{q2}$

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{22} Alors $u_{22} = -10.0000 \Delta w_2 + 20.4412 \Delta E'_{q2}$

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{23} Alors $u_{23} = -3.1623 \Delta w_2 + 11.6515 \Delta E'_{q2}$

avec R_{21} , R_{22} et R_{23} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{21} , μ_{22} et μ_{23} sont gaussiennes de centres -0.2 , 0.0 , $+0.2$ respectivement et de variance 0.1 . Les gains de retour d'état sont calculés par la technique L.Q en prenant $R=10$, 1 et 10 pour les trois règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

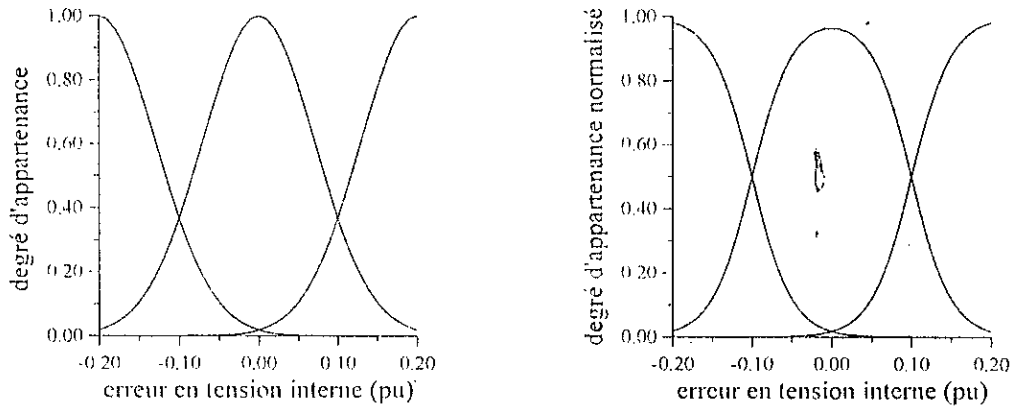


Fig. III.8 Fonctions d'appartenance du deuxième régulateur multi-modèle flou.

Le régulateur PI flou est donné par les règles

| $\Delta V_2 \setminus c\Delta V_2$ | N | Z | P |
|------------------------------------|----------|----------|---------|
| N | -0.030 | -0.025 | 0.00 |
| Z | -0.025 | 0.00 | 0.025 |
| P | 0.00 | 0.025 | 0.030 |

avec N , Z et P sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1 , 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59 .

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.1$ et $g_2=0.01$ pour ΔV_2 et $c\Delta V_2$ respectivement.

- **Régulateur de la machine G_3**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes

Si $\Delta E'_{q3}$ est dans R_{31} Alors $u_{31} = -3.1621 \Delta w_3 + 9.6822 \Delta E'_{q3}$

Si $\Delta E'_{q3}$ est dans R_{32} Alors $u_{32} = -10.0000 \Delta w_3 + 18.2837 \Delta E'_{q3}$

Si $\Delta E'_{q3}$ est dans R_{33} Alors $u_{33} = -3.1623 \Delta w_3 + 10.5382 \Delta E'_{q3}$

avec R_{31} , R_{32} et R_{33} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{31} , μ_{32} et μ_{33} sont gaussiennes de centres -0.2 , 0.0 , $+0.2$ respectivement et de variance 0.1 . Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10$, 1 et 10 pour les trois règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

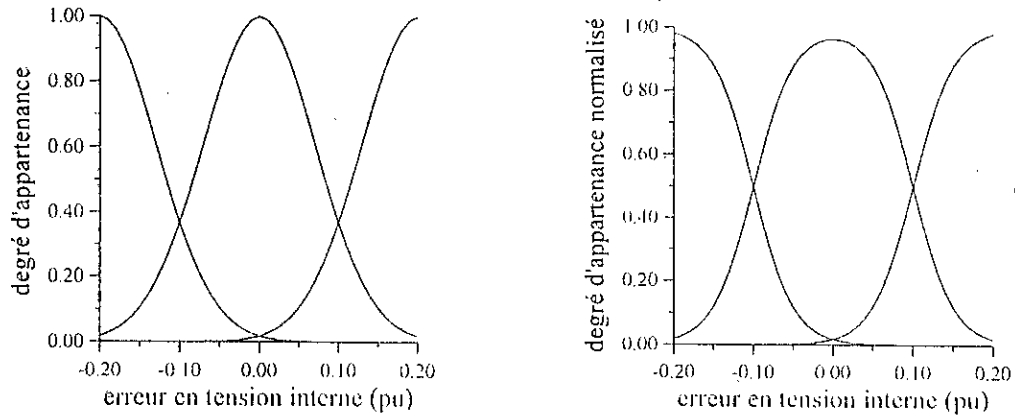


Fig. III.9 Fonctions d'appartenance du troisième régulateur multi-modèle flou.

Le régulateur PI flou est donné par les règles

| $\Delta V_3 \setminus c\Delta V_3$ | N | Z | P |
|------------------------------------|----------|----------|---------|
| N | -0.030 | -0.025 | 0.00 |
| Z | -0.025 | 0.00 | 0.025 |
| P | 0.00 | 0.025 | 0.030 |

avec N , Z et P sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1 , 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59 .

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.01$ et $g_2=0.001$ pour ΔV_3 et $c\Delta V_3$ respectivement.

III.3.1.3. Résultats de simulation

Pour tester les régulateurs synthétisés, nous avons effectué les mêmes tests sur les deux réseaux électriques. Le premier consiste en l'application d'un court-circuit triphasé de durée 0.1 sec sur la ligne qui lie le générateur G1 au générateur G2 à une distance de G1 égale à 20% de la longueur de cette ligne. Le deuxième test est un accroissement de 20% de la puissance mécanique appliquée au générateur G1. ces deux tests sont appliqués à partir de l'instant $t=0.1$ sec.

Les résultats de simulation présentés par les figures (III.10)-(III.13) montrent que le réglage de la tension terminale est obtenu ainsi que la stabilité transitoire est assurée. Comme nous pouvons le voir la perturbation est rejetée au bout de 1 à 2 sec, mais la présence du PI flou qui est mal synthétisé induit des oscillations qu'il faut réduire.

Le test de la décentralisation de la commande est réalisé par un court-circuit au niveau d'une station de commande locale ce qui donne une commande nulle. La simulation (Fig.III.14)-(Fig.III.16) montre que malgré la défaillance d'une station de commande locale le système se stabilise au bout de 20 secondes assurant une bonne fréquence mais les tensions terminales sont un peu affectées par ce test. Ceci est à cause de la forte interconnexions entre les sous-systèmes qui permet aux stations de commande non défaillantes de participer à la stabilisation du sous-système dont la station de commande est défaillante.

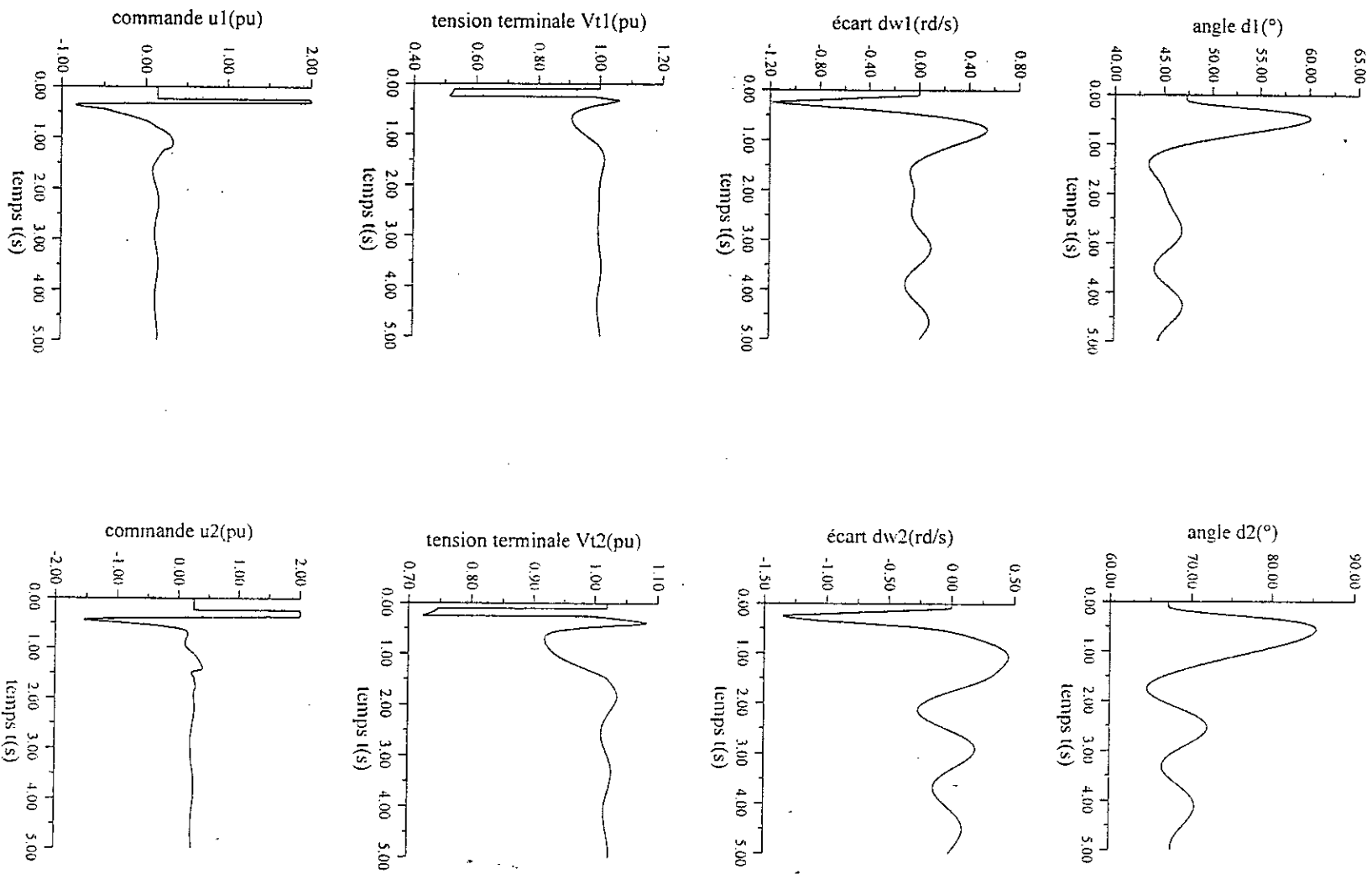


Fig. III.10 Réseau électrique à 2 machines avec un court-circuit triphasé (première approche).

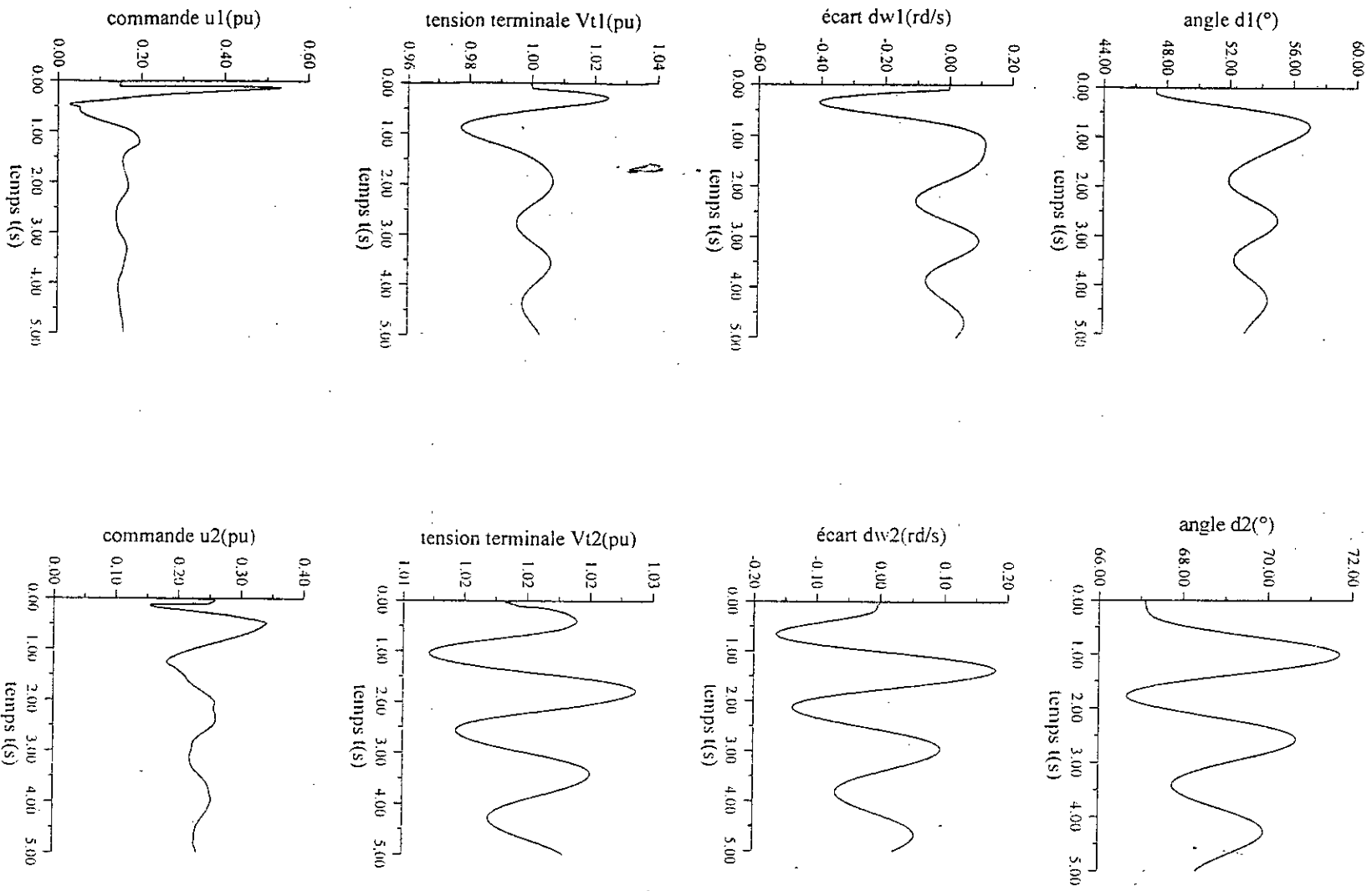


Fig.III.11 Réseau électrique à 2 machines avec un accroissement de 20% de la puissance mécanique (première approche).

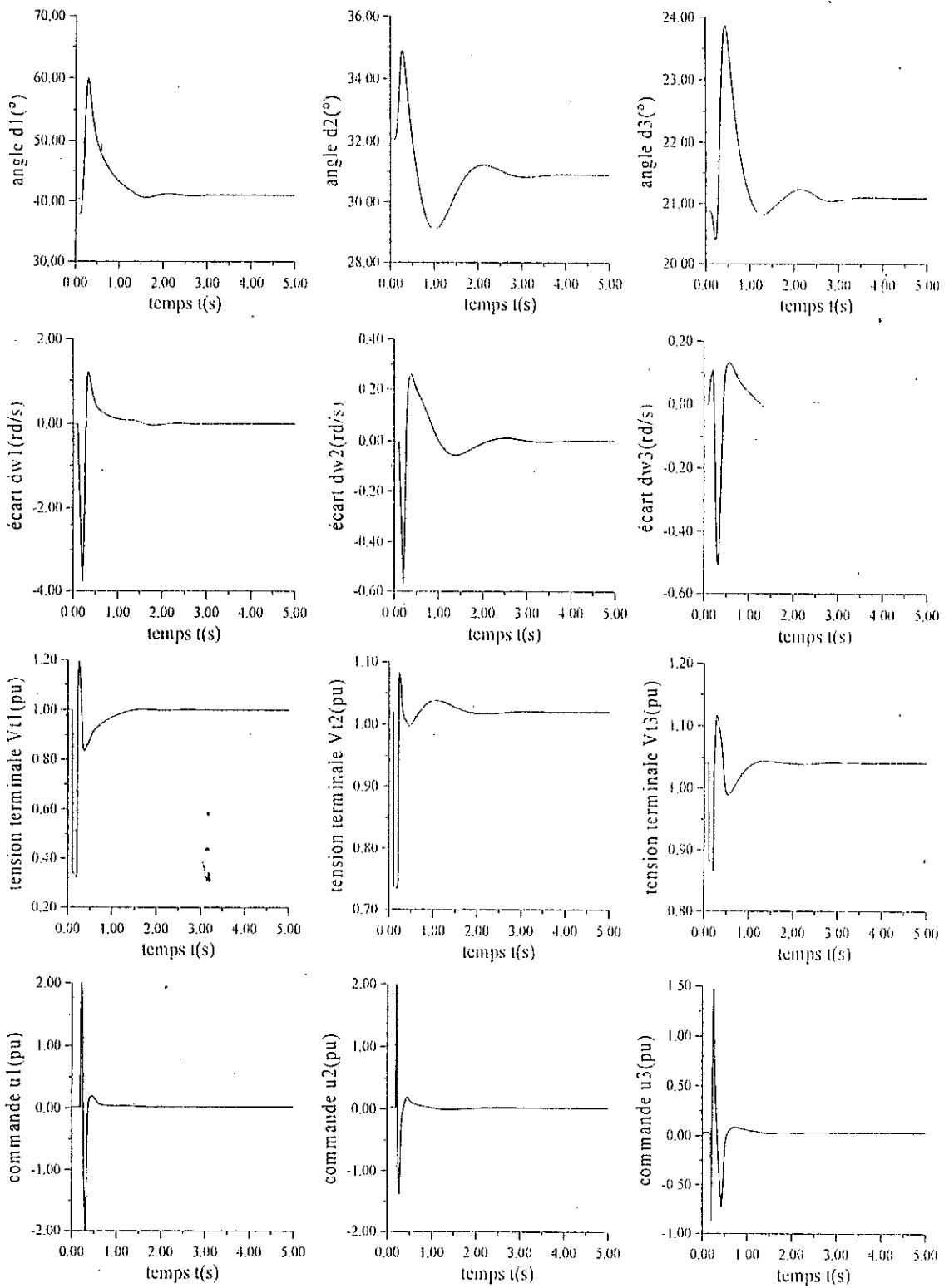


Fig.III.12 Réseau électrique à 3 machines avec un court-circuit triphasé (première approche).

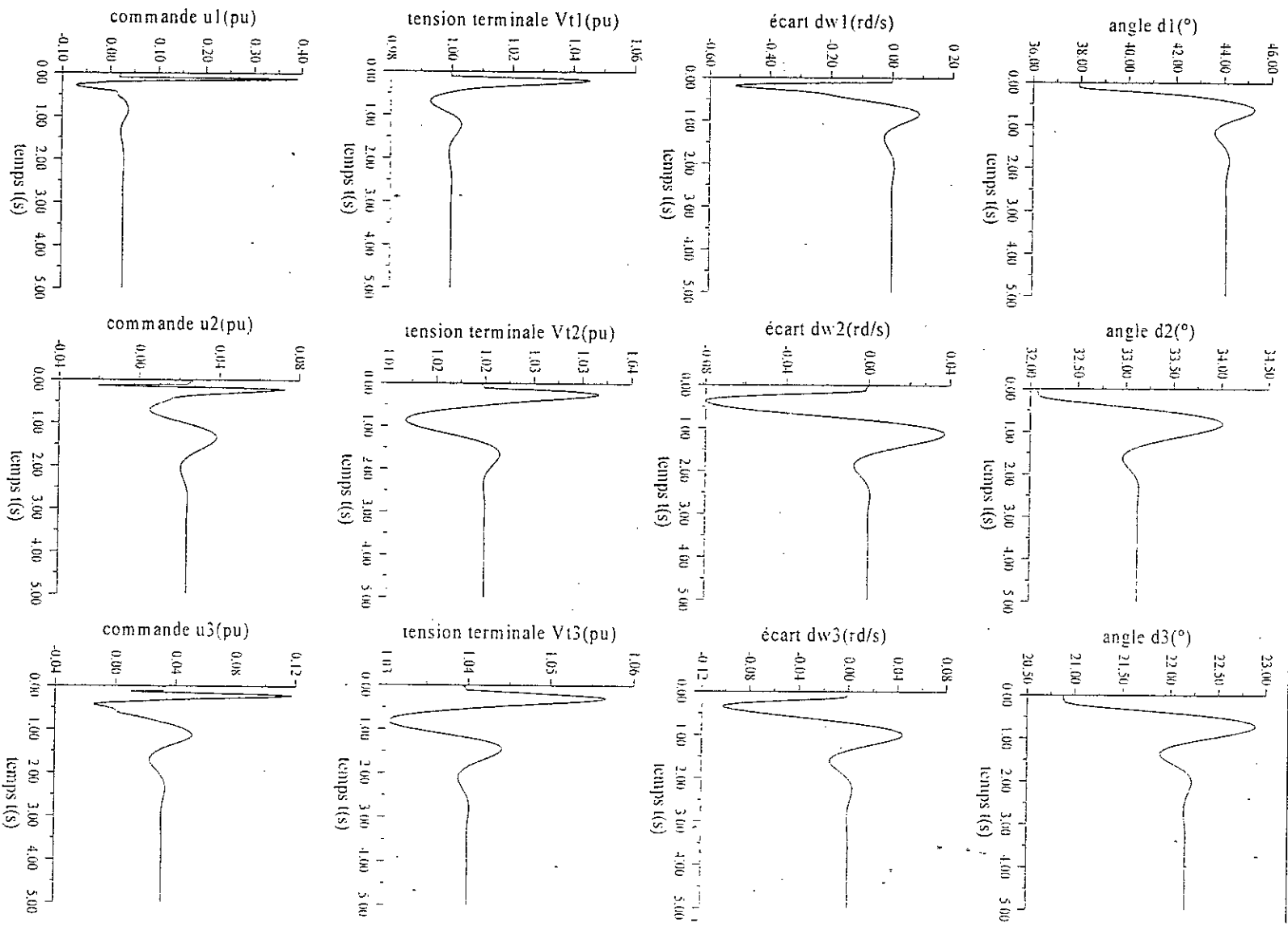


Fig.III.13 Réseau électrique à 3 machines avec un accroissement de 20% de la puissance mécanique (première approche).

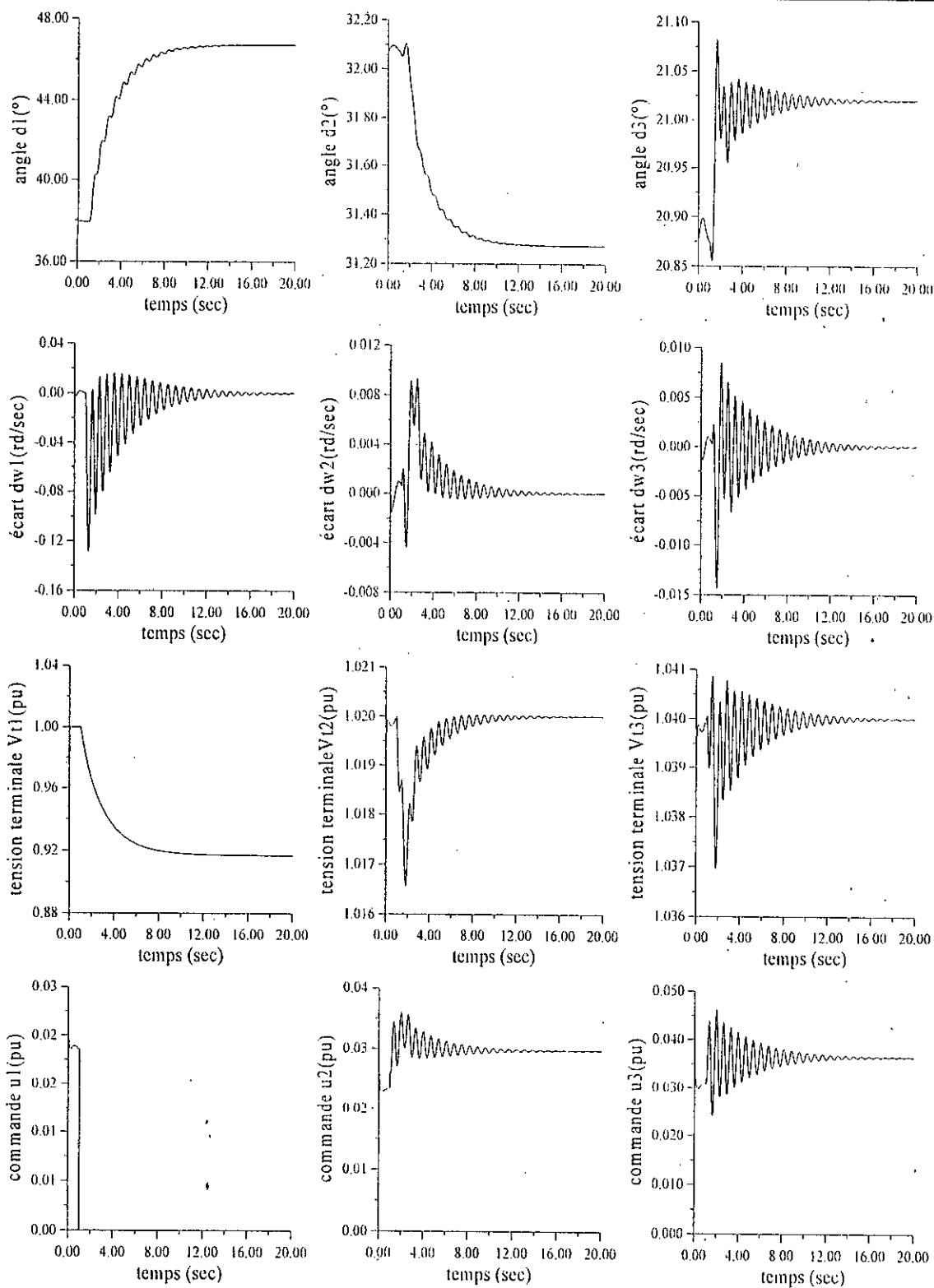


Fig. III.14 Réseau électrique à 3 machines, Test de défaillance de la commande du premier sous-système.

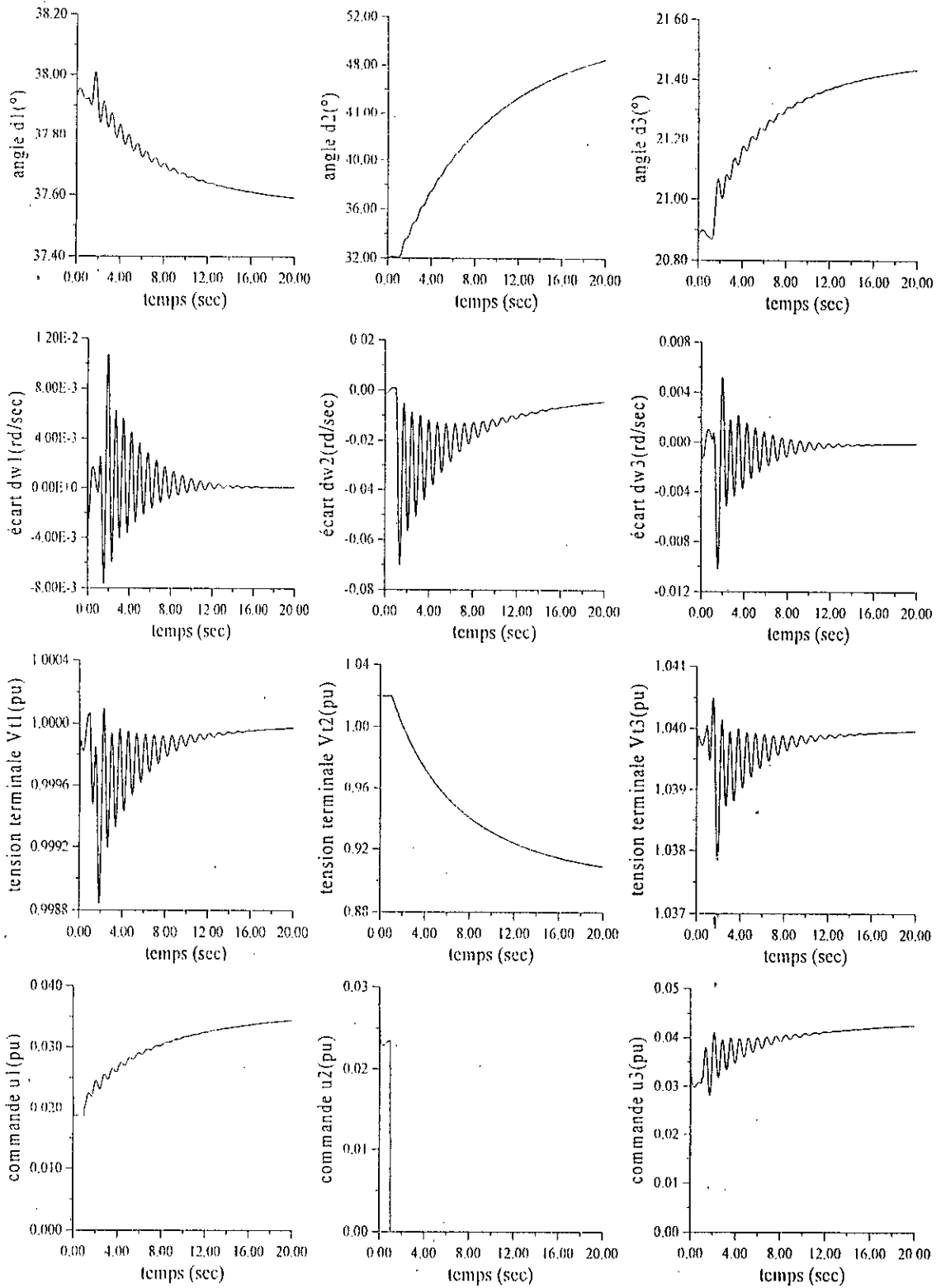


Fig. III.15 Réseau électrique à 3 machines, l'est de défaillance de la commande du deuxième sous-système.

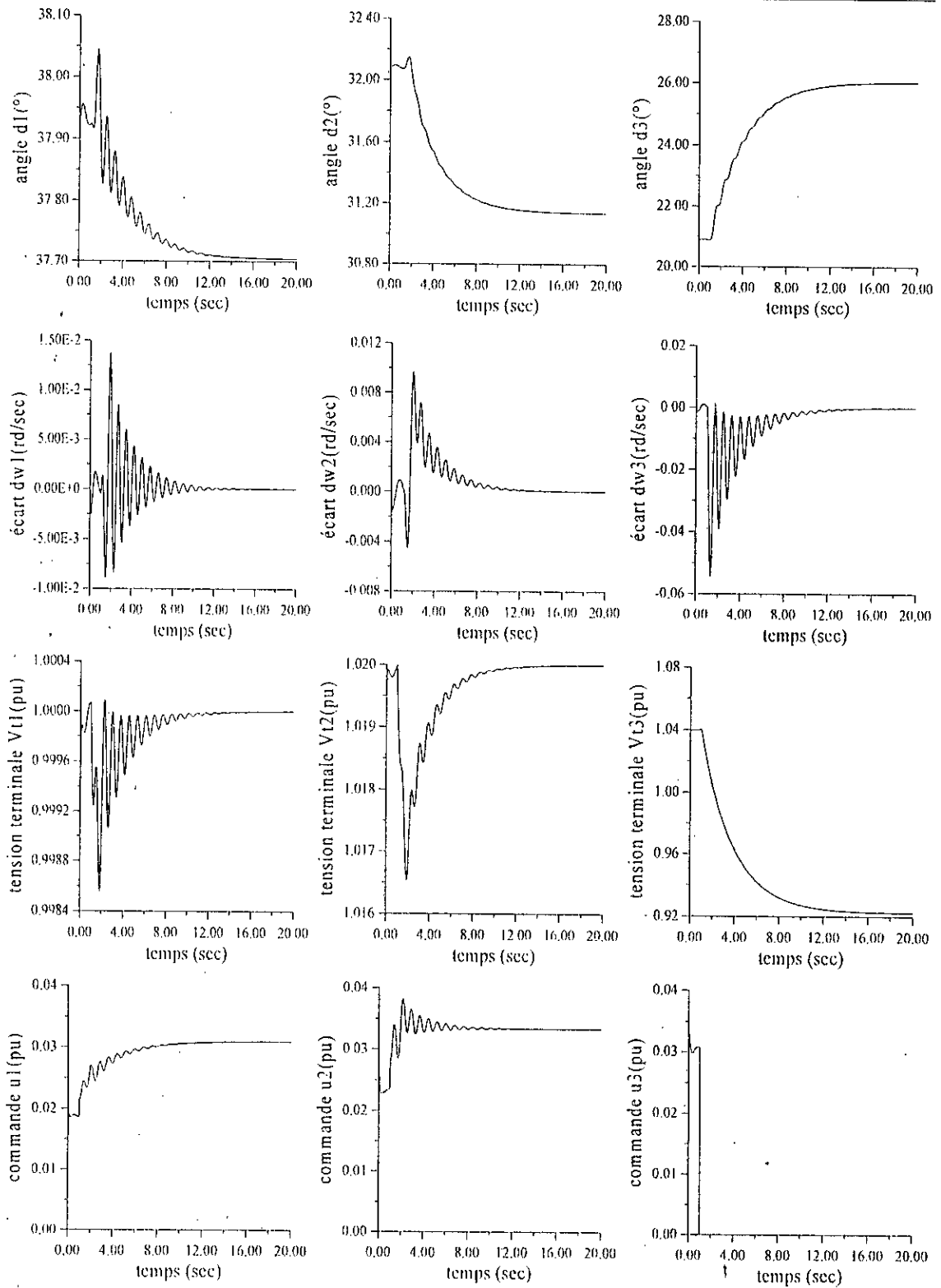


Fig. III.16 Réseau électrique à 3 machines, Test de défaillance de la commande du troisième sous-système.

III.3.2. Deuxième approche

Les variables d'état utilisées pour le modèle dynamique flou et son régulateur flou associé sont l'erreur $\Delta w_i = w_i - w_{0i}$, $\Delta E'_{qi} = E'_{qi} - E'_{qi0}$ et l'erreur $\Delta V_i = V_i - V_{ci}$, $i=1, \dots, r$, donc il faut avoir un modèle d'état en fonction de ces variables. L'objectif de cette approche est d'éliminer le régulateur PI flou et de garder le régulateur flou multi-modèle dont les prémisses des règles floues seront en fonction de la variable $\Delta E'_{qi}$ et leurs conséquences en fonction des variables Δw_i et ΔV_i qui servent pour le retour d'état.

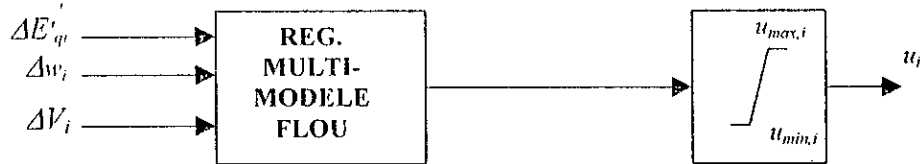


Fig.III.17 Schéma du régulateur flou pour le sous-système i (Deuxième approche).

III.3.2.1. Application

Nous allons tout d'abord tirer le modèle non linéaire correspondant à cette approche, nous avons

$$V_{ci} = \sqrt{(E'_{qi} - x'_{di} I_{di})^2 + (x'_{di} I_{qi})^2} \quad (\text{III.43})$$

et en supposant les interconnexions constantes, et par la linéarisation autour de $\Delta \bar{E}'_{qi}$,

nous aurons

$$\Delta V'_i \approx \frac{[(I + B_{ii} \cdot x'_{di})^2 + (x'_{di} \cdot G_{ii})^2] \cdot \Delta \bar{E}'_{qi} + \eta_i}{V_{ci}} \cdot \Delta \bar{E}'_{qi} \quad (\text{III.44-a})$$

$$\Delta V_i \approx \frac{[(I + B_{ii} \cdot x'_{di})^2 + (x'_{di} \cdot G_{ii})^2] \cdot \Delta \bar{E}'_{qi} + \eta_i}{V_{ci}} \cdot \Delta E'_{qi} + \gamma_i \quad (\text{III.44-b})$$

et le modèle correspondant sera le suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \dot{w}_i = -\frac{D_i}{2H_i} \cdot \Delta w_i - \frac{w_{0i}}{2H_i} \cdot G_{ii} \cdot \Delta E'_{qi} - \frac{w_{0i}}{2H_i} \cdot (G_{ii} \cdot E'_{qi0} + \eta_{ii}) \cdot \Delta E'_{qi} \\ \Delta \dot{V}_i = -\frac{1}{T'_{doi}} \cdot (I - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_{ii}) \cdot \Delta V_i + \\ \quad + \frac{k_{ci}}{T'_{doi}} \cdot \frac{[(I + B_{ii} x'_{di})^2 + (x'_{di} G_{ii})^2] \cdot \Delta \bar{E}'_{qi} + \eta_i}{V_{ci}} \cdot u_i - \\ \quad - \frac{k_{ci}}{T'_{doi}} \cdot \frac{[(I + B_{ii} x'_{di})^2 + (x'_{di} G_{ii})^2] \cdot \Delta \bar{E}'_{qi} + \eta_i}{V_{ci}} \\ \quad - \left((I - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_{ii}) \cdot E'_{qi0} - \frac{(x_{di} - x'_{di}) \cdot \eta_{2i}}{T'_{doi}} \right) - \\ \quad - \frac{1}{T'_{doi}} \cdot (I - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_{ii}) \cdot \gamma_i \end{array} \right. \quad (\text{III.45})$$

La première équation est non linéaire et doit être linéarisée par rapport à la variable $\Delta E'_{qi}$ et enfin le changement de variable (III.44-b) sera appliqué pour avoir un modèle d'état en fonction de Δw_i et ΔV_i dans lequel la grandeur $\Delta \bar{E}'_{qil}$ apparaît comme paramètre. Ceci fait, nous aurons donc le modèle linéaire local dans la région R_{il}

$$A_{il} = \begin{bmatrix} \frac{D_i}{2H_i} - \frac{w_0}{2H_i} \cdot \left(\frac{(2 \cdot G_{ii} \cdot \Delta \bar{E}'_{qil} + G_{ii} \cdot E'_{q0i} + \eta_{ii}) \cdot V_{ci}}{[(I + B_{ii} x'_{di})^2 + (x'_{di} G_{ii})^2] \cdot \Delta \bar{E}'_{qil} + \eta_{ii}} \right) \\ 0 \qquad \qquad \qquad - \frac{I}{T'_{d0i}} \cdot (I - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_{ii}) \end{bmatrix} \quad (III.46)$$

$$B_{il} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_{ci}}{T'_{d0i}} \cdot \frac{[(I + B_{ii} x'_{di})^2 + (x'_{di} G_{ii})^2] \cdot \Delta \bar{E}'_{qil} + \eta_{ii}}{V_{ci}} \end{bmatrix}$$

et le modèle dynamique flou sera

Si $\Delta E'_{qi}$ est dans R_{il} Alors

$$\dot{x}_i = f_{il}(x_i, u_i) = A_{il}x_i + B_{il}u_i + C_{il} \quad (III.47)$$

où C_{il} , $i=1, \dots, r$, $l=1, \dots, m$, représentent les termes indépendants de $x_i^T = [\Delta w_i \Delta V_i]$.

III.3.2.2. Synthèse du régulateur flou

Le régulateur flou associé à ce modèle dynamique flou a la même forme que le précédent et pour les fonctions d'appartenance, nous n'allons présenter que celles qui sont modifiées.

A. Réseau électrique à 2 machines

• Régulateur de la machine G_1

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{11} Alors $u_{11} = -9.3835 \Delta w_1 + 39.5133 \Delta V_1$

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{12} Alors $u_{12} = -9.3947 \Delta w_1 + 38.8139 \Delta V_1$

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{13} Alors $u_{13} = -9.4040 \Delta w_1 + 38.2294 \Delta V_1$

avec R_{11} , R_{12} et R_{13} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{11} , μ_{12} et μ_{13} sont gaussiennes de centres -0.2 , 0.0 , $+0.2$ respectivement et de variance 0.05 .

Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=I$

et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$.

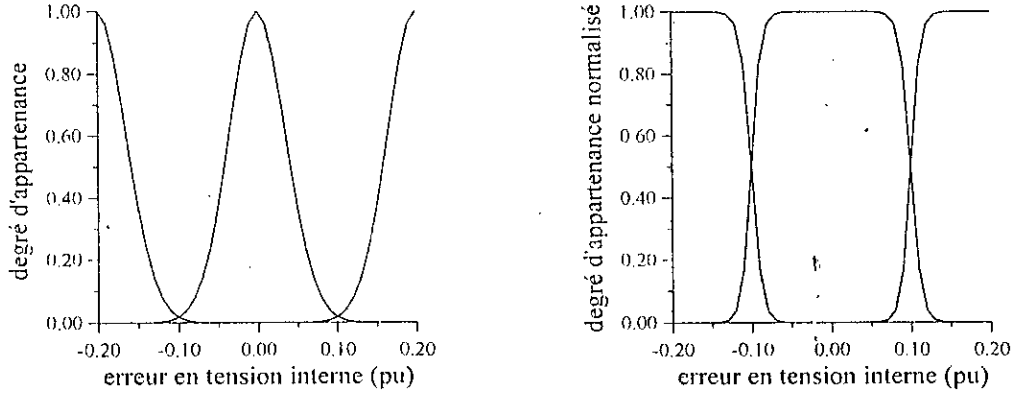


Fig. III.18 Fonctions d'appartenance du premier régulateur multi-modèle flou.

• **Régulateur de la machine G_2**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{21} Alors $u_{21} = -9.7797 \Delta w_2 + 23.0266 \Delta V_2$

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{22} Alors $u_{22} = -9.7899 \Delta w_2 + 21.9623 \Delta V_2$

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{23} Alors $u_{23} = -9.7987 \Delta w_2 + 21.0369 \Delta V_2$

avec R_{21} , R_{22} et R_{23} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{21} , μ_{22} et μ_{23} sont gaussiennes de centres -0.2 , 0.0 , $+0.2$ respectivement et de variance 0.1 . Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=I$ et

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$$

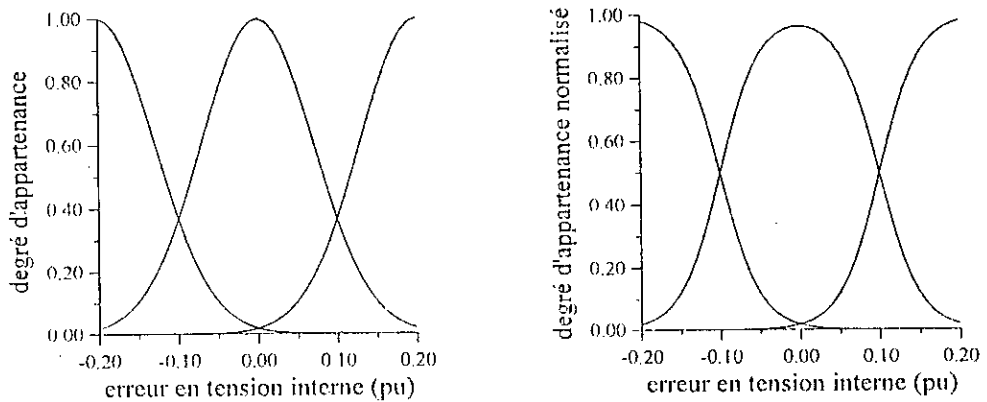


Fig. III.19 Fonctions d'appartenance du deuxième régulateur multi-modèle flou.

B. Réseau électrique à 3 machines

• **Régulateur de la machine G_1**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{11} Alors $u_{11} = -1.0000 \Delta w_1 + 5.4596 \Delta V_1$

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{12} Alors $u_{12} = -3.1623 \Delta w_1 + 10.0382 \Delta V_1$

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{13} Alors $u_{13} = -1.0000 \Delta w_1 + 5.3291 \Delta V_1$

avec R_{11} , R_{12} et R_{13} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{11} , μ_{12} et μ_{13} sont gaussiennes de centres -0.2 , 0.0 , $+0.2$ respectivement et de variance 0.05 .

Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10$, 1 et 10

pour les tris règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

• **Régulateur de la machine G_2**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{21} Alors $u_{21} = -3.1623 \Delta w_2 + 11.3262 \Delta V_2$

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{22} Alors $u_{22} = -10.0000 \Delta w_2 + 20.1710 \Delta V_2$

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{23} Alors $u_{23} = -3.1623 \Delta w_2 + 11.0991 \Delta V_2$

avec R_{21} , R_{22} et R_{23} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{21} , μ_{22} et μ_{23} sont gaussiennes de centres -0.2 , 0.0 , $+0.2$ respectivement et de variance 0.1 . Les

gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10$, 1 et 10 pour

les tris règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

• **Régulateur de la machine G_3**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si $\Delta E'_{q3}$ est dans R_{31} Alors $u_{31} = -3.1623 \Delta w_3 + 10.2059 \Delta V_3$

Si $\Delta E'_{q3}$ est dans R_{32} Alors $u_{32} = -10.0000 \Delta w_3 + 18.1775 \Delta V_3$

Si $\Delta E'_{q3}$ est dans R_{33} Alors $u_{33} = -3.1623 \Delta w_3 + 9.9410 \Delta V_3$

avec R_{31} , R_{32} et R_{33} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{31} , μ_{32} et μ_{33} sont gaussiennes de centres -0.2 , 0.0 , $+0.2$ respectivement et de variance 0.1 . Les

gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10$, 1 et 10 pour

les tris règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

III.3.2.3. Résultats de simulation

Les mêmes tests sont appliqués ici, et les résultats de simulation présentés par les figures (III.20)-(III.23) montrent qu' en plus du réglage réussi et le rejet rapide des perturbations (au bout de 1 sec) la stabilité transitoire est améliorée par rapport à celle du cas précédent. Ainsi les oscillations dues au régulateur PI flou sont supprimées.

Le test de la décentralisation est réalisé (Fig.III.24)-(Fig.III.26) et montre que la stabilité transitoire est assurée mais le réglage de la tension terminale est un peu détérioré.

III.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthode de Cao *et al.* pour le réglage flou. Nous avons tout d'abord exposé cette technique de commande floue pour un système simple et après nous l'avons généralisée pour le cas des systèmes complexes en gardant le même raisonnement.

Pour l'application de cette méthode sur les réseaux électriques, nous avons donné deux approches: la première n'assure le réglage de la tension terminale que par le biais d'un PI flou et la deuxième approche est obtenue à partir de la première en utilisant une petite astuce qui nous a permis d'éviter l'usage du PI flou.

La décentralisation a montré par les résultats obtenus que le nombre de règles floues utilisées est réduit (3 règles par régulateur) .

Les résultats de la simulation montrent les performances des deux approches, à savoir: assurance de la stabilité transitoire, réglage de la tension terminale et la décentralisation de la commande.

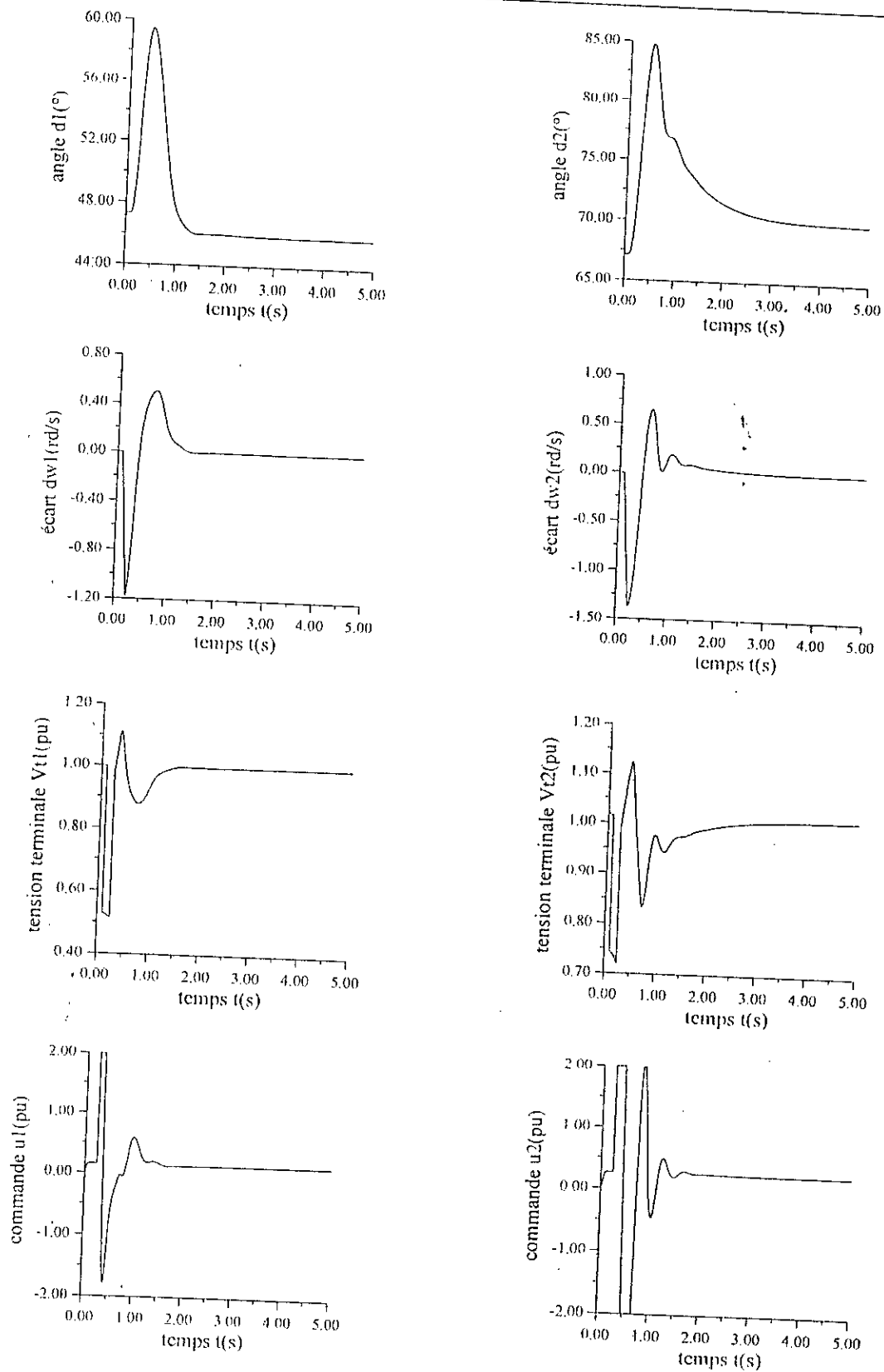


Fig.III.20 Réseau électrique à 2 machines avec un court-circuit triphasé (deuxième approche).

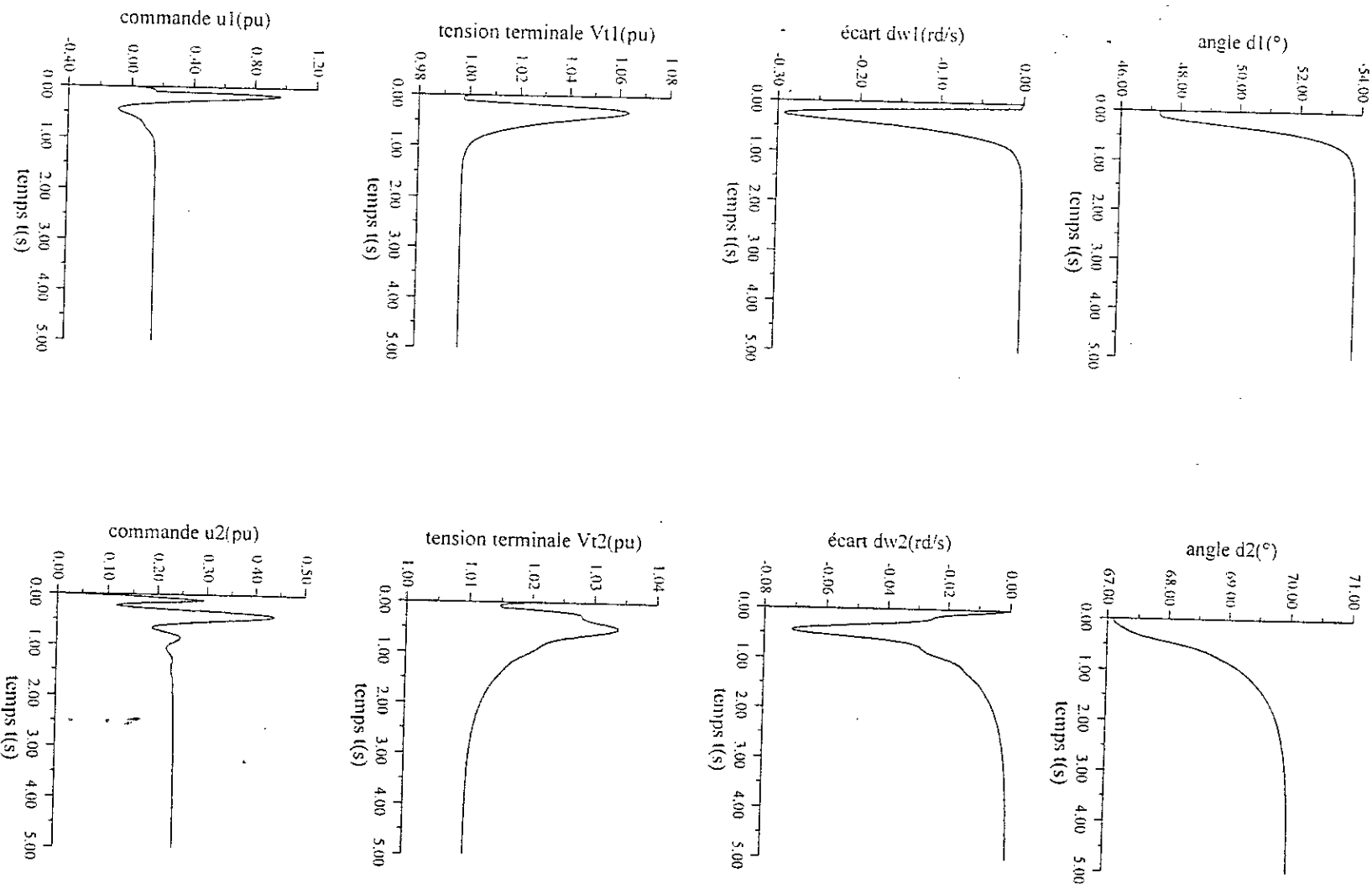


Fig. III.21 Réseau électrique à 2 machines avec accroissement de 20% de la puissance mécanique (deuxième approche).

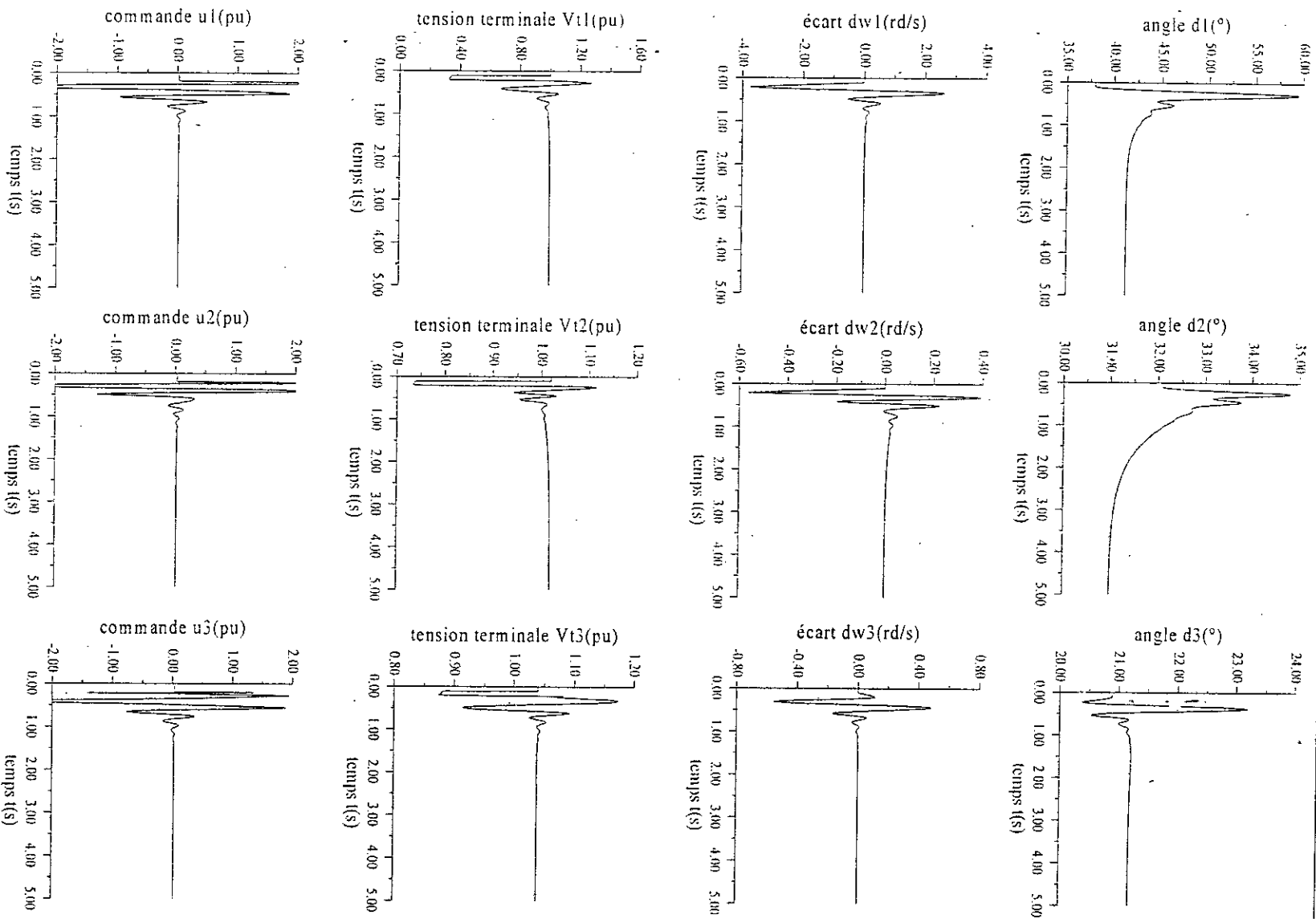


Fig. III.22 Réseau électrique à 3 machine avec un court-circuit triphasé (deuxième approche).

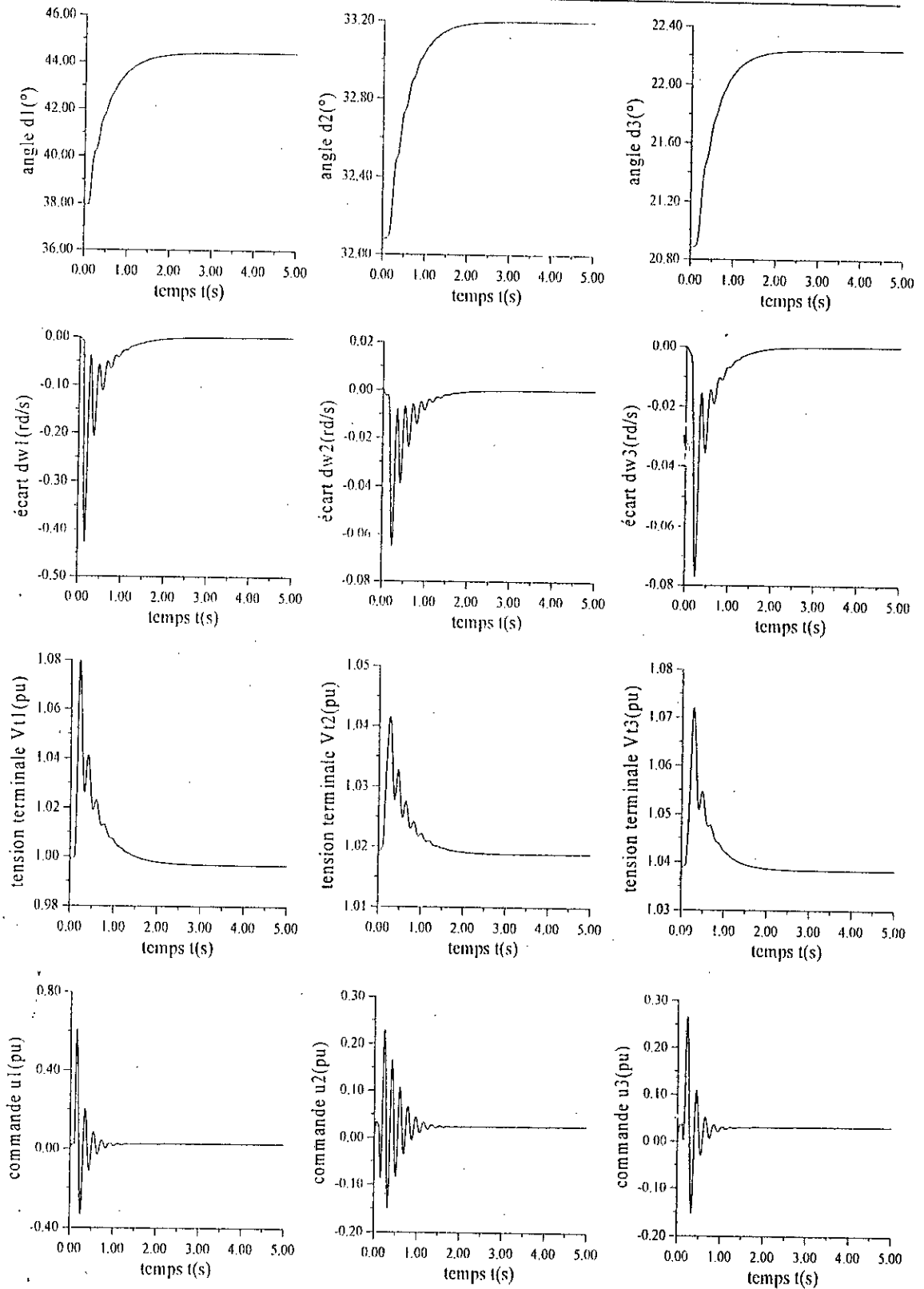


Fig.III.23 Réseau électrique à 3 machines avec un accroissement de 20% de la puissance mécanique (deuxième approche).

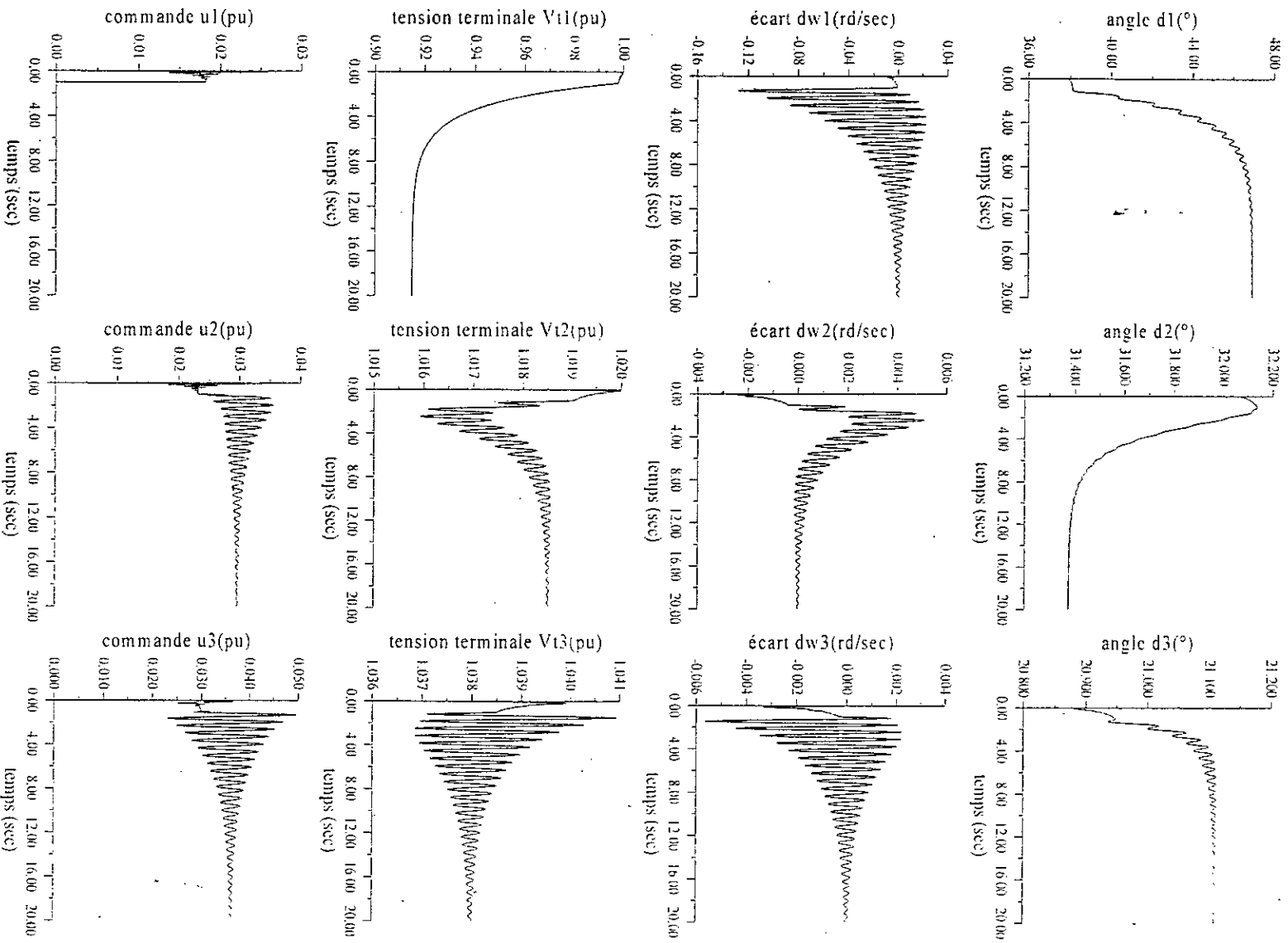


Fig. III-24 Réseau électrique à 3 machines, Test de défaillance de la commande du premier sous-système.

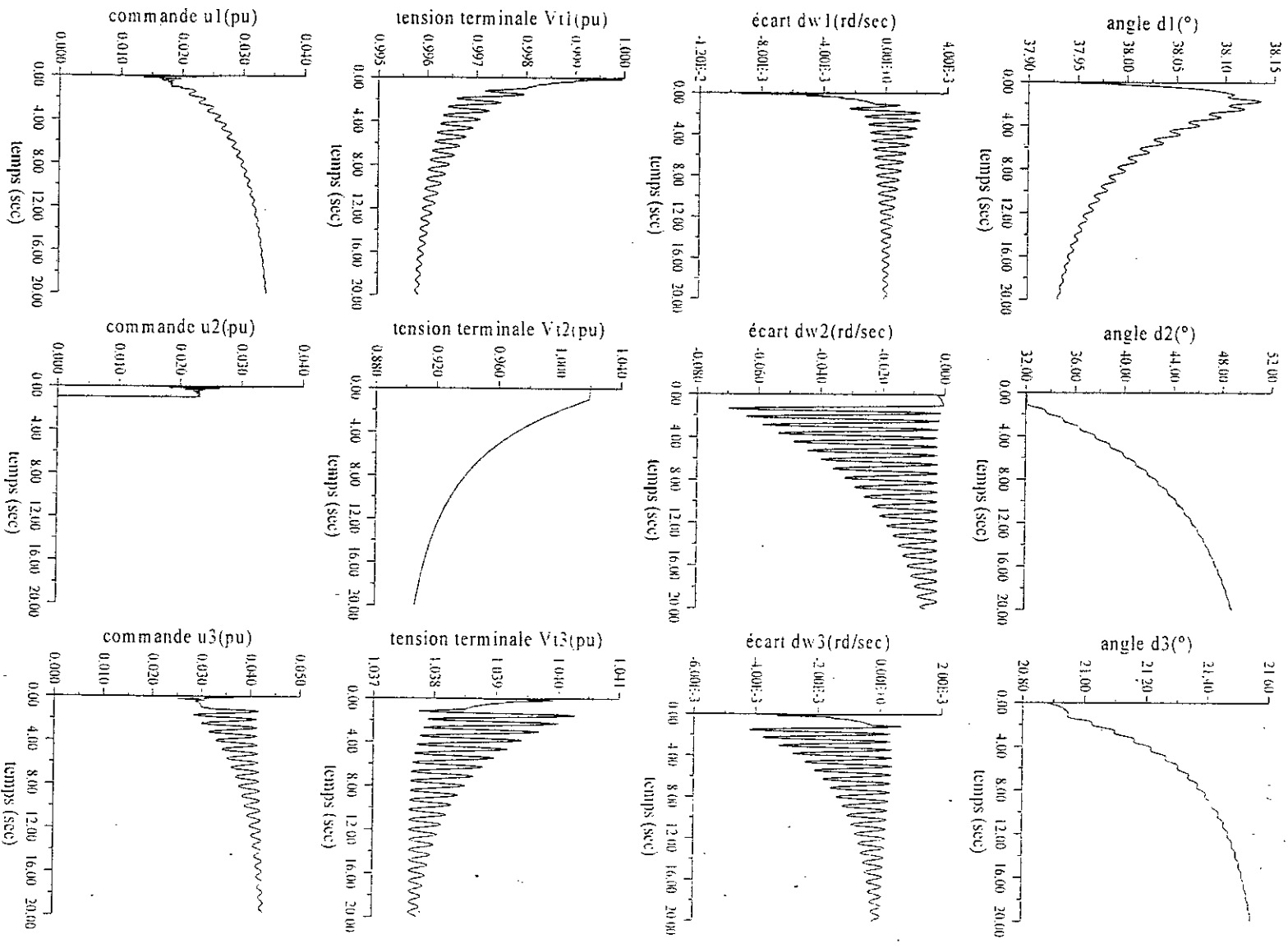


Fig. III.25 Réseau électrique à 3 machines, Test de défaillance de la commande du deuxième sous-système.

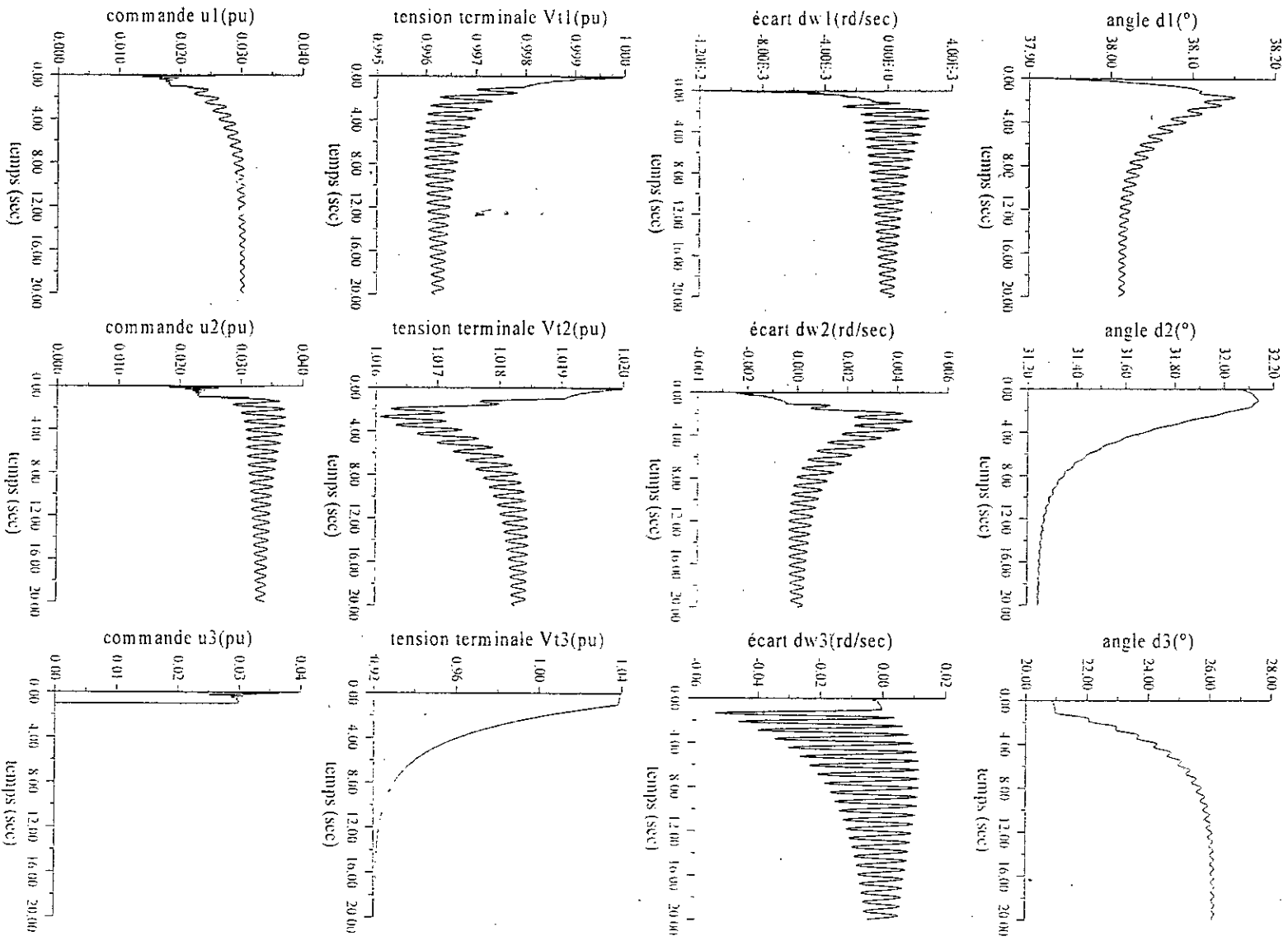


Fig. III.26 Réseau électrique à 3 machines, Test de défaillance de la commande du troisième sous-système.

COMMANDE FLOUE MULTI-MODELE
A MODELES LOCAUX LINEARES
PAR QUANTIFICATION

CHAPITRE IV

COMMANDE FLOUE MULTI-MODELE A MODELES LOCAUX
LINEAIRES PAR QUANTIFICATION

IV.1. INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons constaté que la méthode de Cao *et al.* nécessite la linéarisation autour d'un ensemble de points préalablement choisis dans l'espace d'état. Dans ce chapitre, nous allons montrer que cette linéarisation n'est pas nécessaire pour la construction d'un modèle flou et qu'une quantification est suffisante pour en avoir un. Cette quantification est basée sur un choix d'un ensemble de points, dans l'espace d'état, autour desquels on considère que les variables d'état sont fixes.

Pour obtenir un modèle dynamique flou basé sur la quantification, il faut trouver une représentation adéquate sous forme d'état (représentation matricielle) et ensuite faire la quantification des variables d'état. Une fois les variables d'état quantifiées en un ensemble de points, des régions caractérisées par un ensemble de fonctions d'appartenance y seront associées. Dans chaque région, on tire les matrices du système qui seront constantes (les variables d'état qui apparaissent dans ces matrices sont remplacées par leurs valeurs adéquates dans chaque région). Cette démarche facilite l'obtention des modèles linéaires locaux (la linéarisation sera remplacée par une simple substitution).

Dans ce qui suit, la présentation de la technique sera d'abord effectuée pour un système simple et après elle sera généralisée pour les systèmes complexes (décentralisation).

Dans l'application sur les réseaux électriques (ici réseau électrique à trois machines seulement), nous garderons les mêmes paramètres que dans le chapitre précédent et nous ne changerons que la méthode d'obtention des modèles linéaires locaux, à partir desquels les régulateurs linéaires locaux seront calculés.

Ce chapitre sera achevé par les résultats de la simulation ainsi que des commentaires.

IV.2. METHODE DE CAO MODIFIEE

La quantification est déjà connue dans la représentation numérique des grandeurs et elle engendre des erreurs qui peuvent être réduite en augmentant le nombre de points ce qui revient à dire: augmenter la résolution.

Dans ce qui suit nous allons profiter de la quantification mais en assurant la réduction de l'erreur par l'utilisation de la logique floue qui sert à attribuer des degrés de vérité aux différentes représentations, par exemple:

Si on quantifie l'intervalle $[1, 2]$ par l'ensemble $\{1, 2\}$, la relation $x=1.2$, sera vu comme suit:

x est 1 avec un degré de vérité égale à 0.8 et

x est 2 avec un degré de vérité égale à 0.2

et on constate bien que $1 \cdot 0.8 + 2 \cdot 0.2 = 1.2$.

D'abord, nous allons présenter la méthode de quantification pour approcher une fonction préalablement donnée, ensuite l'utilisation de cette méthode pour le cas centralisé (système simple) sera exposée et enfin la présentation sera achevée par la généralisation de cette méthode pour le cas décentralisé (système complexe).

• **Définitions**

Dans ce qui suit, nous allons définir les outils mathématiques nécessaires pour cette méthode.

Soit $x \in \mathcal{X}$,

a. Fonctions triangulaires

a.1. Soit $a > 0$. On définit la fonction $\psi_-^{(a)}$, triangulaire à gauche de centre θ et de largeur a par

$$\psi_-^{(a)}(x) = \begin{cases} \frac{x+a}{a}, & x \in]-a, \theta] \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

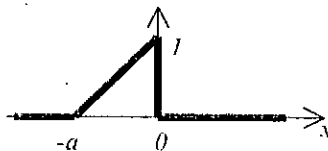


Fig.IV.1 Fonction triangulaire à gauche de centre θ et de largeur a .

a.2. Soit $b > 0$. On définit la fonction $\psi_+^{(b)}$, triangulaire à droite de centre θ et de largeur b par

$$\psi_+^{(b)}(x) = \begin{cases} \frac{b-x}{b}, & x \in]\theta, b] \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

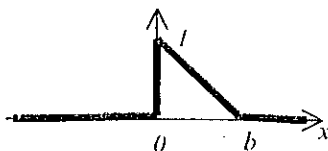


Fig.IV.2 Fonction triangulaire à droite de centre θ et de largeur b .

a.3. Soient $a > 0$ et $b > 0$. On définit la fonction $\psi^{(a,b)}$, triangulaire de centre θ , de largeur à gauche égale à a et de largeur à droite égale à b par

$$\psi^{(a,b)}(x) = \psi_{-}^{(a)}(x) + \psi_{+}^{(b)}(x) \quad (IV.3)$$

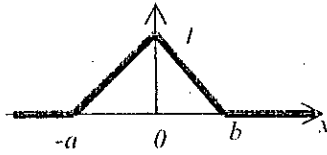


Fig.IV.3 Fonction triangulaire de centre θ et de largeurs à gauche et à droite a et b respectivement .

a.4. la fonction φ définie par

$$\varphi(x) = \psi^{(a,b)}(x - m) \quad (IV.4)$$

est triangulaire de centre m et de largeurs à gauche et à droite a et b respectivement.

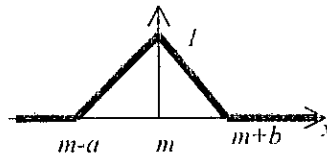


Fig.IV.4 Fonction triangulaire de centre m et de largeurs à gauche et à droite a et b respectivement .

b. Propriétés

b.1. nous avons la relation

$$\psi^{(a,b)}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right) = \psi^{(a\sigma, b\sigma)}(x - m) \quad (IV.5)$$

b.2. Si $a=b$, nous aurons une fonction triangulaire symétrique de centre θ et de largeur $2a$,

$$\psi^{(a)}(x) = \psi^{(a,a)}(x) \quad (IV.6)$$

c. Famille de fonctions triangulaires

On définit la famille Ψ_a de fonctions triangulaires par

$$\Psi_a = \left\{ \psi_i^{(a)} / \psi_i^{(a)}(x) = \psi^{(a)}(x - ia), i \in \mathbb{Z} \right\} \quad (IV.7)$$

Les fonctions de cette famille vérifient les propriétés suivantes:

P₁.

$$\psi_0^{(a)}(x) = \psi^{(a)}(x) \quad (IV.8)$$

P₂.

$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} \psi_i^{(a)}(x) = 1 \quad (\text{IV.9})$$

P₃.

$$\forall x \in \mathfrak{R}, \quad x = \sum_{i \in \mathbb{Z}} \psi_i^{(a)}(x) \cdot (i \cdot a) \quad (\text{IV.10})$$

d. Cas d'intervalles limités

Soit $I = [x_1, x_2] \subset \mathfrak{R}$.

Pour $n \in \mathbb{N}^*$ préalablement choisi, définissons la quantité a par

$$a = \frac{x_2 - x_1}{n} \quad (\text{IV.11})$$

et l'ensemble A_n de points $a_i, i = 1, \dots, n$ par

$$A_n = \{a_i / a_i = x_1 + i \cdot a, i = 0, \dots, n\} \quad (\text{IV.12})$$

et la famille $\Psi_{a,n}$ de fonctions triangulaires sur l'intervalle I par

$$\Psi_a = \{\psi_i^{(a)} / \psi_i^{(a)}(x) = \psi(x - a_i), a_i \in A_n, i = 0, \dots, n\} \quad (\text{IV.13})$$

Pour $x \in I$, nous avons

$$\sum_{i=0}^n \psi_i^{(a)}(x) = 1 \quad (\text{IV.14})$$

$$x = \sum_{i=0}^n \psi_i^{(a)}(x) \cdot a_i \quad (\text{IV.15})$$

e. Représentation d'une fonction par la quantification

Nous allons présenter le cas simple d'une fonction continue à une seule variable monotone (croissante).

Soit $y=f(x)$ une fonction continue, monotone (croissante) définie sur l'intervalle $I_x=[x_1, x_2]$ et soit $I_y=[y_1, y_2]$ l'intervalle image de I_x par la fonction f , avec $y_1=f(x_1)$ et $y_2=f(x_2)$.

Nous avons le résultat suivant

$$\exists \varphi_i^{(b)} / f(x) = \sum_{i=0}^n \varphi_i^{(b)}(x) \cdot f(b_i), \quad x \in I_x \quad (\text{IV.16})$$

avec $b_i = x_1 + i \cdot b$ et $b = (x_2 - x_1)/n$ et $n \in \mathbb{N}^*$.

De plus, nous avons

$$\sum_{i=0}^n \varphi_i^{(h)}(x) = 1, \quad x \in I_x \quad (\text{IV.17})$$

Preuve

Voir l'annexe A.4

Remarque

Cette représentation n'est pas une approximation, mais simplement une autre représentation de la fonction elle-même afin de la préparer pour l'approximation floue qui sera obtenue par le changement des fonctions $\varphi_i^{(h)}$ par d'autres fonctions en cloches $\mu_i, i=1, \dots, n$ qui en sont proches.

f. Généralisation

La généralisation pour les fonctions non monotones se fait par la décomposition de l'intervalle de définition en un ensemble de sous intervalles dans lesquels les fonctions seront monotones.

• **Système simple**

Soit le système dynamique non linéaire

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (\text{IV.18})$$

Supposons qu'en manipulant f , nous avons pu l'écrire sous la forme suivante:

$$f(x, u) = f_1(x) \cdot x + f_2(x) \cdot u + f_3(x) \quad (\text{IV.19})$$

Décomposons l'espace d'état en des régions $R_l, l=1, \dots, m$ ayant des fonctions d'appartenance normalisées (leur somme égale à 1) $\mu_l, l=1, \dots, m$. Calculons $A_l=f_1(x_l), B_l=f_2(x_l)$ et $C_l=f_3(x_l)$ pour $x_l \in R_l$, avec $\mu_l(x_l)=1, l=1, \dots, m$. Nous aurons ainsi m modèles linéaires :

$$\dot{x} = A_l x + B_l u + C_l, \quad l=1, \dots, m \quad (\text{IV.20})$$

Il existe des fonctions d'appartenance normalisées et en forme de cloche $\mu_l(x), l=1, \dots, m$, qui permettent d'avoir

$$f_1(x) \approx \sum_{l=1}^m A_l \cdot \mu_l(x), \quad f_2(x) \approx \sum_{l=1}^m B_l \cdot \mu_l(x) \quad \text{et} \quad f_3(x) \approx \sum_{l=1}^m C_l \cdot \mu_l(x) \quad (\text{IV.21})$$

De (IV.19), (IV.20) et (IV.21), nous pouvons construire le système dynamique flou suivant:

$$\begin{aligned} \text{SI } x \text{ est } R_l \text{ Alors } \dot{x} = f(x, u) = A_l x + B_l u + C_l \\ l=1, \dots, m \end{aligned} \quad (\text{IV.22})$$

• **Système complexe**

Soit le système dynamique non linéaire

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (\text{IV.23})$$

Supposons que ce système peut être décomposé en r sous-systèmes interconnectés, nous aurons donc $x^T = [x_1^T \ x_2^T \ \dots \ x_r^T]$ et $u^T = [u_1^T \ u_2^T \ \dots \ u_r^T]$. De plus considérons les vecteurs $X_i^T = [x_{i-1}^T \ \dots \ x_{i-1}^T \ x_{i+1}^T \ \dots \ x_r^T]$, $i=1, \dots, r$. La forme décentralisée du système précédent sera

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, u_i, X_i) \quad i=1, \dots, r \quad (\text{IV.24})$$

En manipulant f_i , nous pouvons l'écrire sous la forme suivante

$$f_i(x_i, u_i, X_i) = f_{i1}(x_i) \cdot x_i + f_{i2}(x_i) \cdot u_i + f_{i3}(x_i, X_i) \quad i=1, \dots, r \quad (\text{IV.25})$$

Décomposons le i ème sous-espace d'état en des régions R_{il} , $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$ ayant des fonctions d'appartenance normalisées μ_{il} , $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$ et calculons $A_{il} = f_{i1}(x_{il})$, $B_{il} = f_{i2}(x_{il})$ et $C_{il}(X_i) = f_{i3}(x_{il}, X_i)$ pour $x_{il} \in R_{il}$, avec $\mu_{il}(x_{il}) = 1$, $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$. Nous aurons ainsi m_i modèles linéaires

$$\dot{x}_i = A_{il} x_i + B_{il} u_i + C_{il}(X_i), \quad i=1, \dots, r \text{ et } l=1, \dots, m_i \quad (\text{IV.26})$$

Dans ce modèle, nous avons regroupé les termes des interconnexions dans les vecteurs C_{il} , $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$.

Il existe des fonctions d'appartenance normalisées en forme de cloche $\mu_{il}(x_i)$, $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m_i$, qui permettent d'avoir (voir l'annexe A.4)

$$\begin{aligned} f_{i1}(x_i) &\approx \sum_{l=1}^{m_i} A_{il} \cdot \mu_{il}(x_i), \\ f_{i2}(x_i) &\approx \sum_{l=1}^{m_i} B_{il} \cdot \mu_{il}(x_i) \text{ et} \\ f_{i3}(x_i, X_i) &\approx \sum_{l=1}^{m_i} C_{il}(X_i) \cdot \mu_{il}(x_i) \end{aligned} \quad (\text{IV.27})$$

De (IV.25), (IV.26) et (IV.27), nous pouvons construire le i ème sous-système dynamique flou suivant

Si x_i est dans R_{il} Alors

$$\begin{aligned} \dot{x}_l &= f_l(x_l, u_l, X_l) = A_{il}x_l + B_{il}u_l + C_{il}(X_l) & (IV.28) \\ l &= 1, \dots, m_i \\ i &= 1, \dots, r \end{aligned}$$

IV.3. APPLICATION ET SIMULATION

IV.3.1. Première approche

Le schéma de la commande est le même que celui de la première approche du chapitre précédent.

IV.3.1.1. Application

A partir du modèle non linéaire du générateur G_i , $i=1, \dots, r$, nous construisons le modèle suivant

$$\begin{cases} \Delta \dot{w}_i = -\frac{D_i}{2H_i} \cdot \Delta w_i - \frac{w_0}{2H_i} \cdot G_{ii} \cdot \Delta E_{qi}' - \frac{w_0}{2H_i} \cdot (G_{ii} \cdot E_{qi0}' + \eta_{1i}) \cdot \Delta E_{qi}' \\ \Delta \dot{E}_{qi}' = -\frac{1}{T'_{doi}} \cdot (1 - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_{ii}) \cdot \Delta E_{qi}' + \frac{k_{ci}}{T'_{doi}} \cdot u_i - \\ -\frac{1}{T'_{doi}} \cdot (1 - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_{ii}) \cdot E_{qi0}' - \frac{(x_{di} - x'_{di})}{T'_{doi}} \cdot \eta_{2i} \end{cases} \quad (IV.29)$$

où les termes η_{1i} et η_{2i} sont liés aux interconnexions.

Nous pouvons constater que la non linéarité est liée à la variable $\Delta E_{qi}'$, ce qui nous conduit à considérer les régions R_{il} autour des points $\Delta \bar{E}_{qi}'$ et de fonctions d'appartenance μ_{il} , $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m$.

En considérant que $\eta_{1i} = \eta_{1i}^0 + \Delta \eta_{1i}$, ce modèle peut être réécrit sous la forme suivante

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{w}_i \\ \Delta \dot{E}_{qi}' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{2H_i} & -\frac{w_0}{2H_i} \cdot (G_{ii} \cdot \Delta E_{qi}' + G_{ii} \cdot E_{qi0}' + \eta_{1i}^0) \\ 0 & -\frac{1}{T'_{doi}} \cdot (1 - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_{ii}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta w_i \\ \Delta E_{qi}' \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_{ci}}{T'_{doi}} \end{bmatrix} \cdot u_i + \begin{bmatrix} -\frac{w_0}{2H_i} \cdot \Delta \eta_{1i} \cdot \Delta E_{qi}' \\ -\frac{1}{T'_{doi}} \cdot (1 - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_{ii}) \cdot E_{qi0}' - \frac{(x_{di} - x'_{di})}{T'_{doi}} \cdot \eta_{2i} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (IV.30)$$

L'application de la méthode de quantification conduit donc au modèle linéaire local dans la région R_{il} suivant

$$A_{il} = \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{2H_i} & -\frac{w_{oi}}{2H_i} \cdot (G_{oi} \cdot \Delta \bar{E}'_{qi} + G_{oi} \cdot E'_{qio} + \eta_{oi}^0) \\ 0 & -\frac{J}{T'_{doi}} \cdot (1 - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_{il}) \end{bmatrix} \quad (IV.31)$$

$$B_{il} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_{ci}}{T'_{doi}} \end{bmatrix}$$

et le modèle dynamique flou du sous système $i, i=1, \dots, r$ sera

SI $\Delta E'_{qi}$ est dans R_{il} Alors

$$\dot{x}_i = f_{il}(x_i, u_i) = A_{il}x_i + B_{il}u_i + C_{il}(X_i) \quad (IV.32)$$

$i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m$

où $C_{il}(X_i)$, $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m$, représentent les termes indépendants de $x_i^T = [\Delta w_i \Delta E'_{qi}]$.

IV.3.1.2. Synthèse du régulateur flou

Le régulateur flou associé à ce modèle dynamique flou est donné par

SI $\Delta E'_{qi}$ est dans R_{il} Alors

$$u_{il} = K_{il} \cdot x_i \quad (IV.34)$$

$i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m$.

et la commande appliquée sera

$$u_{mi} = \sum_{l=1}^m \mu_{il} u_{il} = \left[\sum_{l=1}^m \mu_{il} K_{il} \right] \cdot x_i = K_i(\mu_i) x_i \quad (IV.35)$$

$i=1, \dots, r$

avec K_{il} , $i=1, \dots, r$, $l=1, \dots, m$ les gains de retour calculés par la technique LQ [CAO 97] pour les modèles linéaires locaux des sous-systèmes G_{il} , $i=1, \dots, r$, dans les régions R_{il} , $i=1, \dots, r$, $l=1, \dots, m$.

L'application sur le réseau électrique à 3 machines donne les résultats suivants:

• **Régulateur de la machine G_1**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{11} Alors $u_{11} = -1.0000 \Delta w_1 + 5.4467 \Delta E'_{q1}$

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{12} Alors $u_{12} = -3.1623 \Delta w_1 + 10.2952 \Delta E'_{q1}$

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{13} Alors $u_{13} = -1.0000 \Delta w_1 + 5.6213 \Delta E'_{q1}$

avec R_{11} , R_{12} et R_{13} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{11} , μ_{12} et μ_{13} sont gaussiennes de centres -0.2 , 0.0 , $+0.2$ respectivement et de variance 0.05 . Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10$, 1 et 10

pour les trois règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

Le régulateur PI flou est donné par les règles

| $\Delta V_1 \setminus c\Delta V_1$ | N | Z | P |
|------------------------------------|----------|----------|---------|
| N | -0.030 | -0.025 | 0.00 |
| Z | -0.025 | 0.00 | 0.025 |
| P | 0.00 | 0.025 | 0.030 |

avec N , Z et P sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1 , 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59 .

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.01$ et $g_2=0.001$ pour ΔV_1 et $c\Delta V_1$ respectivement.

• **Régulateur de la machine G_2**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{21} Alors $u_{21} = -3.1621 \Delta w_2 + 11.2069 \Delta E'_{q2}$

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{22} Alors $u_{22} = -10.0000 \Delta w_2 + 20.4412 \Delta E'_{q2}$

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{23} Alors $u_{23} = -3.1623 \Delta w_2 + 11.5052 \Delta E'_{q2}$

avec R_{21} , R_{22} et R_{23} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{21} , μ_{22} et μ_{23} sont gaussiennes de centres -0.2 , 0.0 , $+0.2$ respectivement et de variance 0.1 . Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10$, 1 et 10 pour

les trois règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

Le régulateur PI flou est donné par les règles

| $\Delta V_2 \backslash c\Delta V_2$ | <i>N</i> | <i>Z</i> | <i>P</i> |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| <i>N</i> | -0.030 | -0.025 | 0.00 |
| <i>Z</i> | -0.025 | 0.00 | 0.025 |
| <i>P</i> | 0.00 | 0.025 | 0.030 |

avec *N*, *Z* et *P* sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1, 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59.

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.1$ et $g_2=0.01$ pour ΔV_2 et $c\Delta V_2$ respectivement.

• **Régulateur de la machine G_3**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes

Si $\Delta E'_{q3}$ est dans R_{31} Alors $u_{31} = -3.1621 \Delta w_3 + 9.9031 \Delta E'_{q3}$

Si $\Delta E'_{q3}$ est dans R_{32} Alors $u_{32} = -10.0000 \Delta w_3 + 18.2837 \Delta E'_{q3}$

Si $\Delta E'_{q3}$ est dans R_{33} Alors $u_{33} = -3.1623 \Delta w_3 + 10.3308 \Delta E'_{q3}$

avec R_{31} , R_{32} et R_{33} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{31} , μ_{32} et μ_{33} sont gaussiennes de centres -0.2, 0.0, +0.2 respectivement et de variance 0.1. Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10$, 1 et 10 pour les trois règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

Le régulateur PI flou est donné par les règles

| $\Delta V_3 \backslash c\Delta V_3$ | <i>N</i> | <i>Z</i> | <i>P</i> |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| <i>N</i> | -0.030 | -0.025 | 0.00 |
| <i>Z</i> | -0.025 | 0.00 | 0.025 |
| <i>P</i> | 0.00 | 0.025 | 0.030 |

avec *N*, *Z* et *P* sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1, 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59.

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.01$ et $g_2=0.001$ pour ΔV_3 et $c\Delta V_3$ respectivement.

IV.3.1.3. Résultats de simulation

Pour apprécier les performances des régulateurs synthétisés, les tests suivants ont été effectués sur le réseau électrique à 3 machines:

Le premier consiste en l'application d'un court-circuit triphasé à l'instant $t=0.1$ sec et de durée 0.1 sec sur la ligne qui lie le générateur G1 au générateur G2 à une distance de G1 égale à 20% de la longueur de cette ligne, suivie de l'ouverture de cette ligne.

Le deuxième test est un accroissement de 20% de la puissance mécanique appliquée au générateur G1 à partir de l'instant $t=0.1$ sec.

Les résultats de simulation, présentés par les figures (IV.5) et (IV.6), montrent que le réglage de la tension terminale est obtenu ainsi que la stabilité transitoire est assurée. Comme nous pouvons le voir la perturbation est rejetée au bout de 1 à 2 sec.

Le test de la décentralisation de la commande est réalisé par un court-circuit au niveau d'une station de commande locale ce qui donne une commande nulle. La simulation (Fig.IV.7)-(Fig.IV.9) montre que malgré la défaillance d'une station de commande locale le système se stabilise au bout de 20 secondes assurant une bonne fréquence mais les tensions terminales sont un peu affectées par ce test. Ceci est à cause de la forte interconnexions entre les sous-systèmes qui permet aux stations de commande non défaillantes de participer à la stabilisation du sous-système dont la station de commande est défaillante.

Ainsi, en plus de la facilité de la synthèse des régulateurs, nous pouvons considérer le réglage comme suffisant.

Nous constatons aussi que ces résultats sont semblables à ceux obtenus par la méthode de Cao *et al.* et ceci est à cause de la forme du modèle du réseau électrique.

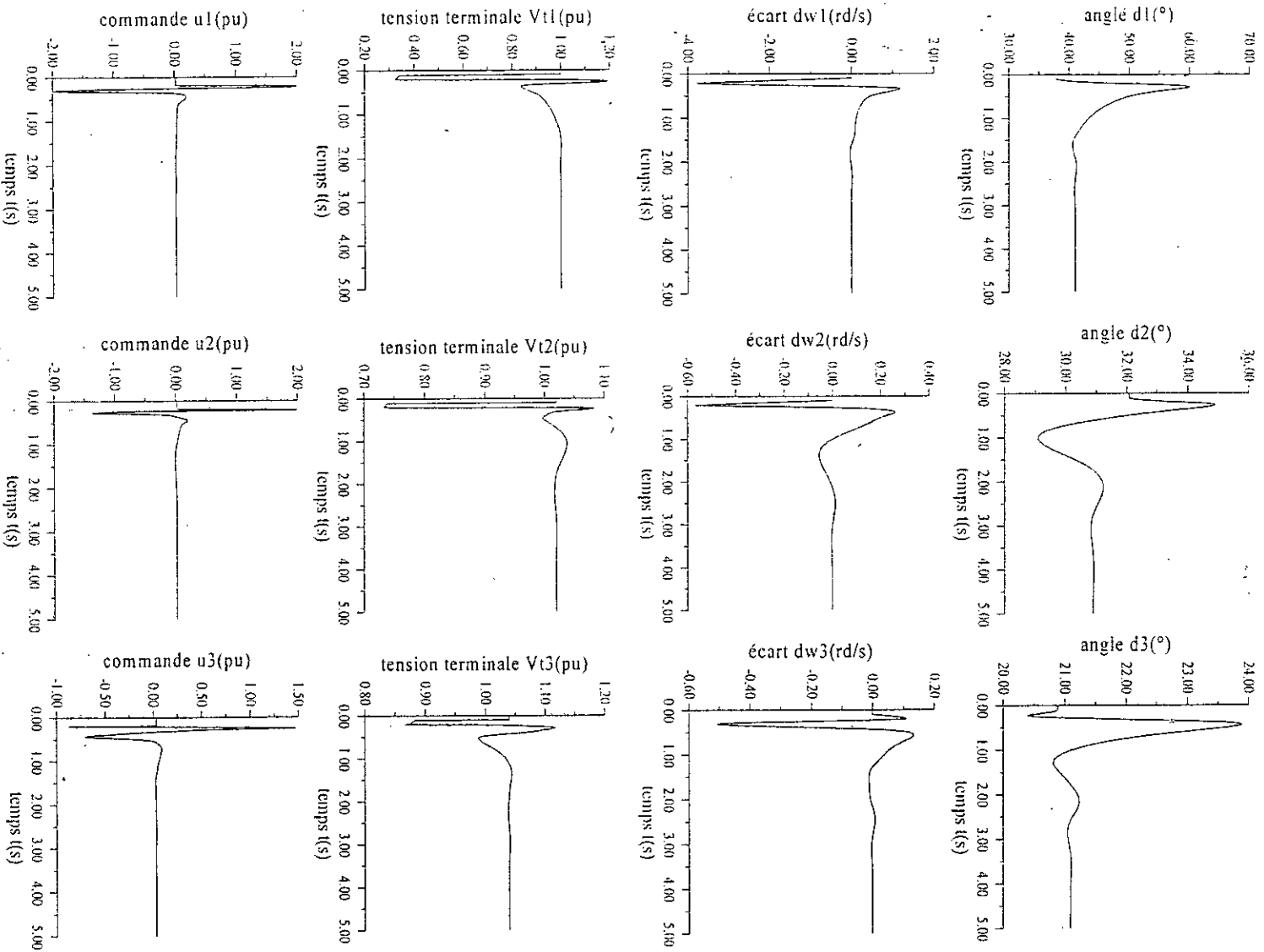


Fig.IV.5 Réseau électrique à 3 machines avec un court-circuit triphasé (première approche).

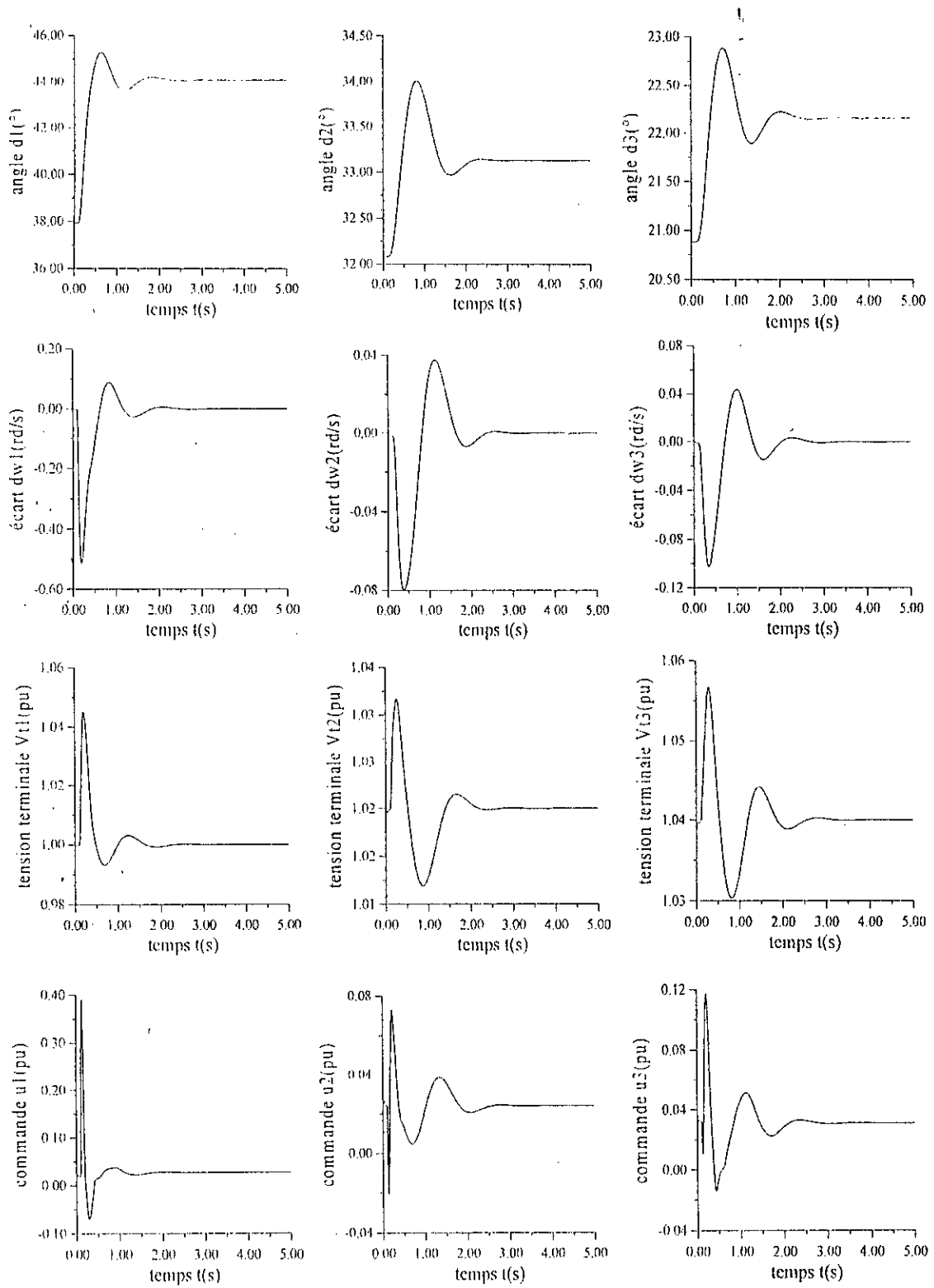


Fig.IV.6 Réseau électrique à 3 machines avec un accroissement de 20% de la puissance mécanique (première approche).

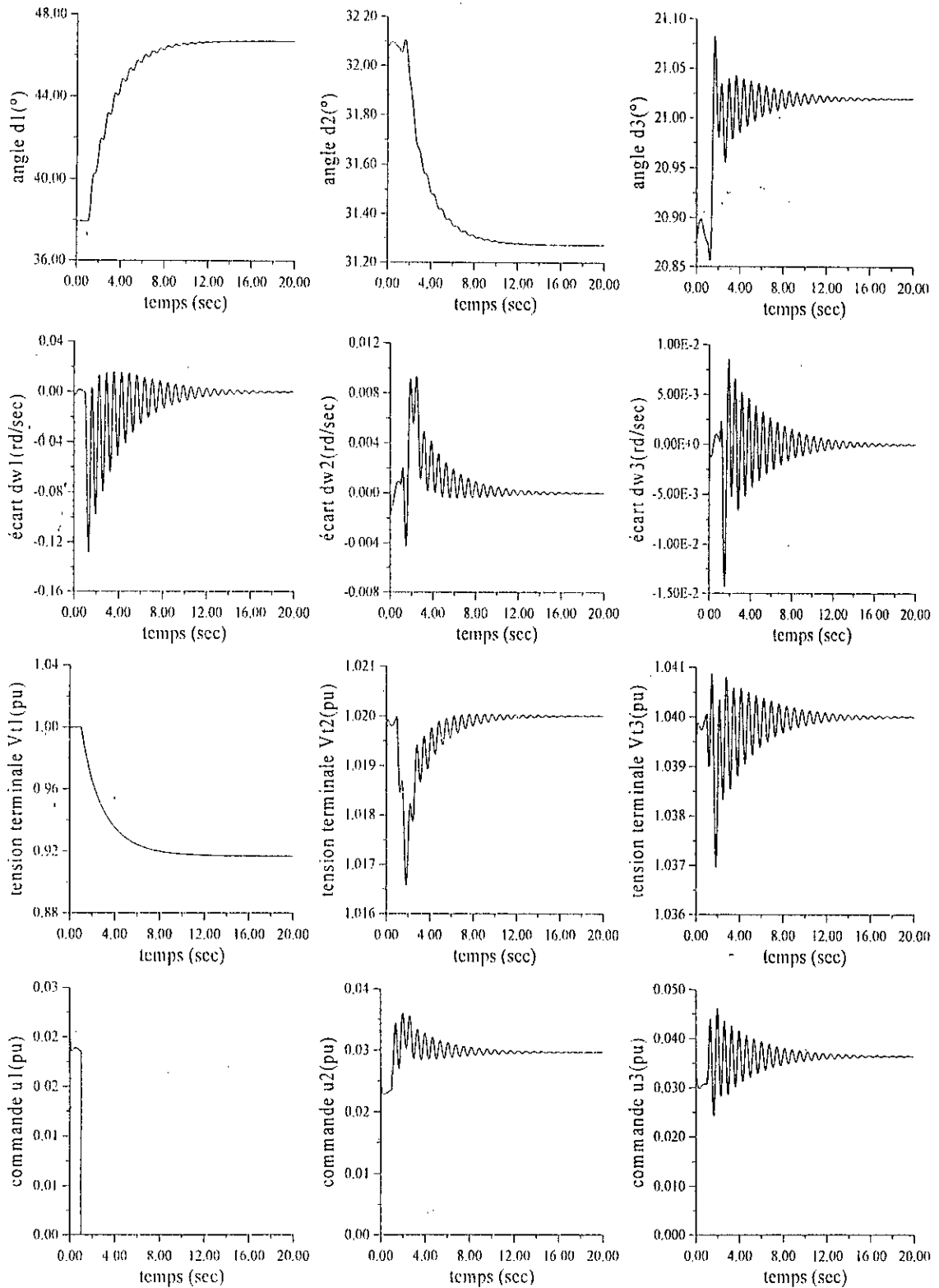


Fig.IV.7 Réseau électrique à 3 machines, Test de défaillance du régulateur du 1^{er} sous-système.

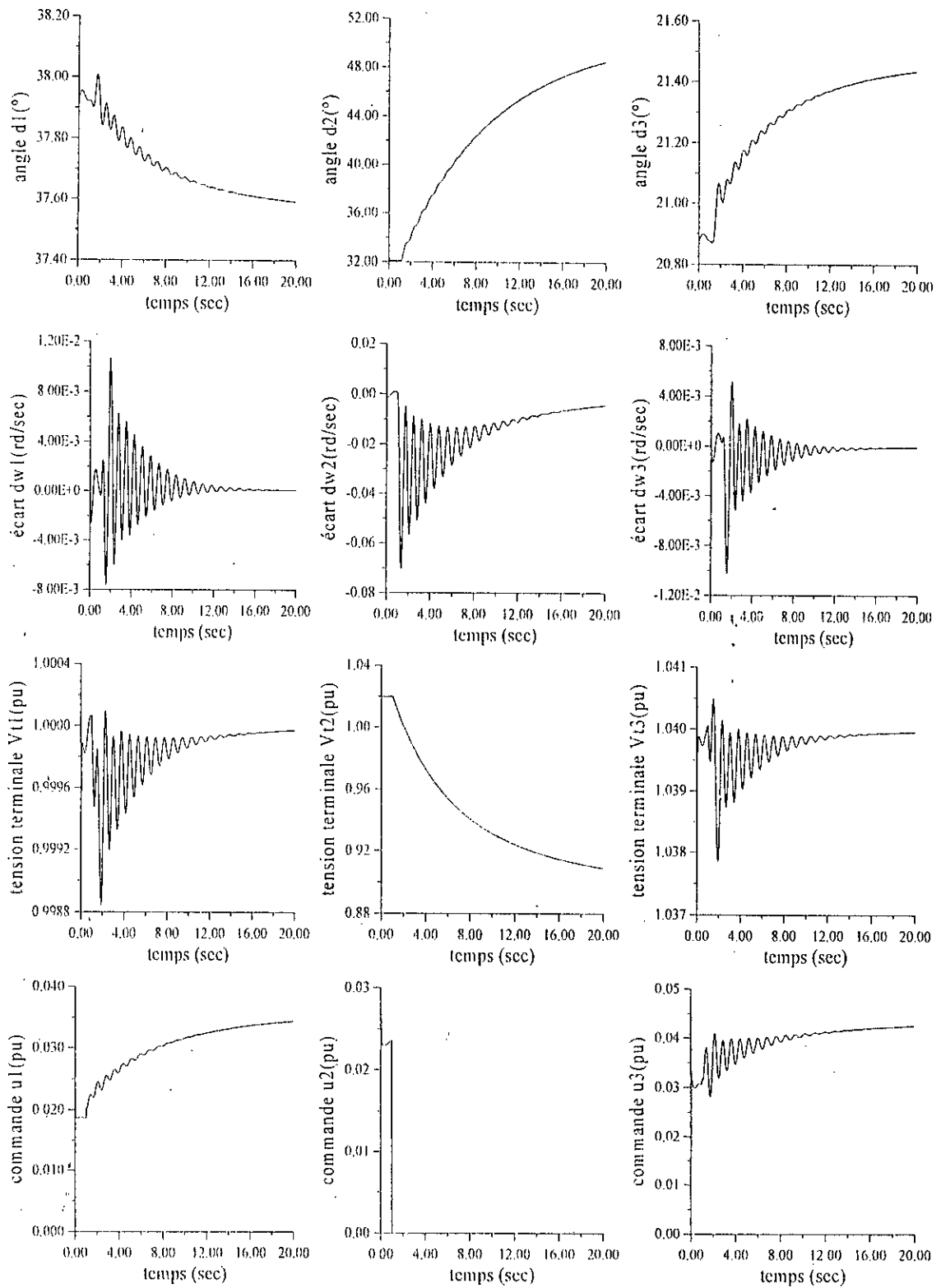


Fig.IV.8 Réseau électrique à 3 machines, Test de défaillance du régulateur du 2^{ème} sous-système.

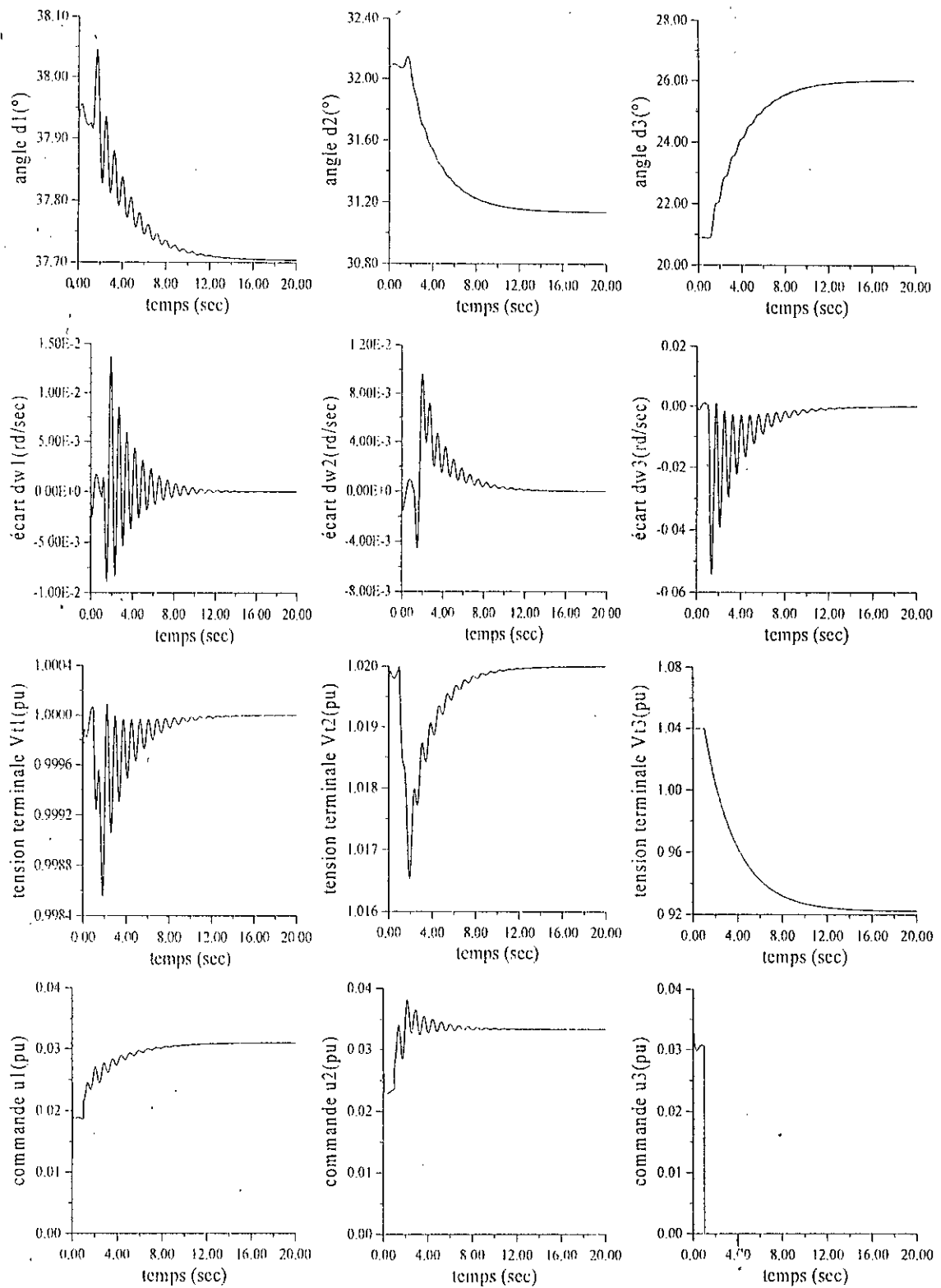


Fig.IV.9 Réseau électrique à 3 machines, Test de défaillance du régulateur du 3^{ème} sous-système.

IV.3.2. Deuxième approche

Le schéma de la commande est le même que celui de la deuxième approche du chapitre précédent.

IV.3.2.1. Application

Le modèle non linéaire correspondant à ce schéma est déjà tiré dans le chapitre III et l'application de cette méthode conduit à

$$A_{il} = \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{2H_i} & -\frac{w_{\theta}}{2H_i} \cdot \left(\frac{(G_{ii} \cdot \Delta \bar{E}'_{qi} + G_{ii} \cdot E'_{q\theta i} + \eta_{ii}^0) \cdot V_{ci}}{[(1 + B_{ii} x'_{di})^2 + (x'_{di} G_{ii})^2] \cdot \Delta \bar{E}'_{qi} + \eta_i} \right) \\ 0 & -\frac{I}{T'_{doi}} \cdot (1 - (x_{di} - x'_{di}) \cdot B_{ii}) \end{bmatrix} \quad (IV.36)$$

$$B_{il} = \begin{bmatrix} \frac{k_{ci}}{T'_{doi}} \cdot \frac{0}{[(1 + B_{ii} x'_{di})^2 + (x'_{di} G_{ii})^2] \cdot \Delta \bar{E}'_{qi} + \eta_i} \end{bmatrix}$$

dans la région R_{il} entourant les points $\Delta \bar{E}'_{qi}$ et de fonctions d'appartenance μ_{il} , $l=1, \dots, m_i$ et $i=1, \dots, r$ et le modèle dynamique flou sera

Si $\Delta E'_{qi}$ est dans R_{il} Alors

$$\dot{x}_i = f_{il}(x_i, u_i) = A_{il}x_i + B_{il}u_i + C_{il}(X_i) \quad (IV.37)$$

$i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m$

où $C_{il}(X_i)$, $i=1, \dots, r$ et $l=1, \dots, m$, représentent les termes indépendants de $x_i^T = [\Delta w_i \Delta E'_{qi}]$.

IV.3.2.2. Synthèse du régulateur flou

Le régulateur flou associé à ce modèle dynamique flou a la même forme que le précédent, et l'application au réseau électrique à 3 machines donne les résultats suivants

• **Régulateur de la machine G1**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{11} Alors $u_{11} = -1.0000 \Delta w_1 + 5.5508 \Delta V_1$

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{12} Alors $u_{12} = -3.1623 \Delta w_1 + 10.0382 \Delta V_1$

Si $\Delta E'_{q1}$ est dans R_{13} Alors $u_{13} = -1.0000 \Delta w_1 + 5.2499 \Delta V_1$

avec R_{11} , R_{12} et R_{13} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{11} , μ_{12} et μ_{13} sont gaussiennes de centres -0.2 , 0.0 , $+0.2$ respectivement et de variance 0.05 .

Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10, 1$ et 10 pour les tris règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

• **Régulateur de la machine G2**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{21} Alors $u_{21} = -3.1623 \Delta w_2 + 11.4825 \Delta V_2$

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{22} Alors $u_{22} = -10.000 \Delta w_2 + 20.1710 \Delta V_2$

Si $\Delta E'_{q2}$ est dans R_{23} Alors $u_{23} = -3.1623 \Delta w_2 + 11.9599 \Delta V_2$

avec R_{21}, R_{22} et R_{23} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{21}, μ_{22} et μ_{23} sont gaussiennes de centres $-0.2, 0.0, +0.2$ respectivement et de variance 0.1 .

Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10, 1$ et 10 pour les tris règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

• **Régulateur de la machine G3**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si $\Delta E'_{q3}$ est dans R_{31} Alors $u_{31} = -3.1623 \Delta w_3 + 10.4391 \Delta V_3$

Si $\Delta E'_{q3}$ est dans R_{32} Alors $u_{32} = -10.0000 \Delta w_3 + 18.1775 \Delta V_3$

Si $\Delta E'_{q3}$ est dans R_{33} Alors $u_{33} = -3.1623 \Delta w_3 + 9.7456 \Delta V_3$

avec R_{31}, R_{32} et R_{33} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{31}, μ_{32} et μ_{33} sont gaussiennes de centres $-0.2, 0.0, +0.2$ respectivement et de variance 0.1 .

Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10, 1$ et 10 pour les tris règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

IV.3.2.3. Résultats de simulation

Les mêmes tests sont appliqués ici, et les résultats de simulation présentés par les figures (IV.10) et (IV.11) montrent qu'en plus du réglage réussi, le rejet des perturbations s'effectue au bout de 1 sec.

Nous constatons que la stabilité transitoire est améliorée par rapport à celle du cas précédent, mais en contre partie les oscillations s'intensifient.

De même, cette méthode donne des résultats semblables à ceux obtenus par l'application de la méthode de Cao *et al.*

Le test de la décentralisation est réalisé (Fig.IV.12)-(Fig.IV.14) et montre que la stabilité transitoire est assurée mais le réglage de la tension terminale est un peu détérioré.

IV.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthode modifiée de celle de Cao *et al.* pour le réglage flou. Dans cette méthode la linéarisation par les dérivées a été remplacée par une quantification de variables d'état qui est combinée avec la logique floue afin d'associer un degré de vérité à chaque valeur de la quantification (fonction d'appartenance).

Nous avons tout d'abord exposé les éléments mathématiques nécessaires permettant d'avoir une formulation adéquate du système qui aboutit à une quantification jointe à la logique floue.

Cette technique de commande floue a été présentée pour un système simple, ensuite généralisée pour le cas des systèmes complexes, en gardant le même raisonnement.

Pour l'application de cette méthode sur les réseaux électriques, nous avons donné deux approches: la première n'assure le réglage de la tension terminale que par le biais d'un PI flou et la deuxième approche est obtenue à partir de la première en utilisant une petite astuce qui nous a permis d'éviter l'usage du PI flou.

Par les résultats obtenus, nous avons constaté que la décentralisation a conduit à la réduction du nombre de règles floues utilisées qui est de trois règles par régulateur.

Les résultats de la simulation montrent les performances des deux approches, à savoir: assurance de la stabilité transitoire, réglage de la tension terminale et la décentralisation de la commande.

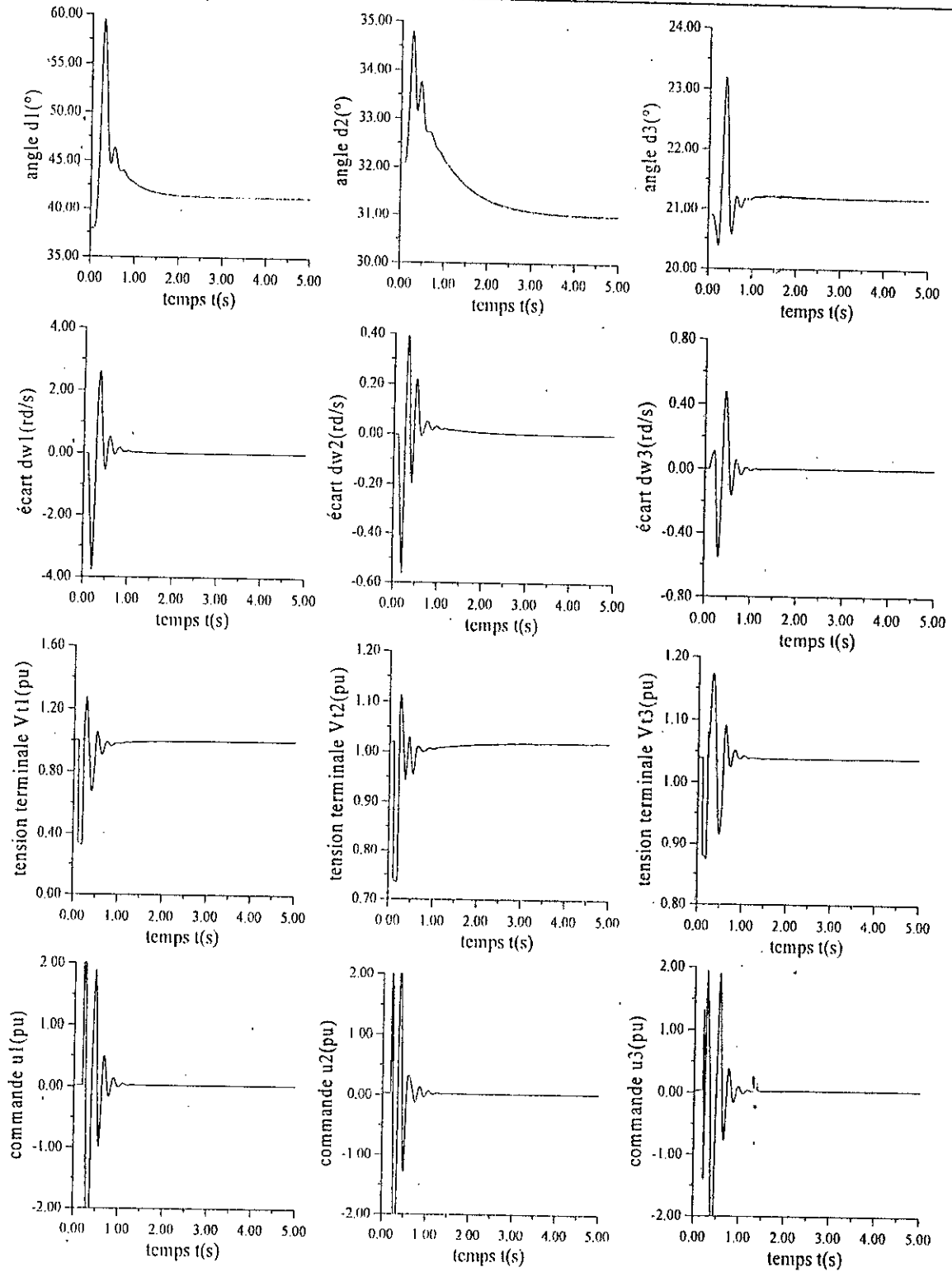


Fig.IV.10 Réseau électrique à 3 machine avec un court-circuit triphasé (deuxième approche).

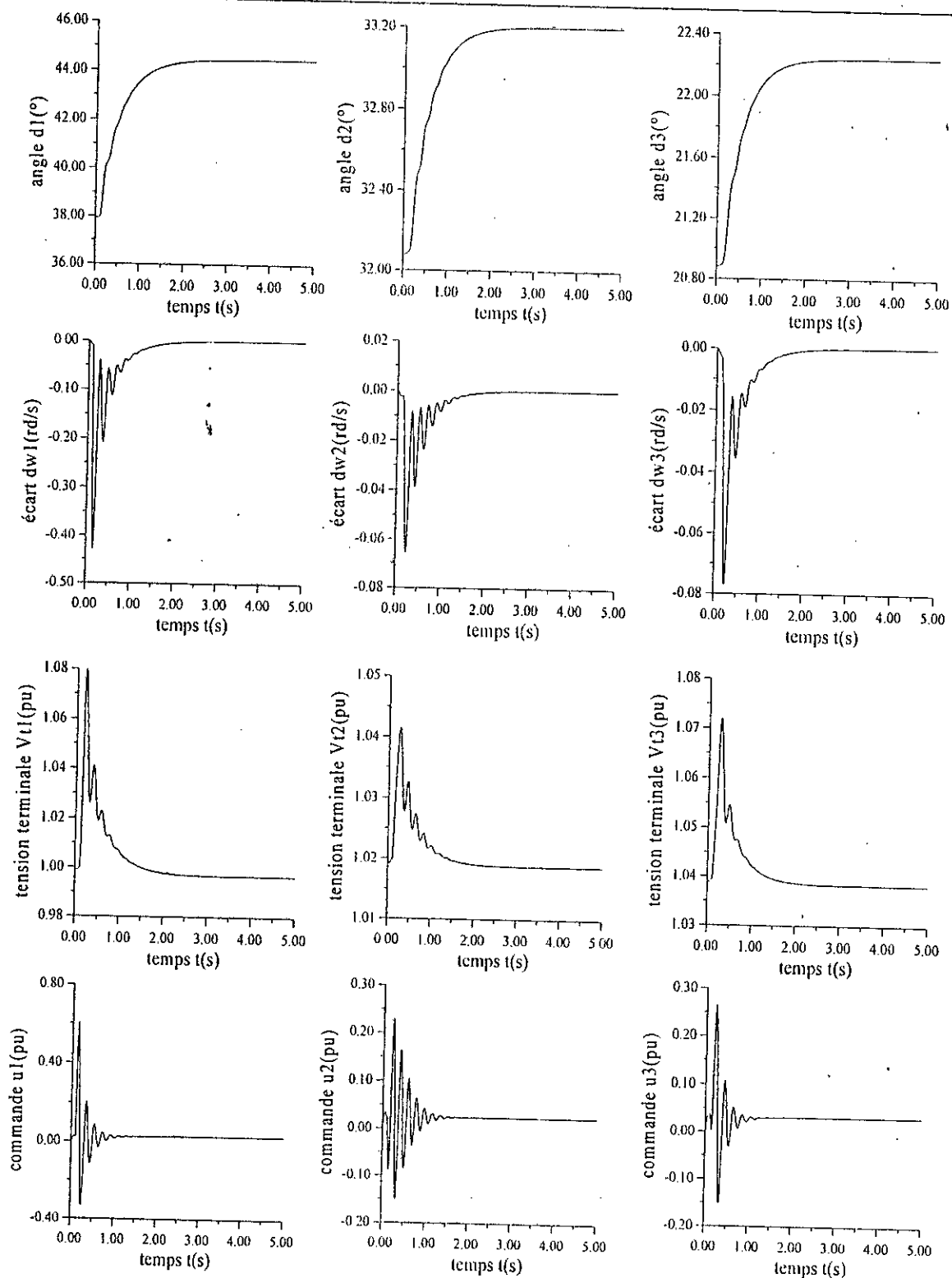


Fig.IV.11 Réseau électrique à 3 machines avec un accroissement de 20% de la puissance mécanique (deuxième approche).

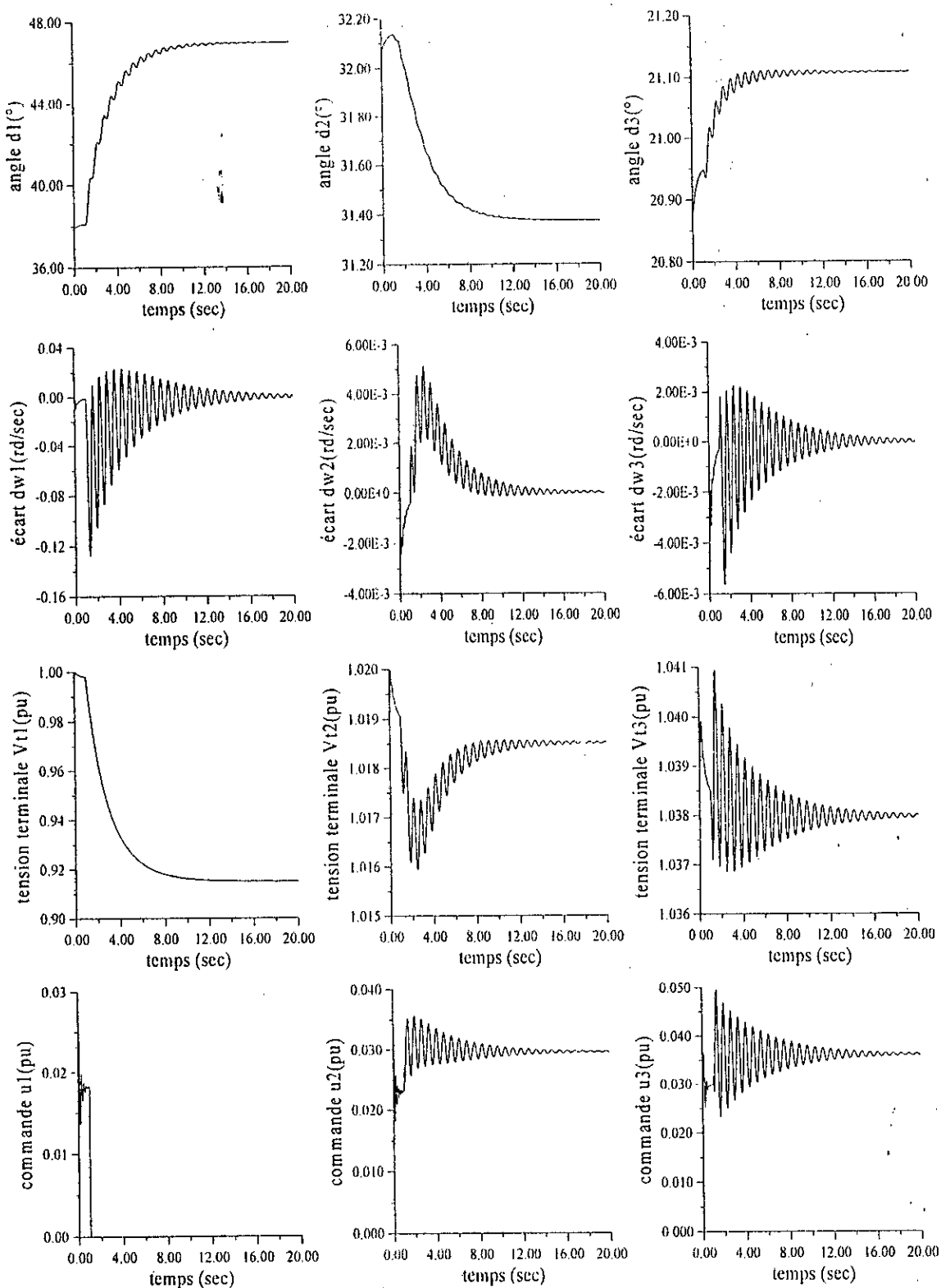


Fig.IV.12 Réseau électrique à 3 machines, Test de défaillance du régulateur du 1^{er} sous-système.

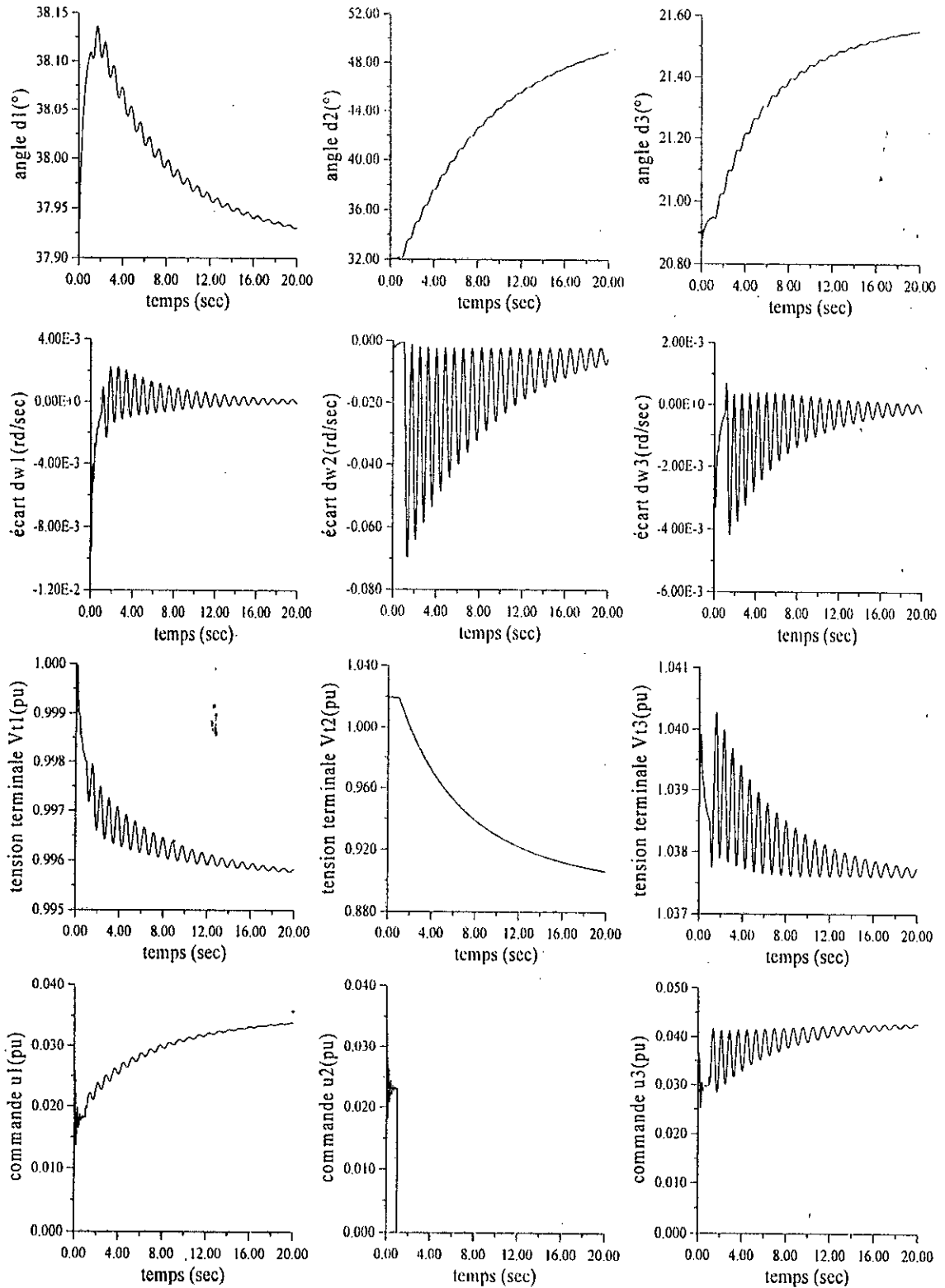


Fig.IV.13 Réseau électrique à 3 machines, Test de défaillance du régulateur du 2^{ème} sous-système.

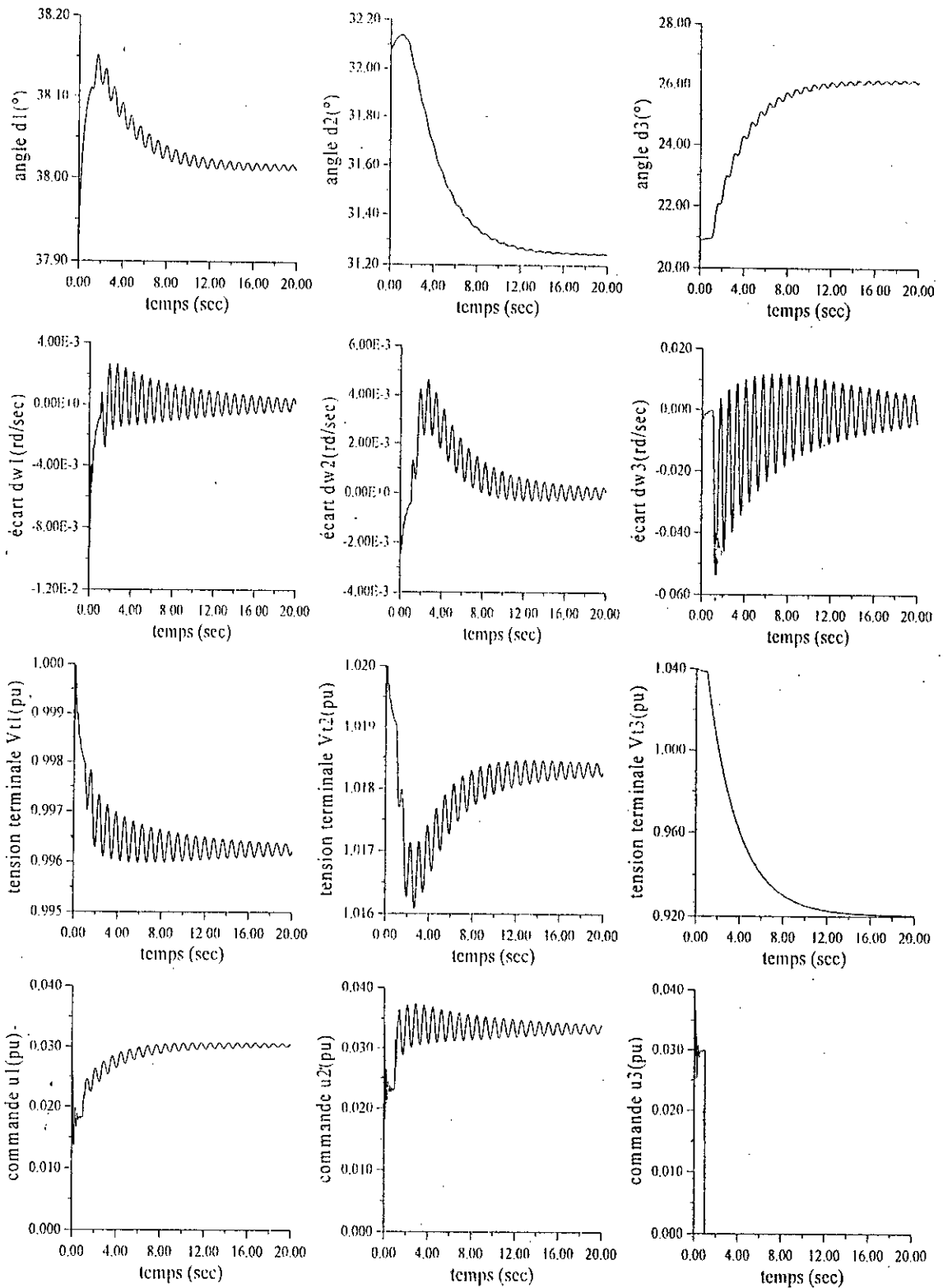


Fig.IV.14 Réseau électrique à 3 machines, Test de défaillance du régulateur du 3^{ème} sous-système.

COMMANDE FLOUE MULTI-MODELE
A MODELES LOCAUX LINEAIRES
PAR QUANTIFICATION GENERALISEE

CHAPITRE V

COMMANDE FLOUE MULTI-MODELE A MODELES LOCAUX LINEAIRES PAR QUANTIFICATION GENERALISEE

V.1. INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la méthode de la quantification des variables d'état pour obtenir des modèles linéaires locaux dans des régions de l'espace d'état préalablement données. Dans ce chapitre, nous allons généraliser cette méthode pour quantifier des fonctions de variables d'état au lieu de quantifier ces mêmes variables, ce qui permet de construire un modèle flou dont les prémisses des règles floues seront basées sur ces fonctions.

L'objectif de cette méthode est d'exploiter la forme du modèle non linéaire du système pour réduire le nombre de règles floues nécessaires pour la construction d'un modèle flou pour ce système.

Ainsi, la décentralisation est utilisée pour réduire le nombre de règles floues nécessaires pour le modèle flou du système. Celui-ci sera utilisé pour la synthèse des régulateurs flous décentralisés par la technique de la commande multi-modèle.

Dans ce qui suit, nous allons présenter la généralisation de la quantification pour des fonctions de variables d'état. Nous présenterons d'abord le cas d'une fonction non linéaire quelconque, ensuite nous passerons au cas d'un système non linéaire simple et enfin au cas d'un système complexe (décentralisation).

Nous proposerons deux approches dont la première nécessite un PI flou.

Chaque approche sera appliquée à deux types de réseaux électriques et ses performances seront évaluées par des simulations et des commentaires.

V.2. LINEARISATION PAR QUANTIFICATION GENERALISEE

Nous passons maintenant à l'exposition de la généralisation de la méthode de quantification. D'abord, soit f une fonction non linéaire

$$y = f(x) \quad (\text{V.1})$$

supposons qu'il existe deux fonctions g et h telles que

$$f = h \circ g \quad (\text{V.2})$$

De cette manière, nous aurons

$$y = f(x) = (h \circ g)(x) = h(g(x)) \quad (\text{V.3})$$

et en posant

$$z = g(x) \quad (V.4)$$

nous aurons

$$y = h(z) \quad (V.5)$$

Le passage de la fonction f vers la fonction h est justifié par le fait que $h(z)$ est plus simple que $f(x)$. par exemple, si f est définie par

$$y = f(x_1, x_2) = (x_1 \cdot x_2 + 1) \cdot \sin\left(\frac{x_1 \cdot x_2}{\sqrt{(x_1 \cdot x_2)^2 + 1}}\right) \quad (V.6)$$

Nous pouvons choisir g et h comme suit

$$\begin{aligned} z &= g(x_1, x_2) = x_1 \cdot x_2 \\ y &= h(z) = (z + 1) \cdot \sin\left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + 1}}\right) \end{aligned} \quad (V.7)$$

Nous constatons bien, dans cet exemple, que h est plus simple que f , car h est une fonction à une seule variable alors que f est à deux variables. Donc, quantifier la variable z est plus simple que quantifier x_1 et x_2 à la fois et ceci réduit le nombre de points considérablement. Nous avons généralement $\dim z < \dim x$.

Par la quantification de la variable z , donc de la fonction g telle que $z=g(x)$, nous aurons (voir chapitre IV)

$$\exists \varphi_i^{(h)} / f(x) = h(z) = \sum_{i=0}^n \varphi_i^{(h)}(z) \cdot h(b_i) \quad (V.8)$$

avec $b_i = z_1 + i \cdot b$ et $b = (z_2 - z_1) / n$, $z \in I_z = [z_1, z_2]$ et $n \in \mathbb{N}^*$.

De plus, nous avons

$$\sum_{i=0}^n \varphi_i^{(h)}(z) = 1, \quad z \in I_z \quad (V.9)$$

• Système simple

Soit le système dynamique non linéaire suivant

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (V.10)$$

Supposons qu'il existe deux fonctions g (généralement à plusieurs variables) et h , telles que $f(x)$ peut s'écrire sous la forme suivante

$$\begin{aligned} f(x, u) &= h(x, u, g(x)) \\ &= h_1(g(x))x + h_2(g(x))u + h_3(g(x)) \end{aligned} \quad (V.11)$$

Posons $z=g(x)$, nous aurons donc

$$f(x, u) = h_1(z) \cdot x + h_2(z) \cdot u + h_3(z) \quad (V.12)$$

Décomposons l'espace des vecteurs z en des régions R_l , $l=1, \dots, m$ ayant des fonctions d'appartenance μ_l , $l=1, \dots, m$. Calculons $A_l=h_1(z_l)$, $B_l=h_2(z_l)$ et $C_l=h_3(z_l)$ pour $z_l \in R_l$ avec $\mu_l(z_l)=1$, $l=1, \dots, m$. Nous aurons ainsi m modèles linéaires

$$\dot{x} = A_l x + B_l u + C_l, \quad l=1, \dots, m \quad (V.13)$$

Il existe des fonctions d'appartenance en forme de cloche $\mu_l(z)$, $l=1, \dots, m$, qui permettent d'avoir (voir l'annexe A.4)

$$h_1(z) \approx \sum_{l=1}^m A_l \cdot \mu_l(z), \quad h_2(z) \approx \sum_{l=1}^m B_l \cdot \mu_l(z) \quad \text{et} \quad h_3(z) \approx \sum_{l=1}^m C_l \cdot \mu_l(z) \quad (V.14)$$

De (V.11), (V.12), (V.13) et (V.14), nous pouvons construire le modèle dynamique flou suivant

$$\begin{aligned} \text{Si } z \text{ est dans } R_l \quad \text{Alors} \quad \dot{x} = f(x, u) = A_l \cdot x + B_l \cdot u + C_l \\ l=1, \dots, m \end{aligned} \quad (V.15)$$

• **Système complexe**

Soit le système dynamique non linéaire

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (V.16)$$

Supposons que ce système peut être décomposé en r sous-systèmes interconnectés, nous aurons donc $x^T = [x_1^T \ x_2^T \ \dots \ x_r^T]$ et $u^T = [u_1^T \ u_2^T \ \dots \ u_r^T]$. De plus considérons les vecteurs $X_i^T = [x_i^T \ \dots \ x_{i-1}^T \ x_{i+1}^T \ \dots \ x_r^T]$, $i=1, \dots, r$. La forme décentralisée du système précédent sera

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, u_i, X_i) \quad i=1, \dots, r \quad (V.17)$$

Supposons qu'il existe des fonctions g_i (généralement à plusieurs variables) et h_i telles que $f_i(x_i)$ peut s'écrire sous la forme suivante

$$\begin{aligned} f_i(x_i, u_i, X_i) = h_i(x_i, u_i, g_i(x_i, X_i)) \\ \frac{1}{3} h_{i1}(g_i(x_i, X_i))x_i + h_{i2}(g_i(x_i, X_i))u_i + h_{i3}(g_i(x_i, X_i), X_i) \end{aligned} \quad (V.18)$$

Si la fonction g_i est obtenue par des mesures directes elle peut être dépendante de X_i , sinon (i.e. calculée à partir de x_i) elle sera choisie indépendante de X_i .

Posons $z_i = g_i(x_i, X_i)$, nous aurons donc

$$f_i(x_i, u_i, X_i) = h_{i1}(z_i) \cdot x_i + h_{i2}(z_i) \cdot u_i + h_{i3}(z_i) \quad (V.19)$$

Décomposons l'espace des vecteurs z_i en des régions R_{il} , $l=1, \dots, m_i$, $i=1, \dots, r$, ayant des fonctions d'appartenance μ_{il} , $l=1, \dots, m_i$, $i=1, \dots, r$. Calculons $A_{il}=h_{i1}(z_{il})$, $B_{il}=h_{i2}(z_{il})$ et

$C_{il}=h_{i3}(z_{il})$ pour $z_{il} \in R_{il}$ avec $\mu_{il}(z_{il})=1$, $l=1, \dots, m_b$, $i=1, \dots, r$. Nous aurons ainsi les modèles linéaires

$$\dot{x}_i = A_{il}x_i + B_{il}u_i + C_{il}, \quad l=1, \dots, m_b, \quad i=1, \dots, r \quad (V.20)$$

Il existe des fonctions d'appartenance en forme de cloche $\mu_{il}(z)$, $l=1, \dots, m_b$, $i=1, \dots, r$, qui permettent d'avoir (voir l'annexe A.4)

$$\begin{aligned} h_{i1}(z_i) &\approx \sum_{l=1}^{m_b} A_{il} \cdot \mu_{il}(z_i), \\ h_{i2}(z_i) &\approx \sum_{l=1}^{m_b} B_{il} \cdot \mu_{il}(z_i) \quad \text{et} \\ h_{i3}(z_i) &\approx \sum_{l=1}^{m_b} C_{il} \cdot \mu_{il}(z_i) \end{aligned} \quad (V.21)$$

De (V.18), (V.19), (V.20) et (V.21), nous pouvons construire le modèle dynamique flou suivant

$$\begin{aligned} \text{SI } z_i \text{ est dans } R_{il} \text{ Alors } \quad \dot{x}_i &= A_{il} \cdot x_i + B_{il} \cdot u_i + C_{il} \\ & \quad l=1, \dots, m_b, \quad i=1, \dots, r \end{aligned} \quad (V.22)$$

V.3. APPLICATION ET SIMULATION

V.3.1. Première approche

Les variables d'état utilisées pour le modèle dynamique flou du sous-système i , $i=1, \dots, r$ (i.e. le générateur G_b , $i=1, \dots, r$) et pour son régulateur flou associé sont l'erreur $\Delta w_i = w_i - w_0$, et l'erreur $\Delta E_{qi} = E'_{qi} - E'_{qi0}$. De plus, l'erreur $\Delta V_i = V_{li} - V_{ci}$ et son accroissement $c\Delta V_i$ seront utilisés pour un PI flou assurant l'annulation de ΔV_i . Aussi, les courants I_{di} et I_{qi} sont pris en considération. Il faut, donc, trouver les équations d'état en ces variables à partir de celles données au chapitre I.

Dans cette approche nous allons utiliser un régulateur flou multi-modèle pour assurer le réglage de la fréquence (donc de la vitesse) et puisque ce régulateur n'assure pas le réglage de la tension terminale (existence de l'erreur statique) nous ferons recours au PI flou.

Dans le schéma bloc qui suit, le bloc nommé ANNUL a pour but l'annulation de l'effet du courant I_{di} , et sa sortie est donnée par $(x_{di} - x_{di}')I_{di}/k_{ci}$.

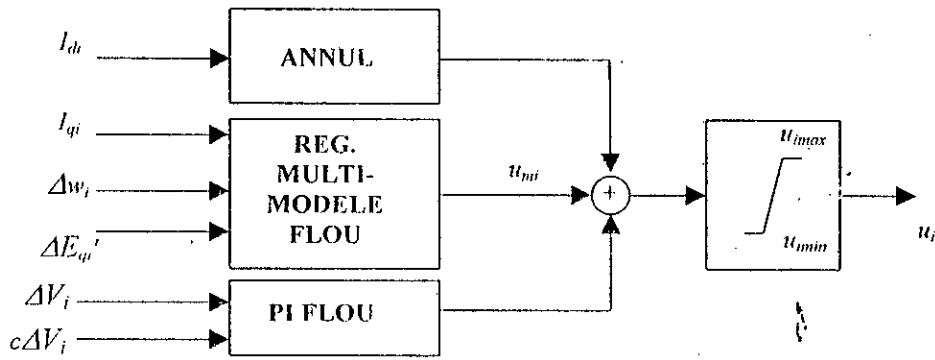


Fig.V.1 Schéma du régulateur flou pour le sous-système i (première approche).

V.3.1.1. Application

En observant le modèle non linéaire du générateur G_i , nous remarquons que le courant I_{qi} est une fonction de variables d'état, et une fois quantifiée en \bar{I}_{qi} dans les régions R_{il} , $l=1, \dots, m_i$, $i=1, \dots, r$, conduit directement aux modèles linéaires locaux (A_{il}, B_{il}) suivants:

$$A_{il} = \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{2H_i} & -\frac{w_{\theta}}{2H_i} \cdot (\bar{I}_{qi}) \\ 0 & -\frac{1}{T'_{doi}} \end{bmatrix} \quad (V.23)$$

$$B_{il} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_{ci}}{T'_{doi}} \end{bmatrix}$$

et le modèle flou sera:

$$SI \ I_{qi} \text{ est dans } R_{il} \quad Alors \quad \dot{x}_i = f_i(x_i, u_i, X_i) = A_{il} \cdot x_i + B_{il} \cdot u_i + C_{il} \quad (V.24)$$

avec C_{il} , $l=1, \dots, m_i$, $i=1, \dots, r$, correspondent aux termes restants et $x_i = [\Delta w_i \ \Delta E_{qi}]^T$.

V.3.1.2. Synthèse des régulateurs flous

Le régulateur flou associé à ce modèle dynamique flou est donné par:

$$SI \ I_{qi} \text{ est dans } R_{il} \quad Alors \quad u_{mi} = K_{il} \cdot x_i \quad (V.25)$$

avec $l=1, \dots, m_i$, $i=1, \dots, r$ et la commande appliquée sera calculée comme suit:

$$u_{mi} = K_i(\mu_i)x_i = \left[\sum_{l=1}^{m_i} \mu_{il} K_{il} \right] \cdot x_i \quad (V.26)$$

avec K_{il} , $l=1, \dots, m_i$, $i=1, \dots, r$, les gains de retour d'état calculés pour les modèles linéaires locaux dans les régions R_{il} , $l=1, \dots, m_i$, $i=1, \dots, r$ par la technique LQ.

A. Réseau électrique à 2 machines

• **Régulateur de la machine G1**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si I_{q1} est dans R_{11} Alors $u_{11} = -7.6925 \Delta w_1 + 32.8148 \Delta E'_{q1}$

Si I_{q1} est dans R_{12} Alors $u_{12} = -8.3518 \Delta w_1 + 33.6015 \Delta E'_{q1}$

Si I_{q1} est dans R_{13} Alors $u_{13} = -8.7070 \Delta w_1 + 34.3783 \Delta E'_{q1}$

Avec R_{11} , R_{12} et R_{13} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{11} , μ_{12} et μ_{13} sont gaussiennes de centres 0.2, 0.3, 0.4 respectivement et de variance 0.05.

Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=1$ et

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$$

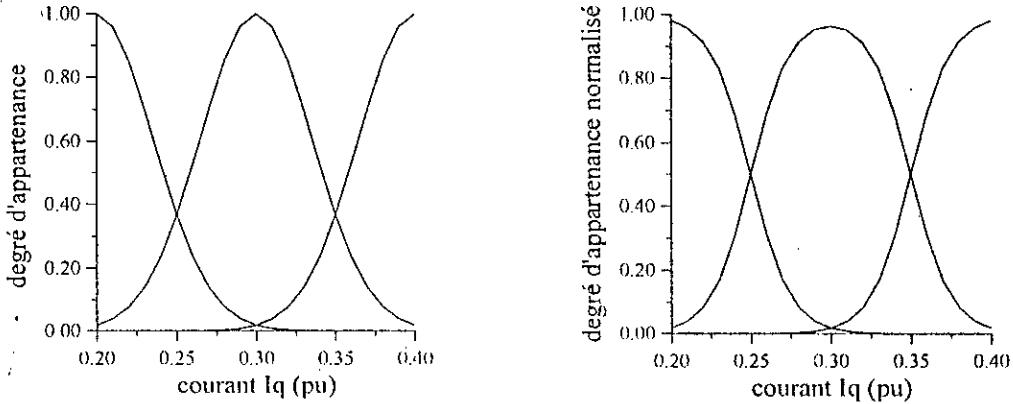


Fig.V.2 Fonctions d'appartenance du 1^{er} régulateur multi-modèle flou.

Le régulateur PI flou est donné par les règles:

| $\Delta V_1 \backslash c\Delta V_1$ | N | Z | P |
|-------------------------------------|-------|-------|------|
| N | -0.06 | -0.05 | 0.00 |
| Z | -0.05 | 0.00 | 0.05 |
| P | 0.00 | 0.05 | 0.06 |

Avec N , Z et P sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1, 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59.

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.01$ et $g_2=0.001$ pour ΔV_1 et $c\Delta V_1$ respectivement.

• **Régulateur de la machine G2**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si I_{q2} est dans R_{21} Alors $u_{21} = -29.2579 \Delta w_2 + 102.7293 \Delta E'_{q2}$

Si I_{q2} est dans R_{22} Alors $u_{22} = -30.0025 \Delta w_2 + 104.2201 \Delta E'_{q2}$

Avec R_{21} , R_{22} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{21} , μ_{22} sont gaussiennes de centres 0.4, 0.6 respectivement et de variance 0.07. Les gains de retour

d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=I$ et $Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 10000 \end{bmatrix}$.

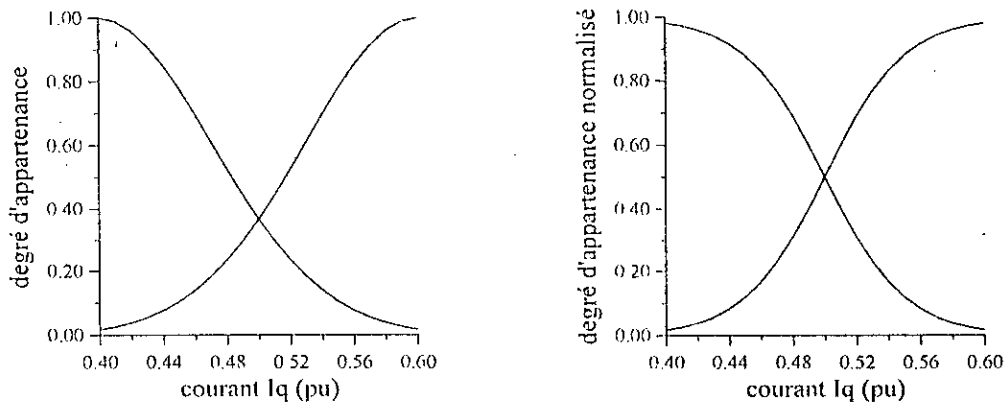


Fig.V.3 Fonctions d'appartenance du 2^{ème} régulateur multi-modèle flou.

Le régulateur PI flou est donné par les règles

| $\Delta V_2 \setminus c\Delta V_2$ | N | Z | P |
|------------------------------------|-------|------|------|
| N | -0.12 | -0.1 | 0.00 |
| Z | -0.1 | 0.00 | 0.1 |
| P | 0.00 | 0.1 | 0.12 |

Avec N , Z et P sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1, 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59.

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.01$ et $g_2=0.001$ pour ΔV_2 et $c\Delta V_2$ respectivement.

B. Réseau électrique à 3 machines

• **Régulateur de la machine G1**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si I_{q1} est dans R_{11} Alors $u_{11} = -10.000 \Delta w_1 + 10.4896 \Delta E'_{q1}$

Si I_{q1} est dans R_{12} Alors $u_{12} = -10.000 \Delta w_1 + 16.7428 \Delta E'_{q1}$

Si I_{q1} est dans R_{13} Alors $u_{13} = -10.000 \Delta w_1 + 19.7187 \Delta E'_{q1}$

avec R_{11} , R_{12} et R_{13} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{11} , μ_{12} et μ_{13} sont gaussiennes de centres 0.4, 1.0, 1.4 respectivement et de variance 0.25.

Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=I$. Les gains

de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=I$ et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

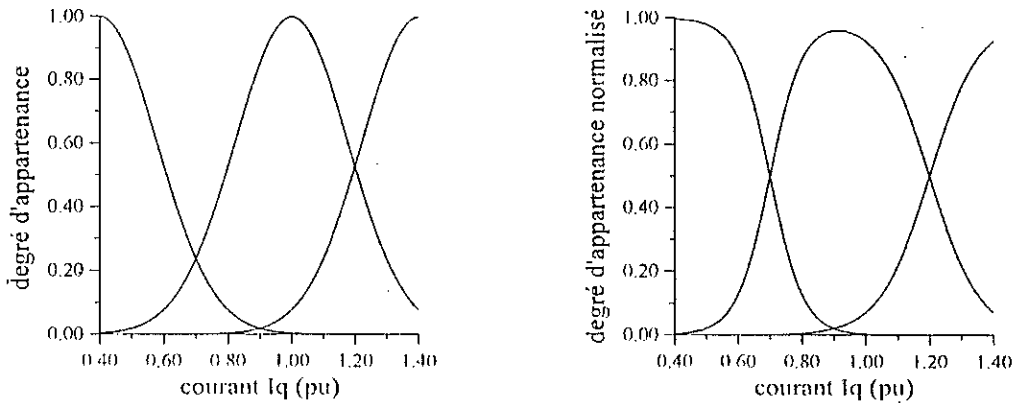


Fig.V.4 Fonctions d'appartenance du 1^{er} régulateur multi-modèle flou.

Le régulateur PI flou est donné par les règles

| $\Delta V_1 \setminus c\Delta V_1$ | N | Z | P |
|------------------------------------|--------|--------|-------|
| N | -0.030 | -0.025 | 0.00 |
| Z | -0.025 | 0.00 | 0.025 |
| P | 0.00 | 0.025 | 0.030 |

avec N , Z et P sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1, 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59.

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.01$ et $g_2=0.001$ pour ΔV_1 et $c\Delta V_1$ respectivement.

• **Régulateur de la machine G2**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes

Si I_{q2} est dans R_{21} Alors $u_{21} = -31.6228 \Delta w_2 + 28.2567 \Delta E'_{q2}$

Si I_{q2} est dans R_{22} Alors $u_{22} = -31.6228 \Delta w_2 + 33.8897 \Delta E'_{q2}$

Si I_{q2} est dans R_{23} Alors $u_{23} = -31.6228 \Delta w_2 + 38.7125 \Delta E'_{q2}$

avec R_{21} , R_{22} et R_{23} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{21} , μ_{22} et μ_{23} sont gaussiennes de centres 0.6 , 0.9 , 1.2 respectivement et de variance 0.15 . Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=1$ et

$$Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$$

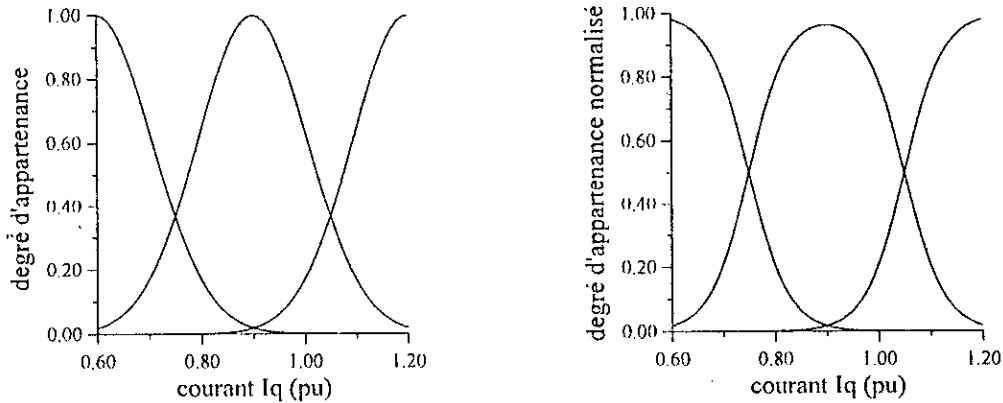


Fig.V.5 Fonctions d'appartenance du 2^{ème} régulateur multi-modèle flou.

Le régulateur PI flou est donné par les règles

| $\Delta V_2 \setminus c\Delta V_2$ | N | Z | P |
|------------------------------------|----------|----------|---------|
| N | -0.030 | -0.025 | 0.00 |
| Z | -0.025 | 0.00 | 0.025 |
| P | 0.00 | 0.025 | 0.030 |

avec N , Z et P sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1 , 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59 .

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.1$ et $g_2=0.01$ pour ΔV_2 et $c\Delta V_2$ respectivement.

• **Régulateur de la machine G3**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes

Si I_{q3} est dans R_{31} Alors $u_{31} = -10.000 \Delta w_3 + 7.8656 \Delta E'_{q3}$

Si I_{q3} est dans R_{32} Alors $u_{32} = -10.000 \Delta w_3 + 11.8511 \Delta E'_{q3}$

Si I_{q3} est dans R_{33} Alors $u_{33} = -10.000 \Delta w_3 + 14.8032 \Delta E'_{q3}$

avec R_{31} , R_{32} et R_{33} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{31} , μ_{32} et μ_{33} sont gaussiennes de centres 0.2 , 0.5 , 0.8 respectivement et de variance 0.15 .

Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=1$ et

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$$

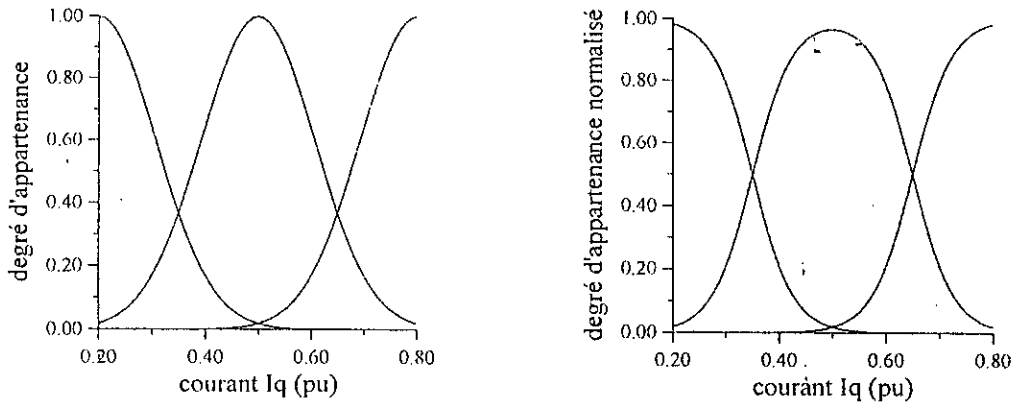


Fig.V.6 Fonctions d'appartenance du 3^{ème} régulateur multi-modèle fluu.

Le régulateur PI flou est donné par les règles

| $\Delta V_3 \setminus c\Delta V_3$ | N | Z | P |
|------------------------------------|--------|--------|-------|
| N | -0.030 | -0.025 | 0.00 |
| Z | -0.025 | 0.00 | 0.025 |
| P | 0.00 | 0.025 | 0.030 |

avec N , Z et P sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance gaussiennes de centres: -1 , 0 et 1 respectivement et de variance égale à 0.59 .

Les gains de normalisation utilisés pour ce PI flou sont $g_1=0.01$ et $g_2=0.001$ pour ΔV_3 et $c\Delta V_3$ respectivement.

V.3.1.3. Résultats de simulation

Pour voir les performances des régulateurs synthétisés, nous avons effectué les mêmes tests sur les deux réseaux électriques.

Les résultats de simulation présentés par les figures (V.7)-(V.10) montrent que le réglage de la tension terminale est obtenu ainsi que la stabilité transitoire est assurée, et comme nous pouvons le voir la perturbation est rejetée au bout de 1 à 2 sec.

Nous remarquons aussi que la commande bascule rapidement entre ses valeurs extrêmes pour se stabiliser enfin sur la valeur adéquate, et ceci assure la rapidité du réglage mais entraîne des oscillations dont l'effet peut se répercuter sur le résultat comme nous pouvons bien le voir sous l'effet de l'accroissement de la puissance mécanique (Fig.V.8 et Fig.V.10).

Le test de la décentralisation de la commande est réalisé par un court-circuit au niveau d'une station de commande locale ce qui donne un commande nulle. La simulation (Fig.V.11)-(Fig.V.13) montre que malgré la défaillance d'une station de commande locale le système se stabilise au bout de 20 secondes assurant une bonne fréquence mais les tensions terminales sont un peu affectées par ce test.

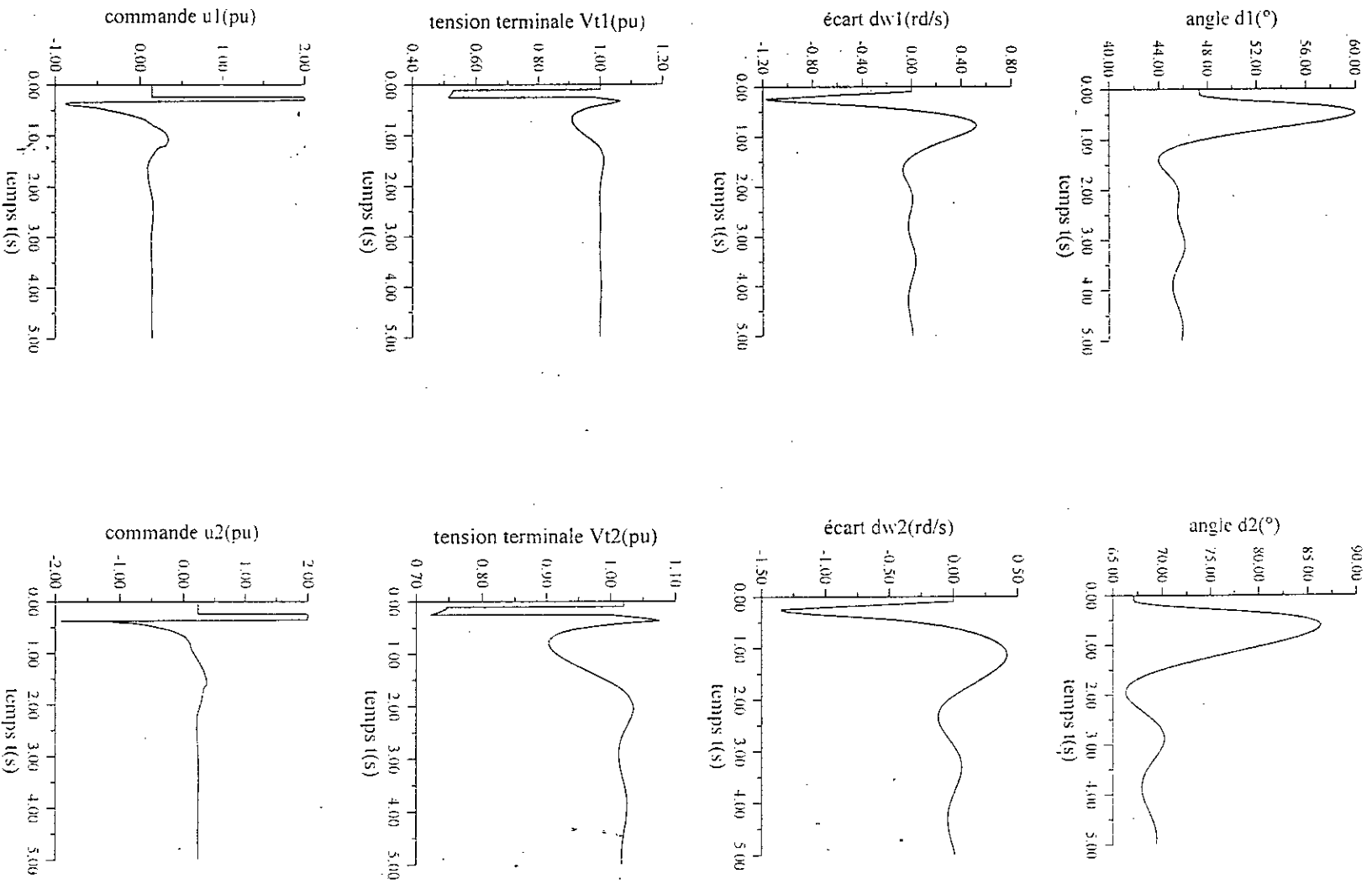


Fig. V.7 Réseau électrique à 2 machines avec un court-circuit triphasé (première approche).

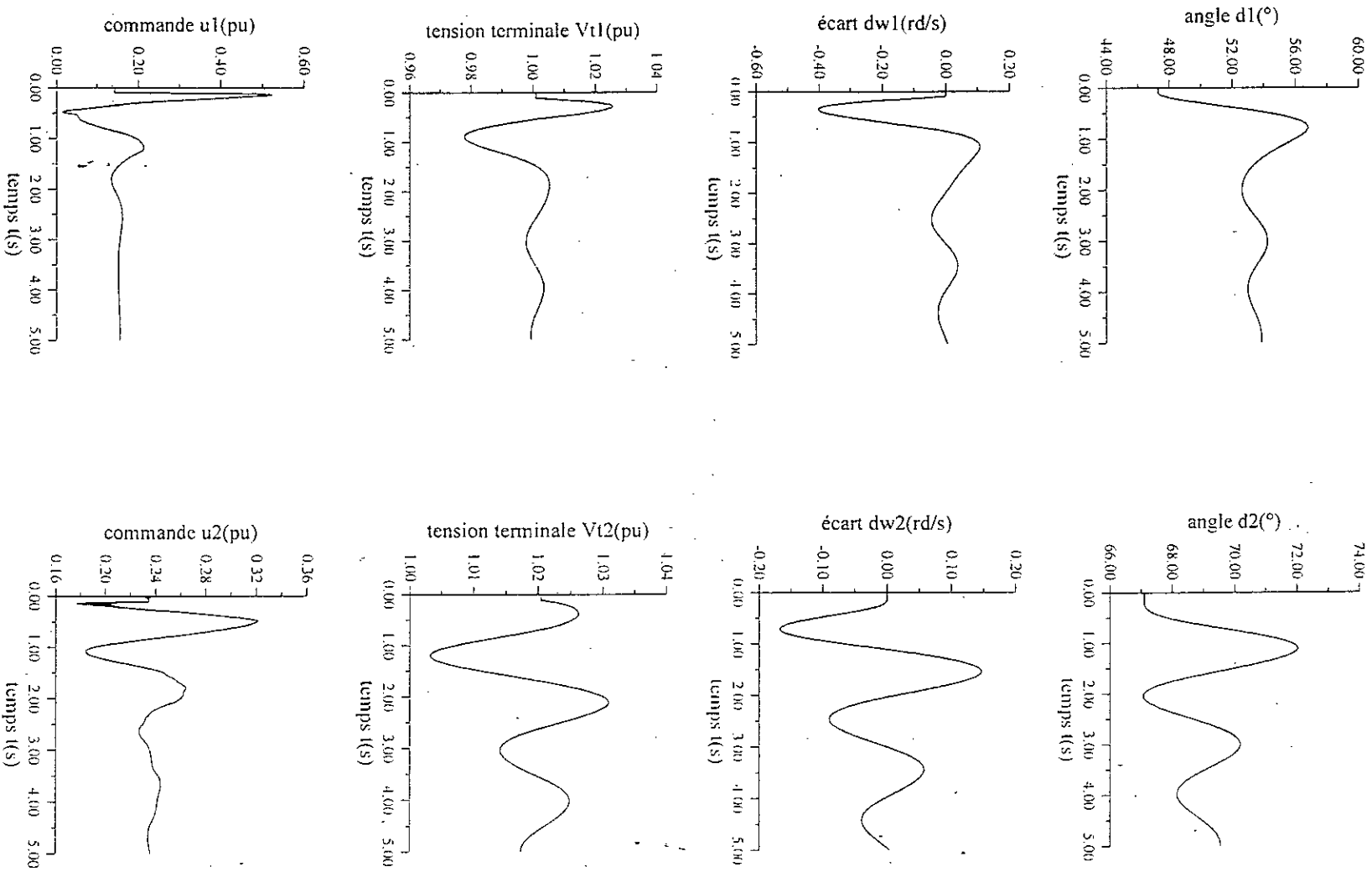


Fig. V. 8 Réseau électrique à 2 machines avec un accroissement de 20% de la puissance mécanique (première approche).

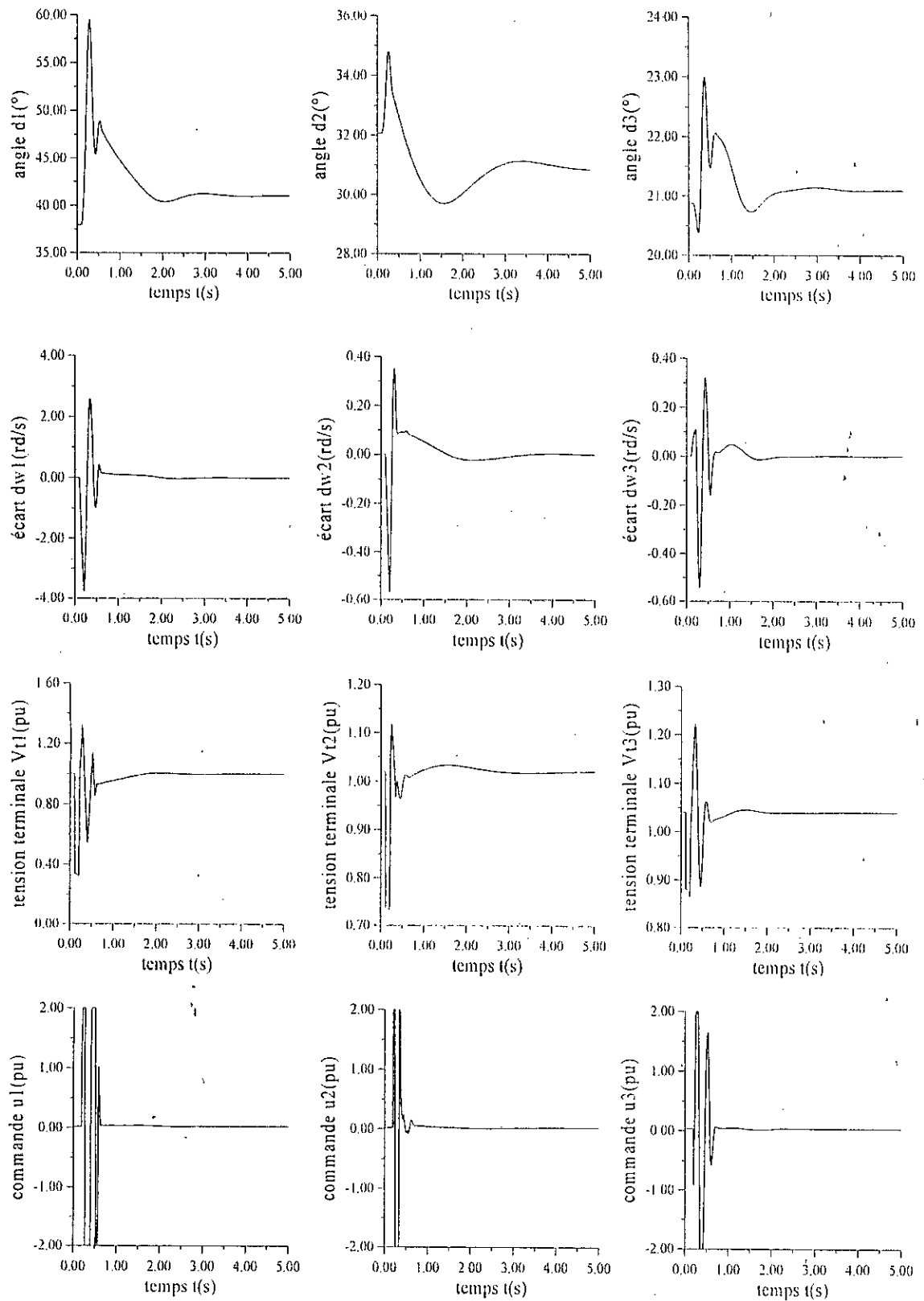


Fig.V.9 Réseau électrique à 3 machines avec un court-circuit triphasé (première approche).

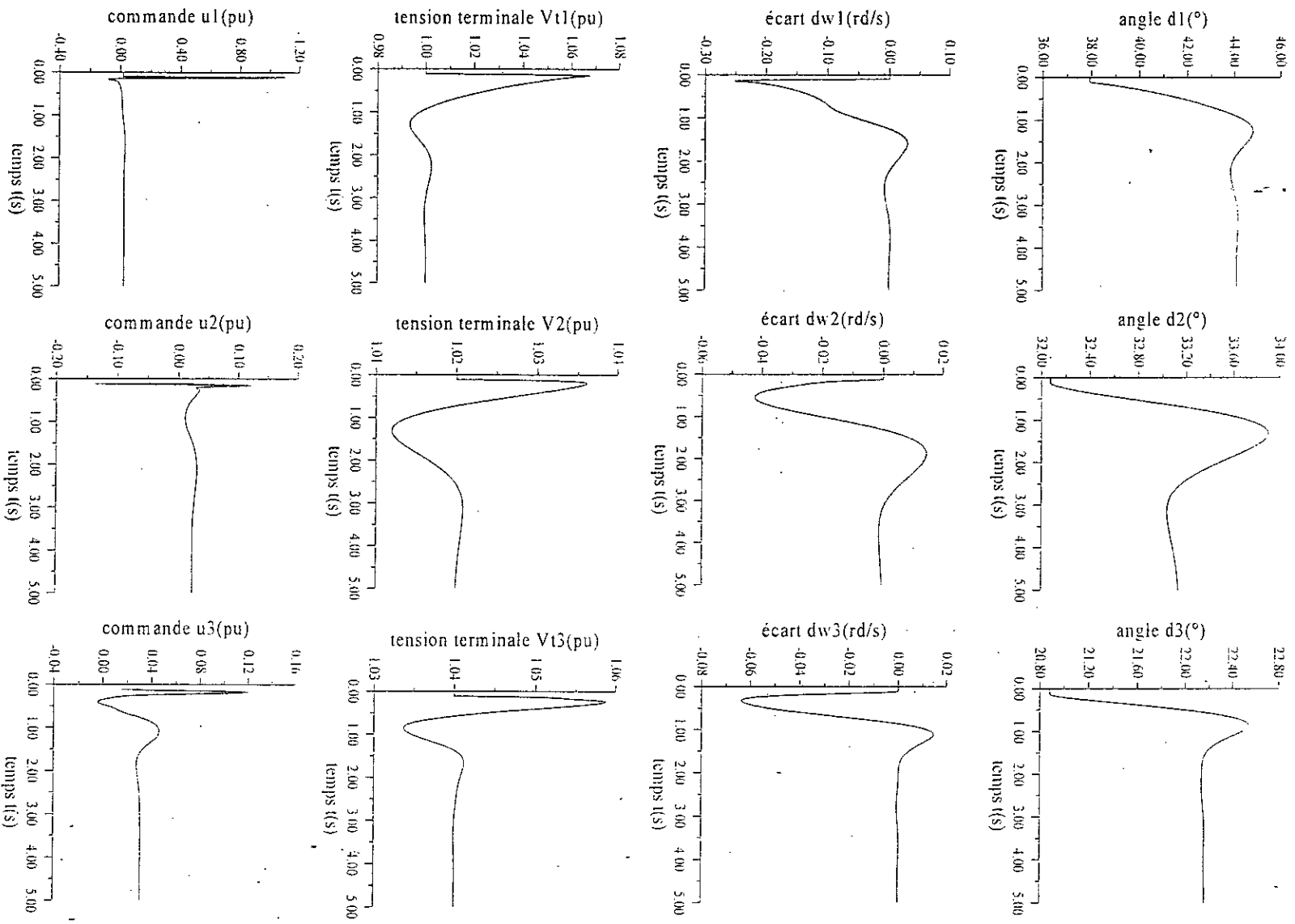


Fig. V.10 Réseau électrique à 3 machines avec un accroissement de 20% de la puissance mécanique (première approche).

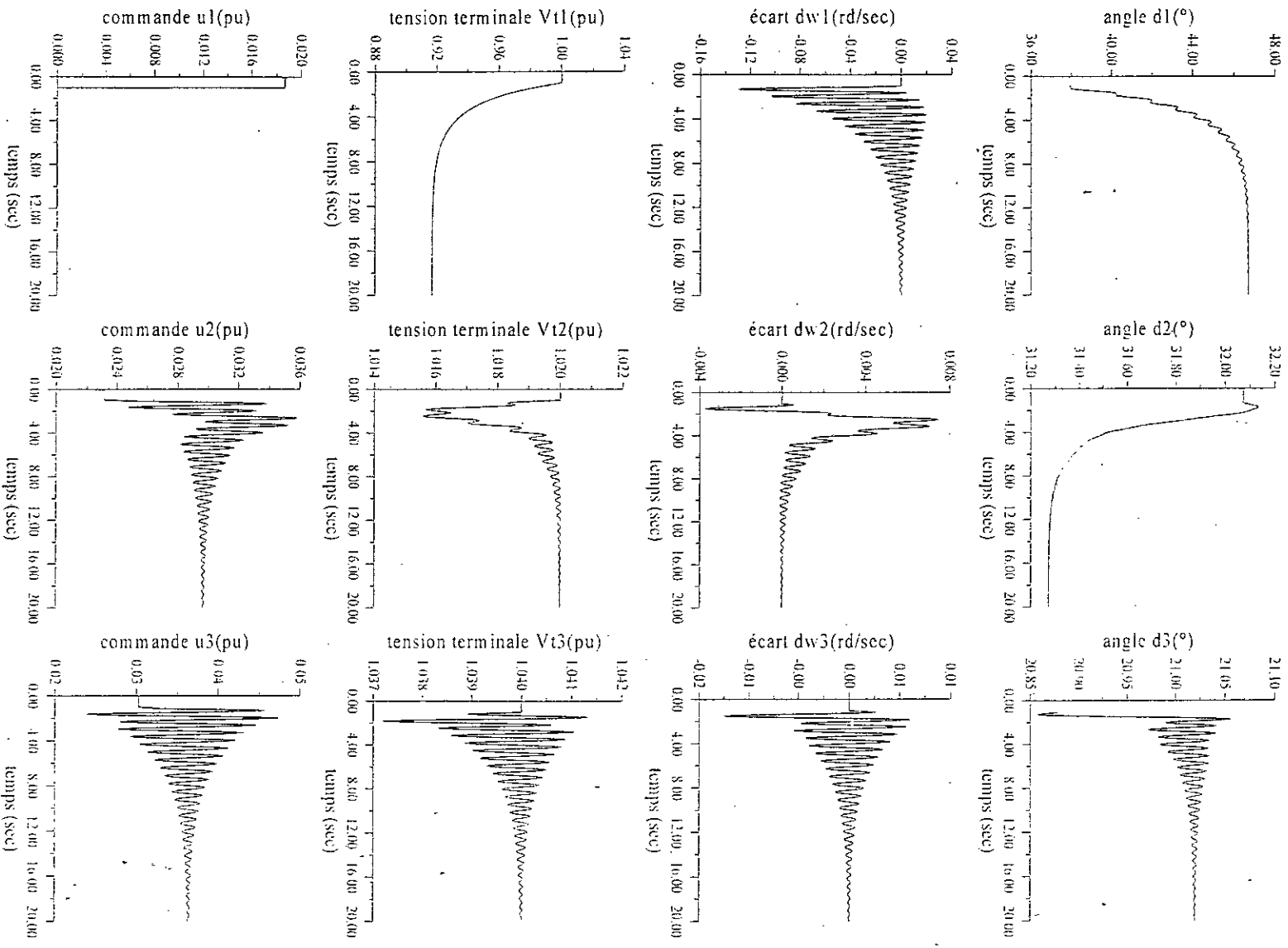


Fig. V.11 Réseau électrique à 3 machines, test de défaillance du régulateur du 1^{er} sous-système.

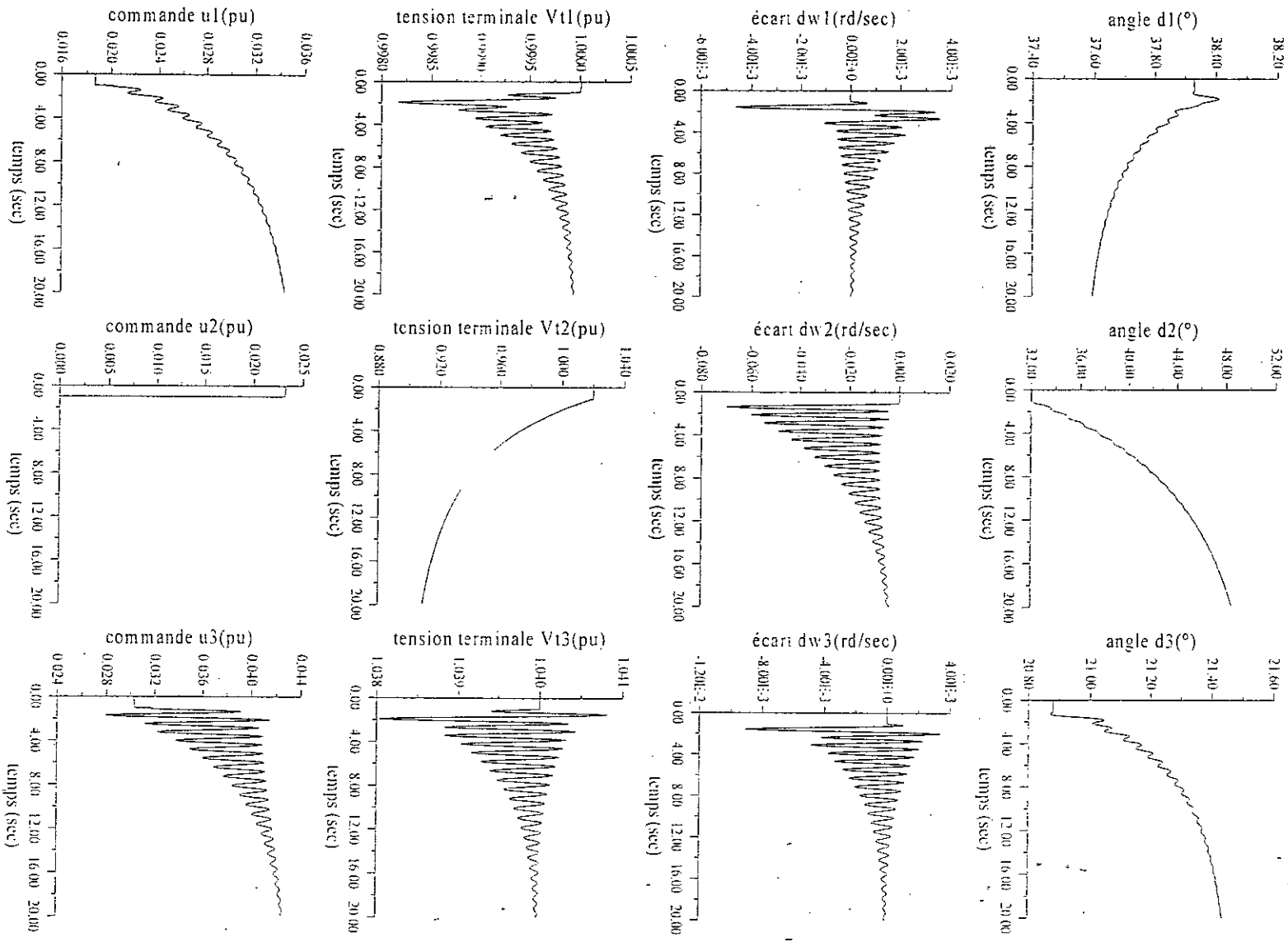


Fig. V.12 Réseau électrique à 3 machines, test de défaillance du régulateur du 2^{ème} sous-système.

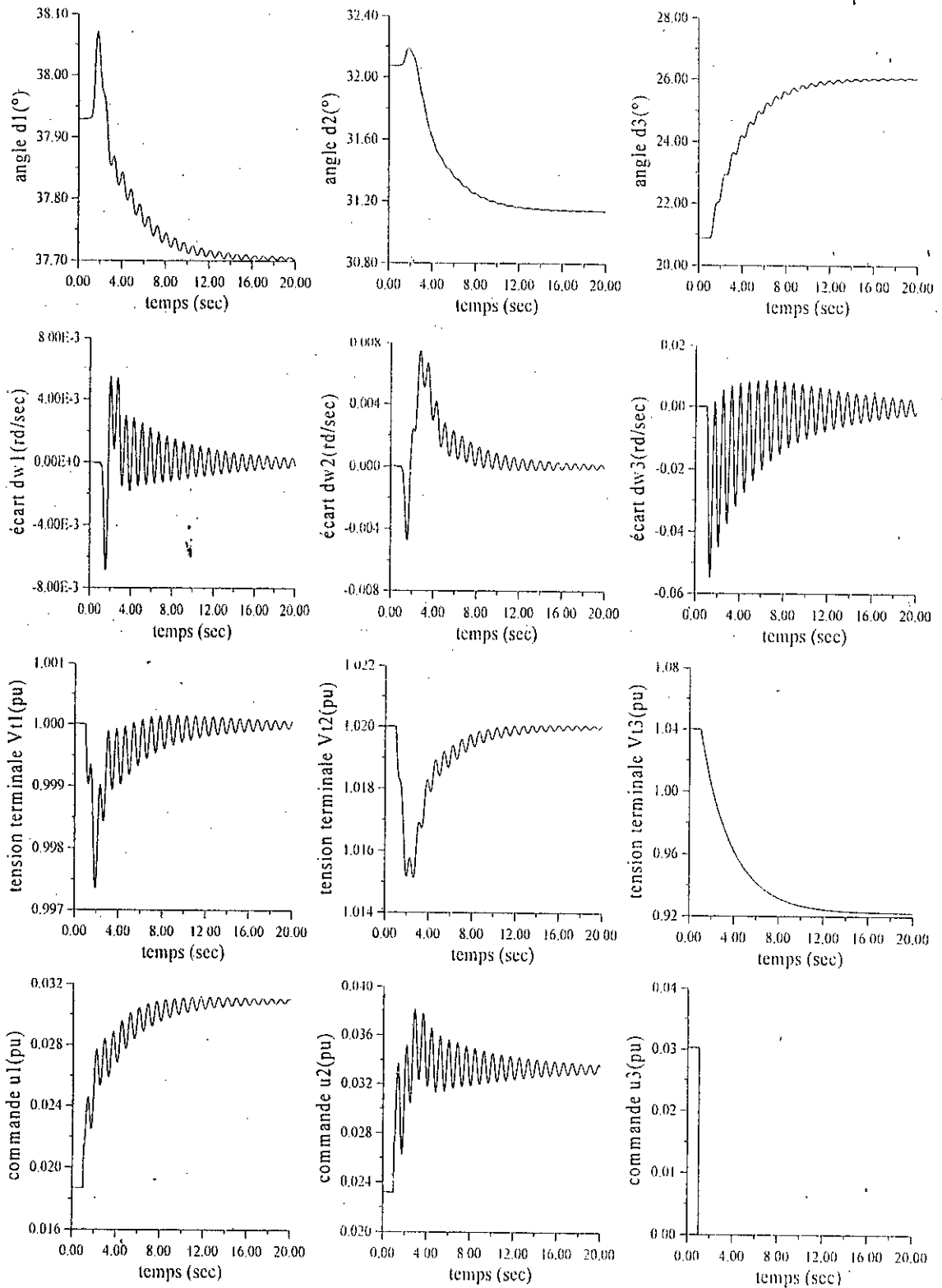


Fig.V.13 Réseau électrique à 3 machines, test de défaillance du régulateur du 3^{ème} sous-système.

V.3.2. Deuxième approche

Les variables d'état utilisées pour le modèle dynamique flou du sous-système i , $i=1, \dots, r$ (i.e. le générateur G_i , $i=1, \dots, r$) et pour son régulateur flou associé sont l'erreur en vitesse $\Delta w_i = w_i - w_0$, et l'erreur en tension terminale $\Delta V_i = V_{tr} - V_{ci}$. Aussi, les courants I_{di} et I_{qi} sont pris en considération. Il faut, donc, trouver les équations d'état en ces variables à partir de celles données au chapitre I.

Dans cette approche nous allons utiliser un régulateur flou multi-modèle pour assurer à la fois la stabilité transitoire et le réglage de la tension terminale.

Dans le schéma le bloc qui suit, le bloc nommé ANNUL a pour but l'annulation de l'effet du courant I_{di} , et sa sortie est donnée par $(x_{di} - x_{di}') I_{di} / k_{ci}$.

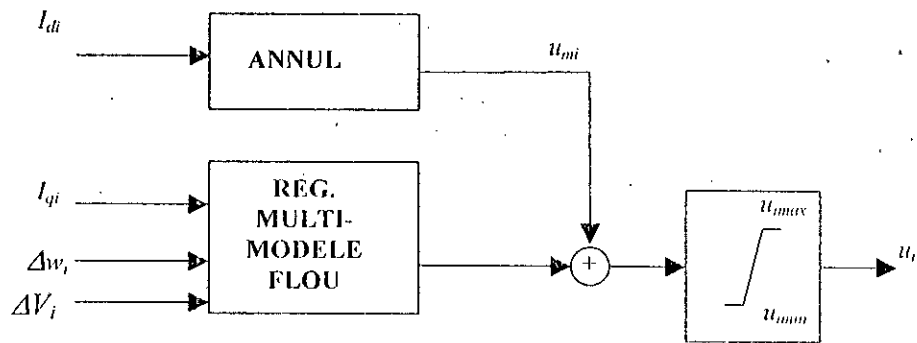


Fig.V.14 Schéma du régulateur flou pour le sous-système i (deuxième approche).

V.3.2.1. Application

D'abord, nous allons établir le modèle d'état, dans lequel la variable d'état sera $x_i^T = [\Delta w_i \ \Delta V_i]$, par le biais d'une approximation obtenue à partir de l'équation de la tension terminale

$$V_{tr} = \sqrt{(E'_{qi} - x'_{di} I_{di})^2 + (x'_{di} I_{qi})^2} \tag{V.27}$$

En fait, dans cette approximation, la variable ΔV_i sera donnée par la formule

$$\Delta V_i \approx \frac{ex_i}{\sqrt{ex_i^2 + (x'_{di} \bar{I}_{qi})^2}} \cdot \Delta E'_{qi} \tag{V.28}$$

avec $ex_i = E'_{q0i} - x'_{di} I_{d0i}$ calculée en régime permanent.

En observant le modèle non linéaire du générateur G_i , nous remarquons que le courant I_{qi} est une fonction de variables d'état et une fois quantifiée dans les régions R_{it} , $l=1, \dots, m_i$, $i=1, \dots, r$ par \bar{I}_{qi} conduit directement aux modèles linéaires locaux dont les matrices sont données par

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{2H_i} & -\frac{w_0}{2H_i} \cdot (\bar{I}_{qil}) \\ 0 & -\frac{1}{T'_{doi}} \end{bmatrix} \quad (V.29)$$

$$B_{ii} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_{ei}}{T'_{doi}} \cdot \frac{ex_i}{\sqrt{ex_i^2 + (x'_{di} \cdot \bar{I}_{qil})^2}} \end{bmatrix}$$

et le modèle dynamique flou sera:

$$\text{Si } I_{qi} \text{ est dans } R_{il} \text{ Alors } \dot{x}_i = A_{ii} \cdot x_i + B_{ii} \cdot u_i + C_{ii} \quad (V.30)$$

où C_{il} , $l=1, \dots, m_b$, $i=1, \dots, r$ représentent les termes indépendants de $x_i^T = [\Delta w_i \Delta V_i]$.

V.3.2.2. Synthèse du régulateur flou

Le régulateur flou associé à ce modèle dynamique flou a la même forme que le précédent.

A. Réseau électrique à 2 machines

- **Régulateur de la machine G1**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si I_{q1} est dans R_{11} Alors $u_{11} = -7.6933 \Delta w_1 + 32.88052 \Delta V_1$

Si I_{q1} est dans R_{12} Alors $u_{12} = -8.3504 \Delta w_1 + 33.6275 \Delta V_1$

Si I_{q1} est dans R_{13} Alors $u_{13} = -8.7022 \Delta w_1 + 34.4947 \Delta V_1$

Avec R_{11} , R_{12} et R_{13} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{11} , μ_{12} et μ_{13} sont gaussiennes de centres 0.2, 0.3, 0.4 respectivement et de variance 0.05. Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=I$ et

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$$

- **Régulateur de la machine G2**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si I_{q2} est dans R_{21} Alors $u_{21} = -29.2567 \Delta w_2 + 102.7769 \Delta V_2$

Si I_{q2} est dans R_{22} Alors $u_{22} = -30.0025 \Delta w_2 + 104.7506 \Delta V_2$

Avec R_{21} , R_{22} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{21} , μ_{22} sont gaussiennes de centres 0.4, 0.6 respectivement et de variance 0.07. Les gains de retour

d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=I$ et $Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 10000 \end{bmatrix}$.

B. Réseau électrique à 3 machines

• **Régulateur de la machine G1**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes:

Si I_{q1} est dans R_{11} Alors $u_{11} = -1.0000 \Delta\omega_1 + 4.0955 \Delta V_1$

Si I_{q1} est dans R_{12} Alors $u_{12} = -3.1623 \Delta\omega_1 + 10.0065 \Delta V_1$

Si I_{q1} est dans R_{13} Alors $u_{13} = -1.0000 \Delta\omega_1 + 6.6727 \Delta V_1$

avec R_{11} , R_{12} et R_{13} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{11} , μ_{12} et μ_{13} sont gaussiennes de centres 0.4, 1.0, 1.4 respectivement et de variance 0.25.

Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10$, 1 et 10

pour les trois règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

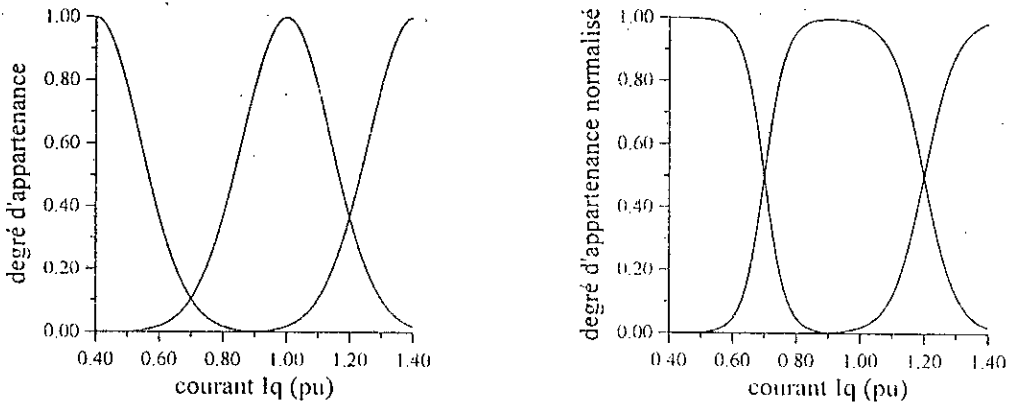


Fig.V.15 Fonctions d'appartenance du 1^{er} régulateur multi-modèle flou.

• **Régulateur de la machine G2**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes

Si I_{q2} est dans R_{21} Alors $u_{21} = -3.1623 \Delta\omega_2 + 8.4523 \Delta V_2$

Si I_{q2} est dans R_{22} Alors $u_{22} = -10.000 \Delta\omega_2 + 19.0491 \Delta V_2$

Si I_{q2} est dans R_{23} Alors $u_{23} = -3.1623 \Delta\omega_2 + 12.6118 \Delta V_2$

avec R_{21} , R_{22} et R_{23} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{21} , μ_{22} et μ_{23} sont gaussiennes de centres 0.6, 0.9, 1.2 respectivement et de variance 0.15.

Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10$, 1, et 10

pour les trois règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

• **Régulateur de la machine G3**

Le régulateur flou associé au modèle flou possède les trois règles suivantes

Si I_{q3} est dans R_{31} Alors $u_{31} = -3.1623 \Delta\omega_3 + 4.2210 \Delta V_3$

Si I_{q3} est dans R_{32} Alors $u_{32} = -10.000 \Delta\omega_3 + 12.0918 \Delta V_3$

Si I_{q3} est dans R_{33} Alors $u_{33} = -3.1623 \Delta\omega_3 + 8.4066 \Delta V_3$

avec R_{31} , R_{32} et R_{33} : des sous-ensembles flous dont les fonctions d'appartenance μ_{31} , μ_{32} et μ_{33} sont gaussiennes de centres 0.2, 0.5, 0.8 respectivement et de variance 0.1. Les gains de retour d'état sont calculés par la technique LQ en prenant $R=10$, 1 et 10 pour les trois règles respectivement et $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$.

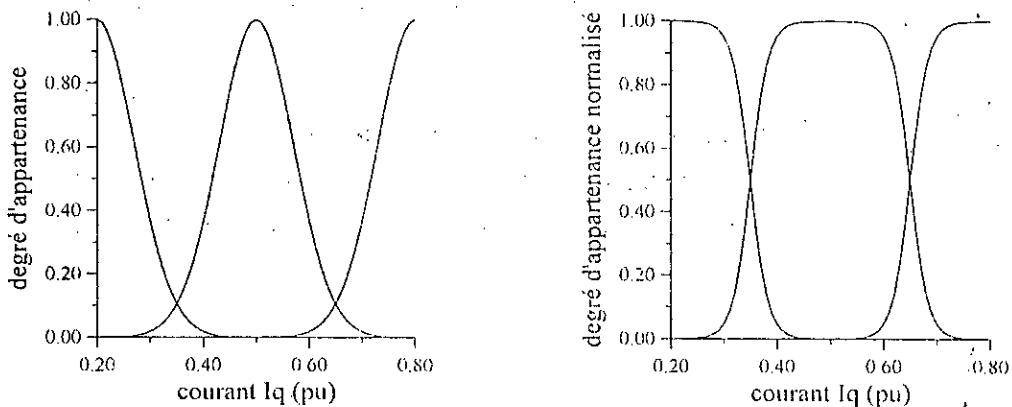


Fig.V.16 Fonctions d'appartenance du 3^{ème} régulateur multi-modèle flou.

V.3.2.3. Résultats de simulation

Les mêmes tests sont appliqués ici, et les résultats de simulation présentés par les figures (V.17)-(V.20) montrent qu'en plus du réglage réussi, le rejet rapide des perturbations (au bout de 1 sec) est remarqué, ainsi la stabilité transitoire est améliorée par rapport à celle du cas précédent.

Le test de la décentralisation de la commande est réalisé. La simulation (Fig.V.21)-(Fig.V.23) montre que malgré la défaillance d'une station de commande locale le système se stabilise au bout de 20 secondes assurant une bonne fréquence mais les tensions terminales sont un peu affectées par ce test.

V.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons profité de la méthode de quantification présentée au chapitre précédent. Dans cette méthode la quantification des variables d'état a été remplacée par une quantification de fonctions de ces variables d'état.

Nous avons tout d'abord exposé les éléments mathématiques nécessaires permettant d'avoir une formulation adéquate du système qui aboutit à une quantification associée à la logique floue.

Cette technique de commande floue a été présentée pour un système simple, ensuite généralisée pour le cas des systèmes complexes, en gardant le même raisonnement.

Pour l'application de cette méthode sur les réseaux électriques, nous avons donné deux approches: la première n'assure le réglage de la tension terminale que par le biais d'un PI flou et la deuxième approche est obtenue à partir de la première en utilisant une petite astuce qui nous a permis d'éviter l'usage du PI flou.

La décentralisation a montré par les résultats obtenus que le nombre de règles floues utilisées est réduit.

L'application de cette méthode, par le biais des deux approches présentées, sur les deux types des réseaux électriques a donné des résultats acceptables au point de vue stabilité transitoire et réglage des tensions terminales des différents générateurs, malgré sa simplicité.

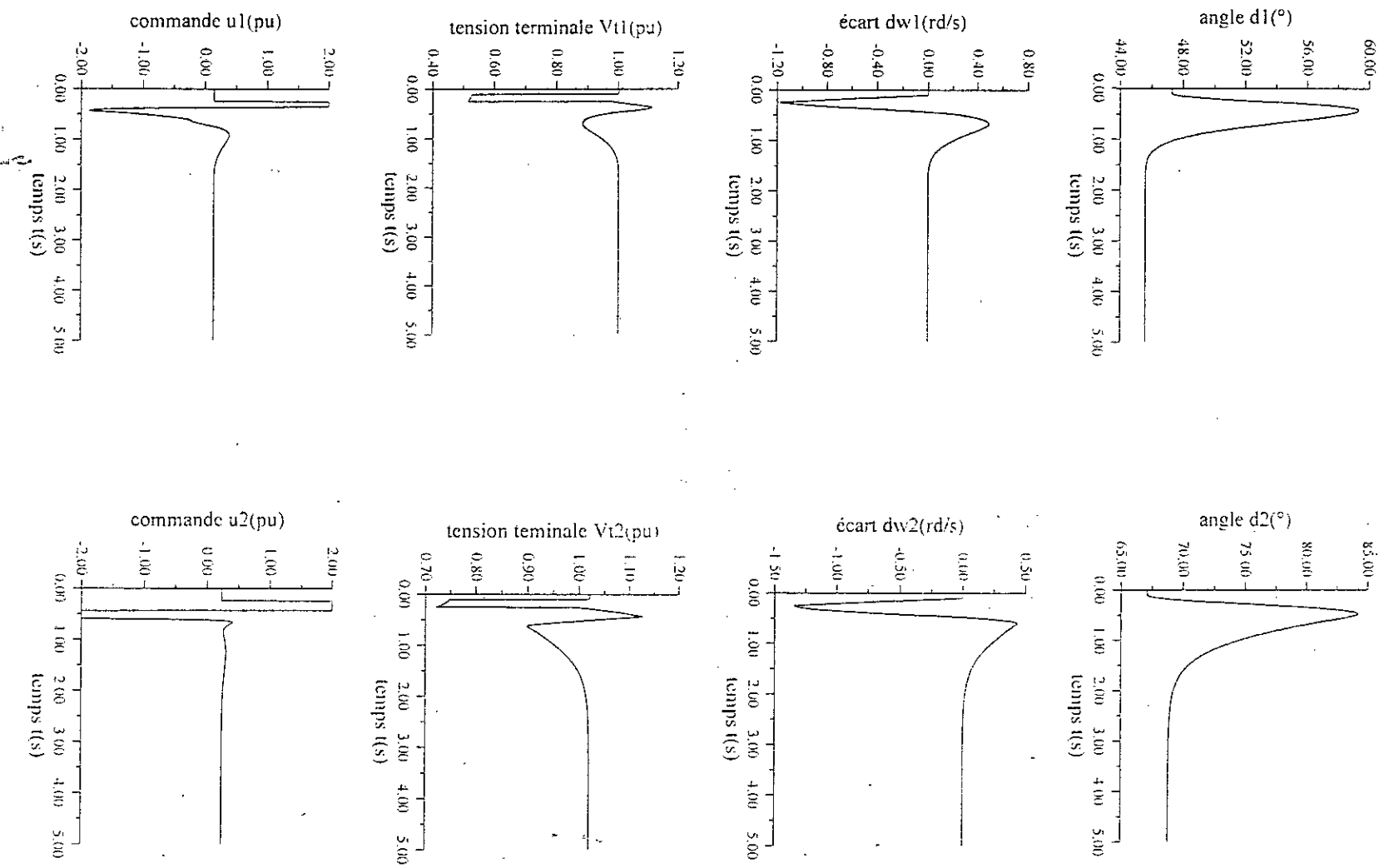


Fig. V.17 Réseau électrique à 2 machines avec un court-circuit triphasé (deuxième approche).

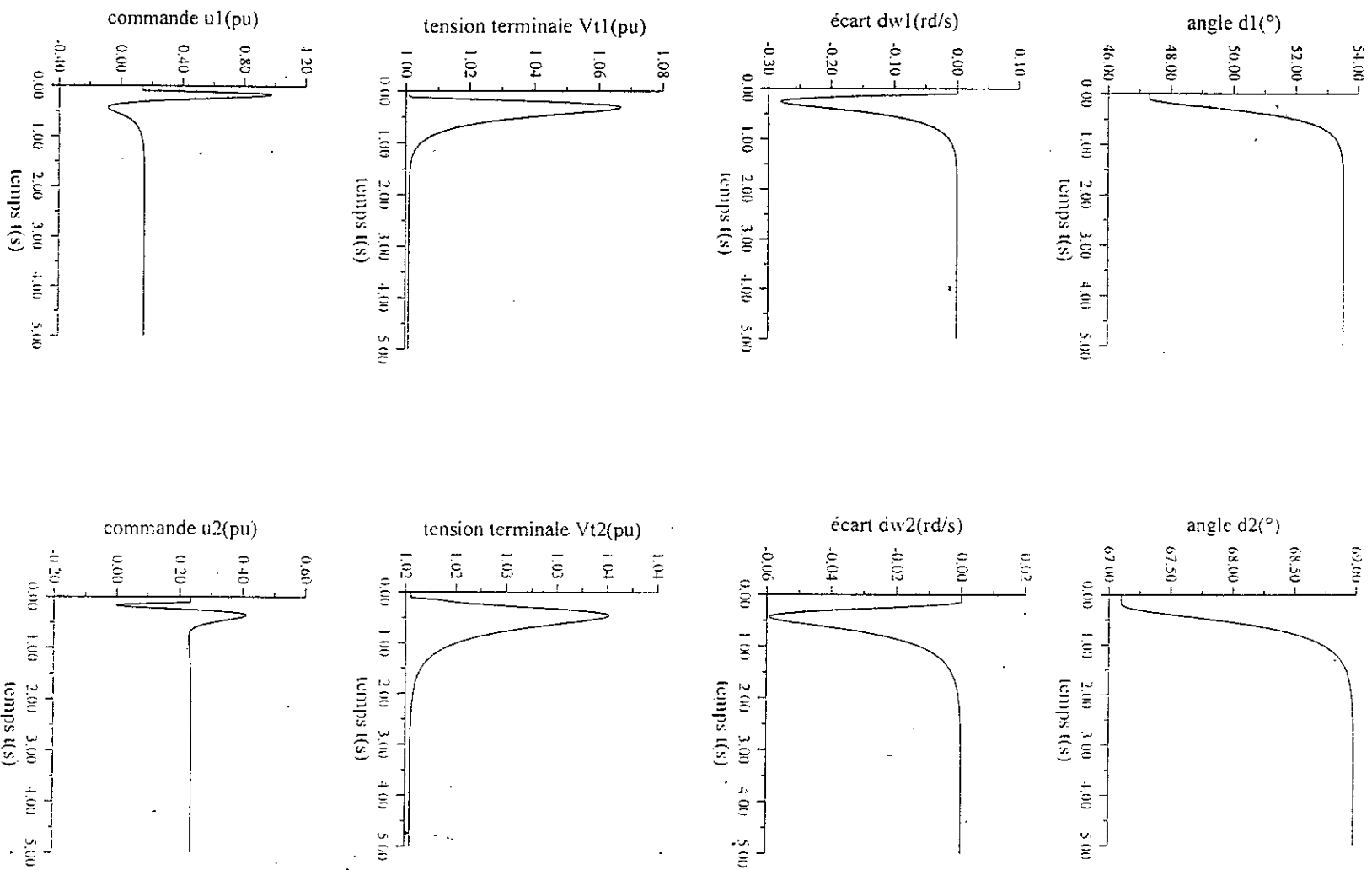


Fig. V. 18 Réseau électrique à 2 machines avec un accroissement de 20% de la puissance mécanique (deuxième approche).

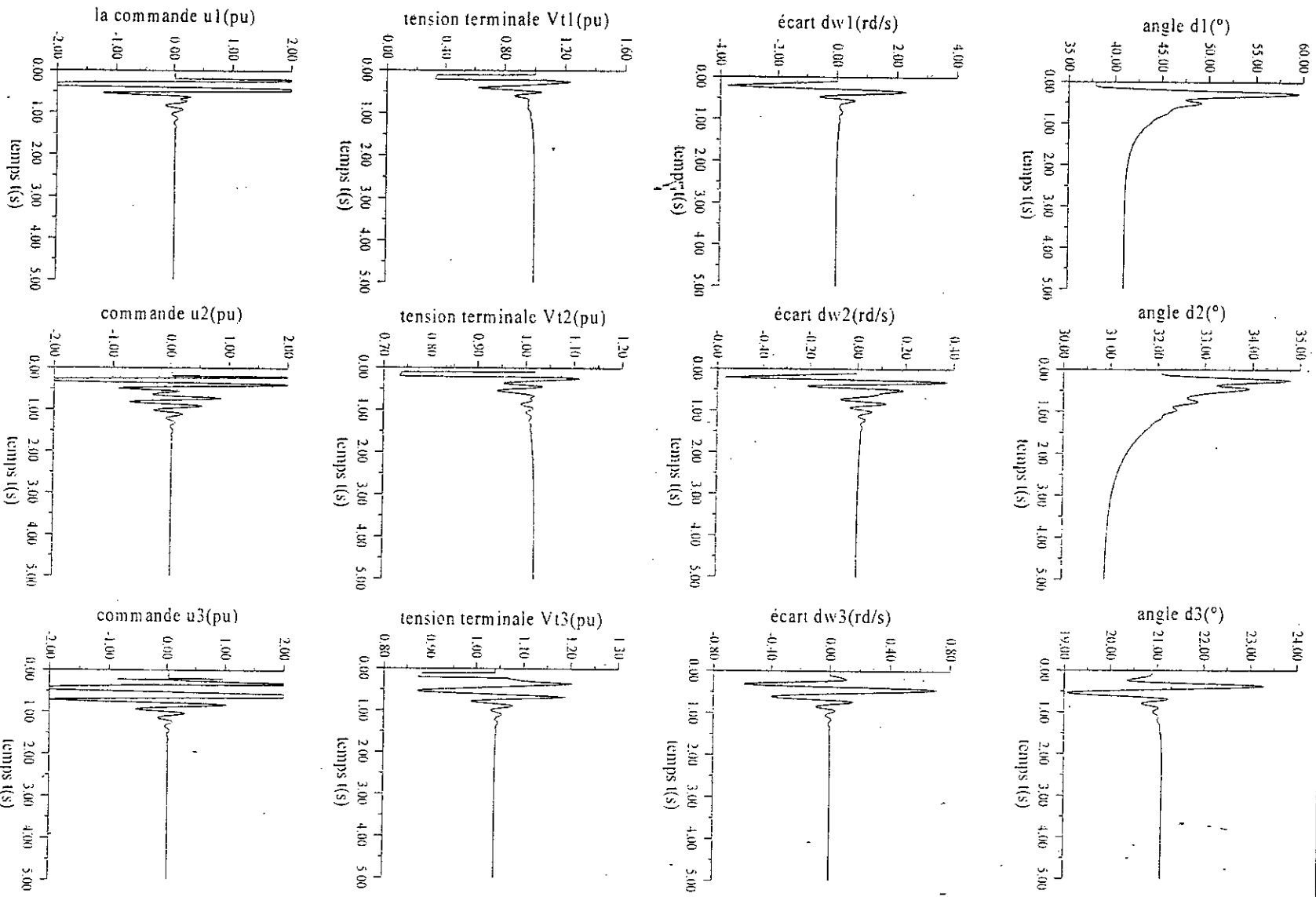


Fig. V.19 Réseau électrique à 3 machines avec un court-circuit triphasé (deuxième approche).

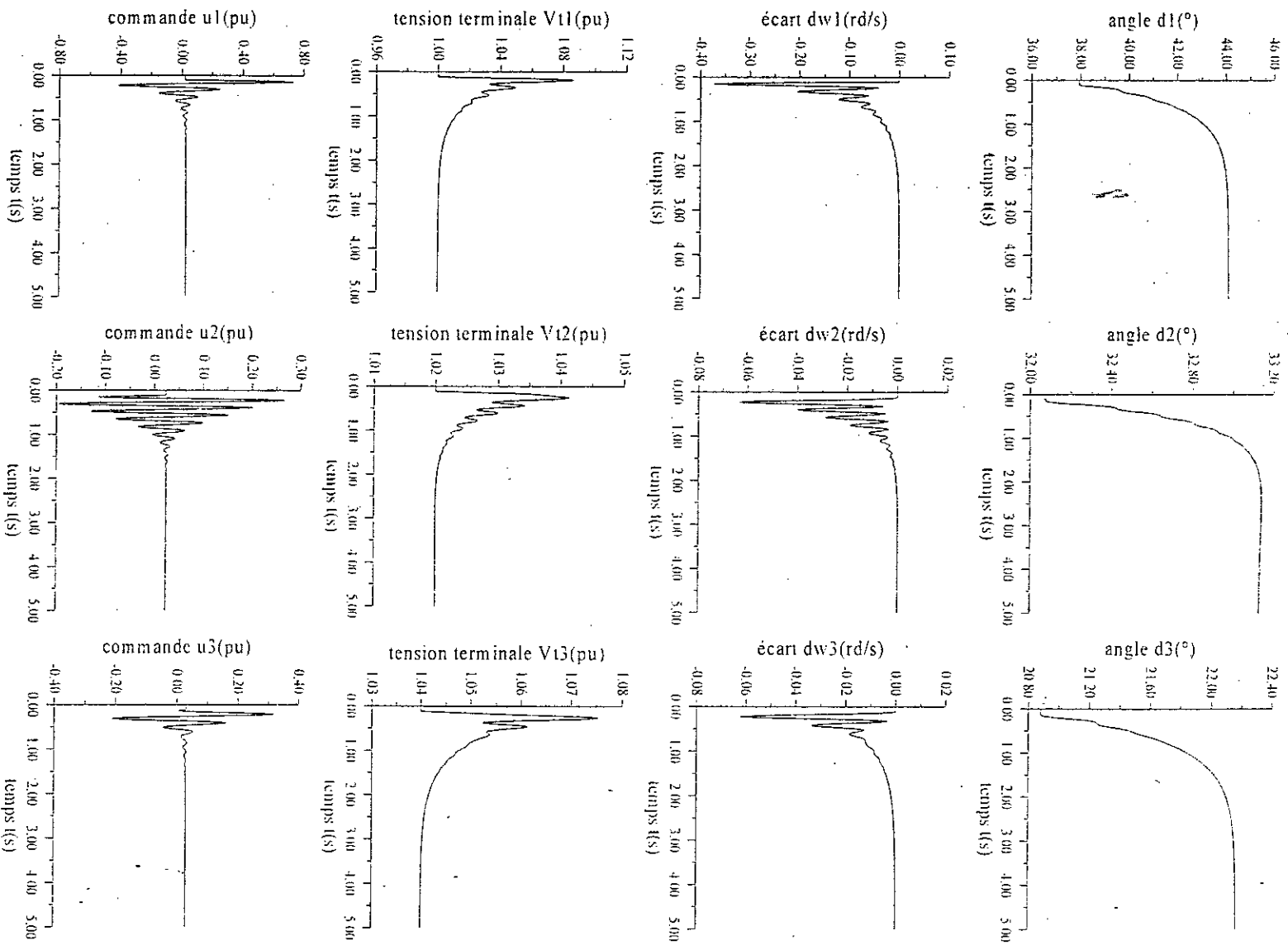


Fig. V.20 Réseau électrique à 3 machines avec un accroissement de 20% de la puissance mécanique (deuxième approche).

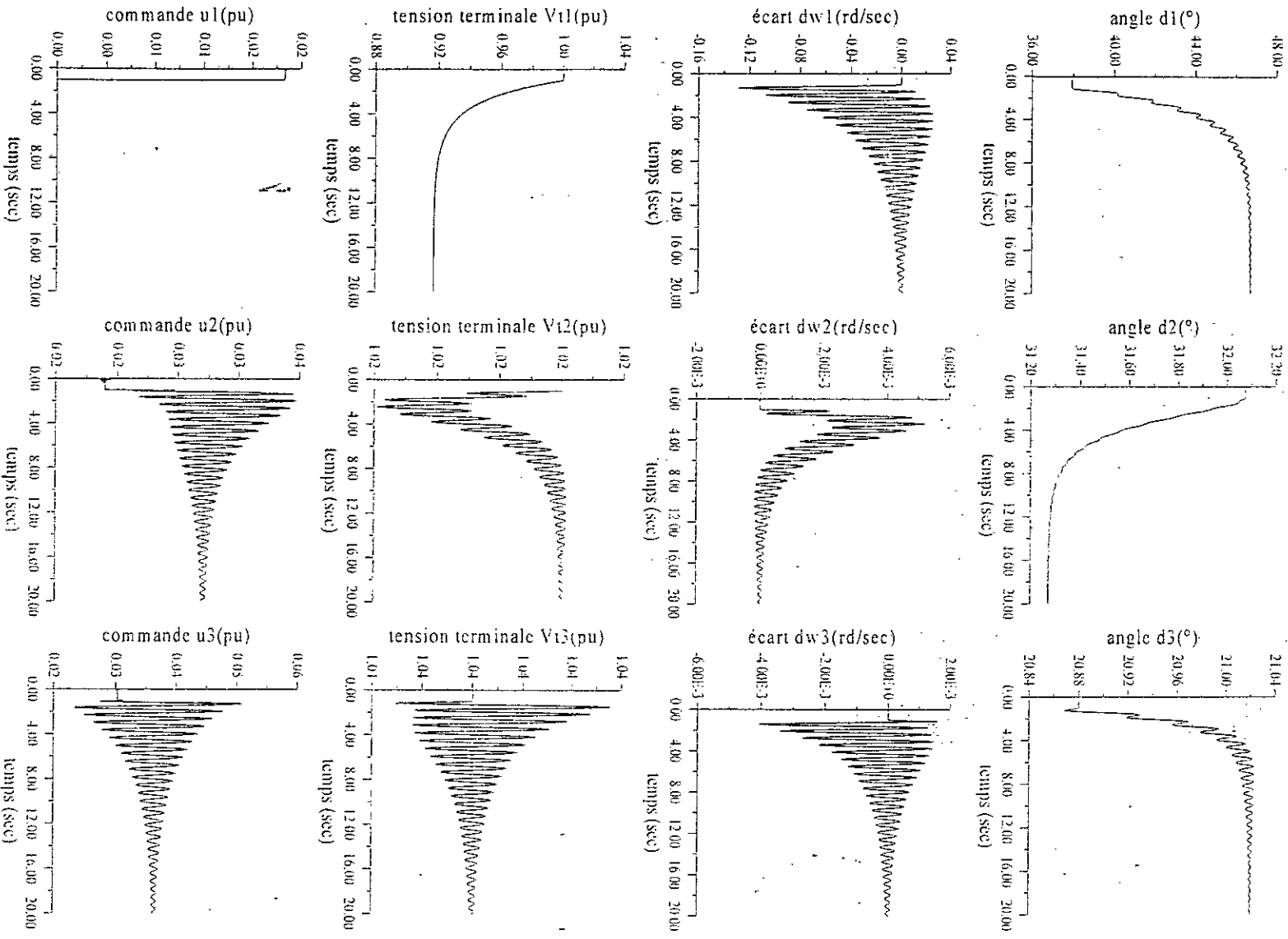


Fig. V.21 Réseau électrique à 3 machines, test de défaillance du régulateur du 1^{er} sous-système.

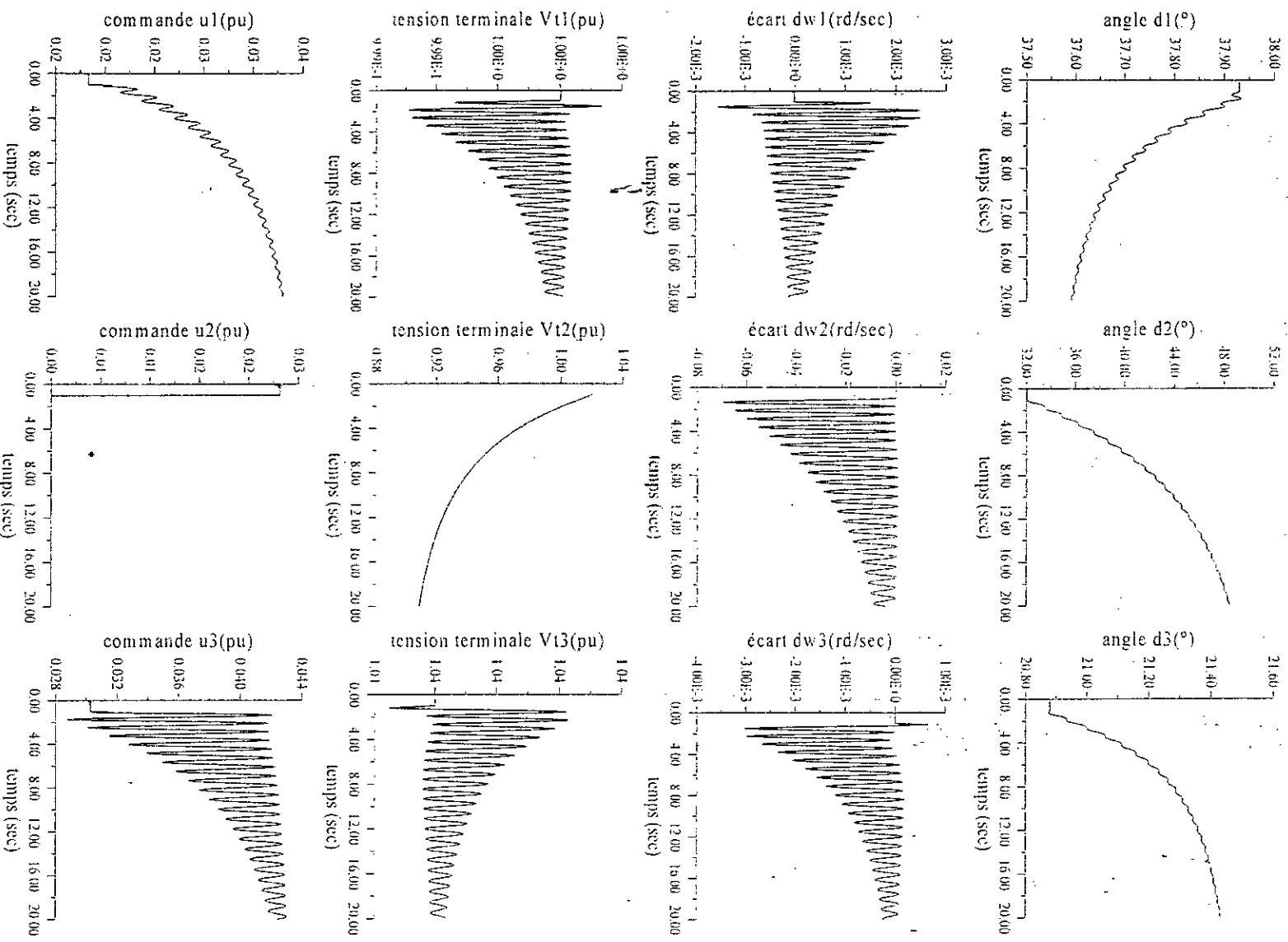


Fig V.22 Réseau électrique à 3 machines, test de défaillance du régulateur du 2^{ème} sous-système.

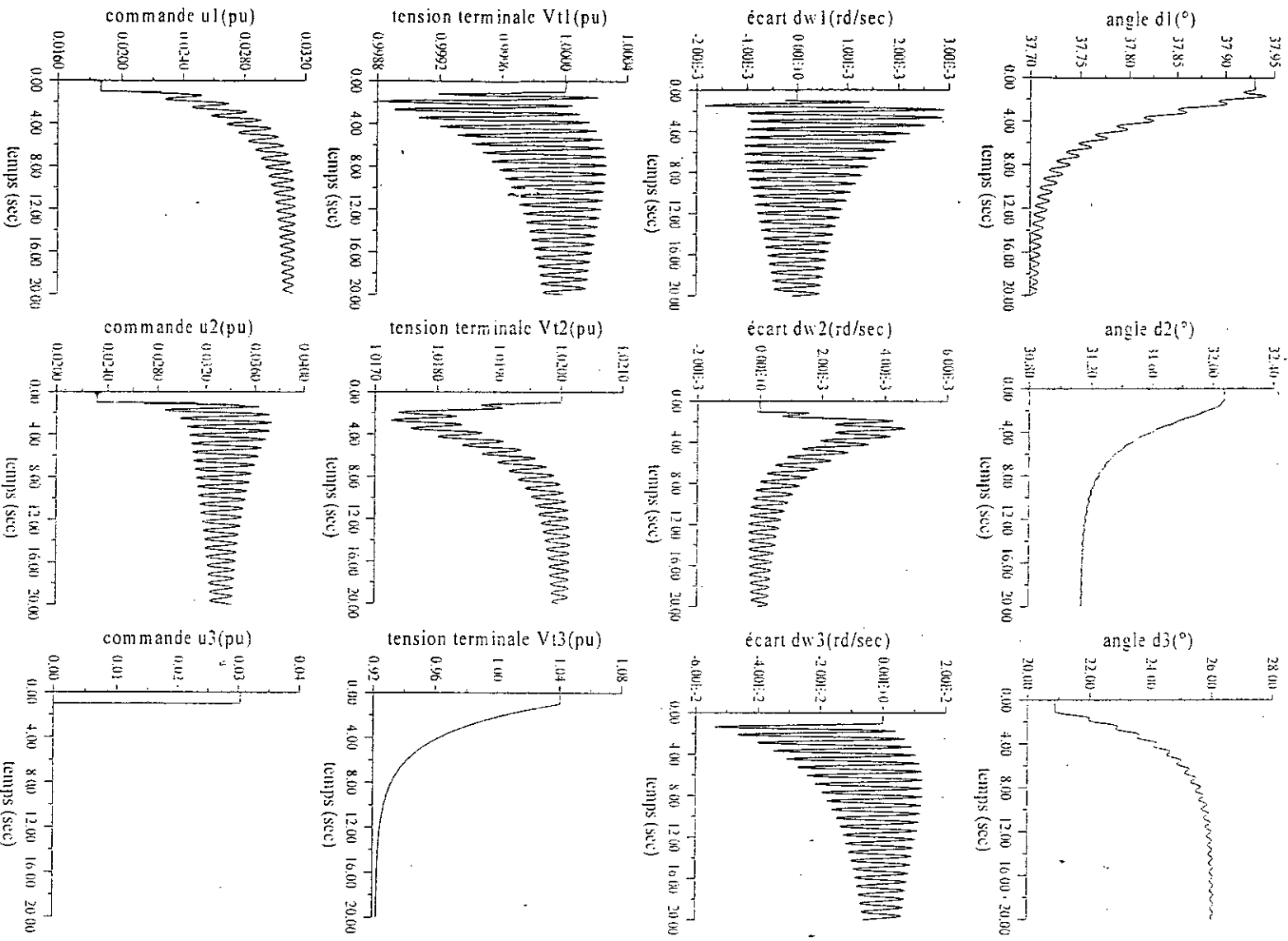


Fig. V.23 Réseau électrique à 3 machines, test de défaillance du régulateur du 3^{ème} sous-système.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans cette thèse concerne la commande décentralisée par logique floue. Dans ce contexte, nous avons proposé plusieurs méthodes de synthèse de régulateurs décentralisés flous basées sur des modèles linéaires approchés du système obtenus autour d'un certain nombre de points dans l'espace d'état.

La décentralisation simplifie largement la synthèse de la commande par logique floue car elle conduit à une base de règles floues réduite. De plus, l'élaboration des règles floues devient simple.

La construction d'un ensemble de modèles linéaires locaux autour de quelques points dans l'espace d'état permet de traiter le problème de commande partiellement dans les régions de l'espace d'état où ces modèles linéaires sont acceptables. La technique de commande multi-modèle est une autre alternative très intéressante.

Le problème de commande des systèmes mal connus ou ayant un grand nombre de paramètres peut être résolu par la technique de commande par logique floue qui fournit un support mathématique bien adapté au traitement de l'imprécision et de l'ambiguïté.

Dans le présent travail, nous avons exploité les avantages de chacune de ces méthodes. Nous avons, tout d'abord, présenté une méthode proposée par Cao *et al.* En s'inspirant de cette méthode, nous avons proposé deux autres méthodes plus simples constituant une amélioration de celle-ci. La première méthode proposée nous a permis d'éliminer l'inconvénient de la méthode précédente en utilisant une quantification de quelques variables d'état et une autre représentation du modèle global pour obtenir des modèles linéaires locaux. Cette méthode a été ensuite généralisée pour pouvoir quantifier des fonctions de variables d'état au lieu de ces variables elles-mêmes.

Une fois les modèles linéaires locaux obtenus par les méthodes précédentes, l'application des techniques linéaires de commande ont permis la synthèse des régulateurs locaux. En combinant ces régulateurs locaux entre eux par le biais de la logique floue, nous construisons les régulateurs multi-modèles flous décentralisés.

Afin de valider les méthodes proposées, nous les avons appliquées à deux types de réseaux électriques en vue de régler les tensions terminales des différents générateurs et d'améliorer leur stabilité transitoire.

Le choix des réseaux électriques est motivé par le fait qu'ils représentent de bons exemples des systèmes complexes interconnectés, pour lesquels l'élaboration d'une étude profite pleinement de la technique de décentralisation. Pour cela, nous avons présenté la modélisation de ces réseaux d'une manière un peu détaillée afin de pouvoir l'utiliser pour valider les méthodes proposées en ayant pour objectif le réglage des tensions terminales de différents générateurs et l'amélioration de la stabilité transitoire.

du système. Celle-ci est étudiée dans le domaine temporel en appliquant aux réseaux des perturbations sévères: rapides et de fortes amplitudes.

L'utilisation de la logique floue s'est avérée intéressante pour le réglage des systèmes complexes car elle permet de construire une commande adéquate à partir d'un ensemble de commandes particulières. En fait, les règles floues pour Mamdani ou Sugeno ne sont que des cas particuliers de commande qui, pondérés par les fonctions d'appartenance, construisent le régulateur flou.

La méthode de commande multi-modèle flou proposée par Cao *et al.* [CAO 96] pour la commande des systèmes non linéaires continus a ouvert une nouvelle direction de recherche, celle de la commande des systèmes dynamiques flous. Cette dernière cherche à trouver le régulateur flou du système à partir d'une représentation floue approchée du système obtenue par des développements en série de Taylor d'ordre 1. L'application sur les réseaux électriques semblait très naturelle et a abouti à des résultats satisfaisants et nous avons remarqué que:

- Le modèle du réseau est très adapté à cette technique de commande,
- Facilité de l'obtention des modèles linéaires locaux à cause de la forme simple des équations du modèle (développement en série de Taylor très simple),
- Les fonctions d'appartenance sont prises gaussiennes, mais les autres formes en cloche sont acceptables.

Dans le cas général, le développement en série de Taylor n'est pas facile. De plus le modèle flou obtenu par la méthode de Cao est un modèle approché. Pour pallier à ces deux problèmes, nous avons proposé une méthode de commande inspirée de celle de Cao mais sans utiliser le développement en série de Taylor, de plus le modèle flou obtenu n'est pas une approximation car en fait c'est le modèle lui-même sous une autre représentation. L'obtention de ce modèle flou est basée sur la quantification de quelques variables d'état ou de toutes les variables d'état (selon le cas) suivie d'une recherche des fonctions d'appartenance adéquates. Nous avons pu mettre en œuvre une méthode qui nous donne ces fonctions d'appartenance. Pour cela, nous avons exposé dans le chapitre IV les éléments de cette méthode et nous avons pu remarquer qu'en plus du modèle flou obtenu, nous pouvons avoir des modèles flous approchés par le biais d'un choix de fonction d'appartenance proches de celles obtenues par notre méthode.

Nous avons opté pour un modèle flou approché obtenu par le changement des fonctions d'appartenance triangulaires en fonctions d'appartenance gaussiennes (les mêmes que dans le chapitre III, pour pouvoir comparer) et l'application sur les réseaux électriques a montré les bonnes performances de cette technique. Nous avons remarqué que:

- cette technique facilite l'obtention des modèles linéaires locaux,
- elle peut éviter d'avoir des modèles linéaires locaux non commandables ou non observables facilement,

CONCLUSION GENERALE

- en général, cette technique donne des résultats différents de ceux obtenus par la méthode de Cao, mais à cause de la forme des modèles des réseaux électriques nous avons eu des résultats proches,
- le modèle flou obtenu n'est pas approché mais il est le même sous une autre représentation,
- nous pouvons avoir une multitude de modèles flous approchés par simple substitution de fonctions d'appartenance,

Pour terminer notre travail, nous avons eu l'idée de montrer que quelques fois il est préférables d'utiliser des fonctions de variables d'état au lieu de ces mêmes variables. Ceci nous a conduit à une généralisation justifiée par l'objectif de diminuer le nombre de règles floues nécessaires. Ainsi, nous avons proposé la dernière méthode qui conduit aussi à un modèle flou qui est une autre représentation du modèle non linéaire initial. Cette dernière méthode garde les mêmes avantages de la méthode précédente.

L'application sur les réseaux électriques a montré les bonnes performances de cette technique et nous a permis de remarquer que nous pouvons utiliser des fonctions de variables d'état mesurables contenant des termes de perturbations.

Le test de différents régulateurs est basé sur l'application de perturbations sévères, rapides et de fortes amplitudes pour pouvoir évaluer la stabilité transitoire des réseaux électriques.

Le premier test est un court-circuit triphasé appliqué pendant une durée de temps limité suivi par l'ouverture de la ligne affectée. Les différents régulateurs ont pu surmonter cette perturbation et ont parvenu à rétablir le réglage des tensions terminales de chaque générateur et assurer ainsi la stabilité transitoire.

Le deuxième test est l'accroissement de la puissance mécanique fournie à un générateur de 20%. Les résultats ont montré que ce test est réussi pour les différents régulateurs flous synthétisés, car nous avons pu remarquer que les effets de cette perturbation sont atténués rapidement.

Le dernier test, concernant l'efficacité de la décentralisation, est réalisé par la simulation d'une défaillance d'une station de commande locale. Ce test a montré que tous les régulateurs flous synthétisés non défaillants arrivent à supporter cette perturbation et, en plus, participent au réglage de la vitesse du générateur dont la station de commande est défaillante, ce qui assure la stabilité transitoire du réseau électrique.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [AND 77] P. M. Anderson, A.A. Fouad, "Power system control and stability", The IOWA state university press, Ames, IOWA, 1977.
- [ARR 90] J. Arrillaga, C. P. Arnold, "Computer analysis of power systems", John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [BEN 97] M. Ben Ghalia, "Modelling and robust control of uncertain dynamical systems using fuzzy set theory," *Int. J. Control*, vol. 68, no. 6, pp. 1367-1395, 1997.
- [BLA 99] F. Blanchini, S. Miani, "A new class of universal Lyapunov functions for the control of uncertain linear systems," *IEEE Trans. Aut. Control*, vol. 44, no. 3, pp. 641-647, 1999.
- [BOS 92] A. Boscolo, C. Manglavacchi, F. Drius, et M. Golak, "Fuzzy controller for generally loaded DC electric motor," in *IFAC (Intelligent Component and Instruments for Control Applications)*, Malaga, Spain, 1992.
- [BOU 93] B. Bouchon-Meunier, *Logique Floue*. PUF, 1993.
- [BOU 00] D. Boukhetala, A. Melahi, F. Boudjema, A. Boulahia, N.K. M'Sirdi, "Commande décentralisée par logique floue appliquée à un bras de robot manipulateur", Conférence internationale de l'Electronique et de l'Electrotechnique 2000, Oran, Algérie, Nov 2000.
- [BUH 94] H. Bühler, *Réglage par Logique Floue*. PPR., 1994.
- [CAO 96] S. G. Cao, N. W. Rees, G. Feng, "Fuzzy control of nonlinear continuous-time systems," in *Proc. 35th CDC*, Japan, pp. 592-597, 1996.
- [CAO 97a] S. G. Cao, N. W. Rees, G. Feng, "Analysis and design for a class of complex control systems Part I: fuzzy modelling and identification," *Automatica*, vol. 33, no. 6, pp. 1017-1028, 1997.
- [CAO 97b] S. G. Cao, N. W. Rees, G. Feng, "Analysis and design for a class of complex control systems Part II: fuzzy controller design," *Automatica*, vol. 33, no. 6, pp. 1029, 1039, 1997.
- [DUB 87] D. Dubois et H. Prade, *Théorie des Possibilités: Application à la Représentation des Connaissances en Informatique*. Masson, 2 ed., 1987.
- [GEG 95] A. E. Gegov et P. M. Frank, "Decentralized fuzzy control of multivariable systems by active decomposition of control laws," *INT. J. Control*, vol. 62, no. 4, pp. 781-798, 1995.

BIBLIOGRAPHIE

- [GHA 96] O. Ghanayem, L. Reznik, "A universal adaptation procedure for fuzzy controller design with the application to power system stability control," in *Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control*, Japan, pp. 1141-1148, 1996.
- [HEL 93] D. H. Hellendoorn et M. Reinfrank, *An Introduction to Fuzzy Control*. Springer Verlag, 1993.
- [HIY 96] T. Hiyama, "Integrated fuzzy logic stabilizing controller for power systems," in *Proc. 35th CDC*, Japan, pp. 2185-2190, 1996.
- [HRE 92] R. Hreero, J. Landaluze, C. F. Nicolas, et R. Rejero, "A highly non linear fuzzy control algorithm for servo-system positioning," in *IFAC (Intelligent Component and Instruments for Control Applications)*, Malaga, Spain, 1992.
- [JAN 91] J. -S. R. Jang, "Rule extraction using generalized neural networks," in *Proc. 4th IFSA World Congress*, July.1991, pp. 82-86 (volume for Artificial Intelligence).
- [JAN 92] J. -S. R. Jang, "Self-learning fuzzy controller based on temporal back-propagation, " *IEEE Trans. Neural Networks.*, vol. 3, pp. 714-723, Sept. 1992.
- [JAN 95] J. -S. R. Jang et C. T. Sun, "Neuro-fuzzy modeling and control," in *Proc. IEEE*, vol. 83, no3, Mars, 1995, pp. 378-405.
- [KAU 87] A. Kauffman, *Nouvelle Logique pour l'Intelligence Artificielle*. Hermès, 1987.
- [KET 92] R. Ketata, *Méthodologie de Régulation Numérique Incluant la Logique Floue*. Thèse de doctorat, no 199, INSA, Toulouse, 1992.
- [KOS 92] B. Kosko, *Neural Network and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach*. Englewood Cliffs, NJ: Printice Hall, 1992.
- [LEE 90a] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems : fuzzy logic controller-Part I," *IEEE Trans., syst. Man. and Cybern.*, vol. 20, pp. 404-418, Feb. 1990.
- [LEE 90b] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems : fuzzy logic controller-Part II," *IEEE Trans, syst., Man. and Cybern.*, vol. 20, pp. 419-435, Feb. 1990.
- [LEE 91] C. C. Lee, "A self-learning rule-based controller employing aproximate reasoning and neural net concepts," *INT. J. Intelligent Systems*, vol.6, pp.71-93, 1991.
- [LIN 91] C. -T. Lin, G. Lee, "Neural-Network-Based Fuzzy logic control and decision system, " *IEEE Trans. Computers*, vol.40, no.12, Dec.1991.

BIBLIOGRAPHIE

- [LIU 93] T. -S. Liu et J. C. Wu, "A model for rider-motorcycle system using fuzzy control," *IEEE Trans., Syst., Man, and Cybern.*, vol. 23, no. 1, Jan./feb. 1993.
- [MAM 74] E. H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plant," in *Proc. IEE*, vol. 121, pp. 1585-1588, 1974.
- [MAT 88] G. P. Mathews, R. A. DeCarlo, "Decentralized tracking for a class of interconnected nonlinear systems using variable structure control," *Automatica*, vol. 24, no. 2, pp. 187-193, 1988.
- [MEL 99] A. Melahi, M. S. Boucherit, L. Nezli, H. Rezine, "Découplage et réglage par logique floue d'une machine synchrone à aimants permanents," in *Conf. Int. SSA2'99, Blida, Algérie*, pp.411-415, 1999.
- [MEN 95] J. Mendel, "Fuzzy logic system for engineering. A tutorial," in *Proc. IEEE*, vol 83, no3, pp.345-377, Mars, 1995.
- [OUR 95] M. A. Ourari, "Commande multivariable par mode de glissement appliquée aux réseaux électriques multimachines", Thèse de Magister, ENP, 1995.
- [SAD 98] S. M. Sadeghzadeh, M. Ehsen, N. Hadj Said, R. Feuillet, "Improvement of transient stability limit in power system transmission lines using fuzzy control of FACTS devices," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 917-922, 1998.
- [SCH 95] H. Scholten, *Logique Floue et Régulation PID: Théorie et Pratique de la Régulation Active avec Interface à Réaliser Soi-même et Programme d'Expérimentation*. Publitronic, 1995.
- [SER 89] H. Seraji, "Decentralized adaptive control of manipulators; theory, simulation and experimentation," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol.5, no.2, pp. 183-201, Apr. 1989.
- [SHA 88] S. Shao, "Fuzzy self-organizing controller and application for dynamic processes," *Fuzzy Sets. Syst.*, vol.26, pp.151-164, 1988.
- [SIL 76] D. D. Siljak, M. B. Vukcevic, "Decentralization, stabilization and estimation of large-scale systems," *IEEE Trans. Automatic control*, pp. 363-366, Jun. 1976.
- [TAK 83] T. Takagi et M. Sugeno, "Derivation of fuzzy control rules from human operator's control actions," in *IFAC Fuzzy Information*, Marseille, France, 1983.
- [TZA 90] S. Tzafestas, "Incremental Fuzzy PID Control," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 37, no 5, Oct. 1990.

BIBLIOGRAPHIE

- [USH 94] H. Ushida, T. Yamaguchi, K. Goto et T. Takagi, "Fuzzy-Neuro control using associative memories and its applications," in *Control Eng., Practice*, Vol.2, no.1, pp.129-145, 1994.
- [WEN 98] J. Wen, S. Cheng, O. P. Malik, (1998) "A synchronous generator fuzzy excitation controller optimally designed with a genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 884-889, 1998.
- [ZAD 88] L. A. Zadeh, "Fuzzy logic," *IEEE Comput. Mag.*, pp. 83-93, 1988.
- [ZHU 98] C. Zhu, R. Zhou, Y. Wang, "A new decentralized nonlinear voltage controller for multimachine power systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 211-216, 1998.

ANNEXES

ANNEXE I

LES PARAMETRES DU RESEAU A DEUX MACHINES

Paramètres du réseau

| Nœud de départ | Nœud d'arrivée | x (pu) |
|----------------|----------------|----------|
| 1 | 2 | 0.7 |
| 1 | 3 | 0.93 |
| 2 | 3 | 0.9 |

Paramètres des transformateurs

$$x_{T1}=0.129 \text{ p.u.}$$

$$x_{T2}=0.127 \text{ p.u.}$$

Paramètres des machines

| Machine | x_d (p.u.) | x_d' (p.u.) | T_{d0}' (s) | H (s) | D | k_c |
|---------|--------------|---------------|---------------|---------|-----|-------|
| 1 | 1.863 | 0.657 | 6.9 | 4.0 | 5.0 | 10 |
| 2 | 2.36 | 0.719 | 7.96 | 5.1 | 3.0 | 10 |

Point de fonctionnement

$$\delta_{10}=47.3^\circ, V_{110}=1.0, P_{m10}=0.4;$$

$$\delta_{20}=67.1^\circ, V_{120}=1.02, P_{m20}=0.8.$$

Calcul de la matrice admittance réduite

D'abord, nous allons faire un changement de numérotation des différents nœuds. Ceci sera fait après l'ajout des nœuds additionnels correspondant aux nœuds internes des générateurs.

Le défaut considéré ici est un court-circuit triphasé survenant à la ligne de transmission qui lie le nœud (1) au nœud (2) à une distance du nœud (1) égale à 20% de la longueur de cette ligne. Ce défaut est poursuivi par l'ouverture de cette ligne de transmission.

- Avant le défaut

La figure ci-après montre le réseau avant l'arrivée du défaut.

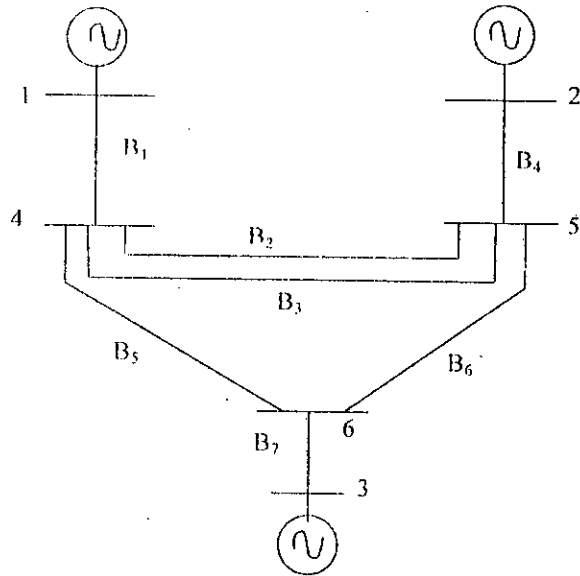


Fig. I.1 Le réseau avant le défaut.

Les différentes grandeurs B_i , $i=1, \dots, 7$ sont données comme suit

$$\begin{aligned}
 B_1 &= -\frac{I}{x_{d1} + x_{T1}}, & B_2 &= -\frac{I}{2x_{12}}, & B_3 &= -\frac{I}{2x_{12}}, & B_4 &= -\frac{I}{x_{d2} + x_{T2}}, \\
 B_5 &= -\frac{I}{x_{13}}, & B_6 &= -\frac{I}{x_{23}}, & |B_7| &\rightarrow \infty
 \end{aligned}
 \tag{I.1}$$

La matrice $[\bar{Y}]$ est donnée par

$$[\bar{Y}] = j \begin{bmatrix}
 B_1 & 0 & 0 & -B_1 & 0 & 0 \\
 0 & B_4 & 0 & 0 & -B_4 & 0 \\
 0 & 0 & B_7 & 0 & 0 & -B_7 \\
 -B_1 & 0 & 0 & (B_1 + B_2 + B_3 + B_5) & -(B_2 + B_3) & -B_5 \\
 0 & -B_4 & 0 & -(B_2 + B_3) & (B_2 + B_3 + B_4 + B_6) & -B_6 \\
 0 & 0 & -B_7 & -B_5 & -B_6 & (B_5 + B_6 + B_7)
 \end{bmatrix}
 \tag{I.2}$$

Décomposons la matrice $[\bar{Y}]$ en $[\bar{y}_{GG}]$, $[\bar{y}_{GL}]$, $[\bar{y}_{LG}]$ et $[\bar{y}_{LL}]$,

$$[\bar{y}_{GG}] = j \begin{bmatrix}
 B_1 & 0 & 0 \\
 0 & B_4 & 0 \\
 0 & 0 & B_7
 \end{bmatrix}
 \tag{I.3}$$

$$[\bar{Y}_{G1}] = -j \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & B_7 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

$$[\bar{Y}_{LG1}] = -j \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_4 & 0 \\ 0 & 0 & B_7 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$[\bar{Y}_{LL}] = j \begin{bmatrix} (B_1 + B_2 + B_3 + B_5) & -(B_2 + B_3) & -B_5 \\ -(B_2 + B_3) & (B_2 + B_3 + B_4 + B_6) & -B_6 \\ -B_5 & -B_6 & (B_5 + B_6 + B_7) \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Utilisant la formule

$$[\bar{Y}_r] = [\bar{Y}_{G1}] - [\bar{Y}_{G1}] \cdot [\bar{Y}_{LL}]^{-1} \cdot [\bar{Y}_{LG1}] \quad (1.7)$$

nous pouvons tirer

$$[\bar{Y}_r] = j \begin{bmatrix} -0.7708 & 0.1788 & 0.5919 \\ 0.1788 & -0.7428 & 0.5640 \\ 0.5919 & 0.5640 & \text{-----} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

En fait, la dernière ligne n'est pas nécessaire, car nous nous intéressons seulement aux machines G1 et G2.

• **Pendant le défaut**

La figure ci-après montre le réseau pendant le défaut.

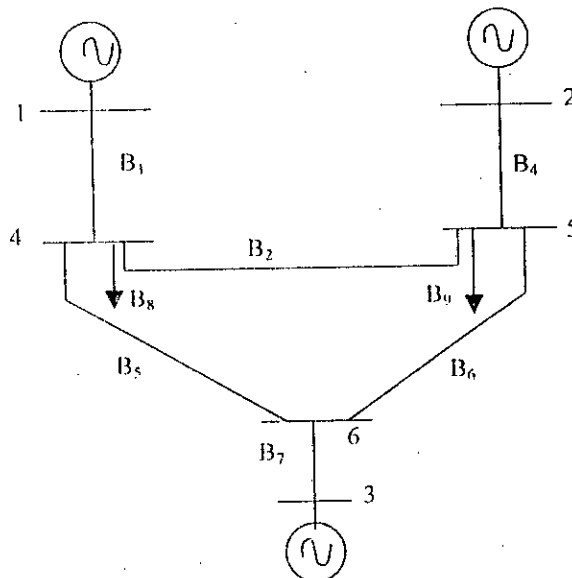


Fig. 1.2 Le réseau pendant le défaut.

Nous avons les relations suivantes

$$B_8 = \frac{B_3}{0.2}, \quad B_9 = \frac{B_3}{0.8} \quad (1.9)$$

Dans la matrice $[\bar{Y}]$ précédente, nous changeons les éléments suivants

$$\begin{cases} y_{44} = j(B_1 + B_2 + B_5 + B_8) \\ y_{45} = -jB_2 \\ y_{54} = -jB_2 \\ y_{55} = j(B_2 + B_9 + B_4 + B_6) \end{cases} \quad (1.10)$$

Le calcul donne

$$[\bar{Y}_r] = j \begin{bmatrix} -1.0233 & 0.0424 & 0.2502 \\ 0.0424 & -0.8166 & 0.3793 \\ 0.2502 & 0.3793 & \text{-----} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Après le défaut (ouverture de la ligne)

La figure ci-après montre le réseau après le défaut.

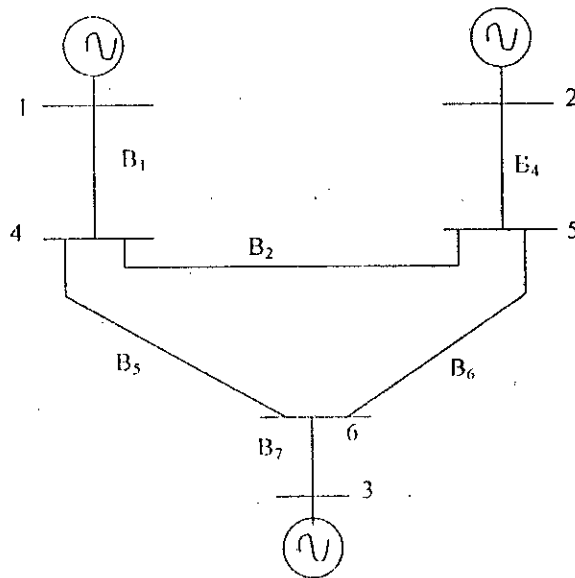


Fig. I.3 Le réseau après le défaut.

Dans la matrice $[\bar{Y}]$ précédente, nous changeons les éléments suivants

$$\begin{cases} y_{44} = j(B_1 + B_2 + B_3) \\ y_{45} = -jB_2 \\ y_{54} = -jB_2 \\ y_{55} = j(B_2 + B_4 + B_6) \end{cases} \quad (I.12)$$

Le calcul donne

$$[\bar{Y}_r] = j \begin{bmatrix} -0.7126 & 0.1235 & 0.5891 \\ 0.1235 & -0.6902 & 0.5667 \\ 0.5891 & 0.5667 & \text{-----} \end{bmatrix} \quad (I.13)$$

ANNEXE II

LES PARAMETRES DU RESEAU A TROIS MACHINES

Paramètres du réseau

| Nœud de départ | Nœud d'arrivée | R (pu) | x (pu) |
|----------------|----------------|----------|----------|
| 1 | 2 | 0.0923 | 0.5313 |
| 1 | 3 | 0.1293 | 0.7169 |
| 1 | 4 | 0.1782 | 0.7998 |
| 2 | 3 | 0.0628 | 0.4775 |
| 2 | 4 | 0.0666 | 0.3520 |
| 3 | 4 | 0.0926 | 0.6508 |

Paramètres des charges

$$A = 0.4257 - j 2.038 \text{ p.u.}$$

$$B = 0.1121 - j 1.176 \text{ p.u.}$$

$$C = 0.4218 - j 1.475 \text{ p.u.}$$

Paramètres des machines

| Machine | x_d (p.u.) | x_d' (p.u.) | T_{d0}' (s) | H (s) | D | k_c |
|---------|--------------|---------------|---------------|---------|-----|-------|
| 1 | 1.68 | 0.32 | 4.0 | 2.31 | 0 | 20 |
| 2 | 0.88 | 0.33 | 8.0 | 3.40 | 0 | 20 |
| 3 | 1.02 | 0.20 | 7.76 | 4.63 | 0 | 20 |

Point de fonctionnement

$$\delta_{10} = 37.93^\circ, V_{110} = 1.00 \text{ p.u.}, p_{m1} = 0.8 \text{ p.u.}$$

$$\delta_{20} = 32.07^\circ, V_{120} = 1.02 \text{ p.u.}, p_{m2} = 0.7 \text{ p.u.}$$

$$\delta_{30} = 20.88^\circ, V_{130} = 1.04 \text{ p.u.}, p_{m3} = 0.5 \text{ p.u.}$$

Calcul de la matrice admittance réduite

D'abord, nous allons faire un changement de numérotation des différents nœuds. Ceci sera fait après l'ajout des nœuds additionnels correspondant aux nœuds internes des générateurs. Le défaut considéré ici est un court-circuit triphasé survenant à la ligne de transmission qui lie le nœud (1) au nœud (2) à une distance du nœud (1) égale à 20% de la longueur de cette ligne. Ce défaut est poursuivi par l'ouverture de cette ligne de transmission.

- Avant le défaut

La figure ci-après montre le réseau avant l'arrivée du défaut.

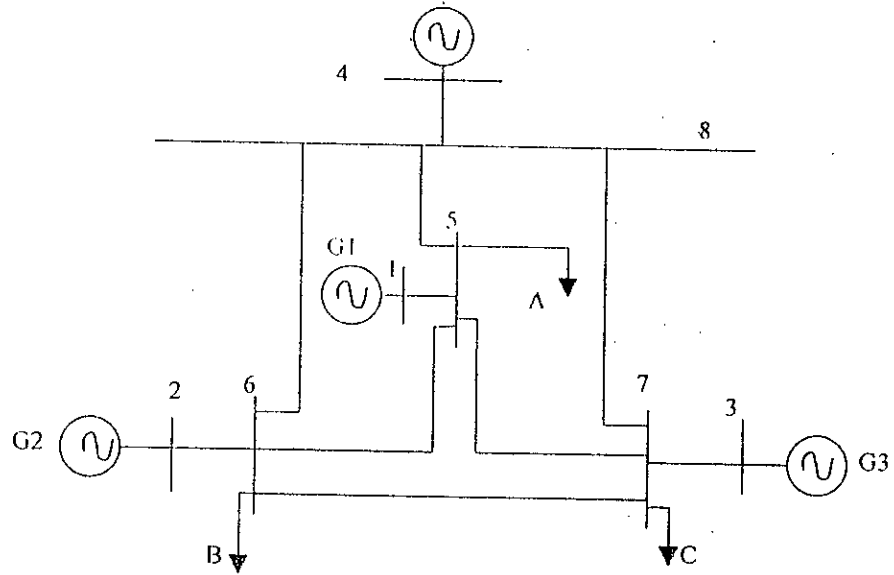


Fig. II.1 Le réseau avant le défaut.

Nous pouvons tirer

$$[Y_r] = \begin{bmatrix} 0.1827 - j1.5941 & 0.0281 + j0.3818 & 0.0193 + j0.5030 & -0.1161 + j1.1017 \\ 0.0281 + j0.3818 & 0.1462 - j1.8560 & 0.0386 + j0.5227 & -0.1161 + j1.3949 \\ 0.0193 + j0.5030 & 0.0386 + j0.5227 & 0.2633 - j2.0235 & -0.1382 + j1.5809 \\ -0.1161 + j1.1017 & -0.1013 + j1.3949 & -0.1382 + j1.5809 & 0.4209 - j4.0000 \end{bmatrix}$$

- **Pendant le défaut**

La figure ci-après montre le réseau pendant le défaut.

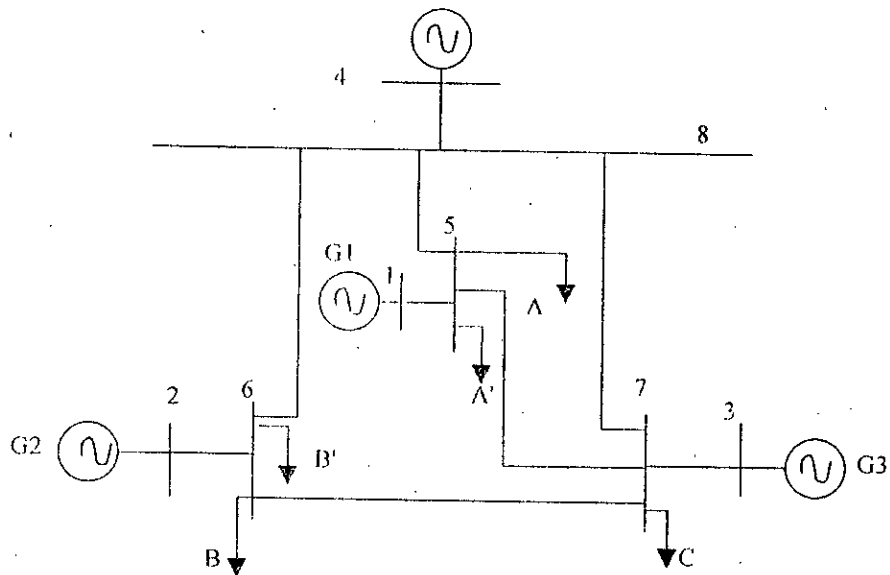


Fig. II.2 Le réseau pendant le défaut.

Nous pouvons tirer

$$[Y_r] = \begin{bmatrix} 0.1023 - j2.4492 & 0.0017 + j0.0227 & 0.0115 + j0.1688 & -0.0245 + j0.3384 \\ 0.0017 + j0.0227 & 0.1382 - j2.0067 & 0.0381 + j0.3826 & -0.0564 + j1.0757 \\ 0.0115 + j0.1688 & 0.0381 + j0.3826 & 0.2694 - j2.1535 & -0.0818 + j1.2871 \\ -0.0245 + j0.3384 & -0.0564 + j1.0757 & -0.0818 + j1.2871 & 0.6454 - j4.0000 \end{bmatrix}$$

- **Après le défaut**

La figure ci-après montre le réseau après le défaut.

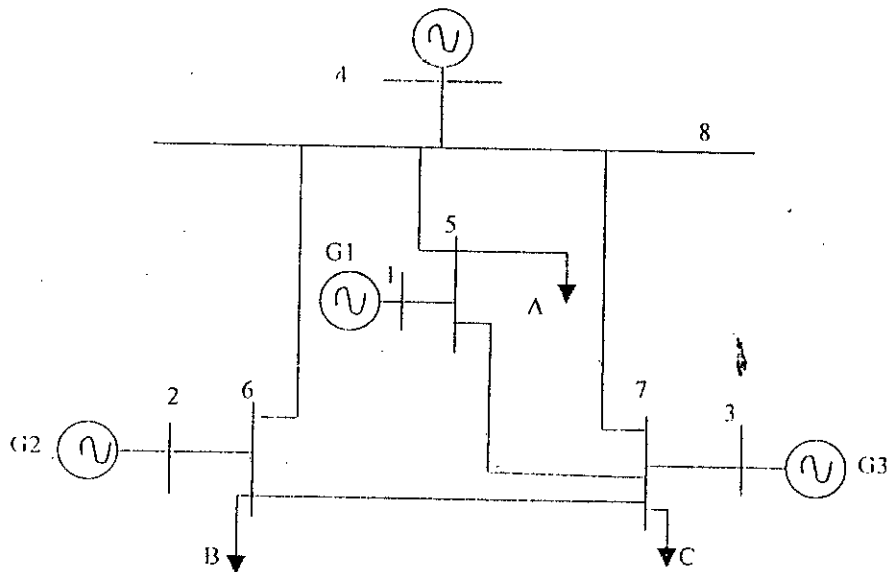


Fig. II.3 Le réseau après le défaut.

Nous pouvons tirer

$$[Y_r] = \begin{bmatrix} 0.2137 - j1.1909 & 0.0017 + j0.0875 & 0.0129 + j0.4899 & -0.1134 + j0.9830 \\ 0.0017 + j0.0875 & 0.1682 - j1.6413 & 0.0434 + j0.5322 & -0.1022 + j1.4816 \\ 0.0129 + j0.4899 & 0.0434 + j0.5322 & 0.2637 - j2.0232 & -0.1367 + j1.5849 \\ -0.1134 + j0.9830 & -0.1022 + j1.4816 & -0.1367 + j1.5849 & 0.4166 - j4.0000 \end{bmatrix}$$

ANNEXE III

NORMES ET CONORMES TRIANGULAIRES

NORMES TRIANGULAIRES

La norme triangulaire (t-norme) est une classe d'opérations binaires définies par

$$T: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1] \quad (\text{III.1})$$

qui satisfont les axiomes suivants

1. Commutativité

$$\forall x, y \quad T(x, y) = T(y, x) \quad (\text{III.2})$$

2. Associativité

$$\forall x, y, z \quad T(x, T(y, z)) = T(T(x, y), z) \quad (\text{III.3})$$

3. Monotonie

$$\forall x, y, z, t \quad \text{si } x \leq z \text{ et } y \leq t \text{ alors } T(x, y) \leq T(z, t) \quad (\text{III.4})$$

4. Le 1 est l'élément neutre

$$T(x, 1) = x \quad (\text{III.5})$$

L'opération MIN est un exemple d'une t-norme.

CONORMES TRIANGULAIRES

La conorme triangulaire (t-conorme) est une classe d'opérations binaires définies par

$$\perp: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1] \quad (\text{III.6})$$

qui satisfont les axiomes suivants

5. Commutativité

$$\forall x, y \quad \perp(x, y) = \perp(y, x) \quad (\text{III.7})$$

6. Associativité

$$\forall x, y, z \quad \perp(x, \perp(y, z)) = \perp(\perp(x, y), z) \quad (\text{III.8})$$

7. Monotonie

$$\forall x, y, z, t \quad \text{si } x \leq z \text{ et } y \leq t \text{ alors } \perp(x, y) \leq \perp(z, t) \quad (\text{III.9})$$

8. Le 0 est l'élément neutre

$$\perp(x, 0) = x \quad (\text{III.10})$$

L'opération MAX est un exemple d'une t-conorme.

ANNEXE IV

REGLAGE FLOU BASE SUR LE MODELE DYNAMIQUE FLOU

Régulateur flou basé sur le modèle dynamique flou

Dans [Cao 96] est démontré le théorème suivant:

Théorème:

Soit le système non linéaire vérifiant les hypothèses du chapitre II.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u) \\ &= \sum_{i=1}^m \mu_i A_i \cdot x + \sum_{i=1}^m \mu_i B_i \cdot u\end{aligned}\quad (\text{IV.1})$$

avec $\mu_i, i=1, \dots, m$ des fonction d'appartenance associées aux régions $R_i, i=1, \dots, m$.

Pour un modèle de référence semi-globalement, uniformément et exponentiellement stable donné.

$$\dot{x}(t) = \bar{A}(\mu) \cdot x(t), \quad \text{avec} \quad \bar{A}(\mu) = \sum_{i=1}^m \mu_i(x) \cdot \bar{A}_i \quad (\text{IV.2})$$

et dans lequel nous ayons

$$\|\Delta \bar{A}_l\| = \max_{x \in R_l} \sum_{i=1, i \neq l}^m \mu_i \|\bar{A}_i - \bar{A}_l\| \quad (\text{IV.3})$$

$l=1, \dots, m$, suffisamment faibles, et s'il existe un ensemble de solutions (K_1, \dots, K_m) pour les équations

$$\bar{A}_l = A_l + B_l K_l, \quad l=1, \dots, m \quad (\text{IV.4})$$

avec

$$\|\Delta K_l\| = \max_{x \in R_l} \sum_{i=1, i \neq l}^m \mu_i \|K_i - K_l\|, \quad l=1, \dots, m \quad (\text{IV.5})$$

suffisamment faibles, alors nous pouvons trouver un régulateur flou donné par

$$u = K(\mu) \cdot x(t), \quad \text{avec} \quad K(\mu) = \sum_{i=1}^m \mu_i(x) \cdot K_i \quad (\text{IV.6})$$

qui rend le système en boucle fermée semi-globalement uniformément et exponentiellement stable.

≈

Remarques:

1. la condition est suffisante,
2. nous pouvons choisir le nombre m suffisamment grand pour assurer les conditions (IV.3) et (IV.5).

Fonctions d'appartenance

Dans ce qui suit, nous allons montrer l'existence de fonctions d'appartenance qui permettent d'écrire $f(x)$, définie dans l'intervalle $[x_1, x_2]$ sous la forme

$$f(x) = v_1(x)v_1 + v_2(x)v_2 \quad (\text{IV.7})$$

avec $y=f(x)$, $y_1=f(x_1)$ et $y_2=f(x_2)$.

D'abord, nous avons

$$\begin{aligned} y &= \mu_1(y) \cdot y_1 + \mu_2(y) \cdot y_2 \\ 1 &= \mu_1(y) + \mu_2(y) \end{aligned} \quad (\text{IV.8})$$

avec

$$\begin{aligned} \mu_1(y) &= \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} \\ \mu_2(y) &= \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \end{aligned}, \quad y \in [y_1, y_2] \quad (\text{IV.9})$$

En posant $v_1(x) = (\mu_1 \circ f)(x)$ et $v_2(x) = (\mu_2 \circ f)(x)$, et utilisant (IV.8) nous aurons (IV.7).

Nous pouvons généraliser ce résultat pour le cas multidimensionnel.