

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

P0020/05B

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département Génie Electrique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Mémoire de Fin d'Etudes pour l'obtention
du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en
Electrotechnique

Thème

**Amélioration de la Stabilité Dynamique des
Réseaux Electriques par les Algorithmes
Génétiques**

Dirigé par :

Dr. M. BOUDOUR

présenté par :

ROUABHI Adel

TEBBAKH Youb

Ecole Nationale Polytechnique
10 Avenue Hassen badi, B.P.182, El-Harrach, Alger.

ملخص :



تناول هذه الرسالة استعمال الخوارزميات الجينية في تعيين محددات مثبتات القوة في الأنظمة الكهربائية. إن إضافة مثبت قوة كملحق لنظام الإثارة في المولد لتوهين الذبذبات الالكترو ميكانيكية يحسن من استقرار الحركات الصغيرة لمحمل النظام الكهربائي. وبالتالي، فيجب على المثبت أن يكون فعالا بحيث نضمن توهين جيد ومرض. لهذا الغرض، تقام دراسة استقرار الحركات الصغيرة والتي تتركز على حساب القيم الذاتية للنظام. هذه الدراسة تفترض تكوين نموذج خطي للنظام حول نقطة تشغيل معينة. تقنيات الخوارزميات الجينية تتركز على آليات الاختيار الفطري، الوراثة والنشوء. لقد أثبتوا أنها وسيلة فعالة في ميدان التفعيل، ونحن نطبقها في هذه الدراسة لتعيين محددات المثبت.

الكلمات المفتاحية : الخوارزميات الجينية، الأنظمة الكهربائية، استقرار الحركات الصغيرة، مثبتات القوة، القيم الذاتية

Résumé :

Ce mémoire présente l'utilisation des algorithmes génétiques (AG) pour la synthèse des paramètres des stabilisateurs de puissance (PSS) dans les systèmes électriques multi machines. L'insertion d'un stabilisateur de puissance, comme auxiliaire du système d'excitation du générateur permettra d'amortir les oscillations électromécaniques. Pour cela, une analyse de la stabilité en petit mouvement basée sur les valeurs propres est effectuée. Cette analyse suppose un modèle linéaire du système autour d'un point de fonctionnement. Les algorithmes génétiques qui sont des techniques de recherche basées sur les mécanismes de sélection naturelle de la génétique et de l'évolution, sont appliqués dans cette étude pour déterminer les paramètres optimisés des dispositifs stabilisateurs PSS.

Mots-clés : algorithmes génétiques, systèmes électriques, stabilité en petit mouvement, stabilisateurs de puissance, valeurs propres.

Abstract :

This thesis presents the use of genetic algorithms (GA) for the synthesis of power system stabilizer (PSS) parameters in mulimachine power systems. Adding a power system stabilizer as a supplementary excitation control, allow us to damp electromechanical oscillations and enhance the overall system small signal stability. Thus, the PSS parameters are optimised to insure a satisfactory damping. For this purpose; an eigenvalue-based small signal stability analyse is performed. This analyse assumed a linearized model of the power system around on operating point. Genetic algorithms that consist in search techniques based on mechanics of natural selection, genetic and evolution are then applied in this study to determine the optimised parameters of the PSS.

Keywords: genetic algorithms, power systems, small signal stability, power system stabilisers, eigenvalues.

Remerciements

Nous remercions en premier lieu notre DIEU tout puissant de nous avoir donné la santé et le pouvoir de terminer ce modeste travail.

Nous remercions particulièrement notre promoteur DR. M. BOUDOUR, pour sa précieuse directive, sa très grande disponibilité, son suivi constant et ses qualités humaines.

Nos sincères et chaleureux remerciements à Monsieur K. SEBAA pour son appui ainsi qu'aux conseils qu'ils nous ont fournis.

Nos vifs remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Nous tenons également à remercier le président et les membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

Que tous les professeurs ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.

DEDICACES

*Je dédie ce travail à ma très chère mère et à
mon père, qui m'ont vraiment soutenu, à mes
frères et sœurs, ainsi qu'à mes amis et
camarades d'études, et à mon promoteur.*

*A mon binôme Ayoub et sa famille
Enfin que tous ceux qui ont participé de près
ou de loin dans l'élaboration
de ce travail trouvent ici l'expression
de ma reconnaissance : ils se reconnaîtront*

Adel

DEDICACES

Chaleureusement je dédie ce modeste travail

A l'âme de mon cher père MOHAMMED.

*A mes chères mères en témoignage de leur amour
et leur sacrifice sans limites à qui je souhaite la
bonne santé et que Dieu me les garde.*

A mon frère et mes sœurs.

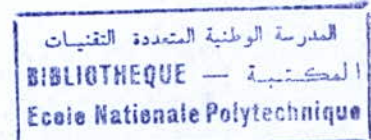
*A toute la famille TEBBAKH et ABDSLAM et
BAHHAZ.*

A mon binôme ADEL et sa famille.

A tous mes amis TAWAT...

A tous mes collègues de la promotion 2005.

Youb



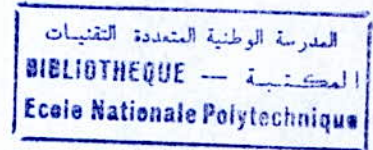
Liste des Figures

	Page
I.1 Classification de la stabilité des systèmes électriques.....	5
II.1 Schéma unifilaire du réseau 2 régions 4 machines.....	18
II.2 Représentation d'un vecteur dans deux repères différents.....	19
II.3 Représentation du circuit électrique d'une machine synchrone.....	20
II.4 Représentation du circuit équivalent dans le repère de <i>Park</i>	20
II.5 Diagramme des phases relatives à la i^{me} machine.....	21
II.6 Modèle du régulateur de vitesse et de la turbine.....	24
II.7 Modèle simplifié de l'excitation.....	25
II.8 Schéma fonctionnel de la i^{eme} machine du réseau multimachine.....	34
III.1 Schéma unifilaire du réseau 2 Régions 4 machines.....	42
III.2 <i>Déviaton</i> de l'angle interne des générateurs lors d'une perturbation de 5% de la machine 3, sans commande et avec la commande optimale linéaire.....	45
III.3 <i>Déviaton</i> de la vitesse des générateurs lors d'une perturbation de 5% de la machine 3, sans commande et avec la commande optimale linéaire.....	46
III.4 Modèle du stabilisateur de puissance.....	47
III.5 Réponses temporelles de l'angle interne ($\Delta\delta$) et de la vitesse ($\Delta\omega$) des générateurs...50	50
IV.1 Organigramme d'un algorithme génétique simple.....	55
IV.2 Exemple d'un chromosome en codage binaire.....	56
IV.3 Sélection par la méthode de la roue de loterie.....	58
IV.4 Croisement multipoints ($p = 2$) en codage binaire.....	60
IV.5 Croisement uniforme en codage binaire.....	60
IV.6 Mutation dans le cas d'un codage binaire.....	61
IV.7 Réponses temporelle : (a) l'angle interne $\Delta\delta$ et (b) la vitesse $\Delta\omega$, des générateurs, avec PSS optimisé, avec charge nominale.....	65

IV.8 Réponses temporelle : (a) l'angle interne $\Delta\delta$ et (b) la vitesse $\Delta\omega$, des générateur, avec transite de puissance de la région 2 vers 1 avec niveau de charge faible.....66

IV.9 Réponses temporelle : (a) l'angle interne $\Delta\delta$ et (b) la vitesse $\Delta\omega$, des générateur, avec transite de puissance de la région 1 vers 2 avec niveau de charge fort.....67

A.1 Schéma unifilaire du réseau 2 régions 4 machines.....A.4



Liste des Tableaux

Tableau	Page
III.1 Valeurs propres du système sans commande et avec commande optimale.	44
III.2 Modes d'oscillation du système sans PSS	48
III.3 Contribution des générateurs dans les modes électromécaniques	49
IV.1 Paramètre d'optimisation de l'AG	64
IV.2 Paramètres des PSS obtenus après optimisation	64



Liste des Symboles et Acronymes

Symboles	ACRONYMES
A	matrice d'état du système
B	matrice de commande
\underline{X}	vecteurs d'état
\underline{U}	vecteur de commande
Δ	indique une petite perturbation ou déviation d'une variable
$K_1...K_6$	matrice de linéarisation
λ	valeur propre
ξ	facteur d'amortissement (x_i)
s	opérateur de Laplace
P_c	probabilité de croisement
P_m	probabilité de mutation
ω	vitesse angulaire
ω_0	vitesse de synchronisme
δ	angle du rotor
P_e	puissance électrique active
Q_e	puissance électrique réactive
P_m	puissance mécanique
V	tension terminale du générateur
V_d, V_q	composante directe et en quadrature de la tension terminale

E'_q	f.é.m transitoire d'axe en quadrature
E_{fd}	tension d'excitation
I	courant d'armature du générateur
I_d, I_q	composante directe et en quadrature du courant d'armature
Y_r	matrice admittance réduite
H	constante d'inertie
D	coefficient d'amortissement
X_d, X_q	réactance synchrone d'axe direct et en quadrature
X'_d	réactance transitoire d'axe direct
T'_{do}	constante de temps transitoire d'axe direct
K_a	gain de l'AVR
T_a	constante de temps de l'AVR
K_c	gain du PSS
T_1, T_1	constantes de temps du PSS
ng	nombre des générateurs
f	fréquence
t	temps
$[]^T$	transposée
AG	Algorithmes Génétiques
AVR	Automatic Voltage Regulator (régulateur de tension)
[p.u]	per unit (unité relative)

SOMMAIRE



◆ Résumé	
◆ Dédicaces	
◆ Remerciements	
◆ Sommaire.....	i
◆ Liste des Figures.....	iv
◆ Liste des Tableaux.....	vi
◆ Liste des Symboles et Acronymes.....	vii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : DEFINITIONS ET CONCEPTS DE BASE	
I-1 : Introduction.....	3
I.2 : Stabilité des systèmes électriques.....	4
I-2.1 : Notion sur la stabilité.....	4
I-2.2 : Types de stabilité.....	5
I-3 : Synthèse des méthodes utilisées.....	6
I-3.1 : Intégration numérique.....	7
I-3.2 : Méthode directe de LYAPUNOV.....	7
I-3.3 : Méthode des valeurs propres.....	8
I-3.4 : Méthode probabilistiques	8
I-3.5 : Méthode par reconnaissance de forme.....	9
I-3.6 : Méthode des couples synchrone et amortisseur.....	9
I-4 : Techniques d'amélioration de stabilité.....	10
I-4.1 : Commande linéaire optimale.....	10
I-4.2 : Amélioration de la stabilité par les PSS.....	10
I-4.3 : Insertion des Dispositifs Stabilisateurs PSS.....	11
I-4.4: Méthodes Intelligentes.....	12
I-5 : Cadre de notre étude.....	14
I-6 : Conclusion.....	15

CHAPITRE II : MODELES DES SYSTEMES ELECTRIQUES DE PUISSANCE

II-1 : Introduction.....	17
II-2 : Modélisation du système.....	16
II-2.1 : Réseau d'application.....	18
II-2.2 : Référentiel Commun.....	19
II-2.3 : Modèle de l'alternateur.....	19
II-2.4 : Equations électriques	21
II-2.5 : Equations mécaniques	22
II-2.6 : Modèles des systèmes de régulation.....	23
II-2.6.1 : Régulation de la vitesse.....	24
II-2.6.2 : Régulation de la tension.....	24
II-2.7 : Modèles des transformateurs.....	27
II-2.8 : Modèles des lignes de transmission.....	27
II-2.9 : Modèles des charges.....	27
II-2.10 : Modèle du réseau de transport.....	27
II-3 : Etude du modèle linéarisé	29
II-4 : Conclusion.....	34

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITE

III-1 : Introduction.....	37
III-2 : Analyse de stabilité.....	38
III-2.1 : Valeurs propres.....	38
III-2.2 : vecteurs propres.....	40
III-2.3 : Facteurs de contribution	40
III-3 : Application au système 2 régions 4 machines.....	42
III-3.1 : Description du Système d'application.....	42
III-3.2 : Commande Linéaire Optimale.....	43
III-4 : Résultats de simulation.....	44
III-4.1 : Valeurs propres.....	44
III-4.2 : Analyse temporelle.....	45
III-4.3 : Amélioration de la Stabilité avec les PSS.....	47

III-4.3.1 : Fonction de transfert du PSS.....	47
III-4.3.2 : Analyse temporelle.....	50
III-5 : Conclusion.....	51

CHAPITRE IV : ALGORITHMES GENETIQUES

IV-1 : Introduction	53
IV-2 : Présentation des algorithmes génétiques.....	54
IV-3 : Description des algorithmes génétiques	55
IV-3 .1 : Codage initiale.....	55
IV-3 .2 : Evaluation.....	57
IV-3 .3 : Sélection.....	57
IV-3 .3 .1 : Méthode de la roulette de loterie.....	57
IV-3 .3 .2 : Méthode du tournoi.....	58
IV-3 .4 : Recombinaison.....	59
IV-3 .4 .1 : Croisement.....	59
IV-3 .4 .2 : Mutation.....	60
IV-3 .5 : Critère d'arrêt.....	61
IV-4 : Réglage des paramètres d'un AG.....	61
IV-5 : Formulation de la fonction objective.....	62
IV-6 : Résultat d'optimisation.....	63
IV-6.1 : Test de robustesse.....	66
IV-7 : Conclusion.....	68
 CONCLUSION GENERALE.....	 69
♦ Bibliographie.....	71
♦ Annexe.....	A.1

INTRODUCTION GENERALE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Les problèmes liés au fonctionnement des réseaux de transport et de production d'énergie électrique ont pris une grande importance, notamment après des black-out paralysant des villes entières, à cause d'une consommation d'électricité qui augmente de plus en plus. Les réseaux électriques ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et interconnectés, formant ainsi un système large et complexe capable de générer, de transmettre et de distribuer l'énergie électrique à travers de vastes étendues.

Un réseau est modélisé par des lignes, câbles, transformateurs, des moyens de production de l'énergie active et réactive (générateur) et des charges.

La tension, la fréquence et l'angle interne sont les trois principaux facteurs déterminant la qualité de l'énergie électrique distribuée aux consommateurs, et indispensable pour la continuité de service, ils doivent être maintenues dans les limites correspondant aux besoins des consommateurs et au bon fonctionnement du réseau. L'analyse de la stabilité consiste à évaluer la capacité du système à supporter des éventuelles perturbations, et de proposer par la suite les moyens de réglage adéquats permettant d'améliorer cette capacité et le maintien de ces trois grandeurs [1].

Les générateurs interconnectés produisent les couples qui dépendent du déplacement relatif des angles de leurs rotors, et ces couples agissent pour maintenir les générateurs dans le synchronisme.

Si la perturbation est petite, les couples de synchronisme maintiennent les générateurs nominalement dans le synchronisme, mais les angles relatifs des générateurs restent perturbés. [2]. D'autre part, Si la perturbation est grande, la nature non linéaire du couple de synchronisme peut ne pas mettre les angles de générateur à un état d'équilibre. Certains ou tous les générateurs perdent alors le synchronisme et le système devient instable.

Les oscillations électromécaniques peuvent apparaître d'abord quand le réseau est contraint à alimenter des charges variables sans cesse croissantes. De ce fait, les générateurs doivent s'appuyer plus fortement sur leurs systèmes d'excitation pour maintenir le synchronisme. A défaut, et à un certain point, sans commande supplémentaire, les oscillations deviennent instables.

Les chercheurs ont eu recours à des approches classiques liées à la théorie de la commande. Mais à partir des années 1960 des approches dites intelligentes sont apparues afin d'essayer de régler ces problèmes devenus plus complexes. Encouragées par le développement des calculateurs, ces méthodes n'ont vu leur application qu'aux années 1990. Ces approches simulent des phénomènes physiques, le comportement humain, ou l'évolution des êtres vivants et sont appelées méthodes intelligentes [3].

Dans ce présent travail, nous nous intéressons particulièrement à l'analyse de la stabilité dynamique du réseau, en amortissant les oscillations de l'angle interne. Dans un premier temps, une commande classique est étudiée, notamment la commande optimale, puis l'introduction d'un dispositif régulateur PSS sans optimisation, enfin on appliquera les algorithmes génétiques afin d'optimiser les paramètres du PSS.

Le premier chapitre traite des concepts et notions de base indispensables à toute étude de stabilité de fonctionnement des R.E.E. Des définitions et une synthèse des méthodes déjà utilisées pour l'évaluation de la stabilité y sont représentées.

Au deuxième chapitre, une description des différents modèles du système électrique de puissance, constituants du réseau d'étude est faite. L'ensemble du système étudié est constitué de l'alternateur, de sa ligne, de sa charge non linéaire, de ses régulateurs primaires de tension et de vitesse et de ses dispositifs stabilisateurs. Puis l'obtention du modèle d'état à partir de la linéarisation autour du point de fonctionnement des équations d'états régissant le système électrique.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse de la stabilité. On évaluera la stabilité dynamique des réseaux d'énergie électrique multi-machines sans aucune commande. Puis on s'intéressera à la commande linéaire optimale et à la l'insertion des PSS Les résultats des différents programmes de simulation y sont présentés et discutés.

Le quatrième chapitre porte sur les algorithmes génétiques et les résultats de l'optimisation des PSS par ces algorithmes, afin d'améliorer la stabilité dynamique du réseau d'énergie électrique.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale présentant les principaux résultats obtenus dans notre travail ainsi que les perspectives pour les travaux ultérieurs.

1.2 STABILITE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

Les problèmes de stabilité dans les systèmes électriques ont depuis longtemps reçu une très grande attention. En effet, un système électrique en fonctionnement peut subir une grande variété de perturbations ou d'incidents [4], tels que :

CHAPITRE I

DEFINITIONS ET CONCEPTS DE BASE

- Le déclenchement d'une unité de production ou d'une charge.
- La foudre atteignant une ligne.
- Un court-circuit au réseau.

Ces phénomènes dynamiques mettent en jeu des constantes de temps très différentes allant de la microseconde à l'heure. Cette caractéristique est d'une grande aide et permet de classer la stabilité des systèmes électriques en plusieurs catégories [5].

1.2.1 Notions de stabilité

La stabilité d'un système électrique est l'aptitude de celui-ci pour un point de fonctionnement donné, à retrouver un état d'équilibre après avoir subi une perturbation physique, sans que les variables du système ne violent telle sorte que l'ensemble du système reste intact [6].

1.1 INTRODUCTION

Ce chapitre introductif définit la notion de stabilité ainsi que les différents types de stabilité. Cependant, avec l'accroissement d'interconnexions de grands réseaux d'énergie électrique, l'intérêt pour la stabilité dynamique s'est considérablement accru.

Dans ce chapitre sont décrits les motivations qui ont conduit à effectuer cette étude. Une synthèse bibliographique sur les différentes méthodes utilisées dans l'analyse de la stabilité des réseaux d'énergie électrique ainsi qu'un aperçu sur la contribution apportée par notre étude y seront également présentés.

I.2 STABILITE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

Les problèmes de stabilité dans les systèmes électriques ont depuis longtemps reçu une très grande attention. En effet, un système électrique en fonctionnement peut subir une grande variété de perturbations ou d'incidents [4], tels que :

- La variation de la charge au cours de la journée.
- La manœuvre d'un ouvrage de couplage.
- Le déclenchement d'une unité de production ou d'une charge.
- La foudre atteignant une ligne.
- Un court-circuit en réseau.

Ces phénomènes dynamiques mettent en jeu des constantes de temps très différentes allant de la microseconde à l'heure. Cette caractéristique est d'une grande aide et permet de classer la stabilité des systèmes électriques en plusieurs catégories [5].

I.2.1 Notions de Stabilité

La stabilité d'un système électrique est l'aptitude de celui-ci, pour un point de fonctionnement donné, à retrouver un état d'équilibre après avoir subi une perturbation physique, sans que les variables du système ne violent leurs contraintes de limite, de telle sorte que l'ensemble du système reste intact [6].

Elle est caractérisée par les fluctuations de puissances transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions et fréquences associées. Nous distinguons trois types de stabilité.

Nous distinguons trois types de stabilité :

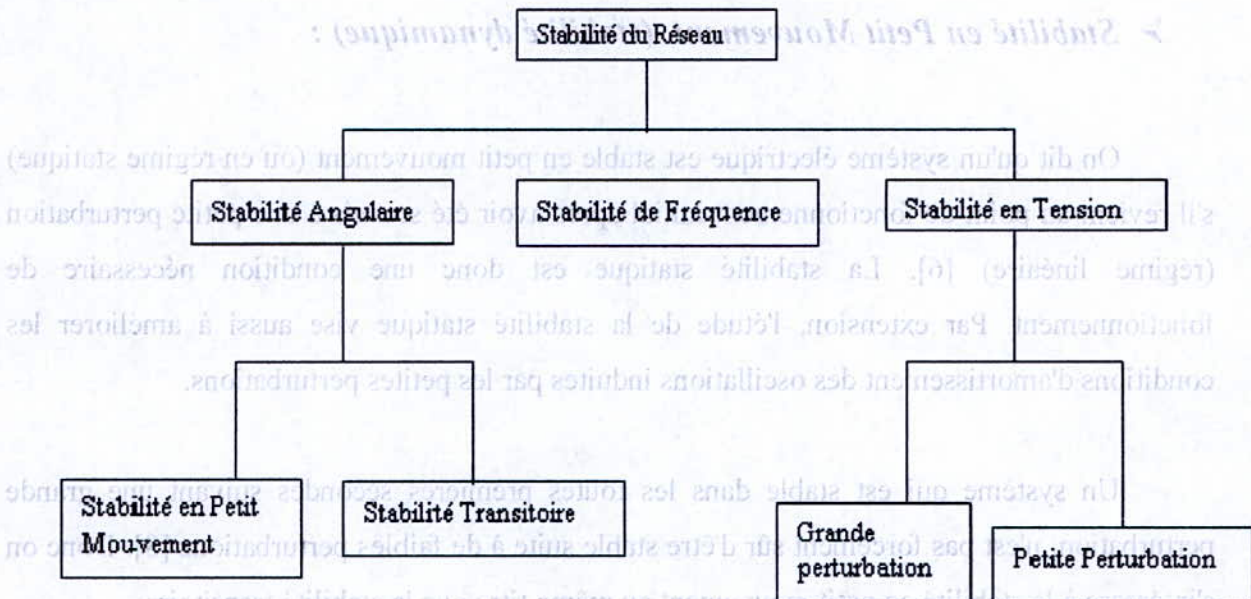


Figure I.1 Classification de la stabilité des systèmes électriques

I.2.2 Types de Stabilité

➤ **Stabilité statique :**

Le réseau a un comportement stable, c'est-à-dire que, soumis à de faibles perturbations, il revient à son point de fonctionnement initial ceci avec d'éventuelles oscillations amorties jusqu'au retour à l'équilibre [7]. Elle concerne les phénomènes lents engendrés par des baisses ou montées de charge journalières, ainsi que de ses variations des plans de tension et/ou de fréquence

➤ **Stabilité Transitoire :**

On dit qu'un système électrique est stable en régime transitoire si, partant d'un point de fonctionnement stable en régime statique, il revient à un point de fonctionnement stable en régime statique, après avoir été soumis à une perturbation donnée (éventuellement de grande amplitude et susceptible de provoquer des comportements non linéaires). [6]

➤ **Stabilité en Petit Mouvement (stabilité dynamique) :**

On dit qu'un système électrique est stable en petit mouvement (ou en régime statique) s'il revient au point de fonctionnement initial après avoir été soumis à une petite perturbation (régime linéaire) [6]. La stabilité statique est donc une condition nécessaire de fonctionnement. Par extension, l'étude de la stabilité statique vise aussi à améliorer les conditions d'amortissement des oscillations induites par les petites perturbations.

Un système qui est stable dans les toutes premières secondes suivant une grande perturbation, n'est pas forcément sûr d'être stable suite à de faibles perturbations [8]. Donc on s'intéresse à la stabilité en petit mouvement au même titre que la stabilité transitoire.

Contrairement à la stabilité transitoire, qui nécessite un modèle non linéaire du système électrique, la stabilité en petit mouvement s'étudie sur un modèle préalablement linéarisé autour d'un point de fonctionnement. Ainsi, nous pouvons analyser la stabilité en petit mouvement en utilisant les méthodes d'analyse des systèmes linéaires. En se basant sur l'identification des valeurs propres du système.

Un moyen efficace et économique d'améliorer la stabilité en petit mouvement d'un système électrique est d'équiper de régulateurs de tension, de générateurs, et de dispositifs de stabilisation appelés stabilisateurs de puissance (Power System Stabilizers : PSS) [9]. Ces stabilisateurs, avec un choix adéquat de leurs paramètres, aident à amortir les oscillations induites par les petites perturbations, ainsi qu'améliorer la stabilité de l'ensemble du système

I.3 SYNTHÈSE DES METHODES UTILISEES

Une variété d'approches permettant l'évaluation de la stabilité des R.E.E ont été proposées dans la littérature. Elles peuvent être classées en six catégories distinctes entre elles de par choix et la nature des méthodes utilisées.

I.3.1 Intégration Numérique

Cette méthode procède par intégration numérique des équations différentielles décrivant le réseau dans l'espace d'état. Il existe une grande variété d'algorithmes d'intégration. Les plus utilisés sont ceux Runge-Kutta et du prédicteur-correcteur d'Euler.

Les équations différentielles qui décrivent le comportement du système sont discrétisées en une forme quasi-linéaire. Cette approche présente l'avantage de pouvoir considérer des modèles très complets (saturation, saillance, organes de régulation...). Il en découle une grande précision. Cependant, nécessitant un temps de calcul important, elle reste incompatible avec une évaluation en ligne de la stabilité [10].

I.3.2 Méthode Directe de Type Lyapunov

Afin d'obtenir une évaluation plus rapide de la stabilité. Les recherches orientées vers les méthodes directes n'ont jamais cessé. Ces méthodes essentiellement fondées sur des concepts d'énergie de type Lyapunov. Laquelle dépend des variations d'état représentant le modèle.

Deux conditions suffisantes de stabilité sont données par le deuxième théorème de Lyapunov : si la fonction v définie dans un domaine de l'espace d'état incluant l'origine existe. Ce dernier est :

- ✓ stable si v est semi-définie négative.
- ✓ Asymptotiquement stable si v est définie négative.

Les méthodes directes présentent deux avantages appréciables :

- ✓ Evaluation rapide de la stabilité.
- ✓ possibilité de définir des indices de stabilité.

Cependant, des inconvénients et des limites existent toujours :

- ✓ L'élaboration d'une fonction de Lyapunov impose un modèle mathématique simplifié et peu réaliste.

- ✓ Les résultats des méthodes directes sont conservatifs : on ne peut rien affirmer quant à la stabilité en dehors du domaine estimé [11].

I.3.3 Méthode des Valeurs Propres

La stabilité des phénomènes de faibles perturbations peut être analysée en utilisant la technique conventionnelle basée sur les valeurs propres. La plupart des programmes utilisés pour le calcul de ces valeurs propres utilisent la méthode de transformation **QR**. Les points forts de cette méthode :

- ✓ Tous les modes sont clairement séparés et identifiés.
- ✓ Les formes et relation entre les différents modes et les paramètres du système sont identifiées par le biais des vecteurs propres.

Cependant, cette méthode exige une grande capacité de stockage de la part du calculateur.

Avantages :

- ✓ Facilité de programmation.
- ✓ Obtention de résultats précis permettant de conclure quant à la stabilité du système.

Inconvénients :

- ✓ Equations décrivant le modèle doivent être linéarisées.
- ✓ Temps de calcul important [12].

I.3.4. Méthodes Probabilistiques

Elle consiste à chercher une transformation qui représente la probabilité des perturbations, en supposant une approximation de la probabilité des facteurs égale à la probabilité correspondant à l'état de fonctionnement stable du réseau. Cependant, cette représentation est difficile à obtenir analytiquement.

La méthode de Monté-Carlo au lieu de la détermination analytique a été appliquée. Cependant, une grande quantité de temps de calcul est exigée afin d'obtenir des résultats statistique utiles. On calcule les statistiques d'ouverture moyennant les données prélevées du système ou, en d'autre termes, la probabilité de chaque événement de défaut [11].

I.3.5 Méthode par Reconnaissance de Forme

La principale idée de cette méthode, est d'extraire l'information désirée des données d'entrée en la traitant à travers plusieurs couches constituées de noeuds ou 'neurones' se comportant en éléments seuils adaptatifs. Dans chaque couche, une représentation interne de l'entrée est générée puis utilisée comme sortie vers la couche suivante [10].

Pour l'analyse de la stabilité par la méthode de reconnaissance de forme, les efforts ont été surtout concentrés dans la sélection de la meilleure description du système initial, l'extraction des caractéristiques, et la synthèse du classificateur.

L'avantage de cette méthode est la rapidité d'évaluation en ligne de la stabilité. Elle ne demande que quelques opérations pour affecter l'état actuel du réseau à l'une des classes.

Les inconvénients de cette méthode sont :

- ✓ Des exécutions hors ligne sont nécessaires (phase d'apprentissage).
Leurs temps de calcul sont très importants.
- ✓ Lorsque des composantes du vecteur forme sont étroitement corrélées entre elles, la méthode perd en précision [11].

I.3.6. Méthode des couples synchrone et amortisseur

On entend par couple synchrone, le couple qui se développe en phase avec les variations d'angle de charge et par couple amortisseur, celui qui se développe en phase avec les variations de vitesse.

Dans l'analyse de De Mello et Concordia, les couples synchrone et amortisseur sont utilisés comme des indices qui permettent l'évaluation de la stabilité dynamique.

L'avantage de cette méthode est que les couples sont calculés d'une manière analytique sous une forme compacte. Cependant, pour des modèles plus complets, tenant compte, entre autres, des organes de commande, la détermination de ces couples devient complexe sinon impossible [10].

I.4. TECHNIQUES D'AMELIORATION DE STABILITE

Les méthodes d'amélioration de stabilité sont choisies d'après la nature du système. Dans le cadre de cette étude, le système est linéaire et le but est l'amélioration de la stabilité dynamique par une commande linéaire optimale puis par l'incorporation des PSS.

I.4.1 Commande Linéaire Optimale

Les contrôleurs linéaires se basent sur l'analyse des petits signaux et sur la technique des valeurs propres. Cette propriété permet d'obtenir de bons résultats en stabilité dynamique, mais par contre réduit la limite de stabilité lorsqu'il s'agit d'un domaine non linéaire [13].

I.4.2 Amélioration de la Stabilité par PSS

L'augmentation de la demande en énergie électrique a eu pour résultat, un rapide développement des réseaux électriques. Il existe différents domaines d'analyse des réseaux électriques, tels que la stabilité, le contrôle de la tension et de l'écoulement de puissance.

L'implémentation de Stabilisateur **PSS** dans la boucle de retour du système d'excitation d'un générateur est du point de vue des spécialistes une opération économique et fiable pour améliorer la stabilité d'un réseau électrique.

Le PSS joue le rôle d'amortissement des oscillations électromécaniques dans les réseaux électriques, après l'apparition des perturbations de petites amplitudes. L'optimisation des paramètres du PSS peut augmenter l'amortissement de ces oscillations, La commande classique fournis des résultats satisfaisants mais face à la complexité grandissantes des

réseaux électriques actuels, l'utilisation de régulateurs PSS et d'autres dispositifs de l'électronique de puissance devient impérative.

1.4.3 Insertion des Dispositifs Stabilisateurs PSS

La performance des systèmes d'excitation et des régulateurs de tension joue un rôle déterminant dans le maintien de la stabilité et l'amortissement des oscillations électromécaniques observées sur le rotor des générateurs. L'ajout d'un stabilisateur de puissance comme auxiliaire du système d'excitation aide à amortir ces oscillations ainsi qu'à améliorer la stabilité de l'ensemble du système.

La structure du stabilisateur de puissance étudié est une structure classique largement utilisée dans la littérature. Elle consiste en un gain, un filtre passe-haut et un ou plusieurs blocs de compensation de phase. La sortie du stabilisateur est une tension qui s'additionne à la tension d'entrée du système d'excitation. Une telle structure utilise souvent la déviation de la vitesse synchrone $\Delta\omega$ comme entrée, mais dans certains cas, d'autres signaux comme la puissance ou une combinaison vitesse/puissance sont utilisés [14, 15].

Pour apporter l'amortissement nécessaire, le stabilisateur doit produire une composante de couple électrique en phase avec la variation de la vitesse. Par conséquent, sa fonction de transfert doit avoir des caractéristiques d'avance de phase adéquates afin de compenser le retard de phase entre l'entrée de l'excitation et le couple électrique du générateur. En effet, un seul bloc de compensation de phase est insuffisant pour garantir la stabilité du système. Généralement, deux à trois blocs suffisent pour que le stabilisateur puisse jouer son rôle [16].

Nous considérerons aussi différentes topologies du système électrique, pour la simple raison que les PSS doivent aussi être capable de stabiliser le système, même si celui-ci change de topologie (perte d'une ligne par exemple).

Le rôle du filtre est d'atténuer les fréquences indésirables (inférieures à 0.1 Hz) du signal d'entrée. Ainsi, le stabilisateur n'affectera que le signal utile correspondant aux oscillations rotoriques. Du point de vue de la stabilité en petit mouvement, la valeur de la constante de temps T_ω du filtre n'est pas critique et est généralement prise entre 1 et 20 s [17].

Les PSS ont souvent des effets indésirables sur la stabilité transitoire. Lors de grandes perturbations, le stabilisateur risquerait de saturer le système d'excitation et par conséquent d'affecter la régulation de la tension. Il est alors indispensable de limiter la sortie du PSS afin de réduire son influence durant les phases transitoires [15, 18].

I.4.4 Méthodes Intelligentes

C'est un ensemble de techniques d'optimisation inspirées de phénomènes naturels ou biologiques. Souvent appelées aussi l'intelligence artificielle. Nous citons les principales méthodes rencontrées dans la littérature :

➤ La Logique floue

La logique floue est une technique pour le traitement de connaissances imprécises et incertaines. Elle permet de prendre en considération des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou expressions du langage naturel, telle que grand, petit, lent, rapide, etc.... [19].

La logique floue dont les variables peuvent prendre n'importe qu'elle valeur entre 0 et 1 (on parle alors de fonction d'appartenance μ), permet de tenir compte de cette réalité en logique floue, une proposition pourra à la fois être vraie et fausse, tout comme un élément pourra appartenir à un ensemble et à son contraire.

Il apparaît en pratique que la méthode de la logique floue correspond effectivement mieux à la réalité que la logique binaire classique. La logique floue peut être considérée comme une extension de la logique classique [20].

➤ Les réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones, avec leurs aptitudes en classification, mémorisation, filtrage et d'approximation sont devenus un moyen très efficace et conquis plusieurs domaines, comme la modélisation des systèmes, le traitement de signal et notamment la reconnaissance d'objets [21].

Les réseaux de neurones constituent un véritable moyen pour la résolution de plusieurs problèmes, ou les méthodes classiques ont montré leurs limites. Leur utilisation s'est avérée efficace dans les processus qui nécessitent une interaction avec l'environnement, et ce par leur pouvoir d'adaptation souvent appelé « plasticité synaptique » [22].

De plus, l'information à l'intérieur des réseaux de neurones, étant traitée en parallèle et d'une manière distribuée, fait que le temps de calcul des opérations s'en trouve réduit. Ces caractéristiques les rendent candidats mêmes là où une solution classique existe déjà.

➤ **Les Algorithmes Génétiques**

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes basées sur les mécanismes biologiques et simulent le processus d'évolution d'une population [6]. A partir d'une population de N solutions du problème représentant des individus, on applique des opérateurs simulant les interventions sur le génome telle que le croisement ou la mutation pour arriver à une population de solutions de mieux en mieux adaptée au problème. Cette adaptation est évaluée grâce à une fonction coût (fitness function).

La particularité de ces algorithmes est qu'ils n'opèrent pas directement sur les paramètres à optimiser mais plutôt sur des paramètres codés. [23]

Traditionnellement, les algorithmes génétiques utilisent un codage binaire sous forme de chaîne de caractères appelée chromosome par analogie à la génétique biologique.

Il y'a aussi d'autres méthodes qui dérivent essentiellement ou partiellement des algorithmes génétiques, tel que Les Stratégies d'Evolution, La Programmation Evolutionnaire, Algorithme à Essaim de particules, ...D'autre méthodes sont aussi utilisées : La Recherche Tabou, Le Recuit Simulé, Les réseaux Bayésiens [6].

I.5 CADRE DE NOTRE ETUDE

Cette étude permet d'une part d'évaluer les conditions de fonctionnement d'un système et, d'autre part, l'application des méthodes intelligentes dans la synthèse des paramètres PSS afin d'améliorer l'amortissement des oscillations électromécaniques de l'ensemble d'un système électrique.

En effet, les incidents et les variations excessives de la charge d'un système électrique peuvent provoquer un accroissement important de l'angle entre les champs magnétiques du rotor et du stator des alternateurs. Dans ces conditions, le couplage électromagnétique entre rotor et stator peut diminuer jusqu'à provoquer des oscillations de puissance mal amorties, voire le décrochage de certains rotors lorsque l'angle dépasse une valeur critique (perte de stabilité). Le rotor cesse alors de tourner au synchronisme avec le champ stator, et l'on observe un glissement des pôles du rotor. Lorsque les pôles repassent dans les zones de stabilité du champ du stator, les forces de couplage tendent à rétablir le synchronisme. La machine est soumise à de violents efforts électromécaniques transitoires et le réseau est le siège d'oscillations importantes de la puissance et de la tension [2].

Conventionnellement, on distingue la stabilité transitoire et la stabilité en petit mouvement (ou stabilité statique).

Dans un premier temps, une linéarisation des équations décrivant le réseau, et l'obtention du modèle d'état, et donc les constantes de temps K_i et ceci après Ecoulement de puissance.

On appliquera ensuite les algorithmes génétiques afin d'optimiser les paramètres du PSS, ensuite une comparaison des résultats entre cette commande et la commande classique.

I.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exposé les définitions essentielles à toute étude de stabilité, notamment les différents types de stabilité que nous pouvons rencontrer, ainsi que les différentes méthodes classiques d'analyse.

Des techniques d'amélioration de stabilité sont présentées afin d'avoir une idée sur les méthodes existantes telle que le commande linéaire optimale, ou bien l'insertion des dispositifs stabilisateurs PSS (signaux additionnels) qui va aider à amortir les oscillations électromécaniques observées sur le rotor des générateurs ainsi qu'améliorer la stabilité de l'ensemble du système.

L'optimisation des paramètres de ces stabilisateurs de puissance par des méthodes intelligentes nous permettra d'améliorer considérablement la stabilité dynamique. Un aperçu général des techniques intelligentes d'optimisation est présenté. Notre étude concernera l'application des algorithmes génétiques pour la stabilisation du système de puissance.

CHAPITRE II

MODELES DES SYSTEMES ELECTRIQUES DE PUISSANCE

II.2 MODELISATION DU SYSTEME

II.2.1 Réseau d'application

II.1 INTRODUCTION

La taille, la complexité et le nombre de sous-systèmes d'un système multimachine, rendent la modélisation de celui-ci pratiquement impossible. Bien que théoriquement possible, un modèle qui décrit tous les phénomènes apparaissant dans un système électrique n'offre pas beaucoup d'avantages qu'un modèle simplifié. Premièrement, un tel modèle nécessiterait une très grande base de données et de paramètres. Deuxièmement, les résultats obtenus seront difficiles à analyser et interpréter vu le nombre de phénomènes entrant en jeu.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord procéder à la modélisation des systèmes électriques. Les modèles ont été choisis selon les données des systèmes que nous avons en notre possession. Ainsi, pour le générateur, nous avons considéré un modèle du 3^{ème} ordre qui est décrit par 3 équations différentielles, et nous allons développer les équations représentant le modèle avec des charges à impédance constante.

Le modèle linéaire multimachine et multiboucles est représenté sous forme de diagramme bloc sur la figure (II.9). Ensuite, le modèle mathématique obtenu sera linéarisé autour du point de fonctionnement du système électrique. Donc, nous déterminerons au préalable les conditions initiales d'équilibre du système électrique à travers le calcul de l'écoulement de puissance.

Nous obtiendrons ainsi le modèle d'état du système qui nous permettra par la suite d'analyser la stabilité du système à travers le calcul des vecteurs propres et les valeurs propres.

Chaque machine est modélisée avec trois variables d'état plus une pour l'excitation, ce qui donne un système d'ordre $4*n$ (n : nombre de machines).

II.2 MODELISATION DU SYSTEME

II.2.1 Réseau d'application

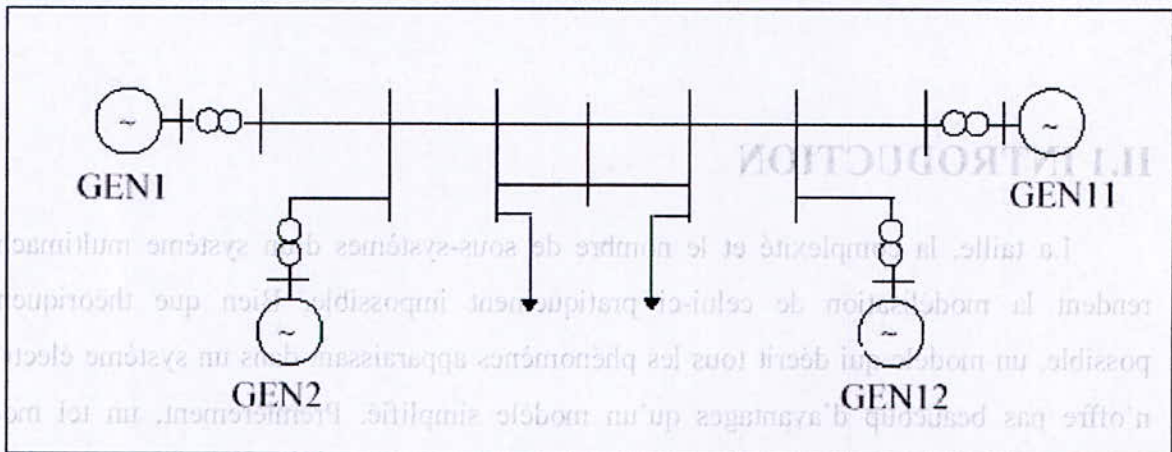


Figure II.1 Schéma unifilaire du réseau 2 régions 4 machines

Les nœuds de charge peuvent être éliminés en utilisant la réduction de « Kron ». On notera que la somme algébrique des courants des nœuds de charge est nulle

II.2.2 Référentiel Commun

Il est nécessaire de ramener les grandeurs de chaque générateur dans un seul repère commun à tous les générateurs. [6]. Les variables de la $i^{\text{ème}}$ machine définies par rapport aux axes d_i et d_q peuvent être exprimées pour toutes machines suivant un système unique d'axes D et Q . Le diagramme représentant les deux repères peut être décrit dans la figure (II-2)

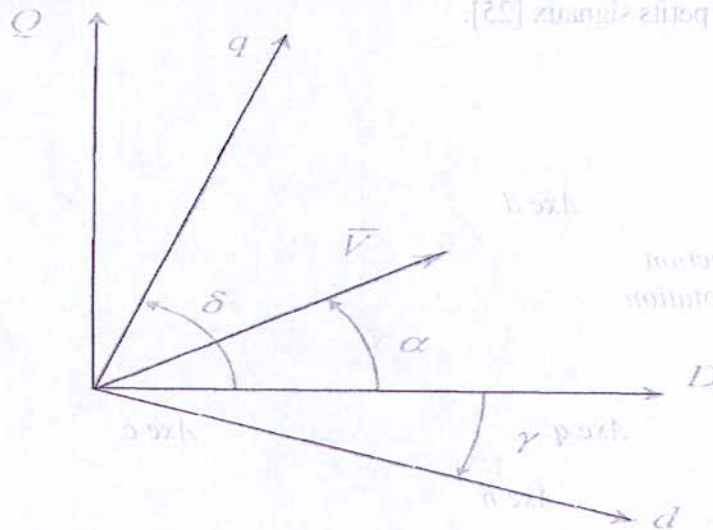


Figure II.2 Représentation d'un vecteur dans deux repères différents

II.2.3 Modèle de l'alternateur

Le générateur constitue l'élément le plus important lors de l'étude des oscillations électromécaniques. Comme leur nom l'indique, les oscillations électromécaniques impliquent les deux phénomènes électrique et mécanique. Par conséquent, il est nécessaire d'avoir les deux modèles qui décrivent ces phénomènes.

Le modèle électrique est basé sur la très connue transformation de Park. Cette transformation, appelée aussi transformation dq , transforme les trois phases statoriques en un système biphasé lié au rotor et mieux adapté à l'analyse de la machine synchrone. Ainsi, deux axes orthogonaux sont définis : l'un suivant la direction du flux généré par le courant traversant les enroulements du rotor et sera désigné par *axe direct* ou la lettre d , et l'autre qui lui est perpendiculaire et sera désigné par *axe en quadrature* ou la lettre q [24].

La figure (II.1) montre schématiquement les enroulements et les sens des courants dans une machine synchrone, ainsi que le modèle équivalent dans le repère de Park. Les différents enroulements sont les suivants :

- Les 3 enroulements statoriques notés a , b et c , et leurs enroulements équivalents notés d et q .
- L'enroulement rotorique noté F .
- Les deux enroulements amortisseurs court-circuités notés D_a et Q_a . Donc, l'effet des enroulements amortisseurs est négligé, ce qui conduit à une estimation optimiste de la stabilité des petits signaux [25].

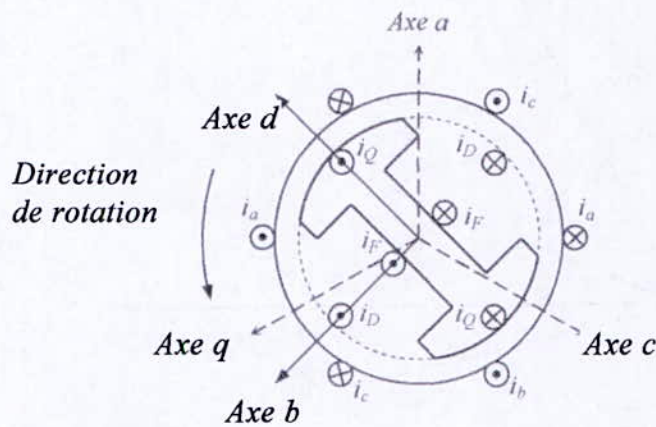


Figure II.3 Représentation du circuit électrique d'une machine synchrone.

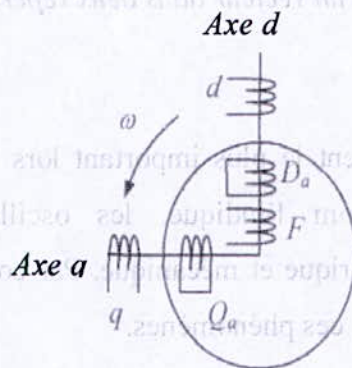


Figure II.4 Représentation du circuit équivalent dans le repère de Park.

Il existe plusieurs modèles pour le générateur, allant du plus simple qui est le modèle mécanique au plus complexe celui du huitième ordre. L'ordre du modèle est défini selon le nombre d'équations dynamiques qui le décrivent. Dans cette étude, nous avons considéré le modèle le plus simple pour l'étude des oscillations électromécaniques qui est le modèle du troisième ordre. Ce modèle est établi en considérant que :

- Toutes les résistances sont négligées
- L'effet des amortisseurs est négligé.
- Le courant au rotor génère un flux suivant l'axe d , par conséquent la f.e.m induite E aura une seule composante dans la direction de l'axe q .
- L'angle mécanique du rotor coïncide avec l'angle de la tension interne du générateur.

II.2.4 Equations électriques

On considère la i^{me} machine d'un système électrique multimachine. Les grandeurs électriques de cette machine sont représentées sur la figure (II.5). Le repère (dq) concerne la machine i seule, alors que le repère (DQ) est commun à toutes les machines du système.

L'angle δ_i représente la position du repère (dq) de la machine i par rapport au repère commun (DQ) .

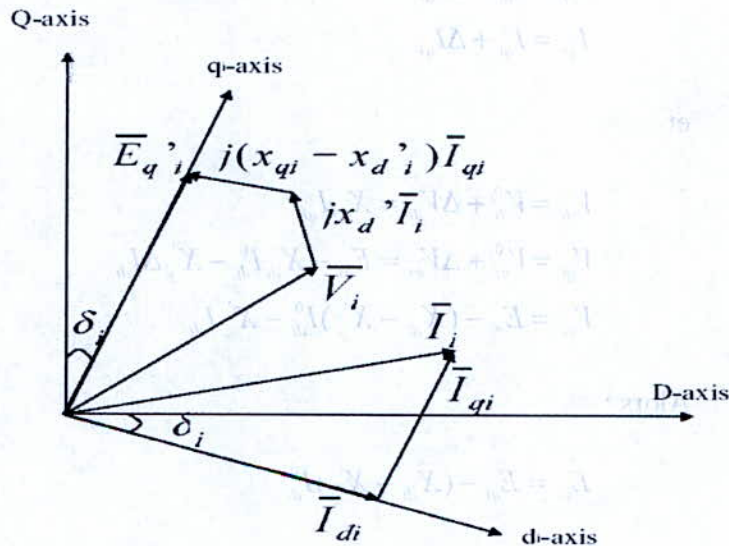


Figure II.5 Diagramme des phases relatives à la i^{me} machine.

D'après la figure (II.5) nous avons :

$$\vec{V}_i = \vec{E}_{q_i} - jX_{d_i} \vec{I}_{d_i} - jX_{q_i} \vec{I}_{q_i} \quad (2.1)$$

Par rapport au repère (DQ) on peut écrire :

$$\begin{aligned} \vec{S}_i &= P_{ei} + jQ_{ei} = \vec{V}_i \vec{I}_i = (V_{d_i} + jV_{q_i})(I_{d_i} - jI_{q_i}) \\ &= P_{ei} + jQ_{ei} = \vec{V}_i \vec{I}_i = (V_{d_i} + jV_{q_i})(I_{d_i} - jI_{q_i}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Qui devient après réarrangement :

$$V_i e^{-j(\delta_i - \alpha_i)} = E_{qi} - X_{di} I_{di} - jX_{qi} I_{qi} \quad (2.3)$$

Nous obtenons alors l'expression de V_d et V_q , après séparation de la partie réelle et imaginaire :

$$\begin{cases} V_i \cos(\delta_i - \alpha_i) = E_{qi} - X_{di} I_{di} = V_{qi} \\ V_i \sin(\delta_i - \alpha_i) = X_{qi} I_{qi} = V_{di} \end{cases} \quad (2.4)$$

Lors d'une perturbation, le système d'équations (2.4) n'est plus valide, car il faut prendre en compte la réactance et la f.e.m transitoires [26]. Supposant que la machine est à l'état stable avant qu'elle ne subisse une perturbation causant des oscillations au niveau du rotor. Les courants et tensions deviennent alors (l'exposant 0 indique l'état stable)

$$\begin{aligned} I_{di} &= I_{di}^0 + \Delta I_{di} \\ I_{qi} &= I_{qi}^0 + \Delta I_{qi} \end{aligned} \quad (2.5)$$

et

$$\begin{aligned} V_{di} &= V_{di}^0 + \Delta V_{di} = X_{qi} I_{qi} \\ V_{qi} &= V_{qi}^0 + \Delta V_{qi} = E_{qi} - X_{di} I_{di}^0 - X'_{di} \Delta I_{di} \\ V_{qi} &= E_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) I_{di}^0 - X'_{di} I_{di} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Alors :

$$E'_{qi} = E_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) I_{di}^0 \quad (2.7)$$

II.2.5 Equations mécaniques

Le fonctionnement de la machine synchrone en générateur implique la conversion d'une énergie mécanique en une énergie électrique. L'énergie mécanique provient d'une turbine qui, solidaire de l'arbre de la machine, entraîne la rotation de celle-ci.

Pour de faibles oscillations autour de la vitesse de synchronisme ($\omega_i \approx \omega_0$), en considérant l'amortissement au rotor et en unité relative (per unit), l'équation régissant le mouvement mécanique du rotor s'écrit :

$$\omega = \frac{1}{2H_i}(P_{mi} - P_{ei} - D_i(\omega_i - 1)) \tag{2.8}$$

L'angle rotorique est donnée par :

$$\delta = \omega_0(\omega_i - 1) \tag{2.9}$$

Avec :

ω_i : Vitesse angulaire du rotor de la i^{eme} machine en p.u

ω_0 : Vitesse de synchronisme (vitesse de base) en rad/s

P_{ei}, P_{mi} : Puissances électrique et mécanique respectivement en p.u

H_i : Constante d'inertie en seconde.

D_i : Constante d'amortissement en p.u

Tel que les puissances électriques sont données par :

$$\begin{aligned} \bar{S}_i &= P_{ei} + jQ_{ei} = \bar{V}_i \bar{I}_i^* = (V_{di} + jV_{qi})(I_{di} - jI_{qi}) \\ &= (V_{di}I_{di} + V_{qi}I_{qi}) + j(V_{qi}I_{di} - V_{di}I_{qi}) \end{aligned} \tag{2.10}$$

Ainsi, la puissance électrique active s'écrit :

$$P_{ei} = E'_{qi}I_{qi} + (X_{qi} - X'_{di})I_{di}I_{qi} \tag{2.11}$$

II.2.6 Modèles des systèmes de régulation

Les générateurs sont équipés de différents systèmes de régulation ayant chacun son rôle. La tâche principale de ces régulateurs est de maintenir l'équilibre entre la puissance électrique produite par les générateurs et la puissance consommée par les charges y compris les pertes. À cela vient s'ajouter le fait que l'électricité délivrée doit répondre à un certains critères de qualité : la forme de la tension, son amplitude et sa fréquence doivent être maintenues dans leurs limites autorisées [27].

La tension et la fréquence apparaissent donc comme des paramètres fondamentaux du fonctionnement de tout système d'énergie électrique. Il y'as lieu de

présenter les des deux régulateurs principaux, à savoir, le régulateur de la vitesse angulaire (donc de la fréquence) et le régulateur de la tension terminale du générateur.

II.2.6.1 Régulation de la vitesse

Le rôle de la turbine est d'entraîner le rotor du générateur à la vitesse synchrone. Selon la source d'énergie utilisée, la turbine peut être à vapeur, à gaz, hydraulique...etc. L'amplitude de la vitesse de rotation (donc la fréquence) est maintenue constante grâce au régulateur de vitesse. Celui-ci, ajuste l'entrée de la valve afin de régler la puissance mécanique de la turbine et ainsi contrôler la fréquence du système [24].

Le modèle de l'ensemble régulateur/turbine utilisé en simulation dynamique est représenté sur la figure (II.6) [28].

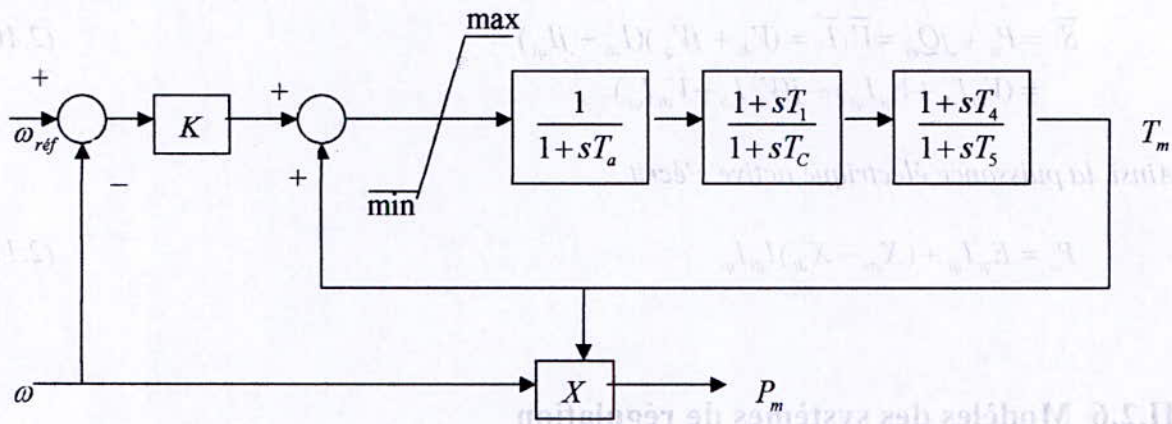


Figure II.6 Modèle du régulateur de vitesse et de la turbine.

II.2.6.2 Régulation de la tension

Les machines synchrones nécessitent une alimentation en courant continu de leur inducteur. Ce courant est obtenu à partir d'un ensemble appelé système d'excitation comportant, dans la majorité des cas :

- La source de puissance proprement dite, fournissant la puissance d'excitation, par exemple une excitatrice à courant continu. [29]

- Le régulateur de tension (AVR : Automatic Voltage Regulator), servomécanisme ayant, dans le cas le plus simple, pour grandeur de sortie une tension commandant la puissance délivrée par la source d'excitation et, pour une grandeur d'entrée, l'écart entre la tension aux bornes de la machine synchrone et une tension de consigne.

Nous considérons, dans cette étude, un modèle très simple du régulateur de tension. Celui-ci est donné sur la figure (II.7). L'entrée U est une entrée de commande issue de certains dispositifs supplémentaires de commande, dans notre cas c'est les stabilisateurs de puissance (PSS) :

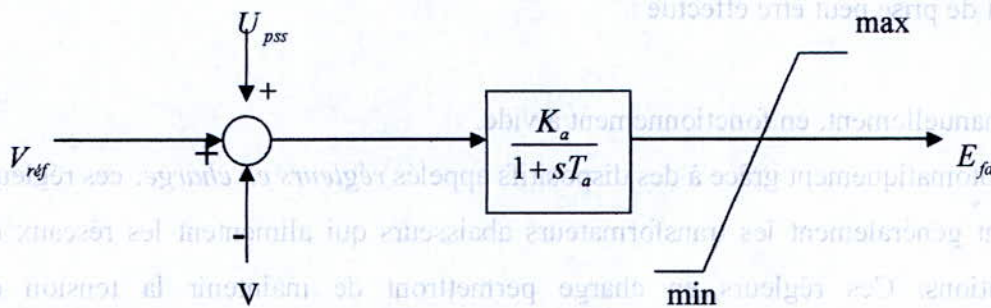


Figure II.7 *Modèle simplifié de l'excitation*

Le fonctionnement de l'excitation est décrit par :

$$E_{fd} = \frac{1}{T_a} (K_a (V_{ref} - V + U) - E_{fd}) \quad (2.12)$$

$$E_q' = \frac{1}{T_{d0}} (E_{fd} - (X_d - X_d') I_d - E_q') \quad (2.13)$$

La première équation correspond au modèle du régulateur de tension. La deuxième équation décrit la relation entre la tension d'excitation et la tension interne du générateur qui, elle-même, est liée à la tension terminale (système d'équations 2.6).

II.2.7 Modèles des transformateurs

Les transformateurs sont généralement placés entre les unités de production et le réseau de transport en fonctionnement élévateur, et entre le réseau de transport et les réseaux de distribution en fonctionnement abaisseur.

L'impédance Z_T correspond à l'impédance équivalente formée par l'impédance du primaire et celle du secondaire ramenée au primaire. Ce transformateur est doté de plusieurs prises (côté haute tension) qui permettent de modifier le nombre de spires du primaire, et par conséquent, de faire varier le rapport de transformation.

Le changement de prise peut être effectué :

- Soit manuellement, en fonctionnement à vide.
- Soit automatiquement grâce à des dispositifs appelés *régleurs en charge*, ces régleurs équipent généralement les transformateurs abaisseurs qui alimentent les réseaux de distributions. Ces régleurs en charge permettront de maintenir la tension de distribution sensiblement constante, quels que soient les écarts constatés sur la tension du réseau de transport (qui varie normalement dans la plage autorisée), et de régler cette dernière avec souplesse de façon à assurer un bon fonctionnement du système électrique [30].

Si N_1 est le nombre de spires côté haute tension et N_2 le nombre de spires côté basse tension, le rapport de transformation m est définie par :

$$m = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.15)$$

La relation entre la tension du côté primaire et la tension du côté secondaire à vide est :

$$V_2 = \frac{V_1}{m} \quad (2.16)$$

Si la tension du primaire diminue, la tension du secondaire peut être maintenue constante en diminuant le rapport m , c'est à dire en effectuant un changement de prise du côté primaire. En charge, l'équation 2.16 n'est plus applicable à cause de l'impédance du transformateur Z_T , mais le principe de fonctionnement reste le même [26].

Dans notre étude, les régleurs en charge ne sont pas modélisés, ainsi le rapport de transformation reste fixe pendant les simulations dynamiques. Toute fois, il est réglé lors du calcul d'écoulement de puissance, de manière à ce que les tensions restent dans leurs limites autorisées et d'assurer la convergence de l'algorithme.

II.2.8 Modèles des lignes de transmission

Pour des raisons économiques (effet de taille...) ou techniques (localisation des réserves hydrauliques et des sources froides...), les unités de production sont souvent géographiquement très concentrées.

Par contre, la consommation est beaucoup plus dispersée. Les réseaux de transport et d'interconnexion assurent la liaison entre les centres de production et les grandes zones de consommation [30]. Constitués principalement de nœuds reliés par des lignes de transmission, ils permettent d'acheminer la puissance disponible sur les lieux d'exploitation.

II.2.9 Modèles des charges

Les charges, dans cette étude, sont des charges statiques représentées par des admittances constantes. Après avoir effectué le calcul d'écoulement de puissance et obtention de la tension au nœud de charge, l'admittance équivalente est calculée puis connectée au nœud de charge :

$$\bar{Y}_L = \frac{P_L}{V_L^2} - j \frac{Q_L}{V_L^2} \quad (2.17)$$

II.2.10 Modèle du réseau de transport

Dans cette section, nous allons établir le modèle du réseau de transport. Celui-ci comprend le modèle des transformateurs, le modèle des lignes de transmission et les admittances équivalentes aux charges. Connaissant les tensions terminales aux nœuds générateurs et la matrice admittance réduite \bar{Y}_r du réseau, le réseau de transport est décrit par l'équation :

$$\bar{I} = \bar{Y}_r \cdot \bar{V} \quad (2.18)$$

Sachant que : $V_i e^{j\alpha_i} = E_{qi} e^{j\delta_i} - X_{di} I_{di} e^{j\delta_i} - X_{qi} I_{qi} e^{j(\delta_i + 90^\circ)}$

Et que : $E_{qi} = E'_{qi} + (X_{di} - X'_{di}) I_{di}$

Nous avons :

$$\bar{V}_i = (E'_{qi} - X'_{di} I_{di} - jX'_{qi} I_{qi}) e^{j\delta_i} \quad (2.19)$$

Sachant aussi que :

$$\bar{I} = \bar{I}_d + \bar{I}_q = I_d e^{j(\delta-90^\circ)} + I_q e^{j\delta} \Rightarrow I_d = \bar{I} e^{-j(\delta-90^\circ)} - jI_q$$

L'expression (2.22) devient :

$$\bar{V}_i = E'_{qi} e^{j\delta_i} - jX'_{di} \bar{I}_i + j(X'_{di} - X'_{qi}) I_{qi} e^{j\delta_i} \quad (2.20)$$

En représentation matricielle :

$$\bar{V} = [e^{j\delta}] E'_q - j[X'_{di}] \bar{I} + j[X'_{di} - X'_{qi}] I_q e^{j\delta_i} \quad (2.21)$$

$[e^{j\delta}]$, $[X'_{di}]$, $[X'_{di} - X'_{qi}]$ sont des matrices diagonales et \bar{V} , E'_q , \bar{I} , I_q sont des vecteurs colonne.

Remplaçons (2.21) dans (2.18) et après arrangement nous obtenons :

$$\bar{I} = \bar{Y}_m ([e^{j\delta}] E'_q + j[X'_{di} - X'_{qi}] I_q e^{j\delta_i}) \quad (2.22)$$

Avec : $\bar{Y}_m = [\bar{Y}_4^{-1} + j[X'_{di}]]^{-1}$

Le courant dans la $i^{\text{ème}}$ machine s'écrit :

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n Y_{n\bar{q}j} e^{j\beta_j} (e^{j\delta_j} E'_{qj} + j(X'_{\bar{q}j} - X'_{qj}) e^{j\delta_j} I_{qj}) \quad (2.23)$$

Sur le référentiel $(dq)_i$ de la machine i nous avons :

$$\bar{I}_{dq_i} = I_i e^{-j(\delta_i-90^\circ)} = \sum_{j=1}^n Y_{nij} e^{j(\beta_j+\delta_{ij})} (jE'_{qj} + (X_{qj} - X'_{\bar{q}j}) I_{qj}) \quad (2.24)$$

Avec :

$$\bar{Y}_m = Y_m e^{j\beta}$$

$$\delta_{ij} = \delta_j - \delta_i$$

On pose :

$$C_{ij} = \cos(\beta_{ij} + \delta_{ij})$$

$$S_{ij} = \sin(\beta_{ij} + \delta_{ij})$$

Nous obtenons les expressions du courant de la $i^{\text{ème}}$ machine suivant l'axe direct et celui en quadrature :

$$\left. \begin{aligned} I_{di} &= \operatorname{Re}(\bar{I}_{dqi}) = \sum_{j=1}^n Y_{mij} (-S_{ij} E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) C_{ij} I_{qj}) \\ I_{qi} &= \operatorname{Im}(\bar{I}_{dqi}) = \sum_{j=1}^n Y_{mij} (C_{ij} E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) S_{ij} I_{qj}) \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

II.3 ETUDE DU MODELE LINEARISE

Nous avons vu qu'un système électrique est décrit par des équations différentielles et des équations algébriques. Ces équations montrent la non linéarité du système dont nous voulons étudier la stabilité. Etant donné que nous nous intéressons à la stabilité du système lorsqu'il subit des perturbations rapides et qui ne l'éloignent pas trop de son point de fonctionnement, nous pouvons alors linéariser ces équations autour de ce point de fonctionnement. Nous rappelons ici les principales équations devant être linéarisées :

$$\left\{ \begin{aligned} \delta &= \omega_0 (\omega_i - 1) \\ \dot{\omega}_i &= \frac{1}{2H_i} (P_{mi} - P_{ei} - D_i (\omega_i - 1)) \\ \dot{E}'_{qi} &= \frac{1}{T_{d0i}} (E_{fdi} - (X_{di} - X'_{di}) I_{di} - E'_{qi}) \\ \dot{E}'_{fdi} &= \frac{1}{T_{ai}} (K_{ai} (V_{refi} - V_i + U_i) - E_{fdi}) \end{aligned} \right. \quad (2.26)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{aligned} P_{ei} &= E'_{qi} I_{qi} + (X_{qi} - X'_{di}) I_{di} I_{qi} \\ I_{di} &= \operatorname{Re}(\bar{I}_{dqi}) = \sum_{j=1}^n Y_{mij} (-S_{ij} E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) C_{ij} I_{qj}) \\ I_{qi} &= \operatorname{Im}(\bar{I}_{dqi}) = \sum_{j=1}^n Y_{mij} (C_{ij} E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) S_{ij} I_{qj}) \\ V_{di} &= X_{qi} I_{qi} \\ V_{qi} &= E'_{qi} - X'_{di} I_{di} \\ V_i &= \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \end{aligned} \right. \quad (2.27)$$

La linéarisation des équations du système (2.26) donne :

$$\begin{cases} \Delta \delta_i = \omega_0 \Delta \omega_i \\ \Delta \omega_i = \frac{1}{2H_i} (\Delta P_{mi} - \Delta P_{ei} - D_i \Delta \omega_i) \\ \Delta \dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{d0i}} (\Delta E_{fdi} - (X'_{di} - X_{di}) \Delta I_{di} - \Delta E'_{qi}) \\ \Delta \dot{E}'_{fdi} = \frac{1}{T_{di}} (-K_{di} \Delta V_i + K_{di} \Delta U_i - \Delta E_{fdi}) \end{cases} \quad (2.28)$$

Afin de former l'équation d'état du système, les équations du système (2.28) doivent s'exprimer uniquement en fonction des variables d'état.

A partir de l'équation du courant d'axe direct du système (2.27) et après linéarisation nous obtenons :

$$\underline{\Delta I}_d = N_d \underline{\Delta \delta} + O_d \underline{\Delta E}'_q + M_d \underline{\Delta I}_q \quad (2.29)$$

Avec :

$$\begin{aligned} N_{dij} &= -Y_{mij} (C_{ij}^0 E_{qj}^0 + S_{ij}^0 (X_{qj} - X'_{dj}) I_{qj}^0) \\ N_{dij} &= -\sum_{j \neq i}^n N_{dij} \quad (\text{L'exposant 0 indique les conditions initiales}) \\ O_{dij} &= -Y_{mij} S_{ij}^0 \\ M_{dij} &= Y_{mij} C_{ij}^0 (X_{qj} - X'_{dj}) \end{aligned}$$

De même pour le courant d'axe en quadrature nous avons :

$$\underline{\Delta I}_q = N_q \underline{\Delta \delta} + O_q \underline{\Delta E}'_q + M_q \underline{\Delta I}_q \quad (2.30)$$

Qui devient :

$$L_q \underline{\Delta I}_q = N_q \underline{\Delta \delta} + O_q \underline{\Delta E}'_q \quad (2.31)$$

Avec :

$$\begin{aligned} N_{qij} &= -Y_{mij} (-S_{ij} E_{qj}^0 + C_{ij} (X_{qj} - X'_{dj}) I_{qj}^0) \\ N_{qij} &= -\sum_{j \neq i}^n N_{qij} \\ O_{qij} &= Y_{mij} C_{ij} \\ M_{qij} &= Y_{mij} S_{ij} (X_{qj} - X'_{di}) \\ L_q &= 1 - M_q \end{aligned} \quad \text{Où } 1 = \text{Matrice identité}$$

Remplaçons (2.31) dans (2.29) :

$$\begin{cases} \underline{\Delta I}_d = (N_d + M_d L_q^{-1} N_q) \underline{\Delta \delta} + (O_d + M_d L_q^{-1} O_q) \underline{\Delta E}'_q \\ \underline{\Delta I}_q = L_q^{-1} N_q \underline{\Delta \delta} + L_q^{-1} O_q \underline{\Delta E}'_q \end{cases} \quad (2.32)$$

On pose :

$$\begin{cases} F_q = L_q^{-1} N_q \\ Y_q = L_q^{-1} O_q \\ F_d = N_d + M_d F_q \\ Y_d = M_d Y_q \end{cases} \quad (2.33)$$

Enfin nous aurons :

$$\begin{aligned} \underline{\Delta I}_d &= F_d \underline{\Delta \delta} + Y_d \underline{\Delta E}'_q \\ \underline{\Delta I}_q &= F_q \underline{\Delta \delta} + Y_q \underline{\Delta E}'_q \end{aligned} \quad (2.33)$$

A partir de l'expression de la puissance électrique active nous obtenons :

$$\underline{\Delta P}_q = K_1 \underline{\Delta \delta} + K_2 \underline{\Delta E}'_q \quad (2.34)$$

Avec :

$$\begin{aligned} K_1 &= O_d F_d + W_d F_d \\ K_2 &= O_d Y_d + W_d Y_d + [I_q^0] \\ O_d &= [X_q - X'_d][I_d^0] + [E_q^0] \\ W_d &= [X_q - X'_d][I_q^0] \end{aligned}$$

A partir de la dynamique de E'_q nous avons :

$$(1 + [T'_{d0}]s) \underline{\Delta E}'_q = \underline{\Delta E}_{fd} - [X_d - X'_d] \underline{\Delta I}_d \quad (2.35)$$

Nous remplaçons $\underline{\Delta I}_d$ par son expression (2.33), l'équation (2.35) devient :

$$(1 + [T'_{d0}]s) \underline{\Delta E}'_q = \underline{\Delta E}_{fd} - [X_d - X'_d] (F_d \underline{\Delta \delta} + Y_d \underline{\Delta E}'_q) \quad (2.36)$$

Développons (2.36) pour la $i^{\text{ème}}$ machine :

$$(1 + (X_d - X'_d)Y_{dii} + sT'_{d0i}) \underline{\Delta E}'_{qi} = \underline{\Delta E}_{fdi} - (X_{di} - X'_{di}) \left(\sum_{j=1}^n F_{dij} \underline{\Delta \delta}_j - \sum_{j=1}^n Y_{dij} \underline{\Delta E}'_{qj} \right) \quad (2.37)$$

Et nous posons :

$$K_{3ij} = (X_{di} - X'_{di})F_{dij}$$

$$K_{4ii} = 1 + (X_{di} - X'_{di})Y_{dii}$$

$$K_{4ij} = (X_{di} - X'_{di})Y_{dij}$$

A partir des équations des tensions :

$$\begin{cases} V_{di} = X_{qi} I_{qi} \\ V_{qi} = E'_{qi} - X'_{di} I_{di} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta V_{di} = X_{qi} \Delta I_{qi} \\ \Delta V_{qi} = \Delta E'_{qi} - X'_{di} \Delta I_{di} \end{cases} \quad (2.38)$$

$$V_i = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \Rightarrow \Delta V_i = \frac{1}{V_i^0} (V_{di}^0 \Delta V_{di} + V_{qi}^0 \Delta V_{qi}) \quad (2.39)$$

Enfin :

$$\underline{\Delta V} = K_5 \underline{\Delta \delta} + K_6 \underline{\Delta E}'_q \quad (2.40)$$

Avec :

$$K_5 = D_v [X_q] F_q - O_v [X'_d] F_d$$

$$K_6 = D_v [X_q] Y_q - O_v [X'_d] Y_d + O_v$$

$$D_v = \left[\frac{1}{V^0} \right] [V_d^0]$$

$$O_v = \left[\frac{1}{V^0} \right] [V_q^0]$$

Ainsi, les équations différentielles décrivant la dynamique de la machine sont réécrites sous une forme linéaire.

A partir des équations (2.33), (2.34) et (2.40) le système (2.29) devient :

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta}_i = \omega_0 \Delta \omega_i \\ \Delta \dot{\omega}_i = \frac{1}{2H_i} \left(\Delta P_{mi} - \sum_{j=1}^n (K_{1ij} \Delta \delta_j) - \sum_{j=1}^n (K_{2ij} \Delta E'_{qj}) - D_i \Delta \omega_i \right) \\ \Delta \dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T_{d0i}} \left(\Delta E_{fdi} - \sum_{j=1}^n (K_{3ij} \Delta \delta_j) - \sum_{j=1}^n (K_{4ij} \Delta E'_{qj}) \right) \\ \Delta \dot{E}_{fdi} = \frac{1}{T_{ai}} \left(-K_{ai} \sum_{j=1}^n (K_{5ij} \Delta \delta_j) - K_{ai} \sum_{j=1}^n (K_{6ij} \Delta E'_{qj}) - \Delta E_{fdi} + K_{ai} \Delta U_i \right) \end{cases} \quad (2.41)$$

Le système d'équations (2.41) est la représentation d'état de la $i^{ème}$ machine d'un système multimachine. Pour un système électrique à n générateurs l'équation d'état s'écrit sous la forme :

$$\frac{d}{dt} X(t) = A X(t) + B U(t) \tag{2.42}$$

Les vecteurs $X(t)$ et $U(t)$ sont respectivement le vecteur d'état et de commande, avec :

$$X(t) = [\Delta\delta_1, \Delta\delta_2, \dots, \Delta\delta_n, \Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_n, \Delta E'_{q1}, \Delta E'_{q2}, \dots, \Delta E'_{qn}, \Delta E_{fd1}, \Delta E_{fd2}, \dots, \Delta E_{fdn}]^T$$

$$U(t) = [\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_n]^T$$

A est la matrice d'état de dimension $4n \times 4n$, et B est la matrice de commande de dimension $4n \times n$, tel que :

$$A = \begin{bmatrix} [Z] & [W0] & [Z] & [Z] \\ (-[MK1]) & (-[DM]) & (-[MK2]) & [Z] \\ (-[MK4]) & [Z] & (-[MK3TD]) & [UTdop] \\ (-[KAK5]) & [Z] & (-[KAK6]) & (-[UTA]) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad B = \begin{bmatrix} [Z] & [Z] \\ [MU] & [Z] \\ [Z] & [Z] \\ [Z] & [KAT] \end{bmatrix}$$

Les éléments de la matrices A et B sont des sous matrices tel que :

Z : Matrice nulle de dimension $n \times n$.

$$W0_{ii} = \omega_0, W0_{ij} = 0$$

$$MU_{ii} = \frac{1}{2H_i}, MU_{ij} = 0$$

$$UTdop_{ii} = \frac{1}{T'_{doi}}, UTdop_{ij} = 0$$

$$MK1_{ij} = \frac{k1_{ij}}{2H_i}, DM_i = \frac{D_i}{2H_i}, MK2_{ij} = \frac{K2_{ij}}{2H_i}, MK3_{ij} = K3_{ij} \cdot T'_{doi}, MK4_{ij} = \frac{K4_{ij}}{T'_{doi}},$$

$$MK3TD_{ij} = \frac{1}{MK3_{ij}}, KAK5_{ij} = \frac{K_{ai} \cdot K_{sij}}{T_{ai}}, KAK6_{ij} = \frac{K_{ai} \cdot K6_{ij}}{T_{ai}}, UTA_{ii} = \frac{1}{T_{ai}}, KAT_{ii} = \frac{K_{ai}}{T_{ai}}$$

La figure (II.2) est la représentation du système (2.41) sous la forme de fonctions de transfert. Elle met en évidence l'interaction qui existe entre les différentes machines du système électrique à travers les matrices K . Ces matrices sont des matrices carrées d'ordre n . Les éléments diagonaux de K_1, \dots, K_6 expriment les dynamiques des machines alors que les éléments hors diagonaux expriment l'interaction entre les machines.

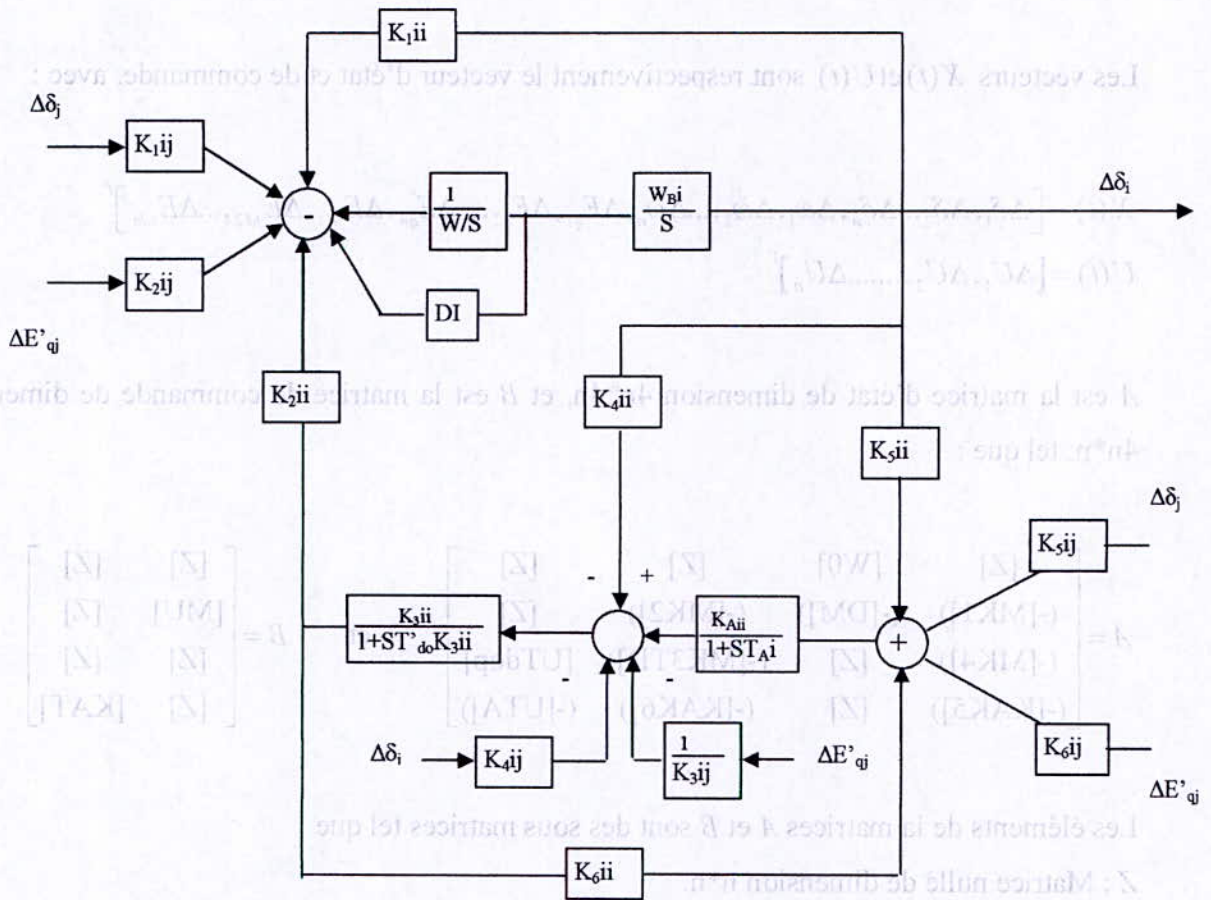


Figure II.8 Schéma fonctionnel de la $i^{ème}$ machine du réseau multimachine

II.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons établi les modèles des composants d'un système électrique multimachine, en vue d'étudier le phénomène des oscillations rotoriques. Ces modèles concernent le générateur et ses dispositifs de réglage de la fréquence et de la tension, ainsi que le réseau de transport formé par les transformateurs, les lignes de transport et les charges.

Le système d'équations qui en résulte, montre qu'un système électrique est régi par des équations dynamiques et des équations algébriques. Ces équations nous ont permis, d'établir

un modèle linéaire du système électrique sous la forme de représentation d'état. Cette représentation est plus adaptée dans l'analyse de la stabilité en petit mouvement.

Cela va nous permettre par la suite d'analyser la stabilité lors de faibles perturbations, d'une part, et de procéder à des simulations dynamiques de défaut, d'autre part.

- > Toutes les valeurs propres du système doivent se trouver du côté gauche du plan complexe.
- > le facteur d'amortissement des modes d'oscillation électromécaniques doit être supérieur au plus petit facteur d'amortissement acceptable.

CHAPITRE III

ANALYSE DE LA STABILITE

- Système avec la commande linéaire optimale.
- Système avec insertion de PSS.

Les réponses enregistrées permettent de faire une étude comparative sur l'amélioration de la stabilité évaluée par ces deux types considérés.

III.2 ANALYSE DE STABILITE

Une fois l'équation d'état du système électrique écrite sous forme de modèle d'état, la stabilité du système peut être étudiée. L'analyse de la stabilité est basée sur les valeurs propres et les vecteurs propres du système.

III.1 INTRODUCTION

Comme nous l'avons introduit dans le chapitre I, la stabilité des systèmes électriques apparaît sous différentes formes. Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons à l'amélioration de la stabilité dynamique, sujet de ce présent chapitre.

Dans la première étape, on évaluera la stabilité dynamique des réseaux d'énergie électrique multi-machines sans aucune commande.

Dans la seconde étape, on s'intéressera à la commande linéaire optimale et à la l'insertion des PSS, tout en garantissant la stabilité globale du système et cela pour différents points de fonctionnement. Ces conditions se résument dans ce qui suit :

- Toutes les valeurs propres du système doivent se trouver du côté gauche du plan complexe.
- le facteur d'amortissement des modes d'oscillation électromécaniques doit être supérieur au plus petit facteur d'amortissement acceptable.

Dans notre réseau d'étude (deux régions, 4 machines-13 nœuds), on appliquera une perturbation à un des générateurs de manière à pouvoir observer la réponse temporelle du système dans les deux cas suivants :

- Système avec la commande linéaire optimale.
- Système avec insertion de PSS.

Les réponses enregistrées permettent de faire une étude comparative sur l'amélioration de la stabilité évaluée par ces deux types considérés.

III.2 ANALYSE DE STABILITE

Une fois l'équation d'état du système électrique écrite sous forme de modèle d'état, la stabilité du système peut être étudiée. L'analyse de la stabilité est basée sur les valeurs propres et les vecteurs propres du système.

III.2.1 Valeurs Propres

Une valeur propre $\lambda = \alpha \pm j\beta$ (ou pole du système) est un nombre complexe qui vérifie l'égalité (3.1) appelée équation caractéristique de la matrice d'état A. le nombre de valeurs propres d'un système est toujours égal à la dimension de sa matrice d'état.

$$\text{Det}(A - \lambda I) = 0 \quad (I = \text{matrice identité}) \quad (3.1)$$

Chaque valeur propre λ_i contribue à la réponse transitoire du système à travers des fonctions élémentaires du temps :

- Chaque valeur propre réelle λ_i de multiplicité m_i donne une réponse transitoire :

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{m_i} c_j t^{j-1} e^{\lambda_i t} \quad (3.2)$$

- Chaque paire de valeurs propres complexes conjuguées (λ_j, λ_j^*) de multiplicité m_j , donne une réponse transitoire :

$$y_j(t) = \sum_{j=1}^{m_j} t^{j-1} e^{\alpha_j t} (c_{1j} \cos(\beta_j t) + c_{2j} \sin(\beta_j t)) \quad (3.3)$$

où c_x , c_y et c_{2j} sont des coefficients.

La réponse transitoire globale du système est constituée par la combinaison linéaire de ces fonctions élémentaires. Dans cette combinaison linéaire, chaque fonction élémentaire du temps est appelée *mode* du système [6].

On constate que les modes sont fonctions d'exponentielles ; la convergence de la réponse peut être déterminée en étudiant les exposants des exponentielles qui ne sont rien d'autre que les valeurs propres du système. On distingue alors deux types de modes :

- Les valeurs propres réelles correspondent à des *modes aperiodiques*.
- Les valeurs propres complexes conjuguées correspondent à des *modes oscillants*.

La caractéristique temporelle d'un mode correspondant à A étant donnée par e^{At} , la stabilité du système est donc liée à l'emplacement des valeurs propres dans le plan complexe [31] :

1. Si toutes les valeurs propres ont une partie réelle négative, tous les modes décroissent dans le temps et le système est dit globalement stable.
2. Si une des valeurs propres est à partie réelle positive, le mode correspondant croît exponentiellement dans le temps et éventuellement domine le comportement du système. Un tel système est dit instable.
3. Si une des valeurs propres est à partie réelle nulle, le mode correspondant aura une réponse non amortie.

Pour les modes oscillatoires [32], les oscillations sont caractérisées par la fréquence oscillatoire en Hertz donnée par :

$$f = \frac{\beta}{2\pi} \quad (3.4)$$

Et le facteur d'amortissement est donnée par :

$$\xi = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (3.5)$$

III.2.2 Vecteurs Propres

Pour chaque valeur propre λ_i ($i=1, \dots, n$) vecteur colonne ϕ_i , de dimension n , qui satisfait l'équation (3.6), est appelé vecteur propre de droite de A associé à λ_i .

$$A\phi_i = \lambda_i\phi_i \quad (3.6)$$

De même, le vecteur ligne φ_i , de dimension n , qui satisfait l'équation (3.7), est appelé vecteur propre de gauche de A associé à λ_i .

$$\varphi_i A = \lambda_i\varphi_i \quad (3.7)$$

Les vecteurs propres de droite montrent la distribution des modes à travers les variables d'état. Alors que les vecteurs propres de gauche, avec les conditions initiales du vecteur d'état du système, déterminent l'amplitude des modes [31].

Les vecteurs propres peuvent être normalisés tel que leur produit donne :

$$\varphi_i\phi_i = 1 \quad (3.8)$$

Il est à noter aussi que le produit d'un vecteur propre de droite et un vecteur propre de gauche associés à deux valeurs propres différentes vaut 0, c.-à-d. :

$$\varphi_i\phi_j = 0 \quad \text{Pour } i \neq j \quad (3.9)$$

III.2.3 Facteurs de Contribution

Une matrice appelée *matrice de contribution*, notée P , donne une mesure sur la relation entre les variables d'état et les modes du système [32]. Elle est définie par :

$$P = [P_1, P_2, \dots, P_n] \quad (3.10)$$

L'élément $P_{ki} = \varphi_{ki} \phi_{ik}$ est appelé *facteur de contribution*, et mesure k participations de la k^{eme} variable d'état dans le i^{me} mode. En général, les facteurs de contributions sont très utiles dans l'identification des variables d'état ayant une grande influence sur un mode donné. La matrice suivante explique ce raisonnement :

$$P = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 \\ x_1 : & P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ x_2 : & P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ x_3 : & P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ x_4 : & P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Pour chaque mode $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ et λ_4 , la matrice de contribution montre le degré d'implication de chaque variable d'état x_1, x_2, x_3 et x_4 .

Les facteurs de contribution sont sans unité, ils ne dépendent donc pas des unités des variables d'état. Aussi, la somme des éléments de chaque ligne de P et la somme des éléments de chaque colonne de P vaut 1 :

$$\sum_{j=1}^n P_{ji} = \sum_{i=1}^n P_{ji} = 1 \quad (3.12)$$

Une autre propriété intéressante est la participation des sous-systèmes [33]. Elle est donnée par la valeur absolue de la somme des facteurs de contribution des variables d'état qui décrivent un sous-système dans un mode :

$$P_{Si} = \left| \sum_{j \in I} P_{ji} \right| \quad (3.13)$$

III.3 APPLICATION AU SYSTEME 2 REGIONS 4 MACHINES

III.3.1 Description du Système d'application

Le système étudié dans cette section est le réseau a deux régions dont le schéma unifilaire est montré sur la figure (III.1). Ce système a été créé dans le but d'étudier le phénomène des oscillations électromécaniques entre différentes régions de production.

Le système est constitué de deux régions reliées à travers une ligne de 220 km. Les deux régions sont symétriques et chacune comporte deux générateurs. Tous les générateurs ont les mêmes paramètres les données du système se trouvent dans l'annexe [34].

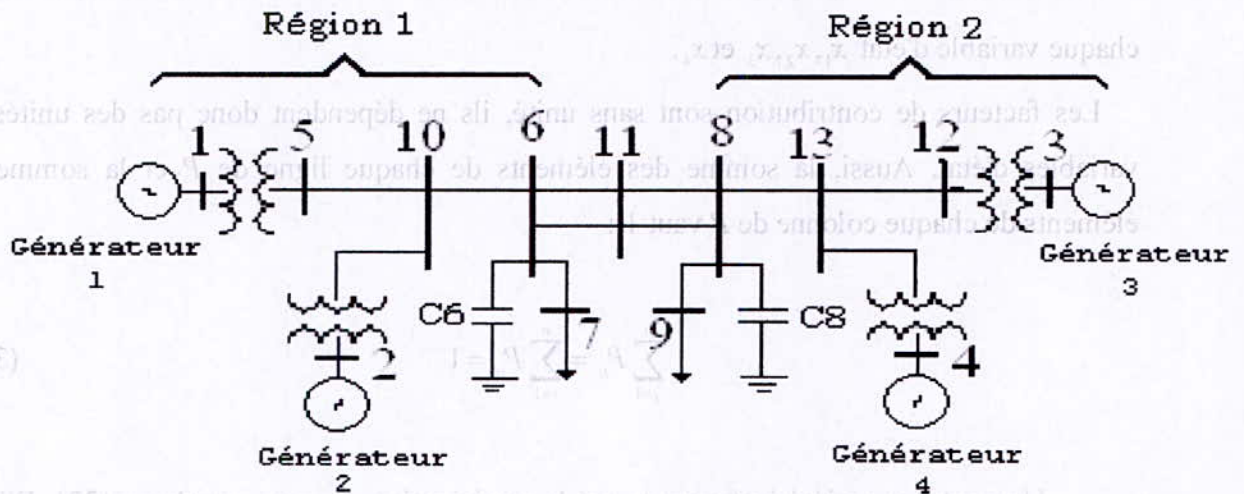


Figure III.1 Schéma unifilaire du réseau 2 Régions 4 machines.

Deux états figure (deux topologies) sont considérés :

- Premier état de figure : 400 MW de puissance s'écoule de la région 1 vers la région 2.
- deuxième état de figure: 400 MW de puissance s'écoule de la région 2 vers la région 1.

III.3.2 Commande Linéaire Optimale

Le régulateur linéaire optimal a pour but de minimiser la variation des états du système en conjonction avec l'effort de contrôle adopté. Le dimensionnement de ce type de stabilisateur nécessite de palier au problème de la détermination du signal $u(t)$ qui rend J minimal. La recherche de la commande optimale exige que le système soit complètement commandable, c'est-à-dire qu'il existe au moins une commande le conduisant d'un état initial quelconque donné à un état final imposé. Toutes les composantes du vecteur d'état sont supposées observables. Les étapes de conception de la commande sont les suivantes :

- Etablir un modèle linéaire puis écrire le système d'équations d'état sous la forme

$$\text{suivante : } \dot{X} = AX + Bu \quad (3.14)$$

- Faire le choix des matrices de pondération Q et R suivant les indices de performances d'où l'équation suivante :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [X^T Q X + u^T R u] dt \quad (3.15)$$

- Construction de la matrice M , du système d'état et des états associés

$$M = \begin{bmatrix} A & -S \\ -Q & -A^T \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\text{Avec: } S = B R^{-1} B^T \quad (3.17)$$

On calcule alors les valeurs propres :

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_- \\ \lambda_+ \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Et les vecteurs propres :

$$X = \begin{bmatrix} X_I & X_{III} \\ X_{II} & X_{IV} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

- Calcul de la matrice de Riccati K et du vecteur de contrôle Bu :

$$K = X_{II} X^{-1} \quad (3.20)$$

$$Bu = -S K \quad (3.21)$$

- Détermination des valeurs du système avec la commande optimale linéaire:

$$\dot{X} = A X + Bu = (A - S K) X \quad (3.22)$$

III.4 RESULTATS DE SIMULATION

III.4.1 valeurs propres :

Les valeurs propres sont données dans le tableau suivant :

Tableaux III.1 : Valeurs propres du système sans commande et avec commande linéaire optimale.

Machine	Sans aucune commande	Avec commande optimale
2	$-0.0322 \pm 5.2157i$	$-2.7373 \pm 7.0183i$
3	$-0.1002 \pm 6.0805i$	$-3.5679 \pm 5.3839i$
4	$-0.0557 \pm 7.8942i$	$-3.1521 \pm 6.0945i$

D'après le tableau (III.1) on constate que sans commande le système est à la limite de la stabilité. En effet la partie réelle des valeurs propres s'approche de l'axe imaginaire. En appliquant la commande optimale on remarque la partie réelle des valeurs propres s'éloigne de l'axe imaginaire et le système devient stable.

III.4.2 Analyse temporelle

Dans cette partie nous simulons des petites perturbations de charge sur la machine 3, les réponses permettent l'analyse de la stabilité dynamique dans le domaine temporel sans aucune commande et avec la commande optimale linéaire. Nous constatons un amortissement des oscillations électromécaniques dès la première secondes.

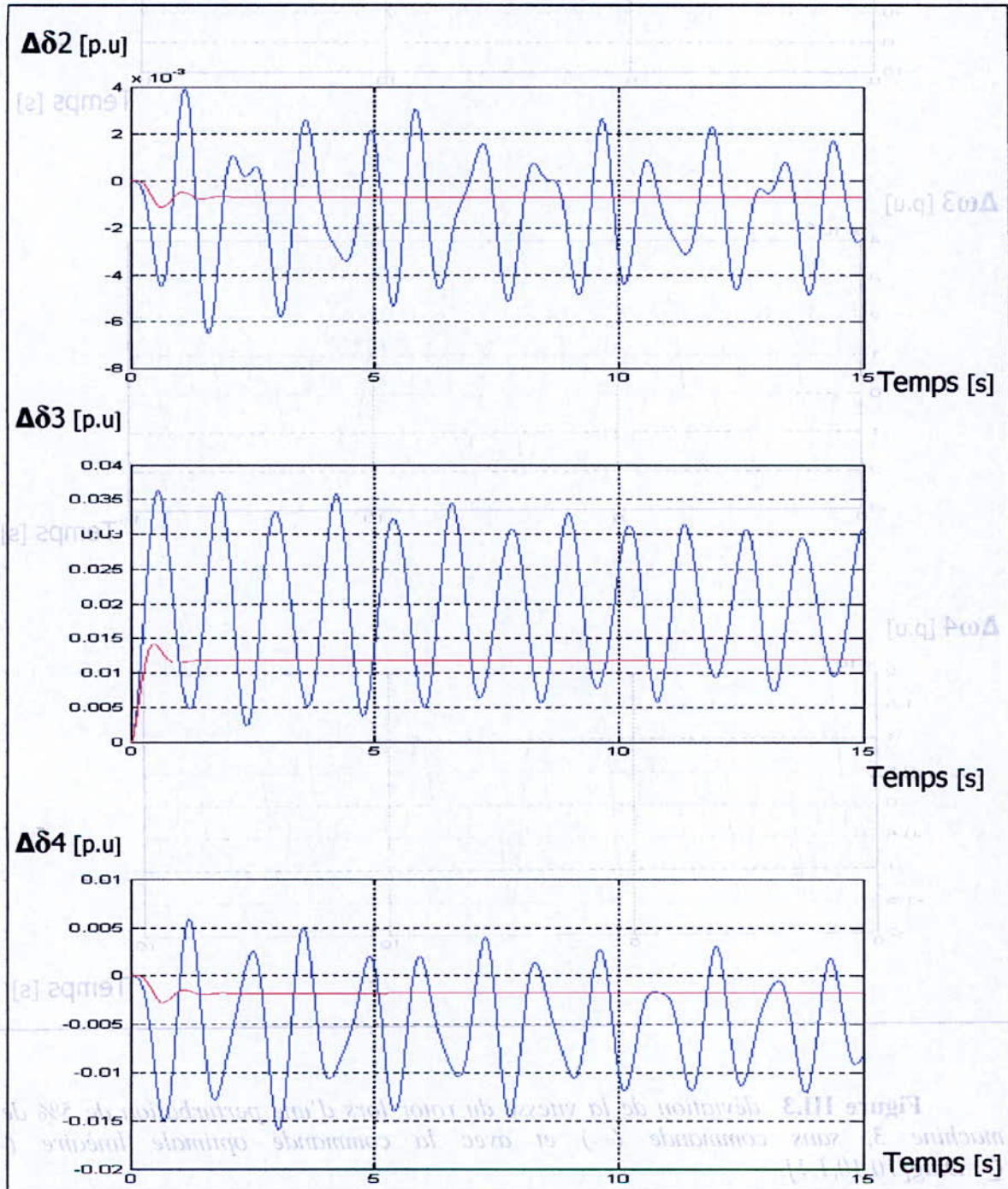


Figure III.2 : Déviation de l'angle interne du générateur 3 suite à une perturbation de 5%, sans commande (—) et avec la commande optimale linéaire (—), $Q = \text{Diag}[10, 10, 1, 1]$.

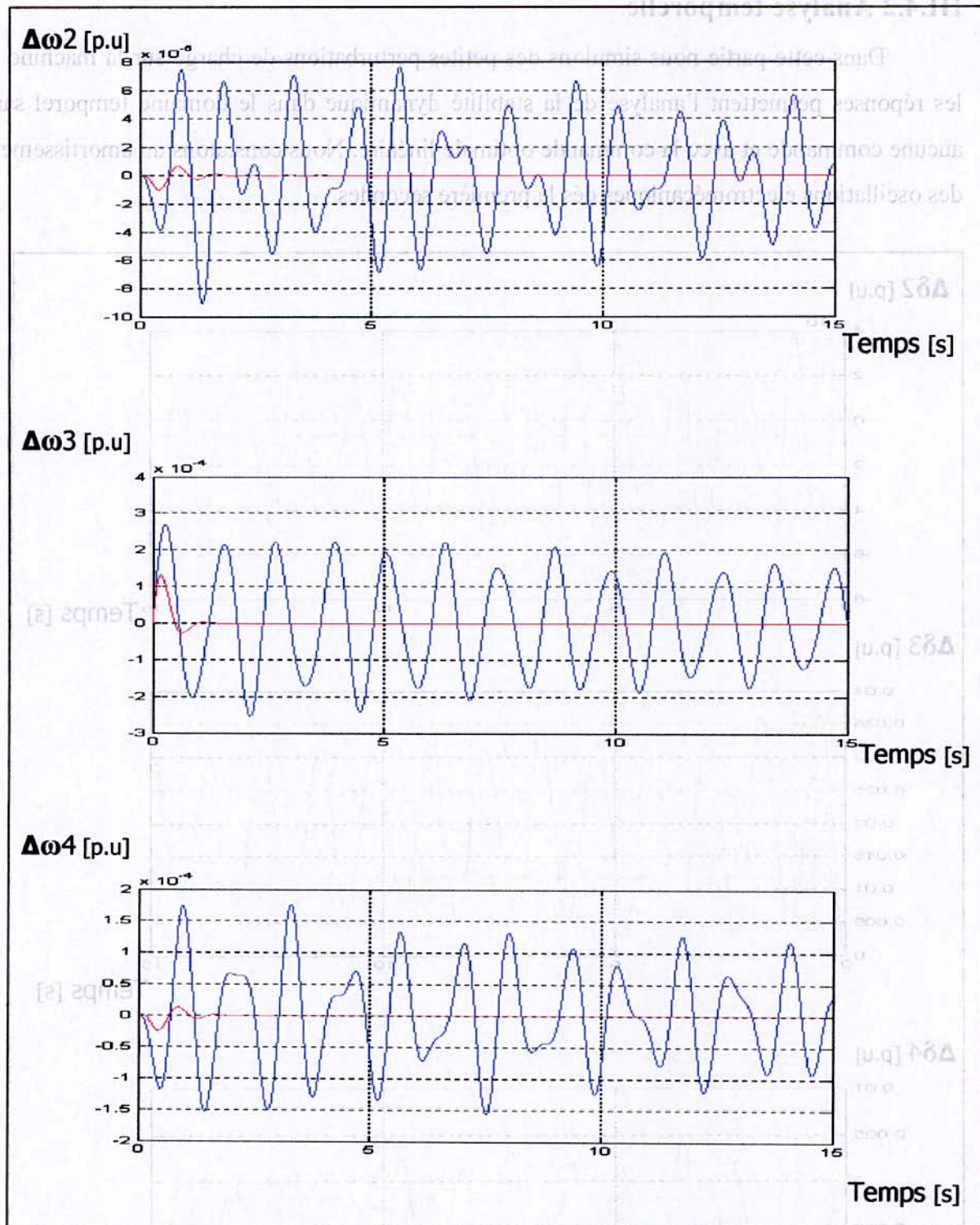


Figure III.3 déviation de la vitesse du rotor lors d'une perturbation de 5% de la machine 3, sans commande (—) et avec la commande optimale linéaire (—), $Q = \text{Diag}[10, 10, 1, 1]$.

III.4.3 Amélioration de la Stabilité avec les PSS

Dans cette deuxième étape. On se propose d'étudier l'influence de l'insertion des « PSS » sur la stabilité dynamique du réseau.

Ces 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 régulateurs de vitesse.

III.4.3.1 Fonction de transfert du PSS

La représentation fonctionnelle du modèle du PSS est donnée par la figure (III.4) :

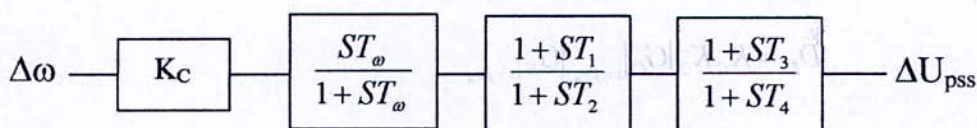


Figure III.4 Modèle du stabilisateur de puissance.

D'où l'on déduit la fonction de transfert dont le dénominateur du second ordre est :

$$d(s) = s^2 + 2\zeta_x \omega_x s + \omega_x^2 \quad (3.23)$$

La procédure à suivre se résumera alors à :

- Fréquence naturelle et taux d'amortissement du système d'excitation (ω_x et ζ_x) :

$$\omega_x = \sqrt{\frac{K_6 K_A}{T_{d0}' T_A}} \quad (3.24)$$

$$\zeta_x = \frac{T_A + K_3 T_{d0}'}{2\omega_x K_3 T_{d0}' T_A} \quad (3.25)$$

- Fréquence dominante d'oscillation en spécifiant le taux d'amortissement

$$(\zeta_{n1} = 0.1 - 0.4) :$$

$$\omega_{d1} = \omega_{n1} \sqrt{1 - \zeta_{n1}^2} \quad (3.26)$$

- Déphasage induit par le système d'excitation :

$$G_E = \frac{2\zeta_x \omega_{d1} / \omega_x}{1 - (\omega_{d1} / \omega_x)^2} \quad (3.27)$$

- Constantes de temps T_1 et T_2 :

$$a = \frac{1 + \sin(G_E)}{1 - \sin(G_E)} \quad (3.28)$$

$$T_1 = \frac{1}{\sqrt{a} \omega_{d1}} \quad (3.29)$$

$$T_2 = T_1 a \quad (3.30)$$

- Gain du stabilisateur K_C : en spécifiant le temps $T_R = 3s$ (reset time), on a :

$$D_E = 2\zeta_{n1} \omega_{n1} M \quad (3.31)$$

$$D_E = K_C K_2 |G_C|_{s=j\omega_n} |G_E|_{s=j\omega_n} \quad (3.32)$$

On déduit :

$$K_C = \frac{2\zeta_{n1} \omega_{n1}}{K_2 |G_C(j\omega_n)| |G_E(j\omega_n)|} \quad (3.33)$$

Le nombre de PSS à installer n'est pas toujours égal au nombre de générateurs. Par conséquent, il faut prendre en considération le choix de l'emplacement optimal des PSS qui offre un meilleur rendement. Ce problème est réglé grâce à la matrice des facteurs de contribution qui permettra d'identifier l'emplacement idéal des PSS.

Le tableau (III.2) donne les modes dominants correspondants aux valeurs propres les plus proches de l'axe imaginaire et leurs fréquences respectives.

Tableau III.2 Modes d'oscillation du système sans PSS

Modes	Amortissement ξ (%)	Fréquence (Hz)
$-0.0322 \pm 5.2157i$	0.4985	1.0286
$-0.1002 \pm 6.0805i$	0.7990	0.6418
$-0.0557 \pm 7.8942i$	0.6177	0.8303

Tableau III.3 Contribution des générateurs dans les modes électromécaniques

Modes	G1	G2	G3	G4
$-0.0322 \pm 5.2157i$	0.1593	0.5579	0.0189	0.2635
$-0.1002 \pm 6.0805i$	0.7505	0.2436	0.0052	0.0006
$-0.0557 \pm 7.8942i$	0.0005	0.0210	0.7636	0.2146

Le tableau (III.3) montre les facteurs de contribution des générateurs dans les modes oscillatoires électromécaniques. Nous pouvons remarque que le mode $(-0.1002 \pm 6.0805 i)$ est dominé par les générateurs 1 et 2, alors que le mode $(-0.0557 \pm 7.8942 i)$ est dominé par les générateurs 3 et 4. Ces deux modes correspondent à des modes locaux et caractérisent l'interaction entre les générateurs d'une même région. Le mode $(-0.0322 \pm 5.2157i)$ correspond à un mode interrégional et caractérise l'interaction entre les générateurs d'une région par rapport aux générateurs d'une autre région.

D'après les résultats de ce tableau l'emplacement optimal des PSS est obtenu avec leur disposition sur les générateurs 2 et 4.

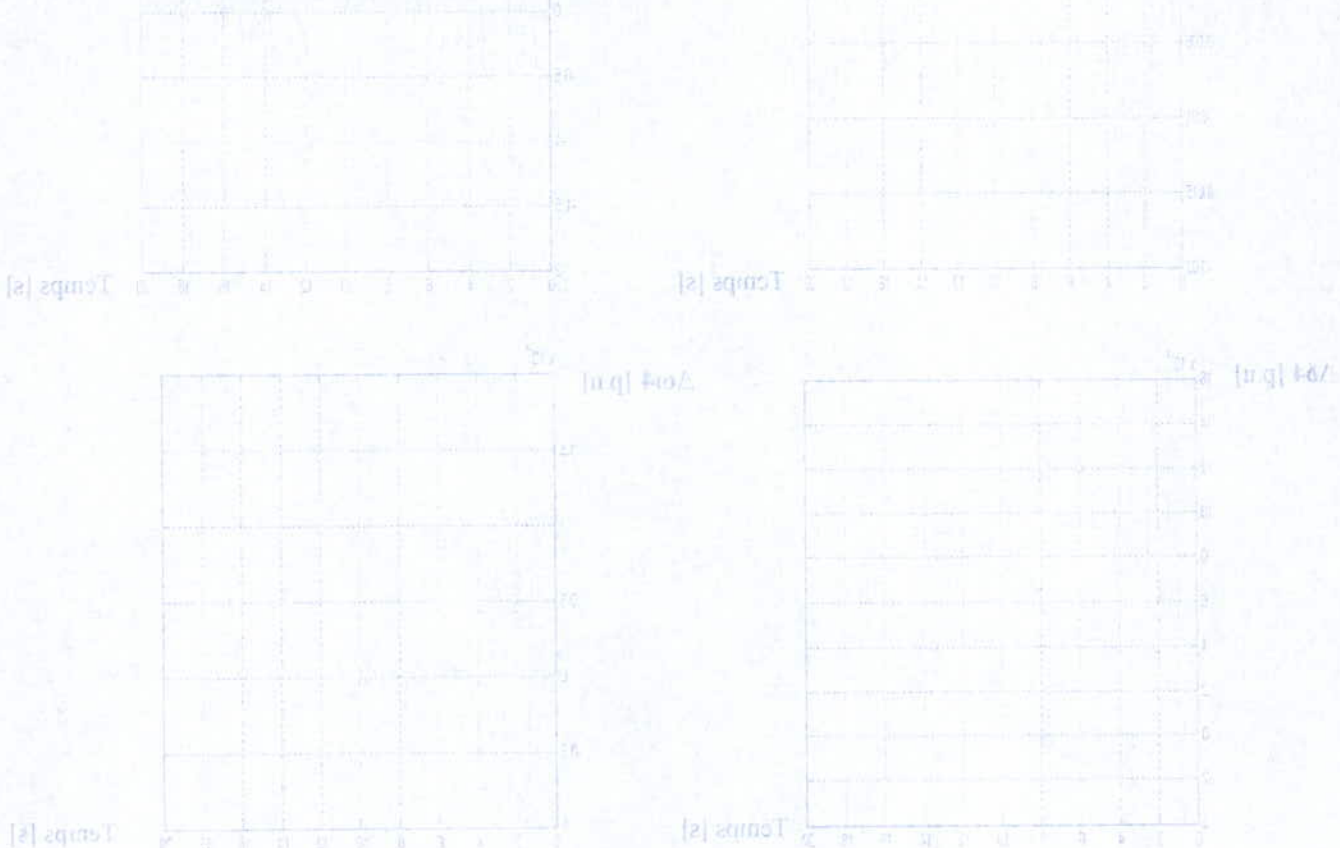


Figure III.2 Réponses temporelles de (a) : l'angle interne (δ) et (b) : de la vitesse (ω) des générateurs avec PSS non optimisés avec charge nominale.

III.4.3.2 Analyse temporelle

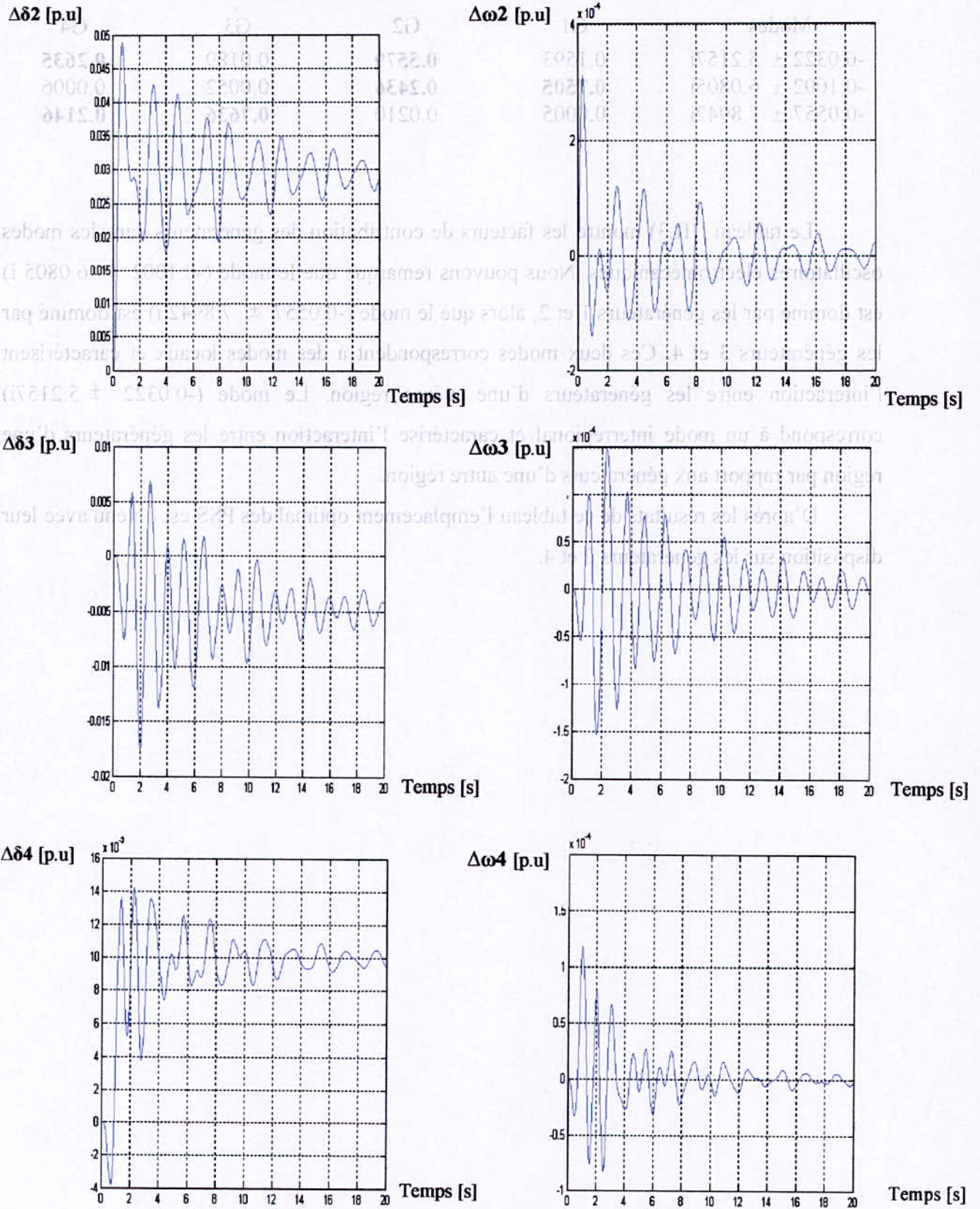


Figure III.5 Réponses temporelles de (a) : l'angle interne ($\Delta\delta$) et (b) : de la vitesse ($\Delta\omega$) des générateurs avec PSS non optimisés avec charge nominale.

D'après les réponses de la figure (III.5), le système devient stable quand les PSS sont implantés dans les générateurs définis par les facteurs de contribution. L'atténuation des oscillations de l'angle interne et de la vitesse des générateurs est réalisée après une dizaine de secondes.

III.5 CONCLUSION

L'analyse des résultats de simulation prouve que la méthode proposée dans ce chapitre utilisant le PSS est capable d'améliorer les oscillations de l'angle interne de la machine tout en contrôlant la vitesse dans des conditions anormales.

L'application des PSS a rendu le système stable et cela sans réglage précis de ses paramètres. Cette stabilité pourra être considérablement améliorée si une approche adéquate était établie pour un réglage optimale des paramètres du PSS, sujet qui sera traité dans le chapitre suivant en utilisant les algorithmes génétiques.

CHAPITRE IV

APPLICATION DES ALGORITHMES GENETIQUES

IV.1 INTRODUCTION

Les algorithmes génétiques (AG) sont des techniques de recherche et d'optimisation stochastique dérivées de la génétique et des mécanismes de la sélection naturelle et de l'évolution. Leurs champs d'application sont très vastes : économie, finance, optimisation de fonctions, planification, et bien d'autres domaines. La raison de ce grand nombre d'application est claire, la simplicité et l'efficacité.

Les premiers travaux sur les algorithmes génétiques ont été initialement développés par John Holland (1975) [35] qui a développé les principes fondamentaux des algorithmes génétiques dans le cadre de l'optimisation mathématique.

A cette époque, l'informatique n'avait pas encore connu de développement et ses travaux n'ont pas pu être appliqués sur des problèmes réels de grande taille. La parution en 1989 de l'ouvrage de référence écrit par D.E Goldberg [36], qui décrit l'utilisation de ces

algorithmes dans le cadre de résolution de problèmes concrets, a permis de mieux faire connaître ces derniers dans la communauté scientifique et a marqué le début d'un nouvel intérêt pour cette technique d'optimisation, notamment après la parution de puissants calculateurs dans les années 90.

Ce chapitre présente quelques concepts fondamentaux sur les algorithmes génétiques ainsi que des résultats d'optimisation des paramètres des PSS appliqués à l'amortissement des oscillations électromécaniques et donc la stabilité du système.

IV.2 PRESENTATION DES ALGORITHMES GENETIQUES

D'une manière globale, un algorithme génétique manipule les solutions potentielles d'un problème donné afin d'atteindre la solution optimale ou une solution jugée satisfaisante.

L'algorithme génétique est organisée en plusieurs étapes et fonctionne de manière itérative. La figure (IV.1) représente l'algorithme génétique le plus simple [35]. Celui-ci met en œuvre différents opérateurs qui seront décrits dans la sélection suivante. Mais avant, il est nécessaire de définir quelques termes de base rencontrés dans la littérature :

- **Individu** : solution potentielle du problème.
- **Chromosome** : solution potentielle du problème sous une forme codée, c-à-d une forme chaîne de caractères.
- **Population** : ensemble fini d'individus (de solution).
- **Gène** : partie élémentaire (caractère) non divisible d'un chromosome.
- **Fitness** : terme anglo-saxon qui désigne la fonction d'évaluation d'un individu. Cette fonction est liée à la fonction à optimiser et permet de définir le degré de performance d'un individu (donc d'une solution) vis-à-vis du problème.

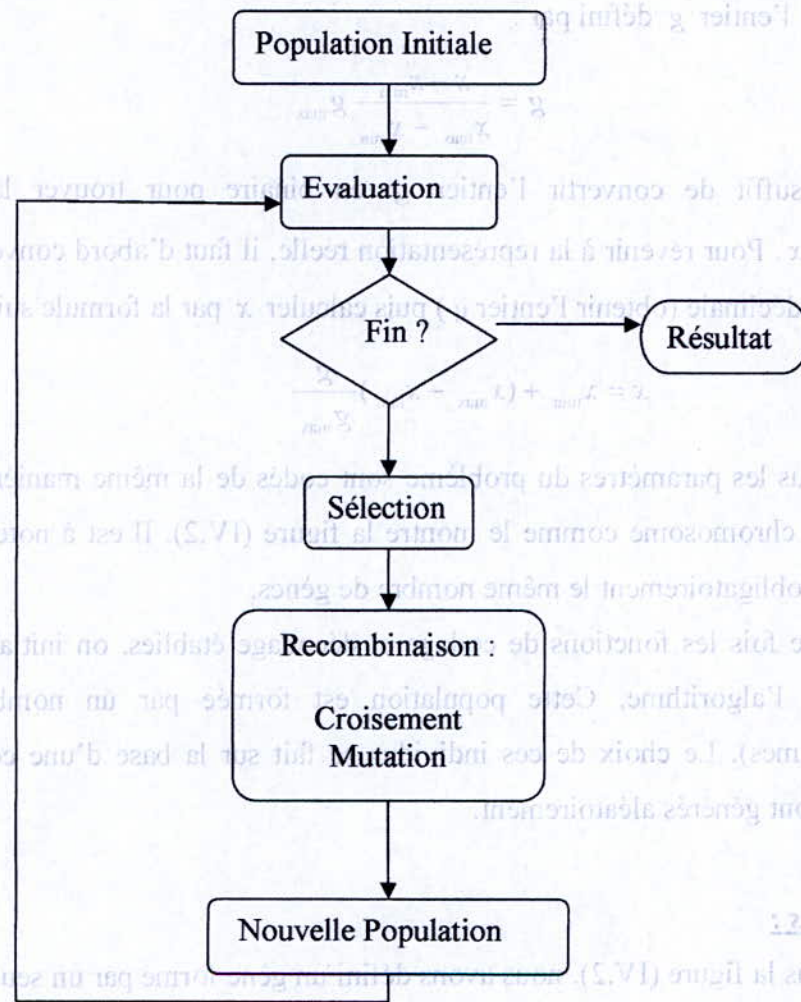


Figure IV.1 Organigramme d'un algorithme génétique simple.

IV.3 DESCRIPTION DES ALGORITHMES GENETIQUES

Dans ce qui suit, nous allons décrire plus en détail les différentes étapes de l'algorithme génétique de la figure (IV.1).

IV.3.1 Codage initiale

La première étape dans la procédure d'un algorithme génétique est le codage des paramètres du problème afin de constituer les chromosomes. Le type de codage le plus utilisé est le codage binaire, mais d'autres types peuvent être utilisés [37], par exemple codage Gray, Réel..., etc. Aussi, nous pouvons facilement passer d'un codage à l'autre.

Par exemple, dans le cas d'un codage binaire d'une variable réelle x définie dans un intervalle $[x_{\min}, x_{\max}]$, on discrétise l'espace de recherche $g_{\max} = 2^n - 1$ valeurs discrètes où

n représente le nombre de bits sur lequel la variable est codée. Ensuite, on associe à la variable x l'entier g défini par :

$$g = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} g_{\max} \quad (4.1)$$

Il suffit de convertir l'entier g en binaire pour trouver la valeur binaire du paramètre x . Pour revenir à la représentation réelle, il faut d'abord convertir la représentation binaire en décimale (obtenir l'entier g) puis calculer x par la formule suivante :

$$x = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min}) \frac{g}{g_{\max}} \quad (4.2)$$

Tous les paramètres du problème sont codés de la même manière puis associés pour former un chromosome comme le montre la figure (IV.2). Il est à noter que les paramètres n'ont pas, obligatoirement le même nombre de gènes.

Une fois les fonctions de codage et décodage établies, on initialise la population de départ de l'algorithme. Cette population est formée par un nombre fixe d'individus (chromosomes). Le choix de ces individus se fait sur la base d'une connaissance à priori, sinon ils sont générés aléatoirement.

Remarques :

- dans la figure (IV.2), nous avons défini un gène forme par un seul bit, ce qui est le cas dans de nombreux travaux. Cela veut dire que tous les bits peuvent être manipulés indépendamment. Cependant, on peut définir un gène par un ensemble de bits et c'est cet ensemble qui sera manipulé par l'algorithme [38].
- la fonction de codage est inutile dans le cas où la population est initialisée aléatoirement. En effet, on peut tirer au hasard les individus directement dans leur représentation codée. Par contre, la fonction de décodage est nécessaire pour l'évaluation de ces individus.

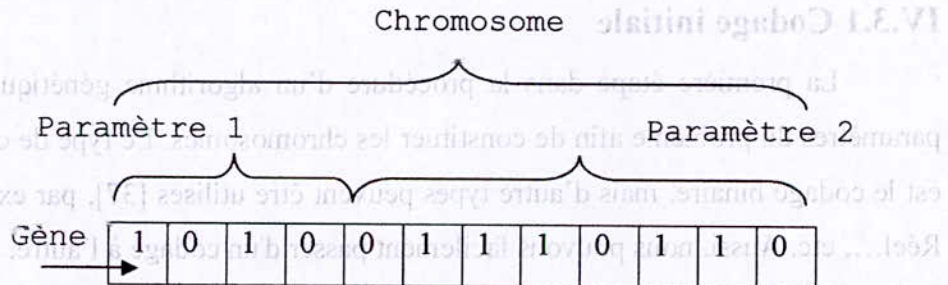


Figure IV.2 Exemple d'un chromosome en codage binaire.

IV.3.2 Evaluation

L'évaluation consiste à mesurer la performance de chaque individu de la population. On utilise pour cela une fonction directement liée à la fonction objective (fonction à optimiser) appelée fonction fitness. C'est une fonction réelle positive qui reflète la force de l'individu. Un individu ayant une grande valeur fitness représente une bonne solution au problème, alors qu'un individu ayant une faible valeur fitness représente une solution médiocre. Dans le cas d'un problème de minimisation, la fonction fitness peut être obtenue en utilisant une des manières suivantes :

- $Fit(x) = N - F_{obj}(x)$ si $F_{obj} \geq N$, sinon $Fit(x) = 0$ (N est une constante positive).
- $Fit(x) = \frac{1}{F_{obj}(x)}$
- $Fit(x) = -F_{obj}(x)$

Contrairement aux méthodes d'optimisation classique, aucune condition liée à la dérivabilité, à la continuité, la convexité ou concavité n'est requise pour la fonction objective. Il suffit juste qu'elle fournisse une valeur numérique finie pour chaque individu.

Cela donne aux algorithmes génétiques un caractère très attrayant pour la résolution dont les propriétés mathématiques sont méconnues ou très délicates à déterminer.

IV.3.3 Sélection

Cet opérateur est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. En règle générale, la probabilité de survie d'un individu sera directement liée à son efficacité relative au sein de la population.

Une population dite intermédiaire est alors formée par les individus sélectionnés.

Il existe plusieurs méthodes de sélection [39]. Nous ne citerons que deux des plus connues :

IV.3.3.1 Méthode de la roulette de loterie

Selon cette méthode, chaque chromosome sera dupliqué dans une nouvelle population proportionnellement à sa valeur d'adaptation. Son principe est d'associer à chaque individu une portion d'une roue dont la surface dépend uniquement de sa valeur fitness [37]. Un

individu présentant une valeur fitness nulle ne sera pas représenté sur la roue, il n'aura donc aucune chance d'être sélectionné. Les individus ayant une grande valeur fitness auront une grande portion et auront, par conséquent, plus de chance d'être sélectionnés.



Figure IV.3 Sélection par la méthode de la roue de loterie.

Pour réaliser la sélection, il suffit de faire tourner la roue autant de fois que le nombre d'individus. La figure (IV.3) illustre un exemple de roue de loterie. Les numéros de 1 à 5 représentent les numéros des individus.

IV.3.3.2 Méthode du tournoi

Le principe de cette méthode est de tirer aléatoirement un groupe de k individus parmi la population, et de sélectionner le meilleur d'entre eux. Ce processus est répété jusqu'à ce que le nombre d'individus de la population intermédiaire soit égal au nombre total d'individus formant la population initiale. Nous avons trouvé dans la littérature deux versions différentes de cette méthode, notamment, au niveau de la façon dont les groupes sont formés.

Selon la référence [40], La population est divisée en groupes de k individus. Ensuite, on sélectionne le meilleur de chaque groupe. Il faut k itérations pour remplir la population intermédiaire parce qu'à chaque fois m individus sont sélectionnés ou m est défini par :

$$m = \frac{\text{taille de la population}}{k} \quad (4.3)$$

Selon la référence [40]. La procédure est la suivante : on tire k fois un individu avec remplacement (chaque tirage inclut tous les individus y compris ceux déjà sélectionnés). Ensuite, on sélectionne celui qui présente la plus grande valeur fitness pour le placer dans la

population intermédiaire. Si N est le nombre totale d'individus formant la population alors il faut N itérations pour remplir la population intermédiaire.

La seule différence que nous avons pu constater, c'est que la deuxième version ne fait pas obligatoirement participer tous les individus, et par conséquent, elle n'assure pas que le meilleur individu soit présent dans la population intermédiaire.

IV.3.4 Recombinaison

La recombinaison agit directement sur la structure des chromosomes en modifiant leurs gènes pour obtenir les nouveaux chromosomes d'une nouvelle population. On dira alors, qu'une nouvelle génération d'individus est née. Lors du passage d'une génération à l'autre, le meilleur individu est supposé évalué afin d'atteindre l'optimum recherché correspondant à une très bonne solution de notre problème. Il existe deux catégories d'opérateurs de recombinaison : l'opérateur de croisement et l'opérateur de mutation.

IV.3.4.1 Croisement

L'opérateur de croisement permet la création de nouveaux individus selon un processus fort simple. Il permet donc l'échange d'information entre les chromosomes (individus). Tout d'abord, deux individus, qui forment alors un couple, sont tirés au sein de la nouvelle population issue de la reproduction. Puis un (potentiellement plusieurs) site de croisement P est tiré aléatoirement. Enfin, selon une probabilité P_c que le croisement s'effectue.

- Si $P > P_c$, le croisement n'aura pas lieu et les parents sont copiés dans la nouvelle génération.
- Si $P \leq P_c$, le croisement se produit et les chromosomes des parents sont croisés pour donner deux enfants qui remplaceront leurs parents dans la nouvelle génération.

Il existe différents types de croisement, les plus connus sont le croisement multipoints de la figure (IV.4) et le croisement uniforme de la figure (IV.5).

Pour le **croisement multipoints**, p positions de croisement, avec $p \in [1, 2, \dots, l-1]$ où l représente la taille du chromosome, sont choisies aléatoirement pour chaque couple. Ensuite, les gènes entre deux points de croisement successifs sont échangés entre deux parents produisant deux nouveaux individus appelés enfants. Les valeurs typiques de p sont : 1 (croisement à 1 point) et 2 (croisement à 2 points).

Le **croisement uniforme** est une généralisation du croisement multipoints. Ici, chaque gène du chromosome peut constituer un point de croisement. Un chromosome nommé masque, de taille identique à celle des parents, est créé aléatoirement et la valeur des gènes du masque identique de quel parent l'enfant recevra-t-il son gène [37].

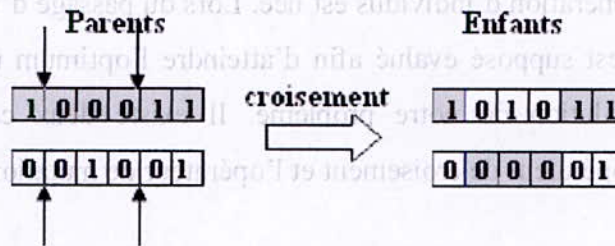


Figure IV.4 Croisement multipoints ($p = 2$) en codage binaire.

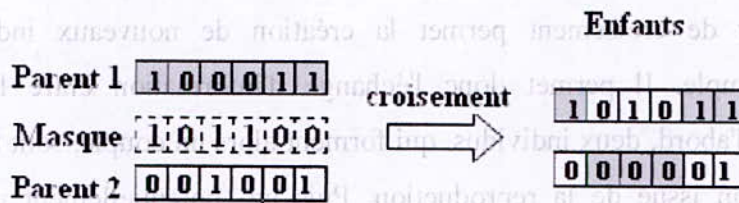


Figure IV.5 Croisement uniforme en codage binaire.

IV.3.4.2 Mutation

L'opérateur de mutation permet d'explorer de nouveaux points dans l'espace de recherche et il assure la possibilité de quitter les optimums locaux. La mutation s'applique sur chaque gène de chaque individu avec une probabilité de mutation P_m en suivant le même principe que pour le croisement.

- Si $P > P_m$ la mutation n'aura pas lieu et le gène reste tel qu'il est.
- Si $P \leq P_m$ la mutation se produit, et le gène sera remplacé par un autre gène tiré aléatoirement parmi les différentes valeurs possibles. Dans le cas d'un codage binaire,

elle favorise la recombinaison des individus tout en favorisant de tomber dans un optimum local. Les valeurs classiques pour ce paramètre varient 0.6 à 0.95.

- **Probabilité de mutation** : elle doit être assez faible par rapport à celle du croisement de manière à ne pas perturber l'évolution de l'algorithme. Une valeur élevée transformera l'algorithme en une recherche aléatoire, alors qu'une valeur très faible rendra impossible l'extraction des optimums locaux. Les valeurs classiques pour ce paramètre varient de 0.001 à 0.2.
- **Taille de la population** : augmenter la taille de la population permet d'augmenter sa diversité et réduit la probabilité d'une convergence prématurée vers un optimum local, mais en même temps elle augmente le temps nécessaire pour converger vers les régions optimales de l'espace de recherche.

IV.5 FORMULATION DE LA FONCTION OBJECTIVE

Dans cette section, une procédure d'optimisation des paramètres de deux PSS simultanément est décrite, les PSS doivent stabiliser le system quelque soit son point de fonctionnement. Pour chaque point de fonctionnement considéré un modèle linéaire du système électrique est obtenu.

L'équation (4.4) décrit le modèle linéaire d'un système électrique établi autour d'un point de fonctionnement k :

$$\dot{X}(t) = A_k X(t) + B_k U(t) \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.4)$$

m est le nombre de points de fonctionnement considérés .

La fonction de transfert des deux PSS est donnée par :

$$U_i(s) = K_C \frac{sT_{\omega i}}{1 + sT_{\omega i}} \left(\frac{1 + sT_{1i}}{1 + sT_{2i}} \right) \left(\frac{1 + sT_{3i}}{1 + sT_{4i}} \right) \Delta\omega_i(s) \quad i = 1, 2 \quad (4.5)$$

La constante du temps du filtre T_{ω} est fixe pendant la procédure d'optimisation, les paramètres à optimiser sont donc les gains K_C et les constantes de temps des blocs de compensation de phase T_1, T_2, T_3 et T_4

Soit λ_{kj} la $j^{\text{ème}}$ valeur propre du système en boucle fermée (avec PSS) pour le $k^{\text{ème}}$ point de fonctionnement et ξ_{kj} le facteur d'amortissement associé défini par :

$$\begin{cases} \lambda_{kj} = \alpha_{kj} \pm i\beta_{kj} \\ \xi_{kj} = -\frac{\alpha_{kj}}{\sqrt{\alpha_{kj}^2 + \beta_{kj}^2}} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, m ; j = 1, 2, \dots, n \quad (4.6)$$

n : représente l'ordre du système en boucle fermée.

Nous regroupons tous les facteurs d'amortissements du $k^{\text{ème}}$ point de fonctionnement dans le vecteur E_k . L'objectif est de chercher dans un domaine limité les paramètres des stabilisateurs assurant un amortissement acceptable pour tous les points de fonctionnement. Pour cela il faut s'assurer que tous les facteurs de soient supérieurs à une valeur acceptable.

Nous pouvons alors formuler le problème de la manière suivante :

$$\text{Maximiser } F = \min(\min(E_k)) \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.7)$$

$$\begin{cases} K_{i \min} < K_i < K_{i \max} \\ T_{ri \min} < T_{ri} < T_{ri \max} \end{cases} \quad r = 1, \dots, 4 ; i = 1, 2 \quad (4.8)$$

Le problème ainsi défini est un problème d'optimisation complexe car la fonction objective dépend des valeurs propres d'une large matrice. Il est donc difficile de le résoudre en utilisant les méthodes classiques. Dans la section suivante, le problème sera résolu en utilisant les algorithmes génétiques.

IV.6 RESULTATS D'OPTIMISATION

Les paramètres d'optimisation par les algorithmes génétiques ainsi que la définition de l'espace de recherche, sont donnés par le tableau (IV.1). Pour ce cas, les deux PSS, installés au niveau des machines 2 et 4, sont identiques et : $T_{1i} = T_{3i}$, $T_{2i} = T_{4i}$ et $K_1 = K_2$ ($i = 1, 2$).

Le tableau (IV.2) présente les paramètres des PSS obtenus après optimisation, et cela après un temps de calcul d'une dizaine de minutes.

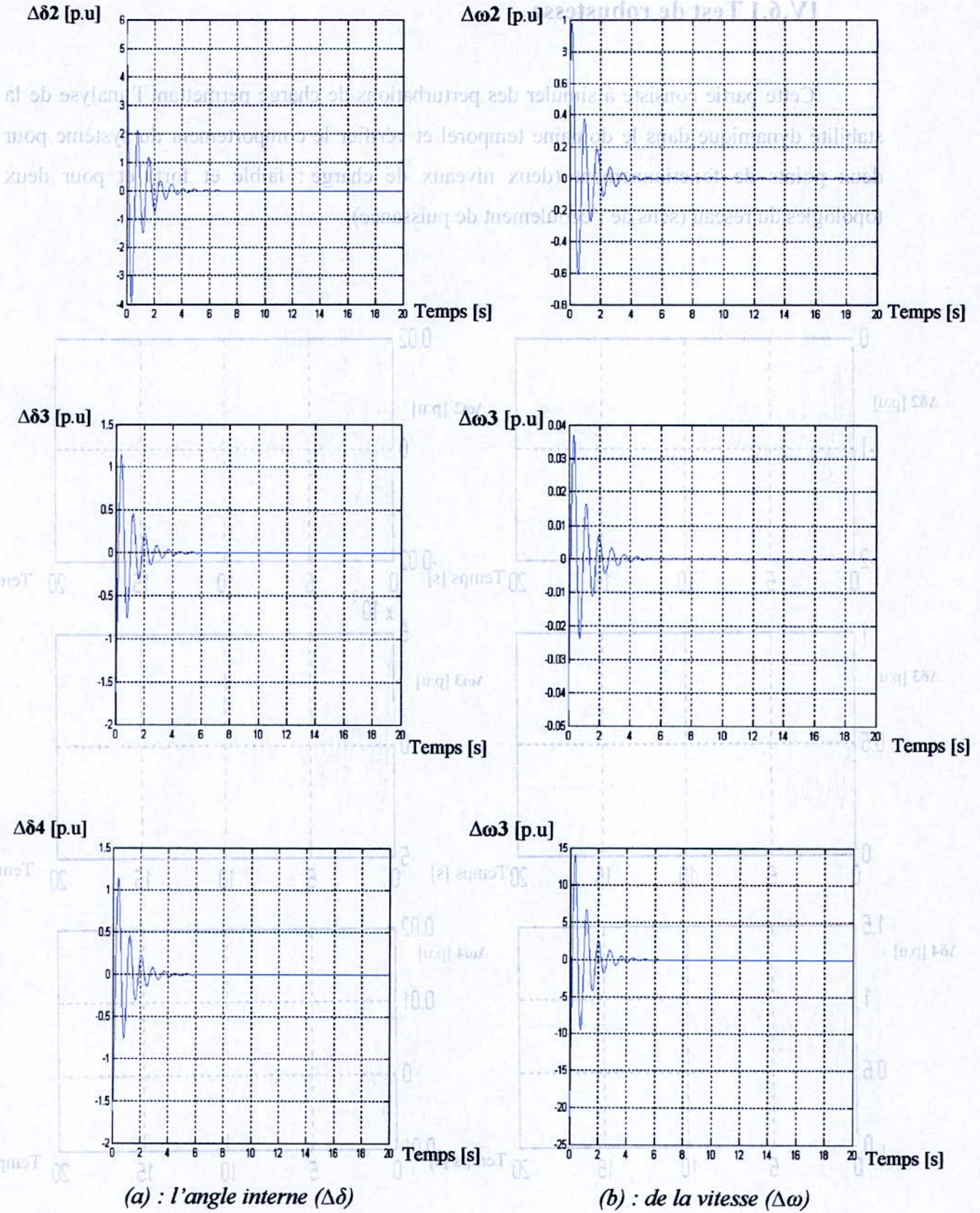
Tableau IV.1 Paramètres d'optimisation de l'AG.

Paramètres de l'AG		Espace de recherche
Type de codage	Binaire	$0.1 \leq T_{1i} \leq 100$ $0.1 \leq T_{2i} \leq 10$ $0.01 \leq K_i \leq 1$
Taille de la population	100	
Taille du chromosome	96	
Probabilité de croisement	0.01	
Probabilité de mutation	0.001	
Nombre de génération	50	

Tableau IV.2 Paramètres des PSS obtenus après optimisation

Paramètres des PSS	T_1	T_2	K
PSS ₁	0.301	0.145	79.047
PSS ₂	0.855	0.410	68.170

Les réponses temporelles obtenues après optimisation des paramètres du PSS sont présentées dans la figure (IV.7). Nous constatons une nette amélioration des oscillations électromécaniques par rapport aux réponses obtenues avec des PSS non optimisés. Le système est bien amorti et est stabilisé en moins de 5 secondes. Les oscillations du système sont donc mieux amorties avec les paramètres des dispositifs stabilisateurs PSS synthétisés par les algorithmes génétiques.



(a) : l'angle interne ($\Delta\delta$)

(b) : de la vitesse ($\Delta\omega$)

Figure IV.7 Réponses temporelles de (a) : l'angle interne ($\Delta\delta$) et (b) : de la vitesse ($\Delta\omega$) des Générateurs avec PSS optimisés avec charge nominale.

IV.6.1 Test de robustesse

Cette partie consiste à simuler des perturbations de charge permettant l'analyse de la stabilité dynamique dans le domaine temporel et vérifier le comportement du système pour deux points de fonctionnement (deux niveaux de charge : faible et fort) et pour deux topologies du réseau (sens de l'écoulement de puissance).

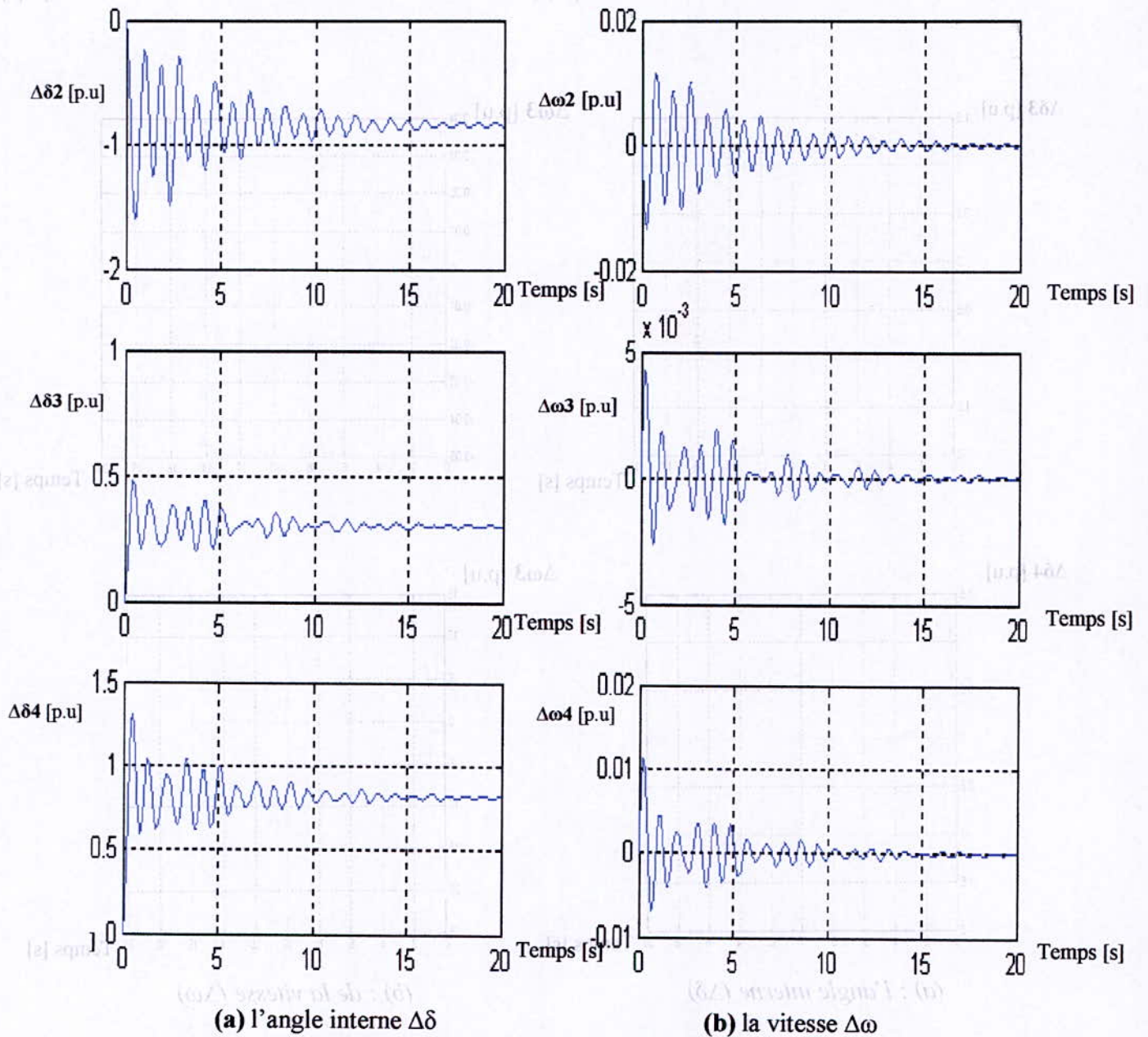


Figure IV.8 Réponses temporelles : (a) l'angle interne $\Delta\delta$ et (b) la vitesse $\Delta\omega$, des générateurs, avec transit de puissance de la région 2 vers 1 avec niveau de charge faible.

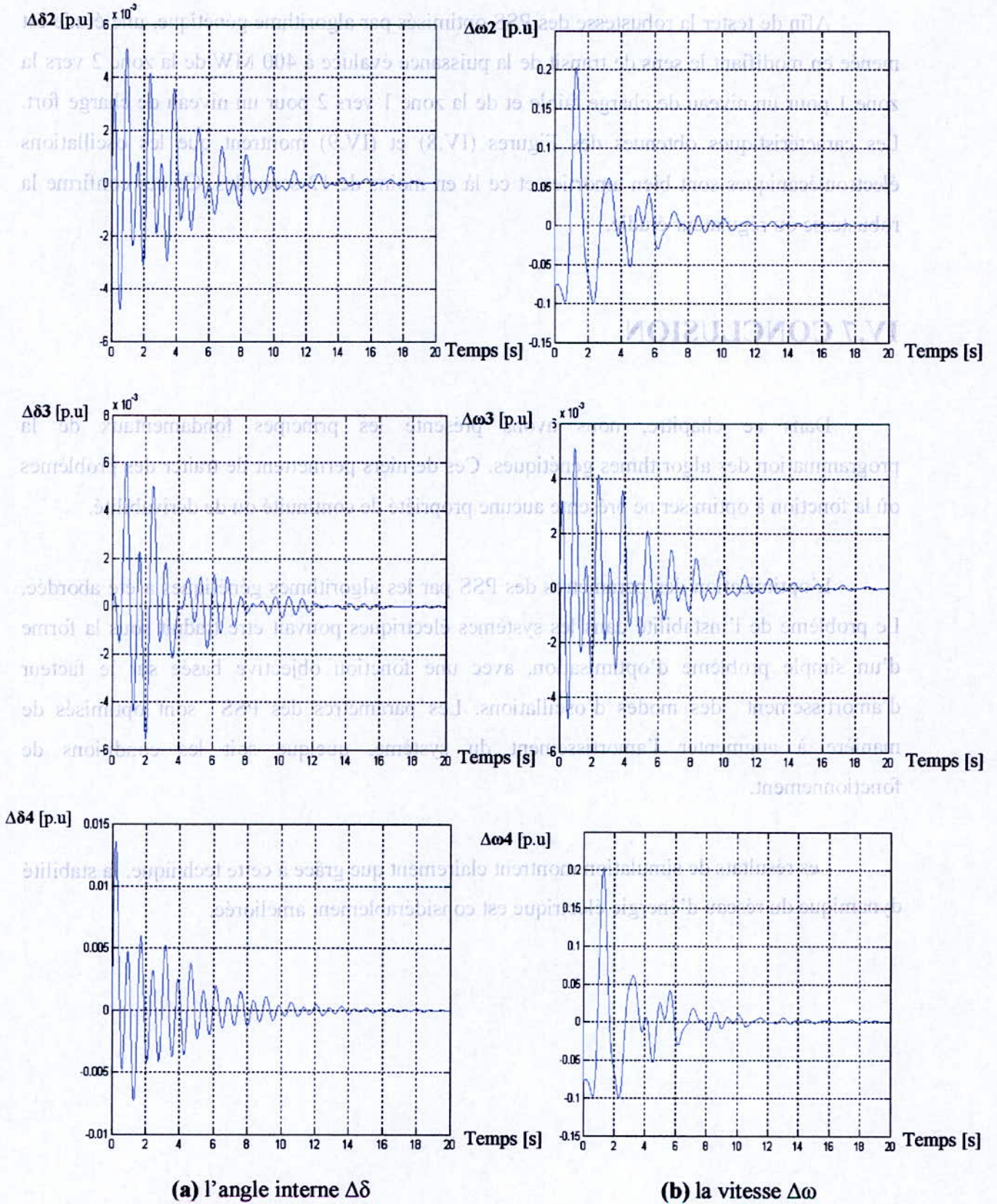


Figure IV.9 Réponses temporelles : (a) l'angle interne $\Delta\delta$ et (b) la vitesse $\Delta\omega$, des générateurs, avec transit de puissance de la région 1 vers 2 avec niveau de charge fort.

Afin de tester la robustesse des PSS optimisés par algorithme génétique, une étude est menée en modifiant le sens de transit de la puissance évaluée à 400 MW de la zone 2 vers la zone 1 pour un niveau de charge faible et de la zone 1 vers 2 pour un niveau de charge fort. Les caractéristiques obtenues des Figures (IV.8) et (IV.9) montrent que les oscillations électromécaniques sont bien amorties et ce là en moins de 12 secondes. Ce qui confirme la robustesse du régulateur étudié.

IV.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes fondamentaux de la programmation des algorithmes génétiques. Ces derniers permettent de traiter des problèmes où la fonction à optimiser ne présente aucune propriété de continuité ou de dérivabilité.

L'optimisation des paramètres des PSS par les algorithmes génétiques a été abordée. Le problème de l'instabilité dans les systèmes électriques pouvait être traduit sous la forme d'un simple problème d'optimisation, avec une fonction objective basée sur le facteur d'amortissement des modes d'oscillations. Les paramètres des PSS sont optimisés de manière à augmenter l'amortissement du système, quelque soit les conditions de fonctionnement.

Les résultats de simulation montrent clairement que grâce à cette technique, la stabilité dynamique du réseau d'énergie électrique est considérablement améliorée.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'analyse et l'amélioration de la stabilité dynamique des réseaux électriques. Notre travail s'est porté sur l'implantation des stabilisateurs de puissance (PSS) et l'application des algorithmes génétiques dans la synthèse et l'optimisation des paramètres (gains et constantes de temps). Le rôle de ces stabilisateurs est d'apporter l'amortissement nécessaire aux oscillations électromécaniques des générateurs, lorsque le système électrique est sujet à de petites perturbations autour de son point de fonctionnement.

Nous avons donc exploiter les avantages des algorithmes génétiques, qui représentent un outil à la fois simple, puissant et efficace dans la résolution des problèmes d'optimisation.

Il fallait, comme dans toute étude de systèmes dynamiques réels, procéder à la modélisation des systèmes électriques en vu d'étudier la stabilité dynamique. Pour cela, nous avons présenté la modélisation du réseau d'une manière un peu détaillée afin de pouvoir l'utiliser pour valider la méthode proposée en ayant pour objectif l'amélioration de la stabilité du système.

Dans l'étape suivante, nous avons effectué une linéarisation des équations du système autour d'un point de fonctionnement afin d'obtenir la représentation d'état du système. Puis l'analyse de la stabilité basée sur la méthode des valeurs propres

L'utilisation par la suite des stabilisateurs PSS s'est avérée intéressante car déjà leur action sans optimisation de leurs paramètres était efficace, les résultats étaient satisfaisants vu que sans PSS le système était instable. Donc l'introduction du PSS a rendu le système stable mais il oscillations pouvaient être encore plus amortis.

La dernière étape portait sur la synthèse des paramètres des PSS en utilisant les algorithmes génétiques. La simulation a été appliquée sur le système à 2 régions et 4 machines, pour traiter le problème d'oscillations interrégionales entre deux groupes de

générateurs. Ce type de problème diminue les performances des systèmes électriques en limitant le transfert de puissance d'une région à une autre. Pour ce système, nous avons considéré le transit de puissance de la région 1 vers la région 2 et l'installation d'un PSS dans chaque région. Les résultats montrent que, le système avec PSS présente de bonnes performances dynamiques, avec un meilleur amortissement observé dans le cas d'optimisation des paramètres du PSS par les algorithmes génétiques. L'algorithmes proposé, du fait de l'efficacité et la simplicité des algorithmes génétiques, permet donc de considérer différents points de fonctionnement ou topologies afin d'assurer, à tout instant, une parfaite stabilité de l'ensemble du système.

La robustesse des PSS optimisés a été testée en considérant la même topologie mais avec un transit de puissance dans le sens inverse. Nous avons obtenu les mêmes performances dynamiques que précédemment.

Enfin, cette étude nous a permis de concevoir une procédure d'optimisation des paramètres des PSS, basée sur les algorithmes génétiques. Nous avons pu atteindre les objectifs tracés en obtenant des PSS performants et robustes, nous proposons comme suite de ce travail :

- Appliquer d'autres méthodes intelligentes et de comparer les résultats.
- Tester ces méthodes dans le cas d'autres réseaux électriques plus complexes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **P. Kundur**, "*Power System Stability and Control*", McGraw-Hill Press 1994.
- [2] **A. Soos**, "*An Optimal Adaptive Power System Stabilizer*", PHD. Thesis, University Of Calgary, October 1997.
- [3] **K. Nara**, "*State of the art of the modern Heuristic Application to Power Systems*", IEEE. PES Winter Meeting January 2000, Vol 2, pp 1279-1283.
- [4] **B. Mayer, M. Jerosilimski et M. Stubbe**, "*Outil de Simulation Dynamique des réseaux Electriques*", Techniques de l'Ingénieur, D4-120, Traité Génie Electrique, 1980.
- [5] **P. Kundur, M. Klein, G.J Rogers et M.S. Zywno**, "*Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability*", IEEE. Transactions on Power Systems, Vol 4, No 2, May 1989.
- [6] **M. A Tolba**, "*Commande des systèmes d'énergie de puissance par des approches heuristiques modernes*", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2004.
- [7] **H. Benkaci**, "*Evaluation de la stabilité statique en temps réel*", thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 1998.
- [8] **P. M. Anderson, and A. A. Fouad**, "*Power System Control and Stability*", The IOWA state university Press, 3^{ème} edition, 1982.
- [9] **P. Zhang et A.H Coonick**, "*Coordinated Synthesis of PSS Parameters in Multi-Machine Power Systems Using the Method of Inequalities Applied to Genetic Algorithms*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No 2, May 2000, pp 811-816.
- [10] **M. Boudour**, "*Evaluation de stabilité dynamique par les couples synchronisants et amortisseurs*", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 1994.

- [11] **Y.N. Yu**, *Electric power system dynamics*, New York academic Press, 1983.
- [12] **J. P. Barret, P. Bornard, B. Meyer**, *Simulation des réseaux électriques*, Edition Eyrolles, 1997.
- [13] **M. E. Aboul-Ela**, “*Two-Level Control Strategy for Damping Power System Oscillations*”, PHD. Thesis, Suez Canal University, May 1994.
- [14] **J.H Chow, J.J Sanchez-Gasca, H. Ren et S.Wang**, , “*Power System Damping Controller design Using Multiple input Signals*”, *IEE Control systems Magazine*, August 2000, pp. 82-90.
- [15] **E.v Larsen et D.A Swann**, “*Applying Power System Stabilizers*”, Part I, II and III”, IEE transactions. “Power Apparatus and systems”, Vol PAS-100, No 6, June 1981, pp. 3017-3046.
- [16] **A.L.B do Bomfim, G.N taranto et D.M Falcao**, “*Simultaneous Tuning of Power System Damping Controllers using Genetic Algorithms*”, IEEE transactions on power systems, Vol 15, No 1, February 2000, pp. 163-169.
- [17] **P. Kundur, M. Klein, G.J. Rogers et M.S. Zywno**, “*Application of Power System Stabilisers for Enhancement of Overall System Stability*”, IEEE transactions on power systems, Vol 4, No 2, May 1989.
- [18] **I.A. Hiskens**, “*Systematic Tuning of Nonlinear power System Controllers*”, IEEE International Conference on Control Applications, Glasgow, Scotland, UK, September 2002.
- [19] **P. Borne, J. Rozinoer, J.Y Dielot et L. Dubous**, “*Introduction a la logique floue*”, édition Technip, paris 1998.
- [20] **H. Buhler**, “*Réglage par la logique floue*”, presses polytechnique et universitaires romandes”, lausannes, suisse 1994.
- [21] **Y.A. Yeddou**, «*Etude de synthèse sur les réseaux de neurones et leur Application*», thèse de Magistère en automatique, ENP, Juin 1998.
- [22] **C.Touzet**, *les réseaux de neurones artificielle, introduction au connexionnisme*, Juillet 1992. <http://saturn.epm.ornl.gov/~touzetc/Book/Bouquin.htm>.
- [23] **T. Blickle et N. Thiele**, “*A comparaison of selection schemes used in Genetic Algorithms*”, TIK-Report Nr. 11 (Version 2), December 1995, Switzerland.

- [24] **G. Anderson**, “*Dynamic and Control of Electric Power Systems*”, Advanced Course, Electric Power Systems, KTH, Zurich, Mars 2000.
- [25] **R.J. Fleming and J. Sun**, “*An Optimal Multivariable Stabilizer For a Multi-Machine Plant*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, No. 1, Mars 1990.
- [26] **G. Anderson**, “*Power System Dynamic and stability*”, An Introduction, Basic Course, Electric Power Systems, KTH, Zurich, Mars 1999.
- [27] **G. Anderson**, “*Dynamic and Control of Electric Power Systems*”, Lectures, pp. 35-528, Power Systems Laboratory, ETH, Zurich, Mars 2003.
- [28] **F. Milano**, PSAT : *Power System Analysis Toolbox, Documentation for PSAT version 1.3.0*, Mai 2004. <http://www.power.uwaterloo.ca/~fmilano/#Section2|region>.
- [29] **P. Wetzer**, *Machines Synchrones : Excitation*, Techniques de l'Ingénieur, D3-545, Traité genie Electrique, 1997.
- [30] **P. Bornard et M. Pavard**, *Réseaux d'Interconnexion et de Transport : Réglage et fonctionnement*, Techniques de l'Ingénieur, D4-090, Traité génie Electrique, 1993.
- [31] **V. Singhvi**, “*Small Signal Stability of an Unregulated Power System*”, Master's Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Mississippi, December 2002.
- [32] **A. F. Snyder**, “*Inter-Area Oscillation Damping with Power System Stabilizers and Synchronized Phasor Measurements*”, Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [33] **L. Rouco**, “*Eigenvalue-based Methods for Analysis and Control of Power Systeme Oscillations*”, IEE Colloquium on Power Dynamics Stabilization, University of Warwick, Coventry, England, February 1998.
- [34] **A. Hasanovic**, “*A simulation and Analysis Toolbox for power Systems and Genetic Algorithm Based Damping Controller Design*”, Master's thesis, College of Engineering and Mineral Ressources at west Virginia University, Morgantown, West Virginia. 2001.

- [35] **J.H. Holland**, "*Adaptation in Natural and Artificial System*", University of Michching press, 1975.
- [36] **D.E. Goldeberg**, "*Genetic Algorithms in search, Optimization and Machine learing*", Addison-Wesley, 1989.
- [37] **A. Chipperfield, P. Fleming, H. Polhlheim et C Fonseca**, "*Genetic Algorithm Toolbox User's Guide*", Version 1.2, Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield.
- [38] **C. Darwin**, "*On the Origin Species by of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favored Races in the Struggle for Life*".1859. Disponible sur <http://www.literature.org/authors/darwin-charles/the-origin-of-species/>
- [39] **T. Blicke and L. Thiele**, "*A Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithms*", TIK-Report Nr. 11 (Version 2), December 1995, Switzzeland.
- [40] **C.A. Coello**, "*An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multiobjective Optimization in Engineering Design*", PHD. Dissertation, Department of Computer Science, Tulane University, 1996.
- [41] **A. Hasanovic and A. Felialchi**, "*Genetic Algorithm Based Inter-Area Oscillation Damping Controller Design MATLAB*", Proc. IEEE Power Eng. Society 2002 Summer Meeting, Chicago, IL, July.

DONNEES DU SYSTEME 2 REGIONS 4 MACHINES

% FICHER DE DONNEES

% format de la matrice des nœuds

% col1 : numéro du noeud

% col2 : amplitude de la tension (pu)

% col3 : angle de la tension (degré)

% col4 : puissance active générée Pg (pu)

% col5 : puissance réactive générée Qg(pu)

% col6 : puissance active de charge P1 (pu)

% col7 : puissance réactive de charge Q1 (pu)

% col8 : conductance du shunt additionnel Gshunt (pu)

% col9 : susceptance du shunt additionnel Bshunt (pu)

% col10 : type des nœuds

-1, nœud de référence

-2, nœud générateur (PV bus)

-3, nœud charge (PQ bus)

% col11 : limite inférieure de la tension Vmin(pu)

% col12 : limite supérieure de la tension Vmax (pu)

% **Topologie 1** : Ecoulement de puissance de la région 1 vers la région 2

%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Bus=[
1	1.03	0.0	7.00	1.85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	0.9	1.1 ;
2	1.01	0.0	7.00	2.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2	0.9	1.1 ;
11	1.03	0.0	7.19	1.76	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2	0.9	1.1 ;
12	1.01	0.0	7.00	2.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2	0.9	1.1 ;
10	1.0103	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3	0.5	1.5 ;
20	0.9876	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3	0.5	1.5 ;
110	1.0125	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3	0.5	1.5 ;
120	0.9938	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3	0.5	1.5 ;
3	0.9781	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0 3	3	0.5	1.5 ;
101	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	3	0.5	1.5 ;
13	0.9899	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3	0.5	1.5 ;
4	0.9500	0.0	0.0	0.0	9.76	1.0	0.0	0.0	0.0	3	0.95	1.05 ;
14	0.9500	0.0	0.0	0.0	17.67	1.0	0.0	0.0	0.0	3	0.95	1.05];

% Topologie 2 : Ecoulement de puissance de la région 2 vers la région 1

%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Bus=[
1	1.03	0.0	7.00	1.85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	0.9	1.1;
2	1.01	0.0	7.00	2.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2	0.9	1.1;
11	1.03	0.0	7.19	1.76	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2	0.9	1.1;
12	1.01	0.0	7.00	2.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2	0.9	1.1;
10	1.0103	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3	0.5	1.5;
20	0.9876	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3	0.5	1.5;
110	1.0125	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3	0.5	1.5;
120	0.9938	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3	0.5	1.5;
3	0.9781	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3	0.5	1.5;
101	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	3	0.5	1.5;
13	0.9899	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3	0.5	1.5;
4	0.9500	0.0	0.0	0.0	17.67	1.0	0.0	0.0	0.0	3	0.95	1.05;
14	0.9500	0.0	0.0	0.0	9.76	1.0	0.0	0.0	0.0	3	0.95	1.05];

% Format de la matrice des lignes de transmission

% col1 : numéro du noeud de depart

% col2: numéro du noeud d'arrivé

% col3 : résistance de la ligne R (pu)

% col4 : reactance de la ligne X (pu)

% col5 : susceptance de la ligne B (pu)

% col6 : rapport de transformation (tap ration)

% col7 : pas du rapport de transformation

% Une ligne entre le noeud 6 et le noeud 11

%	1	2	3	4	5	6	7
linedata=[
1	10	0.0	0.0167	0.0	1.0	0.0;	
2	20	0.0	0.0167	0.0	1.0	0.0;	
11	110	0.0	0.0167	0.0	1.0	0.0;	
12	120	0.0	0.0167	0.0	1.0	0.0;	
3	4	0.0	0.005	0.0	1.0	0.0;	
13	14	0.0	0.005	0.0	1.0	0.0;	
10	20	0.0	0.025	0.0437	1.0	0.0;	
20	3	0.0	0.010	0.0175	1.0	0.0;	
3	101	0.0	0.110	0.1925	1.0	0.0;	
101	13	0.0	0.110	0.1925	1.0	0.0;	
101	13	0.0	0.110	0.1925	1.0	0.0;	
13	120	0.0	0.010	0.0175	1.0	0.0;	
120	110	0.0	0.025	0.0437	1.0	0.0];	

% Format de la matrice des générateurs

% col1 : numéro du noeud

% col2 : résistance d'armature Ra (pu)

% col3 : réactance synchrone d'axe direct Xd (pu)

% col4 : réactance transitoire d'axe direct X'd (pu)

% col5 : constante de temps transitoire d'axe direct T'do (s)

% col6 : réactance synchrone d'axe en quadrature Xq (pu)

% col7 : constante d'inertie H(s)

% col8 : coefficient d'amortissement D (pu)

% col9 : gain de l'AVR Ka

% col10 : constante de temps de l'AVR Ta (s)

% col11 : limite inférieure de la sortie de l'AVR Efdmin (pu)

% col12 : limite supérieure de la sortie de l'AVR Efdmax (pu)

% col13 : fréquence f(Hz)

% col14 : puissance apparente de base du générateur (MVA)

mac_con=[

1	0.0	1.8	0.3	8.0	1.7	6.5	0.0	200	0	-10	10	60	900
2	0.0	1.8	0.3	8.0	1.7	6.5	0.0	200	0	-10	10	60	900
11	0.0	1.8	0.3	8.0	1.7	6.5	0.0	200	0	-10	10	60	900
12	0.0	1.8	0.3	8.0	1.7	6.5	0.0	200	0	-10	10	60	900

% Format de la matrice des régulateurs de vitesse

% col1 : numéro du noeud

% col2 : vitesse de référence wref (pu)

% col3 : gain k (pu)

% col4 : limite inférieure du couple mécanique Tmin (pu)

% col5 : limite supérieure du couple mécanique Tmax (pu)

% col6 : constante de temps du régulateur Ts (s)

% col7 : constante de temps du servomécanisme Tc (s)

% col8 : constante de temps T3 (s)

% col9 : constante de temps T4 (s)

% col10 : constante de temps T5 (s)

%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
exc_con=[	1	1	25.0	0	1.0	0.1	0.5	0	1.25	5.0;
	2	1	25.0	0	1.0	0.1	0.5	0	1.25	5.0;
	11	1	25.0	0	1.0	0.1	0.5	0	1.25	5.0;
	12	1	25.0	0	1.0	0.1	0.5	0	1.25	5.0];

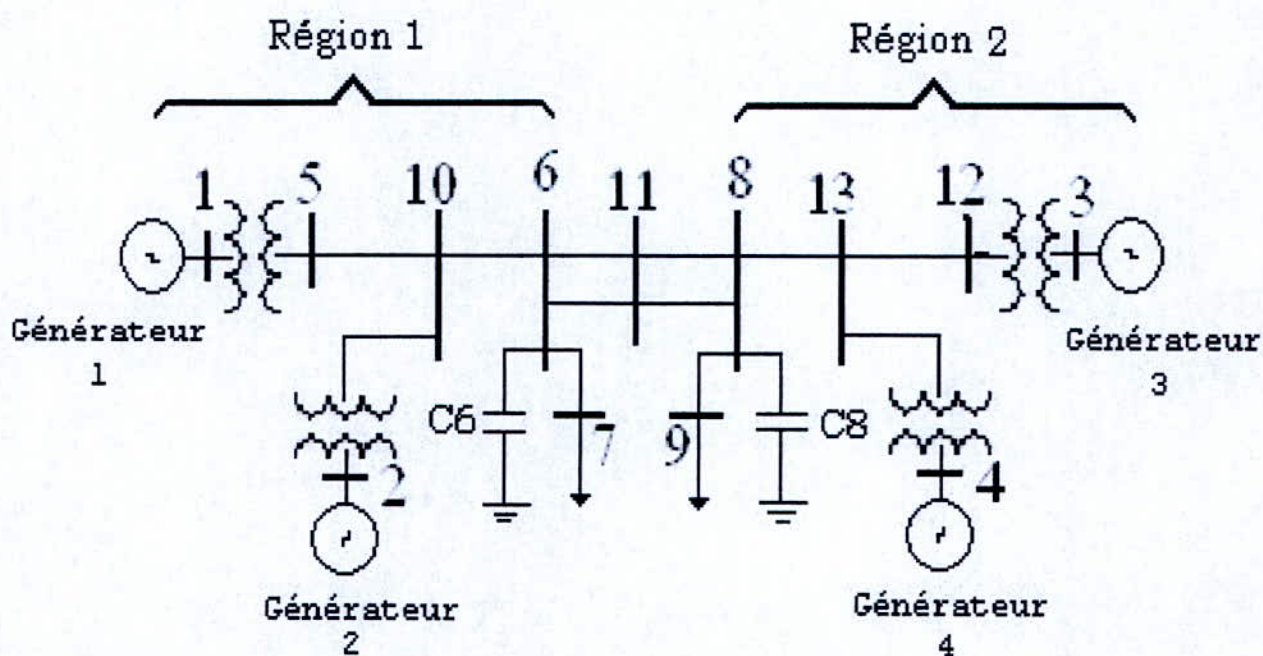


Figure A.1 Schéma unifilaire du réseau 2 Régions 4 machines.