

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**



# Mémoire de Magister

Présenté au Laboratoire de Recherche en Electrotechnique  
en vue de l'obtention du titre de

**Magister**

En

Réseaux Electriques et Haute Tension

Par

**Lamia KARTOBI**

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique à l'USTHB

**Thème**

## **Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essais Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques**

Soutenue publiquement le **04 Décembre 2006** devant le jury composé de:

A. Boubakeur	Professeur à l'E.N.P	Président
M. Boudour	Maître de conférences à l'U.S.T.H.B.	Rapporteur
A. Mekhaldi	Professeur à l'E.N.P	Rapporteur
M. Teguar	Maître de conférences à l'E.N.P	Examineur
L. Nezli	Maître de conférences à l'E.N.P	Examineur
M. Amorouayache	Docteur à Sonelgaz	Examineur
M. Ghezaili	Docteur à Sonelgaz	Invité.

**Résumé :**

Ce mémoire présente l'utilisation des algorithmes génétiques (AG) ainsi que l'essaim de particules (OEP) pour la synthèse des paramètres des Compensateurs statiques d'énergie réactive (SVC) dans les systèmes électriques multi machines. L'ajout du SVC, comme auxiliaire du système d'excitation du générateur permettra d'amortir les oscillations électromécaniques et améliore la stabilité en petit mouvement de l'ensemble du système électrique. Pour cela, une analyse de la stabilité en petit mouvement basée sur les valeurs propres est effectuée. Cette analyse suppose un modèle linéarisé du système autour d'un point de fonctionnement. Les algorithmes génétiques et l'OEP 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 optimaux des dispositifs SVCs.

**Mots-clés :** Algorithmes Génétiques, Optimisation par Essaim de Particules, Systèmes Electriques, Stabilité en Petit Mouvement, SVC, Valeurs Propres.

**Abstract :**

This thesis presents the use of genetic algorithms (GA) and Particle Swarm optimization (PSO) for the synthesis of Static Var Compensator (SVC) parameters in multi-machine power systems. Adding a SVC as a supplementary excitation control, allow us to damp electromechanical oscillations and enhance the overall system small signal stability. Thus, the SVCs parameters are optimized to ensure a satisfactory damping. For this purpose; an eigenvalue-based small signal stability analysis is performed. This analysis assumes a linearized model of the power system around on operating point. Genetic algorithms and particle swarm optimization consist in search techniques based on the mechanics of natural selection, genetic and evolution and they are applied in this study to determine the optimized SVCs parameters.

**Keywords:** Genetic Algorithms, Particle Swarm Optimization, Power Systems, Small Signal Stability, SVC, Eigenvalues.

*Je dédie ce mémoire à mes parents et mes  
Sœurs que j'aime beaucoup Rosa, Ghania et Sabiha ainsi  
qu'à tous mes amis.*

*Lamia*

## **Remerciements**

*Mes remerciements les plus vifs et chaleureux, vont à mon directeur de mémoire monsieur Mohamed Boudour, maître de conférence à l'USTHB pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la confiance, la patience et la compréhension qu'il m'a toujours manifesté ...*

*Je tiens également à remercier monsieur Abdelouaheb Mekhaldi, professeur à l'ENP pour avoir accepté de co-diriger ce mémoire, pour son appui et sa disponibilité.*

*Je remercie monsieur Ahmed Boubakeur, professeur à l'ENP, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

*J'adresse mes remerciements aux membres du Jury qui ont accepté d'examiner ce mémoire en lui apportant de l'intérêt, monsieur M. Tegar maître de conférences à l'ENP, L. Nezli maître de conférences à l'ENP, M. Amorouayache docteur à Sonelgaz et M. Ghezaili docteur à Sonelgaz.*

*Je veux aussi exprimer ma vive reconnaissance envers tous les enseignants du Laboratoire de Recherche en Electrotechnique de l'ENP.*

*J'aimerais remercier du fond du cœur mes parents et mes sœurs pour leurs présence et disponibilité et pour l'appui inconditionnel qu'ils m'ont toujours apporté...*

## Liste des Figures

	<b>Page</b>
<b>II. 1</b> <i>Diagramme schématique des applications des FACTS dans les réseaux</i> .....	23
<b>II. 2.</b> <i>Schéma type du SVC en connexion shunt</i> .....	25
<b>II. 3</b> <i>Organigramme d'un algorithme génétique simple</i> .....	26
<b>II. 5 (a)</b> <i>Croisement multipoints ( <math>p = 2</math> ) (b) Croisement uniforme</i> .....	30
<b>II. 6</b> <i>Mutation dans le cas d'un codage binaire</i> .....	30
<b>II. 7</b> <i>Concept de modification d'un point de recherche par l'OEP</i> .....	34
<b>II. 8</b> <i>Concept de recherche avec des agents dans l'espace de solution de l'OEP</i> .....	34
<b>II. 9</b> <i>Organigramme général dm l'OEP</i> .....	35
<b>III. 1</b> <i>Diagramme de phase pour la <math>i^{\text{ème}}</math> machine</i> .....	39
<b>III. 2</b> <i>Schéma fonctionnel de la <math>i^{\text{ème}}</math> machine du réseau multimachine</i> .....	40
<b>III. 3</b> <i>Modèle du système avec SVC</i> .....	47
<b>III. 4</b> <i>Modèle du SVC</i> .....	48
<b>III. 5</b> <i>Modèle de la machine avec les nouveaux paramètres de contrôle</i> .....	51
<b>IV. 1</b> <i>Diagramme unifilaire du réseau 2 Régions-4 machines</i> .....	55
<b>IV. 2</b> <i>Réponses temporelles de la vitesse des générateurs avec et sans SVC</i> .....	58
<b>IV. 3</b> <i>Tracé des valeurs propres sans SVC</i> .....	62
<b>IV. 4</b> <i>Tracé des valeurs propres avec SVCs non optimisés</i> .....	62
<b>IV. 5</b> <i>Tracé des valeurs propres avec SVCs optimisés par AG</i> .....	63
<b>IV. 6</b> <i>Déviations de la vitesse des générateurs pour une forte charge avec SVC non optimisé et optimisé par AG</i> .....	64
<b>IV. 7</b> <i>Déviations de la vitesse des générateurs pour une faible charge avec SVC optimisé par AG et SVC non optimisé</i> .....	65
<b>IV. 8</b> <i>Déviations de la vitesse des générateurs pour un changement de topologie (suppression de ligne 6-11) avec SVC optimisé par AG et SVC non optimisé</i> .....	66
<b>V. 1</b> <i>Tracé des valeurs propres sur le plan complexe sans SVC</i> .....	70
<b>V. 2</b> <i>Tracé des valeurs propres sur le plan complexe pour une forte charge</i> .....	72
<b>V. 3</b> <i>Tracé des valeurs propres sur le plan complexe pour une faible charge</i> .....	72
<b>V. 4</b> <i>Tracé des valeurs propres sur le plan complexe pour un changement de topologie</i> .....	73
<b>V. 5</b> <i>Déviations de la vitesse des générateurs pour une forte charge avec SVC non optimisé et optimisé par AG et OEP</i> .....	74

<b>V. 6</b> <i>Déviation de la vitesse des générateurs pour une faible charge avec SVC non optimisé et optimisé par AG et OEP</i> .....	75
<b>V. 7</b> <i>Déviation de la vitesse des générateurs pour un changement de topologie (suppression de ligne 6 -11) avec SVC non optimisé et optimisé par AG et OEP</i> .....	76
<b>B. 1</b> <i>Schéma du SVC et TCBR</i> .....	90
<b>B. 2</b> <i>Schéma de base du STATCOM</i> .....	90
<b>B. 3</b> <i>Structure du TCSC (a) et TSSC (b)</i> .....	91
<b>B. 4</b> <i>Structure du TCSR</i> .....	91
<b>B. 5</b> <i>Schéma de base du SSSC</i> .....	91
<b>B. 6</b> <i>Schéma du TCPAR</i> .....	91
<b>B. 7</b> <i>Schéma de base de l'IPFC</i> .....	92
<b>B. 8</b> <i>Schéma de base de l'UPFC</i> .....	93

# Liste des Tableaux

	<b>Page</b>
<b>II.1</b> <i>Application des FACTS a la résolution des problèmes dans le réseau.....</i>	23
<b>IV.1</b> <i>Modes dominants du système sans SVC.....</i>	56
<b>IV.2</b> <i>Contribution des générateurs dans les modes électromécaniques.....</i>	57
<b>IV.3</b> <i>Paramètres des SVC non optimisés.....</i>	57
<b>IV.4</b> <i>Paramètres d'optimisation.....</i>	60
<b>IV.5</b> <i>Paramètres des SVC obtenus après optimisation.....</i>	61
<b>V.1</b> <i>Paramètres des SVCs obtenus après optimisation.....</i>	69
<b>V.2</b> <i>Paramètres des SVCs obtenus par AG et OEP.....</i>	71

# SOMMAIRE

◆ Résumé.....	1
◆ Dédicaces.....	2
◆ Remerciements.....	3
◆ Liste des Figures.....	4
◆ Liste des Tableaux.....	6
◆ Sommaire.....	7
Introduction générale.....	10
 <i><b>CHAPITRE I : Etat de l'Art des techniques d'amélioration de la stabilité.</b></i>	
I.1 Introduction.....	13
I.2 Stabilité des réseaux.....	13
I. 2. 1 Types de stabilité.....	14
I. 2. 1. 1 Stabilité statique.....	14
I. 2. 1. 2 Stabilité dynamique.....	14
I. 2. 1. 3 Stabilité transitoire .....	14
I. 3 Amélioration de la stabilité .....	15
I. 3. 1 Amélioration de la stabilité par les PSS .....	15
I. 3. 2 Amélioration de la stabilité par les FACTS .....	15
I. 3. 2. 1 Compensateurs parallèles.....	16
I. 3. 2. 1. 1 Compensateurs parallèles à base de thyristors.....	16
I. 3. 2. 1. 2 Compensateurs parallèles à base de thyristors GTO.....	16
I. 3. 2. 2 Compensateurs séries.....	17
I. 3. 2. 2. 1 Compensateurs séries à base de thyristor.....	17
I. 3. 2. 2. 2 Compensateurs séries à base de thyristors GTO.....	18
I. 3. 2. 3 Compensateurs hybrides série – parallèle.....	18
I. 3. 2. 3. 1 Compensateurs hybrides à base de thyristors.....	18
I. 3. 2. 3. 2 Compensateurs hybrides à base de thyristors GTO.....	18
I. 3. 3 Techniques de Commande intelligente .....	19
I. 3. 3. 1 Algorithmes Génétiques .....	19
I. 3. 3. 2 Optimisation par essaims de particules.....	20

I. 4 Conclusion .....	21
-----------------------	----

## **CHAPITRE II                    FACTS et méthodes évolutionnaires**

II.1 Introduction.....	22
II. 2. Application des FACTS.....	22
II. 3 Compensateur statique d'énergie réactive (SVC) .....	24
II. 4 Algorithmes génétiques.....	25
II.4.1 Description des Algorithmes Génétiques.....	26
II.4.1. 1 Codage initiale.....	26
II.4.1. 2 Evaluation .....	27
II.4.1. 3 Sélection .....	28
II.4.1. 4 Recombinais.....	29
II.4.1. 5 Critère d'arrêt .....	30
II. 4.1. 6 Réglage des paramètres d'un AG.....	31
II. 4. 2 Optimisation par essaim de particules.....	31
II. 4. 2.1 Concept de base de l'OEP.....	32
II. 4. 2. 2 Algorithme général de l'OEP.....	35
II. 5 Conclusion.....	37

## **CHAPITRE III    MODELISATION DU RESEAU ELECTRIQUE EN REGIME DYNAMIQUE**

III.1 Introduction .....	38
III.2 MODELISATION DU RESEAU MULTIMACHINE.....	38
III.2.1 Diagramme de Phase .....	38
III.2.2 Composantes des Courants.....	39
III.2.3 Equation de Puissance.....	42
III.2.4 Equation des Tensions Internes.....	43
III.2.5 Equation des Tensions Terminales.....	43
III.2.6 Représentation d'état.....	44
III.3 ANALYSE DE STABILITE .....	45
III.3.1 Valeurs propres .....	45
III.4. Modélisation du système avec incorporation des SVC .....	47
III.4.1 Description du Système.....	47

III.4.1.1	Modèle du Système .....	47
III.2.2.2	Compensateur Statique .....	48
III.4.2.3	Méthode Proposé.....	49
III.5	INCORPORATION DES FACTS.....	52
III.5.1	Vecteur Propre.....	52
III.5.2	Facteurs de Contribution .....	53
III.6	Conclusion.....	54
<b>CHAPITRE IV</b>	<b>Optimisation des SVCs par les AG</b>	
IV. 1.	Introduction .....	55
IV. 2	Réseau d'application .....	55
IV. 3	Implantation des SVCs .....	56
IV. 3. 1	Emplacement optimum des SVCs.....	56
IV.4	APPLICATION DES AG <sub>s</sub> .....	57
IV. 4. 1	Formulation de la fonction objective.....	59
IV. 4. 2	Résultats d'optimisation .....	60
IV.5	CONCLUSION.....	67
<b>CHAPITRE V</b>	<b>Optimisation des SVCs par l'OEP</b>	
V. 1.	Introduction .....	68
V. 2	Formulation de la fonction objective.....	68
V. 3	Choix des paramètres de l'OEP.....	68
V. 4	Test de robustesse de l'OEP.....	70
V. 5	Conclusion.....	77
	Conclusion générale .....	78
	Bibliographie .....	80
Annexe A	Données du système étudié .....	87
Annexe B	Schémas représentatifs des FACTS.....	90

# Introduction Générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissance indésirables entre zones interconnectées, subissent des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes. Les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateur à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes. Il faudra donc compléter leur action en mettant en oeuvre des dispositifs électroniques de puissance ayant des temps de réponse courts, connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) pour le contrôle des réseaux [Hin 00]. Le développement des dispositifs FACTS a ouvert de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux régulées, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes. Le maintien de l'équilibre entre la production et la consommation nécessite alors une surveillance permanente du système afin d'assurer la qualité du service (problème de conduite), garantir sa sécurité (problème de protection) et sa stabilité (problème de réglage).

La stabilité fut reconnue comme élément important du bon fonctionnement d'un système électrique à partir des années vingt (1920) [Kun 90]. Depuis, les chercheurs ont eu recours à des approches dites traditionnelles ou classiques liées à la théorie de la commande, pour régler les problèmes de stabilité. À partir des années soixante (1960) sont apparues des

approches dites intelligentes afin de régler ces problèmes devenus très complexes et difficiles à résoudre. Ce n'est qu'au début des années quatre vingt dix (1990) que ces méthodes, encouragées par le développement des calculateurs et micro-ordinateurs, ont vu réellement leur applications prendre de l'ampleur. Ces approches simulent des phénomènes physiques, tel le comportement humain ou l'évolution des être vivants et sont appelées méthodes heuristiques modernes [Nar 00]. Parmi ces méthodes, nous citons à titre d'exemple la Recherche Tabou, le Recuit Simulé, les Algorithmes Génétiques et finalement l'Algorithme à Essaim de Particules.

L'association des dispositifs FACTS avec les techniques heuristiques permettra d'améliorer la stabilité sans pour autant affecter la sécurité et la fiabilité du système de puissance. Les études de stabilité dynamique concernent les petites perturbations tel qu'un changement dans la structure du réseau, dans les conditions d'exploitation, dans les systèmes d'excitation ou au niveau des charges. Ces oscillations peuvent causer une instabilité affectant aussi bien un alternateur, une partie ou tout le réseau.

Ce travail s'articule autour de l'amélioration de la stabilité dynamique d'un réseau d'énergie électrique constitué de deux zones interconnectées, en utilisant le plus populaire des dispositifs FACTS, le SVC ( Static Var Compensator) à raison d'un dispositif placé par zone. L'optimisation des paramètres des SVCs est effectuée dans un premier temps par le biais des Algorithmes Génétiques puis par la méthode des Particules en Essaim.

Un rappel sur la stabilité des réseaux électriques est abordé au premier chapitre. Les différentes méthodes d'amélioration de la stabilité sont présentées ainsi que les différentes structures des FACTS (parallèle, série et hybride). Un aperçu sur l'optimisation par les Algorithmes Génétiques et l'Essaim de Particules est donné en fin de chapitre.

Dans le deuxième chapitre, nous traitons de l'application des FACTS, en particulier le SVC, et leurs principes de fonctionnement. Nous présentons d'une manière détaillée les techniques d'optimisation basées sur les Algorithmes Génétiques et les Particules en Essaim.

Afin d'étudier le comportement du réseau global en régime dynamique, le chapitre III présente un modèle de connaissance du réseau électrique avec les dispositifs SVC [Ele 96].

En se basant sur les travaux effectués par [Ele 96] et [Has 02], nous présentons dans le chapitre IV les résultats de l'application de l'AG à l'optimisation des paramètres des SVCs installés dans le système d'étude.

Le chapitre V contiendra les résultats de l'application de l'OEP à la détermination des paramètres optimaux des SVCs ainsi qu'une étude comparative des résultats obtenus par les deux méthodes d'optimisation.

Enfin, nous terminons cette rédaction par une conclusion et des perspectives à même de compléter ce travail.

# CHAPITRE I

## *ETAT DE L'ART SUR LES TECHNIQUES D'AMELIORATION DE LA STABILITE*

### **I.1 Introduction**

L'énergie électrique étant très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence équilibre entre la production et la consommation. Les générateurs, les récepteurs et les réseaux électriques qui les relient ont des inerties mécaniques et/ou électriques qui rendent difficile le maintien d'un équilibre garantissant une fréquence et une tension relativement constantes.

Face à une variation de puissance, le système électrique doit normalement retrouver un état stable. Dans certains cas, le régime oscillatoire peut diverger. Des études sont nécessaires pour pouvoir éviter ce phénomène et garantir la stabilité du réseau électrique. Elles le sont particulièrement dans le cas des réseaux industriels qui comportent un ou plusieurs groupes générateurs ainsi que des moteurs.

Nous allons présenté dans ce chapitre, des notions sur la stabilité des réseaux et ses différents types ainsi que la technique d'amélioration de la stabilité par les PSS (Power System Stabilizers) et par FACTS, en particulier le SVC qui fera l'objet de notre étude. Les techniques de commande intelligente telles que l'AG (Algorithme Génétique) et l'OEP (Optimisation par Essaims de Particules) seront également présentées dans cette partie

### **I. 2 Stabilité des réseaux**

La stabilité est définie comme la propriété d'un système à retrouver son point de fonctionnement (ou point d'équilibre) après avoir subi une ou plusieurs perturbations.

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.

## **I. 2. 1 Types de stabilité**

Il existe trois types de stabilité : statique, dynamique et transitoire.

### **I. 2. 1. 1 Stabilité statique**

En général, à la fin d'un régime transitoire provoqué par une perturbation, le système atteint son régime permanent. Dans ce cas, l'étude de la stabilité du système, porte sur l'évaluation de l'état statique du réseau. Le système n'est pas en état de stabilité statique si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées. Cet état est appelé : état instable ou état d'urgence. Dans un réseau qui est dans un état d'urgence, les opérateurs du centre de contrôle ont suffisamment de temps pour ramener le système à l'état stable ou au régime normal en apportant des modifications supplémentaires.

Si certaines contraintes d'exploitation ne sont pas respectées, l'une des parties du réseau se sépare du système, le reste continue son fonctionnement normal [SAD 98].

Une autre définition peut être donnée à la stabilité statique qui consiste à dire qu'un réseau d'énergie électrique est dit stable en régime statique si suite à une perturbation quelconque infiniment petite, il retrouve un état de marche synchrone, identique ou infiniment voisin de l'état d'origine [SAM 83].

### **I. 2. 1. 2 Stabilité dynamique**

Il arrive que de petites oscillations apparaissent sur les signaux, à cause d'un changement dans la structure du réseau, dans les conditions d'exploitation, dans les systèmes d'excitation ou au niveau des charges. Ces oscillations peuvent aboutir à déstabiliser un alternateur, une partie ou tout le réseau. Dans ce cas nous pouvons utiliser des modèles linéaires afin de simuler le réseau. Les principaux éléments tels que les machines synchrones, les excitatrices, les systèmes de régulation de vitesse, les PSS ou bien les FACTS dont les dynamiques ne sont pas négligeables, seront pris en compte dans ces modèles [SAM 83].

### **I. 2. 1. 3 Stabilité transitoire**

La stabilité transitoire d'un réseau de transport d'énergie électrique est son aptitude à retrouver une position d'équilibre stable après une perturbation brusque et de forte amplitude. Cette perturbation peut écarter notablement le réseau de sa position initiale. Le phénomène de stabilité transitoire concerne les grandes perturbations. Nous pouvons citer :

- Les courts-circuits affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines,
- La Perte d'ouvrages

- La Perte des groupes de production, ... etc.

Les conséquences de ses défauts peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement complet du réseau. La stabilité transitoire dépend :

- du type de perturbation
- de la durée de perturbation
- du lieu de perturbation
- de la performance des systèmes de protection (relais, réenclenchement)
- du point de fonctionnement avant défaut (niveau de puissance active, topologie du réseau et degré d'excitation des machines)
- des caractéristiques dynamiques (des générateurs, des charges et des régulateurs mis en place dans les stations ainsi que des stabilisateurs comme le PSS).

Ce qui importe dans une méthode d'analyse de la stabilité transitoire, c'est la rapidité et l'exactitude des réponses obtenues [Bar 84] [SAD 98].

### **I. 3 Amélioration de la stabilité**

#### **I. 3. 1 Amélioration de la stabilité par les PSS**

La structure du stabilisateur de puissance est une structure classique qui consiste en un gain, un filtre passe-haut et un ou plusieurs blocs de compensation de phase [Cho 00] [Lar 81]. Ces Stabilisateurs de puissance sont un moyen efficace et économique d'amélioration de la stabilité dynamique d'un système électrique [Zha 00].

Un choix adéquat des paramètres des PSS engendre un bon amortissement des oscillations induites par les perturbations et améliore la stabilité de l'ensemble du système.

#### **I. 3. 2 Amélioration de la stabilité par les FACTS**

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques [BEL00].

Les systèmes FACTS sont appliqués à l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques. A cet égard, les composants FACTS peuvent être classés en trois catégories : compensateurs parallèle, compensateurs série et compensateurs hybrides "série – parallèle" [HIN00].

### **I. 3. 2. 1 Compensateurs parallèle**

Vers la fin des années 60, plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leurs apparitions. Ces derniers avaient l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif.

En effet, tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances active et réactive qui transitent dans la ligne [Bel 00] [Son 99] [Hin 00].

Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont (Annexe B) :

#### **I. 3. 2. 1. 1 Compensateurs parallèle à base de thyristors**

Il s'agit de :

- TCR (Thyristor Controlled Reactor )

Dans le TCR (ou RCT : Réactances Commandées par Thyristors), la valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors [Hin 00].

- TSC (Thyristor Switched Capacitor)

Dans le TSC (ou CCT : Condensateurs Commandés par Thyristor), les thyristors fonctionnent en pleine conduction [Hin 00].

- SVC (Static Var Compensator)

L'association des dispositifs TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive) dont le premier exemple a été installé en 1979 en Afrique du Sud [Pas 98] [Ler 91].

- TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor)

Ce type de compensateur connecté en parallèle est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations [Pas 98].

#### **I. 3. 2. 1. 2 Compensateurs parallèle à base de thyristors GTO**

Il s'agit du STATCOM (STATic COMpensator) qui a connu jusqu'à présent différentes appellations:

- ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- STATCON (STATic CONDenser)

- SVG (Static Var Generator)
- SVClight
- SVCplus

Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70, mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte puissance [Bel 00].

Le STATCOM présente plusieurs avantages :

1. bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
2. bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.

Cependant, le STATCOM de base engendre de nombreux harmoniques. Il faut donc utiliser, pour résoudre ce problème, des compensateurs multi-niveaux à commande MLI ou encore installer des filtres [Pet 97].

### **I. 3. 2. 2 Compensateurs série**

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci (Annexe B).

#### **I. 3. 2. 2. 1 Compensateurs série à base de thyristor**

Parmi ces Compensateurs, on trouve :

- TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Le TCSC (Compensateur Série Contrôlé par Thyristors) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur [Pas 98].

- TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de  $90^\circ$  soit de  $180^\circ$ .

- TCSR(Thyristor Controlled Series Reactor)

TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable.

- TSSR( Thyristor Switched Series Reactor)

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de  $90^\circ$  soit de  $180^\circ$  [Pas 98].

### **I. 3. 2. 2 Compensateurs série à base de thyristors GTO**

- SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille.

### **I. 3. 2. 3 Compensateurs hybrides série - parallèle**

#### **I. 3. 2. 3. 1 Compensateurs hybrides à base de thyristors**

- TCPAR ( Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)

TCPAR (déphaseur statique) est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs ou régulateurs en charge (LTC ; Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. Ce type de compensateur n'est pas couramment utilisé, seule une étude est actuellement menée afin d'introduire un déphaseur à thyristors dans l'interconnexion des réseaux du nord ouest du Minnesota et du nord de l'Ontario [Pet 97] (Annexe B).

#### **I. 3. 2. 3. 2 Compensateurs hybrides à base de thyristors GTO**

- IPFC (Interline Power Flow Controller)

L'IPFC a été proposé par Gyugyi, Sen et Schuder en 1998 afin de compenser un certain nombre de lignes de transport d'une sous-station. Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC [Hin 00].

Nous pouvons l'utiliser afin de contrôler les changements de puissances entre les lignes du réseau.

- UPFC (Unified Power Flow Controller)

Gyugyi a présenté le concept de l'UPFC en 1990. En principe, l'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance [Pas 98] (Annexe B).

### **I. 3. 3 Techniques de Commande intelligente**

Il existe une grande variété de techniques de commande intelligente. Notre intérêt se portera sur les Algorithmes Génétiques et les Essaims de Particules.

#### **I. 3. 3. 1 Algorithmes Génétiques**

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.

Les premiers travaux sur les algorithmes génétiques ont été initialement développés par John Holland (1975) [Gol 89] qui, sur la base de travaux précédents, 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 appliqué sur des problèmes réels de grande taille. La parution en 1989 de l'ouvrage de référence écrit par D.E Goldberg, qui décrit l'utilisation de ces algorithmes dans le cadre de résolution de problème 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.

Les algorithmes génétiques, comme les réseaux de neurones, font partie des « Réseaux Adaptatifs Non-linéaires » (RAN) [Gol 89]. Ils sont composés d'un grand nombre d'unités élémentaires ou agents, qui sont dans notre cas des chromosomes. Ces agents traitent l'information le plus souvent de façon parallèle et distribuée. Ils interagissent entre eux d'une manière non linéaire et sans contrôle central. Si l'environnement extérieur dans lequel ils baignent est capable de leur fournir une rétroaction, alors les agents et leurs interactions sont modifiés par des « opérateurs » de telle sorte que le système global s'adapte progressivement à son environnement et améliore sa réponse. Développés pour des fins d'optimisation, les algorithmes génétiques permettent la recherche d'un extremum global [Bag 99].

L'Application des AG à la conception des contrôleurs pour l'amélioration de la stabilité des systèmes de puissance a été l'objet de plusieurs travaux [Far 98] [Abd 99].

Parmi les premières tentatives, [Ju 95] consistait en l'application des AG à la synthèse des paramètres du SVC. Dans [Tar 98], l'AG avait été utilisé pour l'amortissement d'un système de puissance possédant une structure de contrôleur décentralisé. De très bons résultats ont été obtenus lors de l'application de l'AG à la conception de PSS [Abi 99]. De même, [Wan 00] proposait l'application de l'AG à la conception d'un contrôleur PI pour SVC.

L'installation de plusieurs PSSs ou SVCs dans un réseau revient à effectuer une coordination de leurs paramètres donc une optimisation via les AGs [Has 01] [Has 02]. Des résultats prometteurs ont été obtenus pour un réseau d'application comprenant 16 machines. [Abi 02] avait appliqué l'AG à l'analyse et à la conception de plusieurs contrôleurs, à savoir les PSS et les FACTS.

### **I. 3. 3. 2 Optimisation par essais de particules**

L'optimisation par essaim de particules (OEP) est une technique d'optimisation parallèle développée par Kennedy et Eberhart [Ken 95-1], et inspirée du comportement social des individus qui ont tendance à imiter les comportements réussis qu'ils observent dans leur entourage, tout en y apportant leurs variations personnelles. A la différence des algorithmes génétiques, qui miment les mécanismes génétiques de l'évolution, l'OEP s'inspire plutôt de la formation d'une culture. Dans l'ouvrage [Ken 01-1], se trouve les racines sociales de l'OEP ainsi que les techniques mathématiques mises en œuvre pour la modélisation.

L'algorithme OEP est initialisé par une population de solutions potentielles aléatoires, interprétées comme des particules se déplaçant dans l'espace de recherche. Chaque particule est attirée vers sa meilleure position découverte par le passé ainsi que vers la meilleure position découverte par les particules de son voisinage (ou de tout l'essaim, dans la version globale de l'algorithme).

L'algorithme OEP comprend plusieurs paramètres de réglage qui permettent d'agir sur le compromis exploration – exploitation. L'exploration est la capacité de tester différentes régions de l'espace à la recherche de bonnes solutions candidates. L'exploitation est la capacité de concentrer la recherche autour des solutions prometteuses afin de s'approcher le plus possible de l'optimum. Le choix des paramètres reste en grande partie empirique. Une analyse complète de l'algorithme a été faite par Clerc et Kennedy [Cle 02] [Tre 03].

En plus des avantages issus des méthodes traditionnelles d'optimisation, l'OEP possède les qualités suivantes [Abi 01] :

- Contrairement aux (AGs) et à d'autres Algorithmes heuristiques, l'OEP possède une grande flexibilité de contrôle qui permet de balancer entre l'exploration globale et locale de l'espace de recherche.
- L'OEP utilise des règles de transition probabilistiques, et non pas déterministes. Cela permet d'obtenir une recherche dans des domaines considérés compliqués et incertains. Cet avantage confère à l'OEP une grande robustesse et une flexibilité qui dépassent celles des méthodes conventionnelles d'optimisation.

Différents modèles de l'algorithme OEP ont été présentés dans [Ves 02] pour l'optimisation numérique.

De plus en plus, l'OEP voit son importance grandir dans le domaine des systèmes de puissance. Nous retrouvons cette technique d'optimisation dans le contrôle de la tension et de la puissance réactive [Yos 99]. L'optimisation des paramètres des PSSs dans [Abi 01] a été obtenus par le biais de la technique d'optimisation par essaim de particules et a présenté de bons résultats pour un réseau d'application comprenant 10 machines et 39 nœuds (New England). L'OEP a été appliquée par [Sar 04] afin de déterminer l'emplacement optimal des dispositifs FACTS dans le cas mono type (TCSC, ou UPFC ou SVC), puis dans le cas multi type (TCSC, UPFC et SVC). Dans [Alh 04], l'optimisation des paramètres du SVC par le biais de l'OEP donne de très bons résultats quant à la stabilité d'un système de Microturbines raccordées à un réseau de distribution Electrique.

## **I. 4 CONCLUSION**

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu sur la stabilité des réseaux d'énergie électrique, ses différents types ainsi que les procédés permettant son amélioration. L'utilisation des dispositifs PSS et en particulier les FACTS a été également discutée. Nous avons également introduit les deux techniques de commande intelligente que sont l'Algorithme Génétique et les Particules en Essaim en vue de leur application dans l'optimisation des paramètres des FACTS et la coordination entre eux.

# CHAPITRE II

## *FACTS ET METHODES EVOLUTIONNAIRES*

### **II.1 Introduction**

Le développement des algorithmes génétiques et l'optimisation par essaims de particules se fait à travers les méthodes par lesquelles l'homme tente de copier la nature et de reproduire des modes de raisonnement et de comportement qui lui sont propres. Bien que ces approches paraissent « naturelles », et si elles se sont imposées dans des domaines allant du traitement de l'image à la gestion financière, elles commencent à peine à être utilisées dans les domaines de l'électrotechnique et de l'industrie afin de résoudre les problèmes d'identification, de régulation de processus, d'optimisation, de classification, de détection de défauts ou de prise de décision.

Nous donnerons dans ce chapitre un aperçu sur les applications des FACTS, en particulier le SVC, ainsi que sur les méthodes d'optimisation par les algorithmes génétiques et les essaims de particules.

### **II. 2. Application des FACTS**

Les FACTS permettent de contrôler dynamiquement l'écoulement de puissance moyennant l'utilisation des divers composants de l'électronique de puissance [Gyu 88].

L'idée principale des FACTS peut être expliquée par l'équation de base (II.1) de la puissance transmise à travers une ligne de transport à courant alternatif.

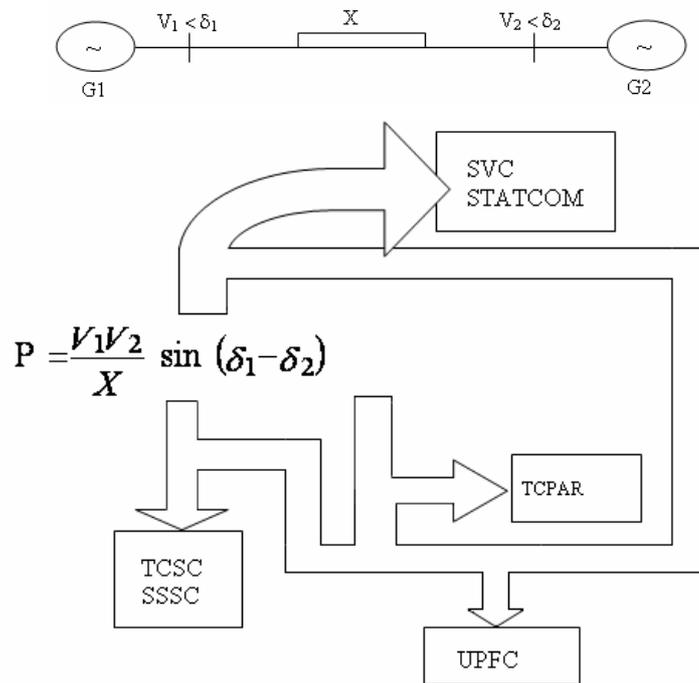
$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (\text{II.1})$$

La Fig. II.1 représente la puissance transmise entre deux noeuds du système. Elle dépend des tensions aux deux extrémités de l'interconnexion, de l'impédance de la ligne et de du déphasage entre les deux systèmes. Les différents dispositifs FACTS peuvent activement influencer un ou plusieurs de ces paramètres pour la commande du flux de puissance et l'amélioration de la stabilité de tension aux noeuds de l'interconnexion.

Selon la configuration du système, les tâches des FACTS peuvent être résumées comme suit:

- Systèmes maillés: Commande du transit de puissance.

- Systèmes radiaux et lignes parallèles: commande de l'impédance.
- Systèmes faiblement connectés: commande de la tension.



**Fig. II.1** Diagramme schématisant les applications des FACTS dans les réseaux.

Le tableau II.1 résume d'une manière simple l'impact de l'utilisation de chaque FACTS, à la résolution des différents problèmes qui entravent le bon fonctionnement du réseau électrique [Pov 00].

**Tableau II.1** Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau.

	Contrôle de Charge	Contrôle de Tension	Stabilité Transitoire	Amplitude des Oscillations
SVC STATCOM	★	★★★	★	★★
TCSC	★★	★	★★★	★★
SSSC	★★★	★	★★★	★★
TCPAR	★★★	★★	★	★★
UPFC	★★★	★★★	★★★	★★★

**Influence:**

Petite ★. Moyenne ★★. Forte ★★★.

Les lignes de transport constituent une composante importante du réseau. Elles sont constituées d'impédances série et shunt. L'impédance série peut affecter le maximum de puissance transitée à travers la ligne et l'impédance shunt est à prédominance capacitive, et possède une influence sur la tension le long de la ligne de transport. L'impédance série de la ligne, les tensions de départ et d'arrivée ainsi que le déphasage entre les tensions, déterminent la puissance transitée. Les FACTS sont utilisés afin de changer les paramètres série et shunt ainsi que le déphasage des tensions d'arrivée des lignes de transport dans le but de contrôler l'écoulement de puissance.

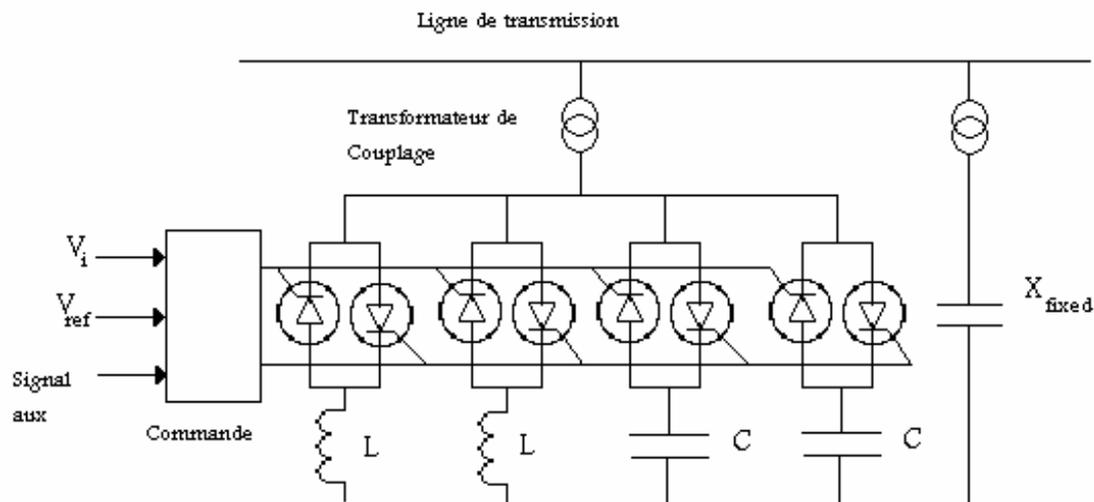
Dans cette étude; le choix s'est porté sur le dispositif SVC, que nous détaillons dans le paragraphe suivant.

### **II. 3 Compensateur statique d'énergie réactive (SVC)**

Appartenant à la famille des Compensateurs parallèles à base de thyristors [Pas 98] [Ler 91], le dispositif SVC est un moyen shunt de compensation réactive. Il est utilisé pour sa grande influence sur la tension. Le terme « statique » indique que le SVC ne contient pas de parties tournantes ou mécaniques [Has 01].

La fig.II.2 reporte le diagramme unifilaire de la connexion parallèle du SVC (Static Var Compensator). Le SVC est composé de thyristors qui commandent des capacités (TSCs) et des réactances (TCRs). Ce dispositif est relié à la ligne de transport via un transformateur de couplage. La génération de la puissance réactive varie constamment entre des valeurs capacitatives et inductives mises en jeu dans le circuit. Le SVC est utilisé afin de réguler la tension des systèmes de transport, à la valeur de référence. L'installation d'un SVC à un ou plusieurs points appropriés dans le réseau peut augmenter la capacité de transfert et réduire les pertes tout en maintenant le profile de la tension pendant le régime perturbé [Ler 91].

L'optimisation des paramètres du SVC est nécessaire pour obtenir de bonnes performances sans pour autant dépasser les valeurs admissibles par ce dispositif. Dans ce mémoire, deux méthodes d'optimisation seront exploitées : l'algorithme génétique (AG) et l'optimisation par essaims de particules (OEP).



**Fig. II. 2.** Schéma type du SVC en connexion shunt.

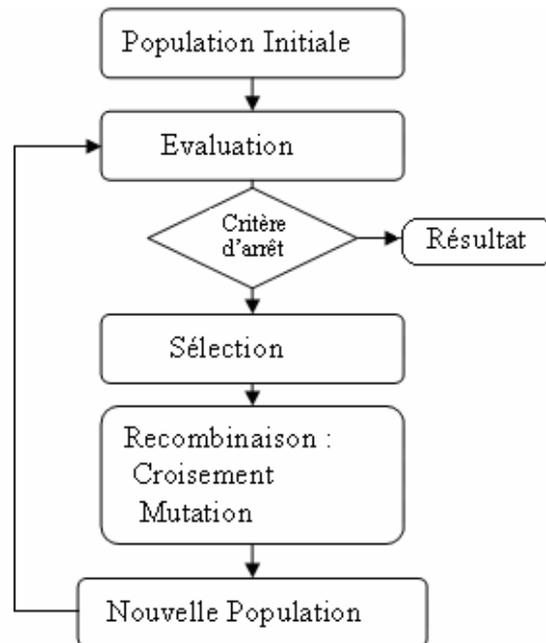
#### II. 4 Algorithmes génétiques

L'algorithme génétique est organisé en plusieurs étapes et fonctionne de manière itérative. La Fig. II.3 représente l'algorithme génétique le plus simple introduit par Holland [Gol 89]. Celui-ci met en œuvre différents opérateurs qui seront décrits dans la section 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 (forme de 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).

D'une manière générale, un algorithme génétique manipule les solutions potentielles d'un problème donné afin d'atteindre la solution optimale ou une solution jugée satisfaisante. Un algorithme génétique fait évoluer une population de gènes en utilisant les mécanismes de sélection naturelle et de la génétique de l'évolution. Il utilise une fonction coût basée sur un critère de performance pour calculer une « qualité d'adéquation » (fitness). Les individus les

plus « forts » seront à même de se reproduire et auront plus de descendants que les autres. Chaque chromosome est constitué d'un ensemble d'éléments appelés caractéristiques ou gènes. Le but est de trouver la combinaison optimale de ces éléments qui donne une « fitness » maximale. A chaque itération (génération de population), une nouvelle population est créée à partir de la population précédente.



**Fig. II. 3** Organigramme d'un algorithme génétique simple.

Il existe de nombreuses façons de procéder. Chaque utilisateur conçoit, en fait, sa variante qu'il juge s'adapter le mieux à son problème [Bag 99].

## II.4.1 Description des Algorithmes Génétiques

Dans ce qui suit, nous allons décrire plus en détail les différentes étapes du simple algorithme génétique de la figure II.3.

### II.4.1.1 Codage initiale

Le codage des paramètres du problème est nécessaire afin de constituer les chromosomes. Le type de codage le plus utilisé est le codage binaire, mais d'autres types peuvent être utilisés, par exemple le codage Gray, Réel..., etc [Her 98]. 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 :

$$g = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} g_{\max} \quad (\text{II.2})$$

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 :

$$x = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min}) \frac{g}{g_{\max}} \quad (\text{II.3})$$

Tous les paramètres du problème sont codés de la même manière puis associés pour former un chromosome comme le montre la figure II.3. 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 [Bli 95].

#### II.4.1.2 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 formulations suivantes :

- $Fit(x) = N - F_{obj}(x)$  si  $F_{obj} \geq N$ , (II. 4)  
sinon  $Fit(x) = 0$  ( $N$  est une constante positive).

- $Fit(x) = \frac{1}{F_{obj}(x)}$  (II. 5)

- $Fit(x) = -F_{obj}(x)$  (II. 6)

Contrairement aux méthodes classiques d'optimisation, 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 formulations mathématiques sont méconnues ou très difficiles à déterminer.

### II.4.1.3 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 [Coe 96] [Gen 97]. Nous ne citerons que deux des plus connues :

- **Méthode de la roulette de loterie** où 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 [Dar 59] [Gen 97].
- **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 [Has 02], 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 :

$$m = \frac{\text{taille de la population}}{k} \quad (\text{II.7})$$

Selon la référence [Coe 96]. 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 compléter 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.

#### II.4.1.4 Recombinaison

La recombinaison agit directement sur la structure des chromosomes en modifiant leurs gènes pour obtenir les nouveaux chromosomes d'une nouvelle population. Il existe deux catégories d'opérateurs de recombinaison : l'opérateur de croisement et l'opérateur de mutation.

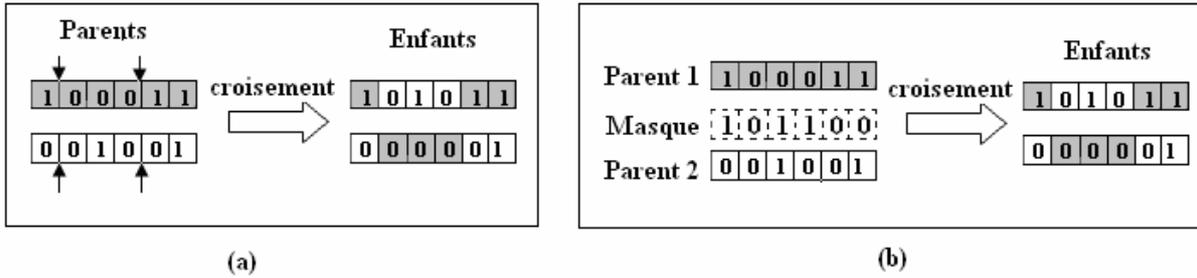
L'**opérateur de croisement** permet la création de nouveaux individus selon un processus fort simple. Il permet donc l'échange d'information entre les chromosomes (individus). Tout d'abord, deux individus, qui forment alors un couple, sont tirés au sein de la nouvelle population issue de la reproduction. 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 recopiés 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 et le croisement uniforme de la fig. II.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).

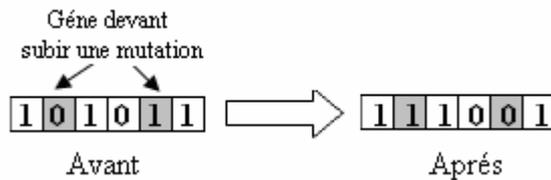
Le **croisement uniforme** est une généralisation du croisement multipoints. Ici, chaque gène du chromosome peut constituer un point de croisement. Un chromosome nommé masque, de taille identique à celle des parents, est créé aléatoirement et la valeur des gènes du masque indique de quel parent l'enfant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



**Fig. II.5** (a) *Croisement multipoints* ( $p = 2$ ), (b) *Croisement uniforme*

L'**opérateur de mutation** permet d'explorer de nouveaux points dans l'espace de recherche et d'éviter de converger vers les optima 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, cela revient tout simplement à remplacer un 0 par 1 et vice versa, comme le montre la figure II.7.



**Figure II.6** *Mutation dans le cas d'un codage binaire.*

Contrairement à l'opérateur de croisement, la mutation est souvent considérée comme secondaire ayant pour rôle de restaurer des informations génétiques perdues [Sri 94] [Ler 95].

#### II.4.1.5 Critère d'arrêt

Comme dans tout algorithme itératif, il faut définir un critère d'arrêt. Celui-ci peut être formulé de différentes façons parmi les quelles nous pouvons citer :

- Arrêt de l'algorithme lorsque le résultat atteint une solution satisfaisante.
- Arrêt s'il n'y a pas d'amélioration pendant un certain nombre de générations.
- Arrêt si un certain nombre de générations est dépassé.

## II. 4. 1. 6 REGLAGE DES PARAMETRES D'UN AG

L'élaboration d'un algorithme génétique nécessite le réglage de certains paramètres. Ce réglage a une influence sur la convergence de l'algorithme génétique et les résultats obtenus. Cependant, il n'existe pas de règle spécifique pour ajuster les paramètres d'un AG, et ils sont souvent choisis de manière empirique. Quelques remarques sont alors à soulever :

- **Probabilité de croisement** : la probabilité de croisement a une influence considérable sur la vitesse de convergence d'un algorithme génétique. Plus elle est grande et plus elle favorise la recombinaison des individus tout en favorisant de tomber dans un optimum local. Les valeurs usuels pour ce paramètre varient entre 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 optima locaux. Les valeurs usuels 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 [Sri 94].

## II. 4. 2 Optimisation par essaim de particules

Etant donné un espace de recherche et une fonction sur cet espace dont on cherche l'optimum, le principe de base consiste à définir un ensemble de particules (l'essaim) par des positions et vitesses initiales. L'essaim va ensuite évoluer selon un processus raisonnement-décision à chaque pas de temps, qui, informellement, est le suivant, du point de vue de la particule :

1. mémoriser sa meilleure position jamais trouvée (meilleure position atteinte)
2. demander à chacun de ses voisins leurs meilleures positions
3. considérer la meilleure d'entre elles
4. combiner les trois tendances : sa propension à suivre son propre chemin (attitude "volontariste"), sa tendance "conservatrice" (revenir vers sa meilleure position) et sa tendance "suiviste" (aller vers son meilleur voisin) pour définir sa nouvelle vitesse/direction de déplacement
5. effectuer ce déplacement

La formulation mathématique de ce comportement est la suivante :

$$v(t+1) = \lambda_1 v(t) + \lambda_2 (p_i(t) - x(t)) + \lambda_3 (p_g(t) - x(t)) \quad (\text{II. 8})$$

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1) \quad (\text{II. 9})$$

où  $t$  est le temps,  $x$  la position (multidimensionnelle) de la particule,  $v$  sa vitesse,  $p_i$  sa meilleure position atteinte,  $p_g$  la meilleure des meilleures positions atteintes dans son voisinage et  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  les coefficients de confiance pondérant les trois directions possibles (volontariste, conservatrice, suiviste).

Dans presque toutes les applications, les coefficients  $\lambda_2$  et  $\lambda_3$  sont choisis à chaque pas de temps au hasard dans un intervalle donné. On voit tout de suite que d'innombrables variantes sont possibles, y compris la possibilité de jouer sur la taille et la définition des voisinages, ou la taille de l'essaim. L'analyse mathématique que M.Clerc a réalisée en 1999, et en fonction de laquelle Jim Kennedy a sensiblement amélioré ses propres versions [Cle 01], a permis d'établir les relations que doivent respecter les coefficients pour assurer la convergence (ou, plus précisément la non divergence).

Les équations du mouvement sont valables quel que soit l'espace de recherche, pour peu que l'on sache définir les opérateurs nécessaires :

- différence de deux positions (déplacement assimilable à une vitesse, le temps étant discrétisé)
- combinaison linéaire de deux vitesses
- addition d'une position et d'une vitesse

Concernant la fonction à optimiser, la seule contrainte est que l'on puisse comparer les valeurs qu'elle prend en deux points quelconques de l'espace de recherche, conformément à la structure algébrique de treillis, qui garantit certaines propriétés de convergence [Lat 00].

## II. 4. 2.1 Concept de base de l'OEP

Le principe de l'OEP développé par Kennedy et Eberhart [Ken 95-2] se base sur le comportement des nuées d'oiseaux. Ainsi, l'OEP a été fondamentalement développé à travers la simulation du comportement des nuées d'oiseaux dans l'espace bidimensionnel. La position de chaque agent est représentée par ses coordonnées suivant les deux axes XY auxquels on associe les vitesses exprimée par  $v_x$  (vitesse suivant l'axe X) et  $v_y$  (vitesse suivant l'axe Y). La modification du comportement de chaque agent se base sur les informations de position et de vitesse.

A chaque itération l'agent procède via une fonction objective à l'évaluation de sa meilleure valeur jusque là (*pbest*) et sa position suivant les deux axes XY. .

Cette information est obtenue à partir de l'analyse des expériences personnelles de chaque agent. En plus, chaque agent connaît la meilleure valeur globale du groupe (*gbest*) parmi les *pbests*. Cette information représente la valeur autour de laquelle d'autres agents sont performants. Ainsi, chaque agent essaye de modifier sa position en se basant sur les informations suivantes :

- position courante ( $x, y$ ),
- vitesse courante ( $v_x, v_y$ ),
- distance entre la position courante et *pbest*
- distance entre la position courante et *gbest*

Cette modification peut être représentée par le concept de vitesse. La vitesse modifiée de chaque agent s'écrira de la manière suivante [Nak 03]:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1rand_1 \times (pbest_i - s_i^k) + c_2rand_2 \times (gbest - s_i^k) \quad (II.10)$$

Où :

- $v_i^k$  : Vitesse de l'agent  $i$  à l'itération  $k$ .
- $w$  : Fonction de pondération.
- $c_j$  : Facteur de pondération.
- $rand$  : Nombre aléatoire entre 0 et 1.
- $s_i^k$  : Position courante de l'agent  $i$  à l'itération  $k$ .
- $pbest_i$  : *pbest* de l'agent  $i$ .
- $gbest$  : *gbest* du groupe.

La fonction de pondération habituellement utilisée dans l'équation (II.10) est la suivante :

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_{\max}} \times iter \quad (II.11)$$

Où :

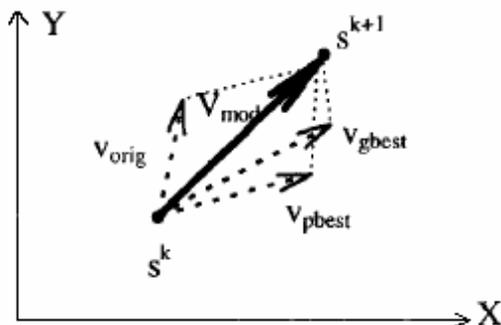
- $w_{\max}$  : Poids initial,
- $w_{\min}$  : Poids final,
- $iter_{\max}$  : Nombre maximum d'itération,
- $iter$  : Nombre courant d'itération.

La partie de droite de l'équation (II.10) comprend trois termes (vecteurs). Le premier terme représente la vitesse précédente de l'agent. Le second terme ainsi que le troisième sont utilisés pour modifier la vitesse de l'agent [Nak 03].

Le modèle utilisé dans l'équation (II.11) est appelé approche poids inertie « Inertia Weights Approach (IWA) » [Kau 01]. La position courante (cherchant le point dans l'espace de solution) est modifiée suivant l'équation ci-dessous :

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (II.12)$$

La Fig. II. 7 montre le concept de modification d'un point de recherche par l'OEP [Nak 03] alors que la Fig.II.8 illustre un concept de recherche avec des agents dans un espace de solution. Chaque agent change sa position courante en moyennant l'intégration des vecteurs comme présentés dans la Fig. II. 8 [Ken 01-1].



**Fig. II. 7** Concept de modification d'un point de recherche par l'OEP.

Où :

$s_i^k$  : Position courante de l'agent.

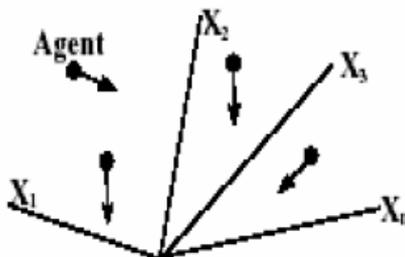
$s_i^{k+1}$  : Position modifiée de l'agent.

$v_i^k$  : Vitesse courante de l'agent.

$v_i^{k+1}$  : Vitesse modifiée de l'agent.

$v_{pbest}$  : Vitesse de l'agent basée sur la position pbest.

$v_{gbest}$  : Vitesse de l'agent basée sur la position gbest choisi parmi toutes les meilleures positions des agents de la population.



**Fig.II. 8** Concept de recherche avec des agents dans l'espace de solution de l'OEP.

## II. 4. 2. 2 Algorithme général de l'OEP

Les concepts de l'OEP présentés dans les sections précédentes nous permettent de construire l'algorithme suivant fig. II. 9 [Fuk 00] [Ken 01-2] [Nak 03] :

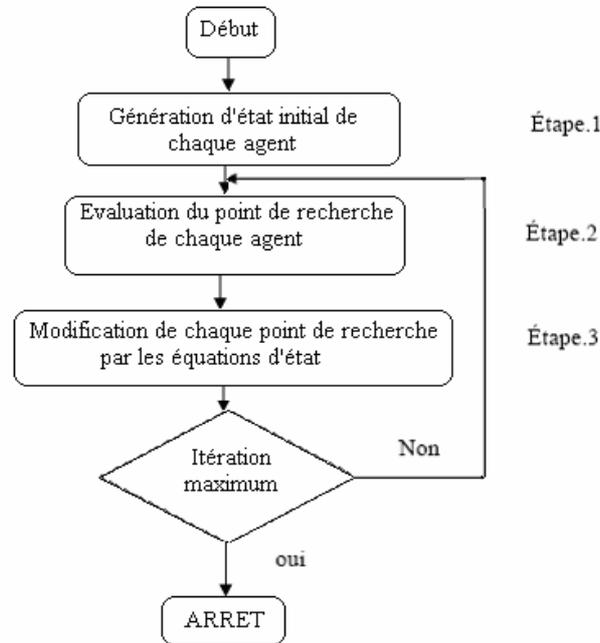


Fig. II. 9 Organigramme général de l'OEP.

### Étape 1 : Génération d'état initial de chaque agent

Les points de recherche initiaux, position  $(s_i^0)$  et vitesse  $(v_i^0)$  de chaque agent sont produits aléatoirement. Pour chaque agent le point de recherche courant est placé à pbest.

$$S_j^0 = \left[ s_{j,1}^0 + s_{j,m}^0 \right] \quad \text{pour} \quad \left| s_k^{\min}, s_k^{\max} \right| \quad (\text{II. 13})$$

$$V_j^0 = \left[ v_{j,1}^0 + v_{j,m}^0 \right] \quad \text{pour} \quad \left| -v_k^{\max}, v_k^{\max} \right| \quad (\text{II. 14})$$

$$j = 1, \dots, n$$

$$v_k^{\max} = \frac{s_k^{\max} + s_k^{\min}}{N} \quad (\text{II. 15})$$

Où:

$n$  : nombre de positions et de vitesses générées aléatoirement .

$N$ : nombre choisi d'intervalles dans la  $k^{\text{ième}}$  dimension.

$m$ : nombre de variables.

**Etape 2 :** Evaluation du point de recherche de chaque agent

Les points de recherche courants sont évalués au moyen de la fonction objective relative au système d'étude. Si la valeur d'un agent est meilleure que son *pbest* courant, *pbest* prend cette nouvelle valeur. Si la meilleure valeur de *pbest* est meilleure que *gbest* courant, *gbest* est remplacé par cette meilleure valeur et l'agent qui correspond à cette meilleure valeur est ainsi stocké.

**Etape 3 :** Modification du point de recherche.

La modification du point de recherche se fait en moyennant les équations (II.10), (II.11) et (II.12).

**Etape 4 :** Critère d'arrêt.

La procédure de recherche est arrêtée lorsque le nombre courant d'itération devient égal à la valeur maximale d'itérations préalablement déterminée. Dans ce cas de figure, la dernière valeur *gbest* peut être considérée comme solution. Dans l'autre cas, la recherche continue en revenant à l'étape 2.

L'optimisation par Essaims de particules peut être présentée par les points suivants :

- La méthode OEP peut essentiellement manipuler le problème d'optimisation continu.
- L'OEP utilise plusieurs points de recherche comme le fait l'algorithme génétique (GA) qui convergent graduellement vers le point optimal en utilisant les valeurs *pbest* et *gbest*.
- La méthode OEP utilise La diversification et l'intensification pour une recherche efficace.
- L'OEP s'applique facilement aux problèmes de k dimensions et a donné de bons résultats pour la fonction *Schaffer f6* et la fameuse fonction *benchmark* [Ken 95-2].
- L'OEP présente un avantage certain sur les méthodes classiques dans le sens où elle permet une exploration aléatoire de l'espace des solutions. De plus, elle est simple à mettre en oeuvre et son exécution conduit à l'obtention de très bons résultats, rapidement et efficacement avec peu de paramètres à ajuster.

## **II. 5 CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes applications des FACTS en particulier le SVC ainsi que les bases nécessaires à la compréhension des méthodes d'optimisation à base d'Algorithme Génétique et d'essaim de particules.

De nombreuses possibilités d'utilisation de ces techniques intelligentes sont envisageables. Dans le cadre de cette étude, nous avons ciblé l'amélioration de la stabilité dynamique du réseau via l'optimisation des paramètres du dispositif SVC.

# CHAPITRE III

## MODELISATION DU RESEAU ELECTRIQUE EN REGIME DYNAMIQUE

### III.1 INTRODUCTION

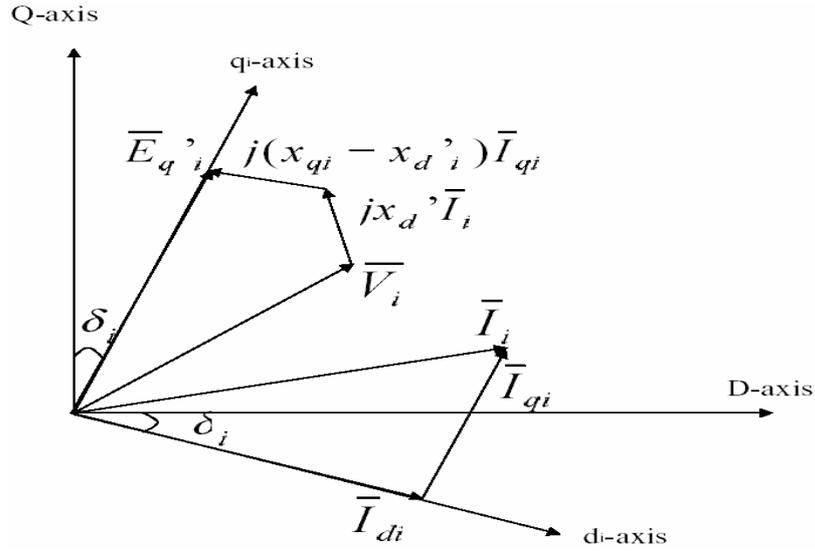
La taille, la complexité et le nombre de sous-systèmes d'un système multimachine, rendent la modélisation de celui-ci pratiquement impossible. Bien que théoriquement possible, un modèle qui décrit tous les phénomènes apparaissant dans un système électrique n'offre pas plus d'avantages qu'un modèle simplifié. 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 présentons au début un modèle permettant de représenter le fonctionnement du système multimachine en régime de faible perturbation ainsi que le modèle du SVC qui sera utilisé pour l'amélioration de la stabilité .

### III.2 MODELISATION DU RESEAU MULTIMACHINE

#### III.2.1 Diagramme de Phase

Le diagramme de phase d'un réseau multimachines peut être décrit dans la figure III.1. Les variables de la  $i^{\text{ème}}$  machine définies par rapport aux axes  $d_i$  et  $d_q$  peuvent être exprimer pour toutes machines suivant un système unique d'axes D et Q.



**Figure III.1** Diagramme de phase pour la  $i^{\text{ème}}$  machine.

Le modèle utilisé dans cette étude et représenté sur la Figure III.2 est similaire à celui adopté dans la référence [YU 83]. Chaque machine est modélisée avec trois variables d'état plus une pour l'excitation, ce qui donne un système d'ordre  $4n$  ( $n$  : nombre de machines). L'effet des enroulements amortisseurs est négligé, ce qui conduit à une estimation optimiste de la stabilité des petits signaux [Fle 90] [Yu 83] [Ele 96].

La tension terminale  $V_i$  de la  $i^{\text{ème}}$  machine du système électrique est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{V}_i = \bar{E}_{qi} - j.x'_d.\bar{I}_i - j.(x_{qi} - x'_d).\bar{I}_{qi} \quad (\text{III.1})$$

$$\bar{E}_{qi} = E'_{qi} \cdot e^{j.(90-\delta_i)} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$$\bar{I}_{qi} = j.I_{qi} \cdot e^{-j.\delta_i} \quad (\text{III.3})$$

Pour  $n$  machines, on a la formulation suivante :

$$[V] = [e^{j.(90-\delta_i)}] [E'_q] - j [X'_d] [I_i] - j.[X_q - X'_d] [e^{-j.\delta_i}] [I_q] \quad (\text{III.4})$$

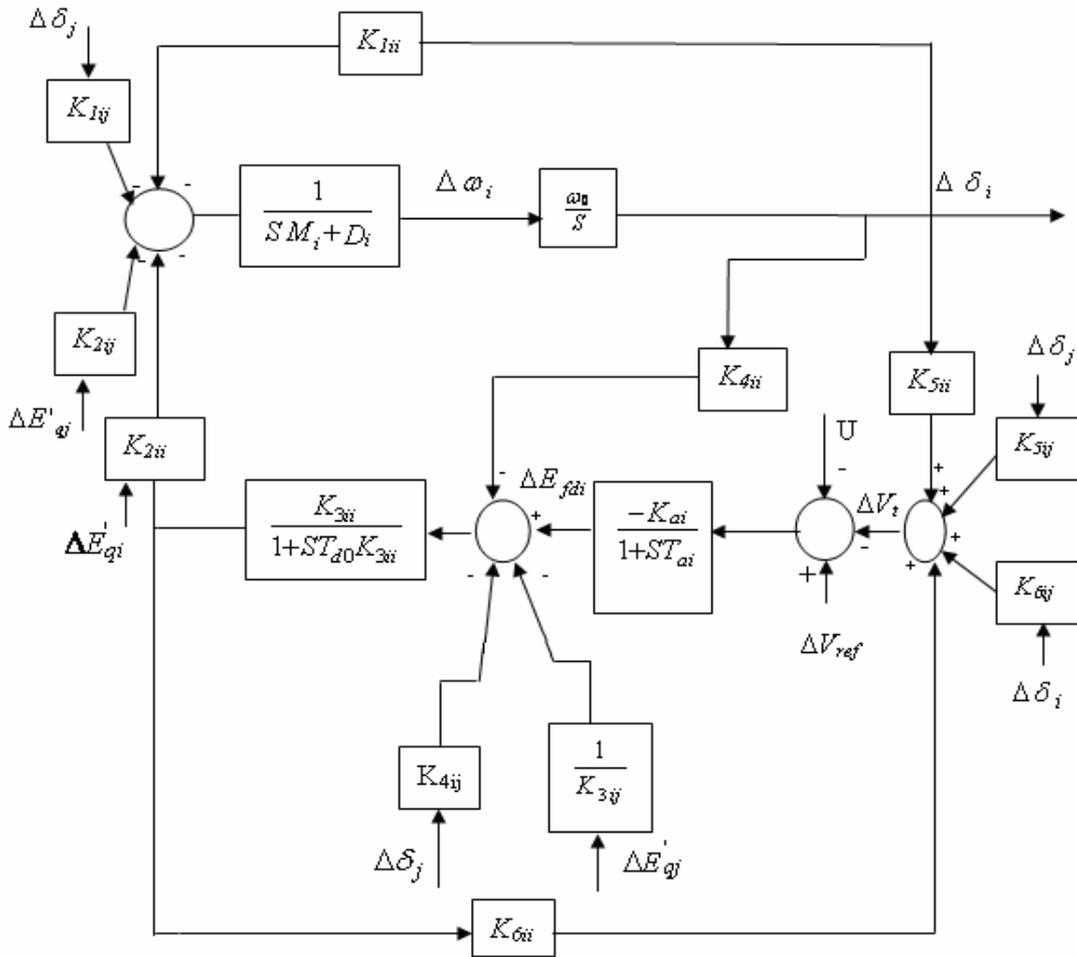
### III.2.2 Composantes des Courants

Pour trouver les composantes  $K_1, \dots, K_6$ , on doit passer par le calcul des composantes des courants qui sera suivi par l'étude d'écoulement de puissance (load flow) du système pour la détermination des conditions initiales. 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.

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_G & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

L'indice « G » désigne les nœuds générateurs.

L'indice « L » désigne les nœuds de charge.



**Figure III.2** Schéma fonctionnel de la  $i^{\text{ème}}$  machine du réseau multimachine.

Après élimination des nœuds de charge, on obtient :

$$[I] = [Y_t][V] \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$$[I] = [I_G] \quad (\text{III.7})$$

$$[V] = [V_G] \quad (\text{III.8})$$

En substituant l'équation (III-4) dans (III-6), on obtient:

$$[I] = [\bar{Y}] \left[ e^{j(90-\delta_i)} [E'_q] + j [X_q - X'_d] [e^{-j\delta_i}] [I_q] \right] \quad (\text{III.9})$$

Avec :

$$[\bar{Y}] = [[\bar{Y}_l]^{-1} + j [X'_d]]^{-1} \quad (\text{III.10})$$

Si l'on pose :

$$\bar{Y}_{ij} = Y_{ij} e^{\beta_{ij}} \quad (\text{III.11})$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad (\text{III.12})$$

$$\beta_{ij} = \beta_i - \beta_j \quad (\text{III.13})$$

On obtient pour la  $i^{\text{éme}}$  machine dans le système  $D-Q$  :

$$\bar{i}_i = \bar{I}_i e^{j\delta_i} \quad (\text{III.14})$$

D'où les expressions :

$$i_{di} = \text{Re}(\bar{i}_i) = \sum_1^n Y_{ij} [-S_{ij} E'_{qj} + (X_{qi} - X'_{di}) C_{ij} I_{qj}] \quad (\text{III.15})$$

$$i_{qi} = \text{Im}(\bar{i}_i) = \sum_1^n Y_{ij} [C_{ij} E'_{qj} + (X_{qi} - X'_{di}) S_{ij} I_{qj}] \quad (\text{III.16})$$

Avec:

$$C_{ij} = \cos(\beta_{ij} + \delta_{ij}) \quad (\text{III.17})$$

$$S_{ij} = \sin(\beta_{ij} + \delta_{ij}) \quad (\text{III.18})$$

La différentiation de l'expression du courant donne :

$$\Delta(i_{di} + j i_{qi}) = \Delta I_{di} + j \Delta I_{qi} \quad (\text{III.19})$$

De l'équation (III.17), on obtient :

$$[\Delta I_d] = [P_d] [\Delta \delta] + [Q_d] [\Delta E'_q] + [M_d] [\Delta I_q] \quad (\text{III.20a})$$

$$[L_d] [\Delta I_q] = [P_q] [\Delta \delta] + [Q_q] [\Delta E'_q] \quad (\text{III.20b})$$

Avec:

$$P_{dij} = -Y_{ij} [C_{ij} E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) S_{ij} I_{qj}] \quad (\text{III.21})$$

$$P_{qij} = -Y_{ij} [S_{ij} E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) C_{ij} I_{qj}] \quad (\text{III.22})$$

$$P_{dii} = \sum_1^n P_{dij} \quad i \neq j \quad (\text{III.23})$$

$$P_{qii} = \sum_1^n P_{qij} \quad i \neq j \quad (\text{III.24})$$

$$Q_{dij} = -Y_{ij} S_{ij} \quad (\text{III.25})$$

$$Q_{qij} = Y_{ij} C_{ij} \quad (\text{III.26})$$

$$L_{qij} = -Y_{ij} (X_{qi} - X'_{di}) S_{ij} \quad (\text{III.27})$$

$$L_{qii} = 1 - Y_{ii} (X_{qi} - X'_{di}) S_{ii} \quad (\text{III.28})$$

$$M_{dij} = Y_{ij} (X_{qi} - X'_{dj}) C_{ij} \quad (\text{III.29})$$

Pour le calcul des matrices  $P$ ,  $Q$ ,  $L$  et  $M$  du système d'équations (III.20), les valeurs initiales de  $E'_{qj}$ ,  $I_{qj}$ , et  $\delta_j$  doivent être connues, la solution du système devient :

$$[\Delta I_d] = [Y_d] [\Delta E'_q] + [F_d] [\Delta \delta] \quad (\text{III.30})$$

$$[\Delta I_q] = [Y_q] [\Delta E'_q] + [F_q] [\Delta \delta] \quad (\text{III.31})$$

Avec :

$$[Y_d] = [Q_d] + [M_d] [Y_q] \quad (\text{III.32})$$

$$[Y_q] = [L_q]^{-1} [Q_q] \quad (\text{III.33})$$

$$[F_d] = [P_d] + [M_d] [F_q] \quad (\text{III.34})$$

$$[F_q] = [L_q]^{-1} [P_q] \quad (\text{III.35})$$

### II.2.3 Equation de Puissance

Le couple électrique est égal à la puissance électrique en unités relatives pour la  $i^{\text{ème}}$  machine:

$$T_{ei} = \text{Re}(\bar{I}_i^* \bar{V}_i) = I_{qi} E'_{qi} + I_{qi} (X_{qi} - X'_{di}) I_{di} \quad (\text{III.36})$$

Pour  $n$  machines, la linéarisation donne :

$$[\Delta T_e] = [I_{q0}]^T [\Delta E'_q] + [I_{q0}]^T [X_q - X'_d] [\Delta I_d] + [[E'_q] + [I_{d0}]^T [X_q - X'_d]] [\Delta I_q] \quad (\text{III.37})$$

D'après le schéma bloc de la figure II.2, le couple électromagnétique est aussi donné par :

$$[\Delta T_e] = [K_1][\Delta \delta] + [K_2][\Delta E'_q] \quad (\text{III.38})$$

Avec :

$$K_{1ii} = D_t F_{dii} + Q_t F_{qii} \quad (\text{III.39})$$

$$K_{1ij} = D_t F_{dij} + Q_t F_{qij} \quad (\text{III.40})$$

$$K_{2ii} = D_t Y_{dii} + Q_t Y_{qii} + I_{qi0} \quad (\text{III.41})$$

$$K_{2ij} = D_t Y_{dij} + Q_t Y_{qij} \quad (\text{III.42})$$

$$D_t = (X_{qi} - X'_{di}) I_{qio} \quad (\text{III.43})$$

$$Q_t = (X_{qi} - X'_{di}) I_{dio} + E'_{qi0} \quad (\text{III.44})$$

### III.2.4 Equation des Tensions Internes

L'équation donnant les tensions internes est :

$$[[1] + S[T'_{do}]] [\Delta E'_q] = [\Delta E_{FD}] - [X_d - X'_d] [\Delta I_d] \quad (\text{III.45})$$

On substitue l'équation (III.30) dans l'équation (III.45), pour obtenir pour la  $i^{\text{ème}}$  machine l'expression suivante :

$$[[1] + S[T'_{do} K_{3ii}]] [\Delta I'_q] = K_{3ii} [\Delta \Delta_{FDi}] - \sum_1^n \frac{1}{K_{3ij}} \Delta E'_{qj} - \sum_1^n K_{4ij} \Delta \delta_{ij} \quad (\text{III.46})$$

Avec:

$$K_{3ii} = [1 + [X_{di} - X'_{di}] Y_{dii}]^{-1} \quad (\text{III.47})$$

$$K_{3ij} = [[X_{di} - X'_{di}] Y_{dji}]^{-1} \quad (\text{III.48})$$

$$K_{4ii} = [X_{di} - X'_{di}] [F_{di}] \quad (\text{III.49})$$

$$K_{4ij} = [X_{di} - X'_{di}] [F_{dij}] \quad (\text{III.50})$$

### III.2.5 Equation des Tensions Terminales

On a l'équation matricielle des tensions aux bornes des différentes machines du réseau :

$$[\Delta V_t] = [V_t]^{-1} [V_{d0}] [\Delta V_d] + [V_t]^{-1} [V_{q0}] [\Delta V_q] \quad (\text{III.51})$$

D'autre part, on a :

$$[\Delta V_t] = [K_5] [\Delta \delta] + [K_6] [\Delta E'_q] \quad (\text{III.52})$$

D'où l'on tire :

$$[K_5] = [D_v] [X_q] [F_q] - [Q_v] [X'_d] [F_q] \quad (\text{III.53})$$

$$[K_6] = [D_v] [X_q] [Y_q] - [Q_v] [X'_d] [Y_d] + [Q_v] \quad (\text{III.54})$$

Avec :

$$[D_v] = [V_t]^{-1} [V_{d0}] \quad (\text{III.55})$$

$$[Q_v] = [V_t]^{-1} [V_{q0}] \quad (\text{III.56})$$

### III.2.6 Représentation d'état

La synthèse des équations électriques et mécaniques donne:

$$\Delta X = \left[ [\Delta \delta] [\Delta \omega] [\Delta E'_q] [\Delta E_{FD}] \right]^T \quad (\text{III.57})$$

$$\Delta U = \left[ \Delta T_m \quad \Delta V_{ref} \right]^T \quad (\text{III.58})$$

$$\Delta Y = \left[ [\Delta \delta] [\Delta \omega] [\Delta V_t] [\Delta T_e] \right]^T \quad (\text{III.59})$$

$$A = \begin{bmatrix} [0] & [\omega_B] & [0] & [0] \\ -\left[ \frac{K_1}{M} \right] & -\left[ \frac{D}{M} \right] & -\left[ \frac{K_2}{M} \right] & [0] \\ -\left[ \frac{K_4}{T'_{do}} \right] & [0] & -\left[ \frac{1}{K_3 T'_{do}} \right] & \left[ \frac{1}{T'_{do}} \right] \\ -\left[ \frac{K_5 K_a}{T_a} \right] & [0] & -\left[ \frac{K_6 K_a}{T_a} \right] & -\left[ \frac{1}{T_a} \right] \end{bmatrix} \quad (\text{III.60})$$

$$B = \begin{bmatrix} [0] & \left[ \frac{1}{M} \right] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & \left[ \frac{K_a}{T_a} \right] \end{bmatrix} \quad (\text{III.61})$$

$$C = \begin{bmatrix} [1] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [1] & [0] & [0] \\ [K_5] & [0] & [K_6] & [0] \\ [K_1] & [0] & [K_2] & [0] \end{bmatrix} \quad (\text{III.62})$$

Les éléments des matrices [A], [B], [C] sont des sous matrices, on a par exemple :

$$-\left[ \frac{K_1}{M} \right] = \begin{bmatrix} -\frac{K_{111}}{M_1} & \dots & \dots & -\frac{K_{11n}}{M_n} \\ -\frac{K_{1n1}}{M_n} & \dots & \dots & -\frac{K_{1nn}}{M_n} \end{bmatrix} \quad (\text{III.63})$$

□ La forme générale de l'équation d'état du système :

$$\dot{X} = AX + BU \quad (\text{III.64})$$

### III.3 ANALYSE DE STABILITE

La stabilité dynamique correspondant aux perturbations de faibles amplitudes peut être analysée en utilisant l'une des méthodes applicables aux systèmes linéaires dont la plus courante reste celle des valeurs propres.

Une fois l'équation d'état du système électrique écrite sous la forme générale (III.64), la stabilité du système peut être étudiée. L'analyse de la stabilité est basée sur des valeurs propres et des vecteurs propres du système.

#### III.3.1 Valeurs propres

Une valeur propre  $\lambda = \alpha \pm j\beta$  (ou pole du système) est un nombre complexe qui vérifie l'égalité (III.65) 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.

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (I : \text{matrice identité}) \quad (\text{III.65})$$

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

- Chaque valeur propre réelle  $\lambda_i$  de multiplicité  $m_i$  donne une réponse transitoire :

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{m_i} c_j t^{j-1} e^{\lambda_i t} \quad (\text{III.66})$$

- Chaque paire de valeurs propres complexes conjuguées  $(\lambda_i, \lambda_i^*)$  de multiplicité  $m_i$  donne une réponse transitoire :

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{m_i} t^{j-1} e^{\alpha_i t} (c_{1j} \cos(\beta_i t) + c_{2j} \sin(\beta_i t)) \quad (\text{III.67})$$

Où  $c_j$ ,  $c_{1j}$  et  $c_{2j}$  sont des coefficients dépendant des conditions initiales.

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. 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 apériodiques**.
- ✦ Les valeurs propres complexes conjuguées correspondent à des **modes oscillants**.

La caractéristique temporelle d'un mode correspondant à  $\lambda$  étant donnée par  $e^{\lambda t}$ , la stabilité du système est donc liée à l'emplacement des valeurs propres dans le plan complexe [Sin 02] :

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 croit 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 [Sny 97], les oscillations sont caractérisées par la fréquence oscillatoire en Hertz donnée par :

$$f = \frac{\beta}{2\pi}$$

et le facteur d'amortissement donné par :

$$\xi = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}$$

### III.4. Modélisation du système avec incorporation des SVC

Dans ce qui suit, nous procéderons à l'intégration des dispositifs FACTS dans le réseau électrique afin d'améliorer la stabilité dynamique, en amortissent les oscillations électromécaniques du système et pour obtenir un réglage convenable de la tension.

Nous présenterons un modèle dynamique complet du système avec l'insertion des FACTS proposé dans [Ele 96]. Le choix du site d'implantation de ces dispositifs sera ensuite défini par la technique des vecteurs propres et des facteurs de contribution.

Au cours de la décennie dernière, le SVC est devenu un moyen populaire très répandu permettant de fournir un apport réactif rapide dans des systèmes de puissance. Ces dispositifs sont utilisés pour le contrôle de la tension, la compensation de l'énergie réactif et des pertes de système ainsi que pour améliorer les limites de stabilité. L'utilisation du SVC est surtout destinée à l'amélioration de l'amortissement du système et le contrôle de la tension [O'BR 85] [WU 91].

#### III.4.1 Description du Système

##### III.4.1.1 Modèle du Système

Pour examiner les possibilités de la méthode proposée, on considère le modèle du système dans la figure III.3. Il se compose d'un alternateur relié à un noeud de puissance infinie par une ligne de transport, et un dispositif de compensation de l'énergie réactive SVC localisé entre ses bornes [Ele 96].

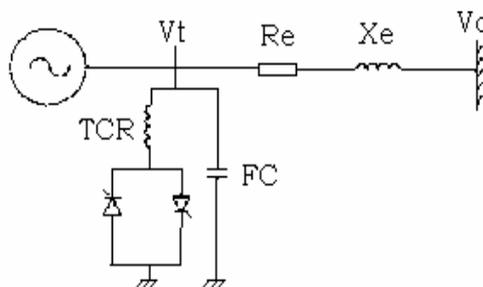
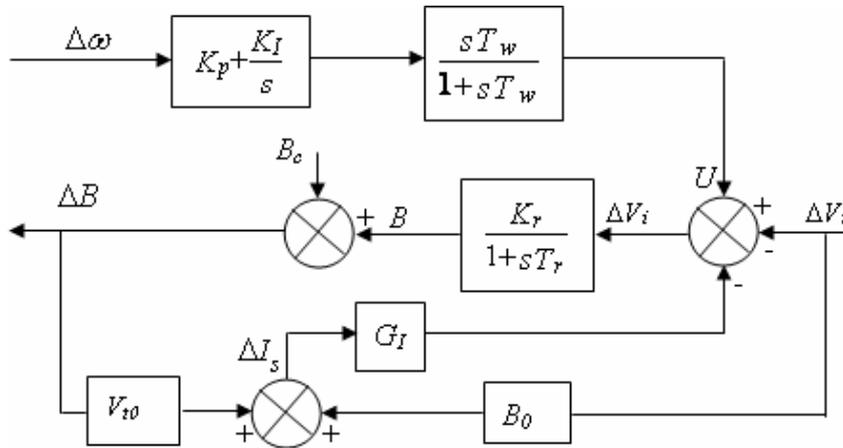


Figure III.3 Modèle du système avec SVC.

Etant donné le modèle de la machine synchrone relié à un nœud de puissance infinie par une ligne de transport avec le régulateur primaire de tension, schématisé dans la fig. III.4. La linéarisation de ce système donne les six paramètres  $K_1 \dots K_6$  que caractérisent les générateurs et qui sont des fonctions des paramètres des machines, des impédances du réseau d'interconnexion ainsi que des conditions de fonctionnement [YU 83].



**Fig. III.4** *Modèle du SVC.*

### III.2.2.2 Compensateur Statique

Dans cette partie, le thyristor réactif commandé avec le condensateur fixe (TCR + FC) est utilisé dans le SVC de la fig. III.4. Une phase du SVC triphasé et son schéma fonctionnel de commande [O'BR 87] [Che 90]. L'unité de SVC est reliée à la borne de générateur comme montré dans figure III.3. La fonction primaire du SVC est commander la puissance réactive et de stabiliser la tension de système. Le signal stabilisant auxiliaire  $U$  est ajouté à l'entrée du contrôleur du SVC et est injecté dans le système d'excitation pour atténuer les oscillations rotoriques de la machine. Le point de fonctionnement en régime permanent du SVC est donné par [Das 87]:

$$I_s = BV_t \quad (III.70)$$

La linéarisation au tour du point de fonctionnement donne :

$$\Delta I_s = B_0 \Delta V_t + V_{t0} \Delta B \quad (III.71)$$

Pour développer une relation générale correspondant aux systèmes multimachines, on suppose que le SVC est situé au nœud terminal du générateur synchrone. D'autre part, le signal d'entrée  $\Delta V_i$  du circuit de commande principal du SVC [Das 87] est donné par:

$$\Delta V_i = -\Delta V_t - G_I \Delta I_s + U \quad (III.72)$$

### III.4.2.3 Méthode Proposée

Dans cette section, une formulation mathématique de la méthode proposée appliquée au système d'énergie multimachine a été développée. Le modèle du système est développé en utilisant la matrice  $A_0$  tenant compte de l'effet des dispositifs SVCs incorporés dans le réseau électrique. Le réarrangement des équations (III.70) et (III.71) sous forme matricielle donne :

$$\Delta I_s = [B_0][A_0][\Delta V_t] + [A_0][\Delta V_{t0}][A_0]^T [\Delta B] \quad (III.73)$$

$$\Delta V_t = -[A_0][\Delta V_t] - [A_0][G_I][A_0]^T [\Delta I_s] + [A_0][A_0]^T [U] \quad (III.74)$$

A partir de la figure III.4, les variations autour d'un point de fonctionnement de la tension et du couple électromagnétique sont données par [YU 83] :

$$[\Delta V_t] = [K_5][\Delta \delta] + [K_6][\Delta E'_q] \quad (III.75)$$

$$[\Delta T_e] = [K_1][\Delta \delta] + [K_2][\Delta E'_q] \quad (III.76)$$

De même, les tensions  $E_{fd}$  et  $E'_q$  sont données par:

$$[\Delta E_{fd}] = -[K_a][\Delta V_t] + [K_a][A_0]^T [U] + [K_a][\Delta V_{ref}] \quad (III.77)$$

$$[\Delta E'_q] = [K_3][\Delta E_{fd}] - [K_3][K_4][\Delta \delta] \quad (III.78)$$

En substituant l'équation (III.78) dans l'équation (III.75), donne :

$$[\Delta V_t] = [K_5 - K_6 K_3 K_4][\Delta \delta] + [K_6][K_3][\Delta E_{fd}] \quad (III.79)$$

Si on suppose que  $\Delta V_{ref} = 0$ , les équations (III.73), (III.74), (III.77) et (III.79) donnent:

$$[\Delta V_t] = [1 + K_c]^{-1} [K_d][\Delta \delta] + [1 + K_c]^{-1} [K_c][A_0]^T [U] \quad (III.80)$$

Où:

$$[\Delta V_t] = [H_Q][\Delta \delta] + [H_D][U] \quad (III.81)$$

et

$$\begin{aligned} [\Delta V_i] = & -[A_0 + A_0 G_I A_0^T B_0 A_0][H_Q][\Delta \delta] - [A_0][G_I][A_0]^T [A_0][V_{t0}][A_0]^T [\Delta B] + \\ & [A_0 A_0^T - (A_0 + A_0 G_I A_0^T B_0 A_0) H_D][U] \end{aligned} \quad (III.82)$$

Le changement équilibré de susceptance du SVC est donné par :

$$[\Delta B] = [K_r][\Delta V_i] \quad (\text{III.83})$$

À partir des équations (III.82), (III.83) et (III.84), nous obtenons :

$$[\Delta B] = -[K_8][\Delta \delta] + [K_9][U] \quad (\text{III.84})$$

Le réarrangement de l'équation (III.84) donne :

$$[U] = [K_9]^{-1}[\Delta B] + [K_9]^{-1}[K_8][\Delta \delta] \quad (\text{III.85})$$

Les équations (III.77), (III.78) et (III.85) donne :

$$[\Delta E'_q] = [K_{10}][\Delta \delta] + [K_{11}][\Delta B] \quad (\text{III.86})$$

Aussi, les équations (III.86), (III.76), (III.85) et (III.81) donnent :

$$[\Delta T_e] = [K_1 + K_2 K_{10}][\Delta \delta] + [K_2][K_{11}][\Delta B] \quad (\text{III.87})$$

$$[\Delta V_t] = [H_Q + H_D K_9^{-1} K_8][\Delta \delta] + [H_D][K_9]^{-1}[\Delta B] \quad (\text{III.88})$$

Où :

$$[\Delta T_e] = [K_{12}][\Delta \delta] + [K_{13}][\Delta B] \quad (\text{III.89})$$

$$[\Delta V_t] = [C][\Delta \delta] + [W][\Delta B] \quad (\text{III.90})$$

Avec :

$$[K_d] = [K_5] - [K_6][K_3][K_4], [K_c] = [K_6][K_3][K_a] \quad (\text{III.91})$$

$$[K_8] = [I + K_r A_0 G_I A_0^T A_0 V_{t0} A_0^T]^{-1} [K_h][H_Q] \quad (\text{III.92})$$

$$[K_9] = [I + K_r A_0 G_I A_0^T A_0 V_{t0} A_0^T]^{-1} [K_r A_0 A_0^T - K_h H_D] \quad (\text{III.93})$$

$$[K_{10}] = [K_3 K_a (A_0^T - H_D) K_9^{-1} K_8 - (K_3 K_a H_Q + K_3 K_4)] \quad (\text{III.94})$$

$$[K_h] = [K_r][A_0 + A_0 G_I A_0^T B_0 A_0] \quad (\text{III.95})$$

$$[W] = [H_D][K_9]^{-1} \quad (\text{III.96})$$

$$[K_{11}] = [K_3 K_a (A_0^T - H_D)][K_9]^{-1} \quad (\text{III.97})$$

$$[K_{13}] = [K_2][K_{11}], \quad [K_{12}] = [K_1 + K_2 K_{10}] \quad (\text{III.98})$$

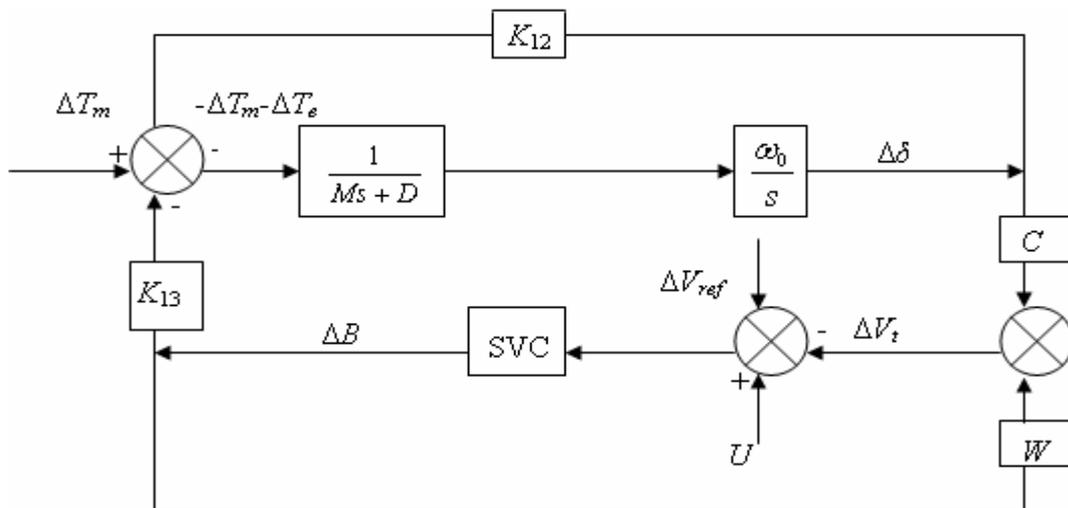
$$[C] = [H_Q + H_D K_9^{-1} K_8] \quad (\text{III.99})$$

$$[H_Q] = [I + K_c]^{-1} [H_d] \text{ et } [H_D] = [I + K_c]^{-1} [K_c][A_0]^T \quad (\text{III.100})$$

Les paramètres, les  $K_1 \dots K_6$ , le  $K_d$ , le  $K_c$ , et  $K_{10}$ ,  $K_a$ ,  $C$ ,  $K_{12}$ ,  $G_I$ , et le  $H_Q$  sont des matrices carrées chacun de l'ordre  $(ng \times ng)$  et le  $H_D$ ,  $W$ ,  $K_{11}$ ,  $K_{13}$  sont des matrices d'ordre  $(ng \times nsvc)$ . aussi  $K_8$  et  $A_0$  sont des matrices de l'ordre  $(nsvc \times ng)$  et  $K_r$ ,  $B_0$  et  $K_9$  des matrices carrées chacun d'ordre  $(nsvc \times nsvc)$ , où T est la transposée de la matrice, et  $A_0$  donné par:

$$A_0 = \begin{matrix} & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & nsvc & ng \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ \vdots \\ nsvc \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \end{matrix} \quad (\text{III.101})$$

Si le  $nsvc = ng$  (c.à.d un SVC est situé dans tous les nœuds générateurs), donc la matrice  $A_0$  est une matrice diagonale égale à l'unité, et si  $A_0 = 0$  donc il n'y a pas de SVC incorporé dans les nœud générateur.



**Fig. III.5** Modèle de la machine avec les nouveaux paramètres de contrôle.

L'équation (III.89) représente une nouvelle formule du couple électromagnétique développé. Le premier terme représente le coefficient de synchronisation de couple, qui doit être positif pour assurer la stabilité de système, le deuxième terme représente le degré auquel une variation de la susceptance de SVC peut causer une accélération relative des machines. Cette limite peut être définie comme facteur d'efficacité du SVC. Augmenter ce facteur donne plus de stabilité au système. La Fig. III.5 montre le modèle final de la machine contenant l'effet de la compensation de SVC. Dans les études suivantes, les signaux de sortie  $\Delta V_t$ ,  $U$  sont injectés à l'entrée correspondante au gain du contrôleur du SVC [Gib 82], et incorporés dans chaque machine (Fig. III.5). Le système complet ainsi définie peut être régie par l'équation d'état exprimée comme suit:

$$\dot{X} = AX + F \Delta B \quad (\text{III.102})$$

## III.5 INCORPORATION DES FACTS

Le nombre de FACTS 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 FACTS 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 SVC.

### III.5.1 Vecteur Propre

Pour chaque valeur propre  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), le vecteur colonne  $\Phi_i$  de dimension  $n$ , qui satisfait l'équation (III.103), est appelé vecteur propre de droite de  $A$  associé à  $\lambda_i$ .

$$A \Phi_i = \lambda_i \Phi_i \quad (\text{III.103})$$

De même, le vecteur ligne  $\Psi_i$  de dimension  $n$ , qui satisfait l'équation (III.104), est appelé vecteur propre de gauche de  $A$  associée à  $\lambda_i$ .

$$\Psi_i A = \lambda_i \Psi_i \quad (\text{III.104})$$

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 [Sin 02]. Les vecteurs propres peuvent être normalisés tel que leur produit donne :

$$\Psi_i \Phi_i = 1 \quad (\text{III.105})$$

Il reste à noter 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 :

$$\Psi_j \Phi_i = 0 \quad (\text{III.105})$$

### III.5.2 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 [YU 83]. Elle est définie par :

$$P = [P_1 \quad P_2 \quad \dots \quad P_n] \quad (\text{III.107})$$

Avec :

$$P_1 = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ \vdots \\ \vdots \\ P_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{i1} \Psi_{i1} \\ \Phi_{i2} \Psi_{i2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \Phi_{in} \Psi_{in} \end{bmatrix} \quad (\text{III.108})$$

L'élément  $P_{ki} = \Phi_{ki} \Psi_{ki}$  est appelé *facteur de contribution*, et mesure la contribution de la  $k^{\text{ème}}$  variable d'état dans le  $i^{\text{ème}}$  mode. Les facteurs de contribution sont très utiles dans l'identification des variables d'état ayant une grande influence sur un mode donné. La matrice suivante explique ce raisonnement :

$$P = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 \\ \chi_1 & P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ \chi_2 & P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ \chi_3 & P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ \chi_4 & P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{III.109})$$

Pour chaque  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ , la matrice de contribution montre le degré d'implication de chaque variable d'état  $x_1, x_2, x_3, x_4$ . 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 :

$$\sum_{j=1}^n P_{ji} = \sum_{i=1}^n P_{ij} = 1 \quad (\text{III.110})$$

Une autre propriété intéressante est la contribution des sous-systèmes [Rou 98]. 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 :

$$P_{Si} = \sum_{j \in S} P_{ji} \quad (\text{III.111})$$

## III.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle linéaire du système électrique sous la forme de représentation d'état. Cette représentation est la plus adaptée dans le cas de l'analyse de la stabilité en petit mouvement.

Les équations dynamiques du modèle du SVC ont été présentées, montrant l'effet de la susceptance des dispositifs SVC. Ils permettent aussi via la matrice A0 de tenir compte de l'effet des dispositifs SVCs incorporés dans le réseau électrique.

# CHAPITRE IV

## OPTIMISATION DES SVCs PAR LES AG

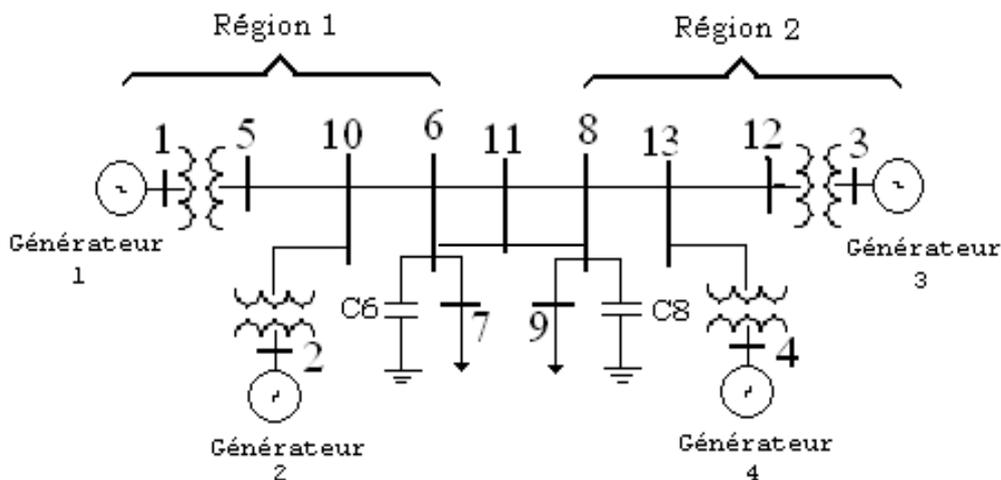
### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons procéder à l'implantation des dispositifs SVC dans un réseau électrique. Le nombre de SVC à installer n'est pas forcément celui des générateurs. Par conséquent, nous devons prendre en considération le choix de l'emplacement optimal offrant le meilleur rendement. La solution à ce problème sera donc donnée par la matrice des facteurs de contribution.

Il sera aussi question d'optimiser les paramètres des SVCs au moyen des AG. L'objectif consiste à trouver les valeurs optimales qui permettent aux SVCs d'assurer un amortissement satisfaisant des oscillations rotoriques, tout en garantissant la stabilité globale du système.

### IV. 2 Réseau d'application

Le système de puissance étudié dans cette section est un réseau à deux régions interconnectées dont le schéma unifilaire est représenté par la figure IV.1. Ce système, introduit par [Kle 91], a été adopté dans le but d'étudier le phénomène des oscillations électromécaniques entre différentes régions de production. Il est constitué de deux régions symétriques, comportant chacune deux générateurs identiques, reliées à travers une ligne de 220 km. Les données du système sont reportés en annexe A [Has 01].



**Fig. IV.1** Diagramme unifilaire du réseau 2 Régions-4 machines.

### IV. 3 Implantation des SVCs

Cette partie consiste à simuler des petites perturbations de charge permettant l'analyse de la stabilité dynamique dans le domaine temporel sans aucune commande et avec incorporation du SVC.

#### IV. 3. 1 Emplacement optimal des SVCs

Etant donné la configuration du réseau d'application, le nombre de SVC choisi dans cette étude sera égal à deux et leur emplacement sera déterminé en utilisant la matrice des facteurs de contribution détaillée précédemment dans le chapitre III.

Le tableau IV.1 présente les modes dominants ainsi que les fréquences et les facteurs d'amortissement correspondants, obtenus pour une perturbation de 5% du couple électromécanique au niveau du générateur G2.

**Tableau IV.1** Modes dominants du système sans SVC.

Modes	Amortissement $\xi$ (%)	Fréquence (Hz)
$-0.0322 \pm 6.4630i$	4.99e-003	1.0281
$-0.0322 \pm 4.0327i$	7.99e-003	0.6414
$-0.0322 \pm 5.2166i$	6.18e-003	0.8308

Le tableau IV.2 montre les facteurs de contribution des générateurs pour les modes oscillatoires électromécaniques. Nous pouvons faire les remarques suivantes :

- le mode ( $-0.0322 \pm 4.0327i$ ) est dominé par les générateurs G1 et G2, alors que le mode ( $-0.0322 \pm 5.2166i$ ) est dominé par les générateurs G3 et G4. Ces deux modes correspondent à des modes locaux et caractérisent l'interaction entre les générateurs d'une même région.
- Le mode ( $-0.0322 \pm 6.4630i$ ) correspond à un mode inter-régional 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 SVCs est obtenu par la disposition suivante :

- Un SVC sera placé sur le générateur 2 et un autre sur le générateur 4.

**Tableau IV.2** Contribution des générateurs dans les modes électromécaniques.

Modes	G1	G2	G3	G4
$-0.0322 \pm 6.4630i$	0.1593	<b>0.5579</b>	0.0189	<b>0.2635</b>
$-0.0322 \pm 4.0327i$	<b>0.7505</b>	<b>0.2436</b>	0.0052	0.0006
$-0.0322 \pm 5.2166i$	0.0005	0.0210	<b>0.7636</b>	<b>0.2146</b>

Les paramètres des SVCs utilisés sont représentés dans le tableau IV.3. La susceptance  $B_{svc}$  des SVCs est prise égale à 0.6 p.u [Ele 96].

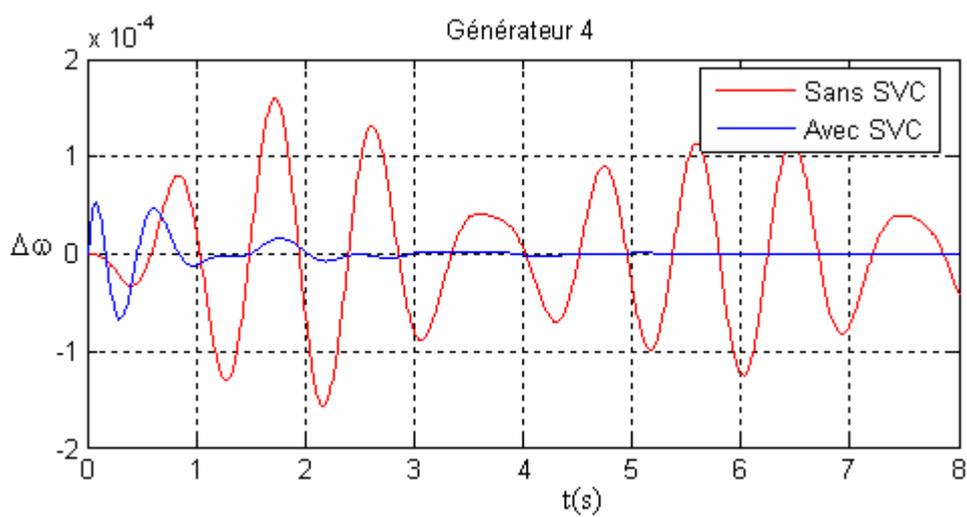
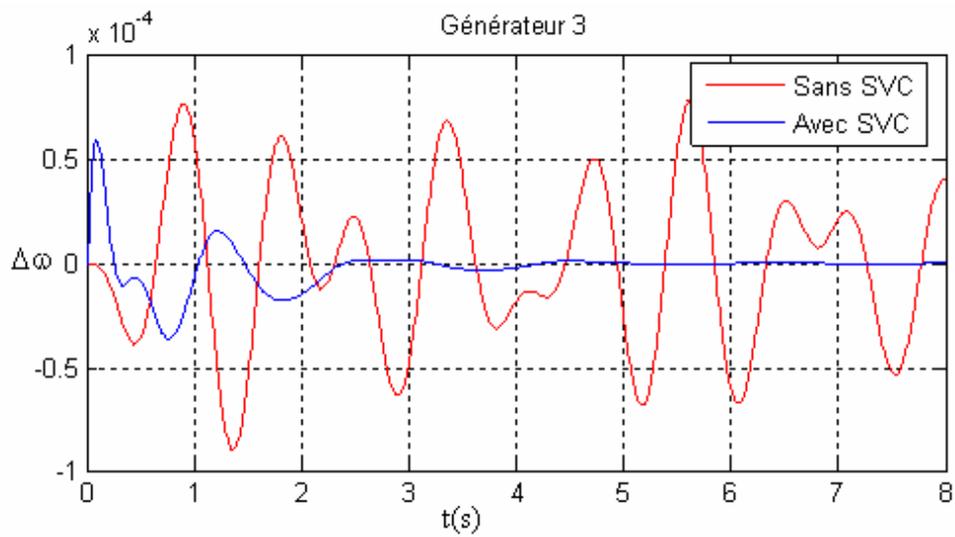
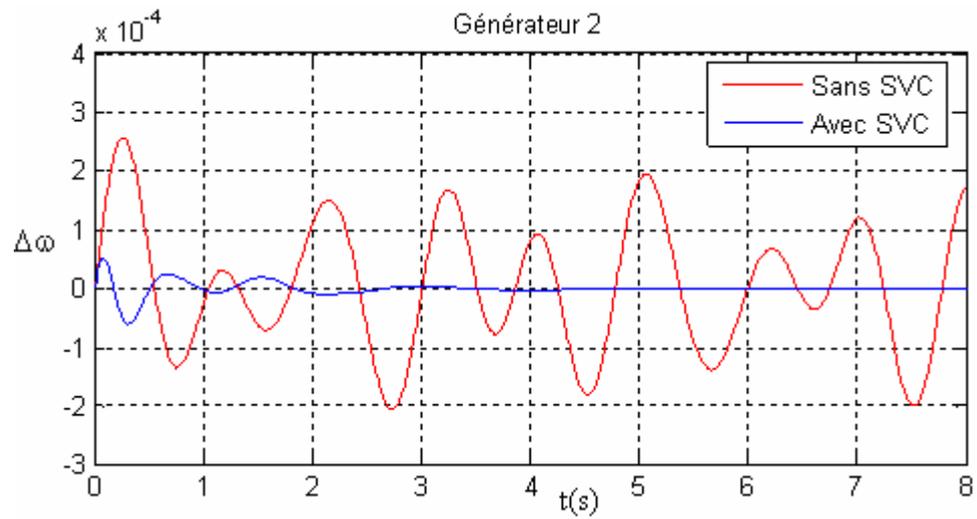
**Tableau IV.3** Paramètres des SVC non optimisés.

Paramètres des SVC <sub>s</sub>	$K_{ri}$	$T_{ri}$	$G_{fi}$
SVC <sub>1</sub>	5.1	0.8	10
SVC <sub>2</sub>	0.1	0.5	10

La figure IV.2, compare la déviation de la vitesse  $\Delta\omega$  pour une perturbation de 5 % du couple électromécanique, pour chaque générateur sans et avec SVCs et ce pour une charge nominale. Nous constatons que le système devient plus stable quand les SVCs sont implantés dans les nœuds générateurs définis par la méthode des facteurs de contribution.

#### IV.4 APPLICATION DES AGs

Dans cette partie, nous avons tenté d'optimiser les paramètres des SVC<sub>s</sub> au moyen des AGs. L'emplacement de ces dispositifs de compensation sera donc, comme défini précédemment, au niveau des générateurs G2 et G4. L'objectif est de trouver les valeurs optimales des paramètres des SVCs qui leur permettent d'obtenir un amortissement satisfaisant des oscillations électromécaniques.



**Fig. IV.2** Réponses temporelles de la vitesse des générateurs avec et sans SVC.

## IV. 4. 1 Formulation de la fonction objective

On considère qu'un système de puissance est bien amorti si l'amortissement de toutes les valeurs propres dépasse les 5% [Gra 00].

Notre objectif est d'arriver, via la procédure d'optimisation par les AGs, à un amortissement de plus de 5% pour tous les modes, et ce, en explorant les valeurs admissibles des paramètres des SVCs constituant l'espace de recherche.

La fonction de transfert qui correspond au SVC est la suivante :

$$K_i(s) = k_i \left( \frac{sT_{\omega i}}{1+sT_{\omega i}} \right) \left( \frac{K_{ri}}{1+sT_{ri}} \right)^2 \quad (\text{IV.1})$$

Du point de vue de la stabilité en petit mouvement, la valeur de la constante de temps  $T_{\omega}$  du filtre n'est pas critique. Le rôle de ce filtre est d'atténuer les fréquences indésirables (inférieures à 0.1 Hz) du signal d'entrée [Gra 00].

Le gain  $k_i$  du contrôleur PI est fixe pendant la procédure d'optimisation et est égale à l'unité. Les paramètres à optimiser sont donc :  $K_{ri}$ ,  $T_{ri}$  et  $G_{li}$  (défini dans le chapitre III) avec  $i = 1, \dots, n$  avec  $n$  représentant le nombre des SVCs placés dans notre système au moyen de la matrice  $A_0$ .

Soit  $\lambda_j$  la  $j^{\text{ème}}$  valeur propre du système avec SVC et  $\xi_j$  le facteur d'amortissement associé défini par :

$$\begin{cases} \lambda_j = \alpha_j + \beta_j \\ \xi_j = - \frac{\alpha_j}{\sqrt{\alpha_j^2 + \beta_j^2}} \end{cases} \quad j = 1, \dots, m \quad (\text{IV.2})$$

$m$  représente l'ordre du système.

On regroupe tous les facteurs d'amortissement  $\xi_j$  relatif à un point de fonctionnement  $p$  donné, dans le vecteur  $\Gamma_p$ .

Pour être résolu par les AGs, le problème d'optimisation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\max F = \min (\min (\Gamma_p)) \quad p = 1, \dots, r. \quad (\text{IV.3})$$

Sujet à :

$$K_{ri \min} \leq K_{ri} \leq K_{ri \max}$$

$$G_{li \min} \leq G_{li} \leq G_{li \max}$$

$$T_{ri \min} \leq T_{ri} \leq T_{ri \max}$$

Où :  $r$  est le nombre total des points de fonctionnement pris en considération.

$K_{ri}$  ;  $G_{li}$  et  $T_{ri}$  représentent les paramètres du  $i^{\text{ème}}$  contrôleur.

Ce problème est généralement très complexe à résoudre avec les méthodes conventionnelles car la fonction objective dépend des valeurs propres d'une matrice de dimension importante [Bom 00]. Nous présentons dans la section suivante, la solution de ce problème par les Algorithmes Génétiques.

#### IV. 4. 2 Résultats d'optimisation

Nous avons procédé à quelques modifications par rapport aux algorithmes génétiques décrits dans le chapitre II :

- Pour mieux exploiter l'espace de recherche, nous avons diversifié les individus dès le départ, ce qui nous a conduit à manipuler une population initiale assez importante.
- Une stratégie élitiste (ou basée sur l'élitisme) qui assure la présence du meilleur individu dans la génération future est utilisée. Pour cela, nous avons utilisé une autre méthode de sélection dite de classement. Son principe est très simple, les individus sont classés en fonction de leur fonction fitness en deux parties. Ceux figurant dans la partie inférieure seront éliminés. La partie supérieure sera d'abord directement copiée dans la génération suivante, à laquelle une autre partie, issue des opérateurs de croisement et de mutation, sera ajoutée.
- La méthode de croisement utilisée est celle dite méthode multipoints.

Les paramètres d'optimisation par les algorithmes génétiques ainsi que la définition de l'espace de recherche, sont donnés par le tableau IV.4.

**Tableau IV. 4** Paramètres d'optimisation.

Paramètres de l'AG		Espace de recherche
Type de codage	Binaire	$0.1 \leq K_r \leq 100$  $0.1 \leq G_{li} \leq 10$  $0.01 \leq T_r \leq 1$
Taille de la population	40	
Taille du chromosome	96	
Probabilité de croisement	0.1	
Points de croisement	2	
Probabilité de mutation	0.01	
Nombre de génération	30	

Pour diversifier l'espace de recherche, les 4 points de fonctionnement suivants ont été considérés :

- Une configuration du réseau avec une seule ligne entre les nœuds (6-11) et (8-11).
- Une forte charge égale à 1.8 de la charge nominale.
- Une faible charge égale à 0.3 de la charge nominale.
- Une charge nominale avec une perturbation de 5% du couple mécanique.

Le tableau IV. 5 présente les paramètres des SVCs obtenus par le biais de l'optimisation par les AGs.

**Tableau IV.5** Paramètres des SVCs obtenus après optimisation

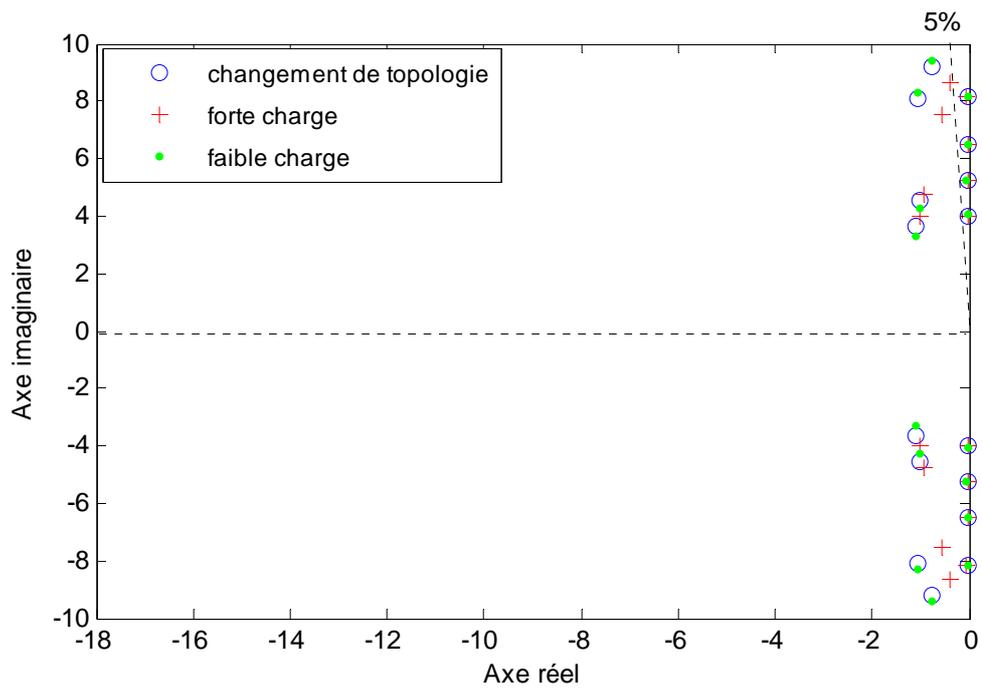
Paramètres des SVC <sub>s</sub>	$K_{ri}$	$T_{ri}$	$G_{li}$
SVC <sub>1</sub>	85.6206	0.4581	2.0481
SVC <sub>2</sub>	90.4620	0.0693	4.1414

Afin de tester la robustesse du dispositif SVC optimisé par l'Algorithme Génétique, nous avons proposé trois cas de figures :

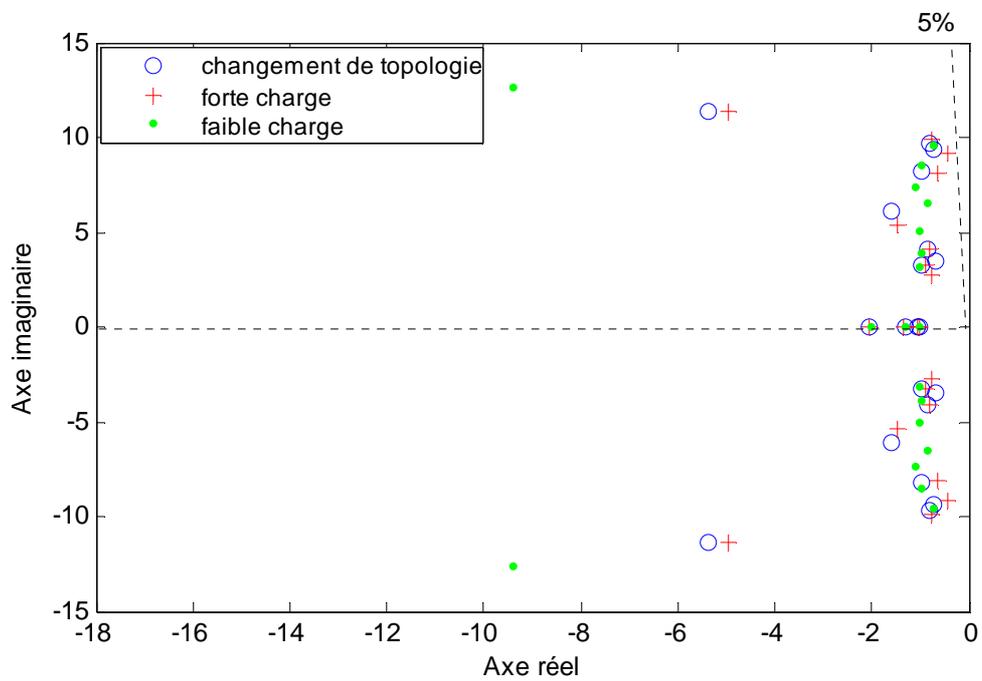
- Une forte charge égale à 1.5 de la charge nominale.
- Une faible charge égale à 0.5 de la charge nominale.
- Un changement de topologie (ligne 6 -11 ouverte).

Le tracé des valeurs propres dans le plan complexe, présenté par les figures IV.3, IV.4 et IV.5, traduit le comportement du réseau (sans SVC ; avec SVCs non optimisés au niveau des générateurs G2 et G4 et avec SVCs optimisés par AG) vis-à-vis des différentes perturbations simulées.

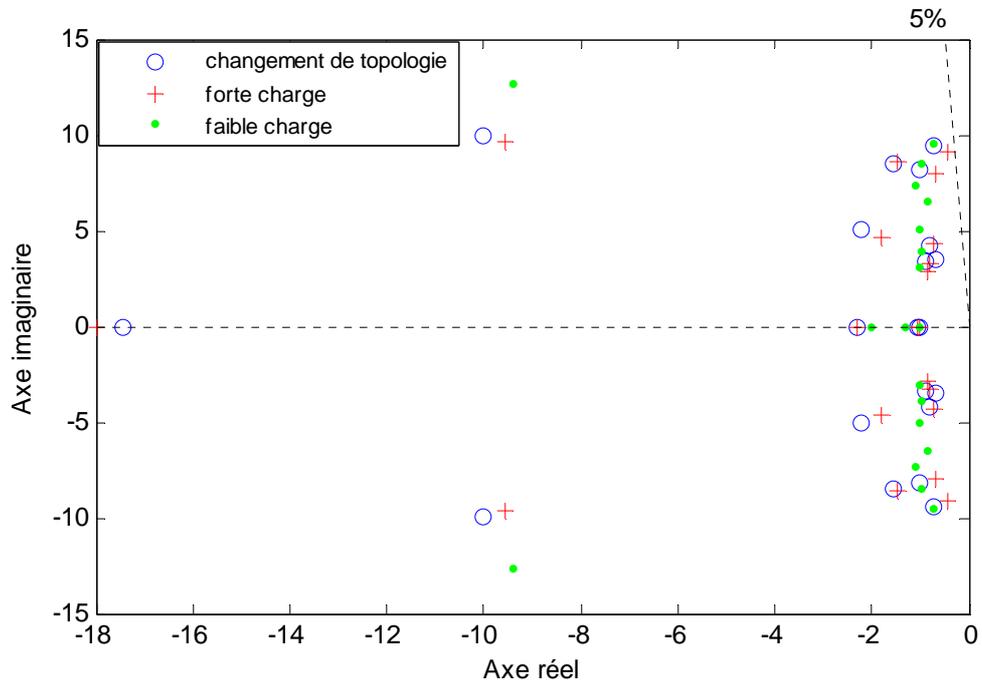
Nous constatons que dans le cas du réseau sans SVCs, une partie des valeurs propres est localisée à la droite du secteur défini par des facteurs d'amortissement inférieurs à 5%. Les cas des SVCs non optimisés et optimisés par AG voient la totalité de leurs valeurs propres repoussées vers la partie négative du plan complexe avec un amortissement nettement supérieure à 5%. Nous obtenons donc, grâce à l'insertion des SVCs, une amélioration de la stabilité du système, qui est d'autant plus perceptible avec les SVCs optimisés par les algorithmes génétiques.



**Fig. IV.3** *Tracé des valeurs propres sans SVC.*

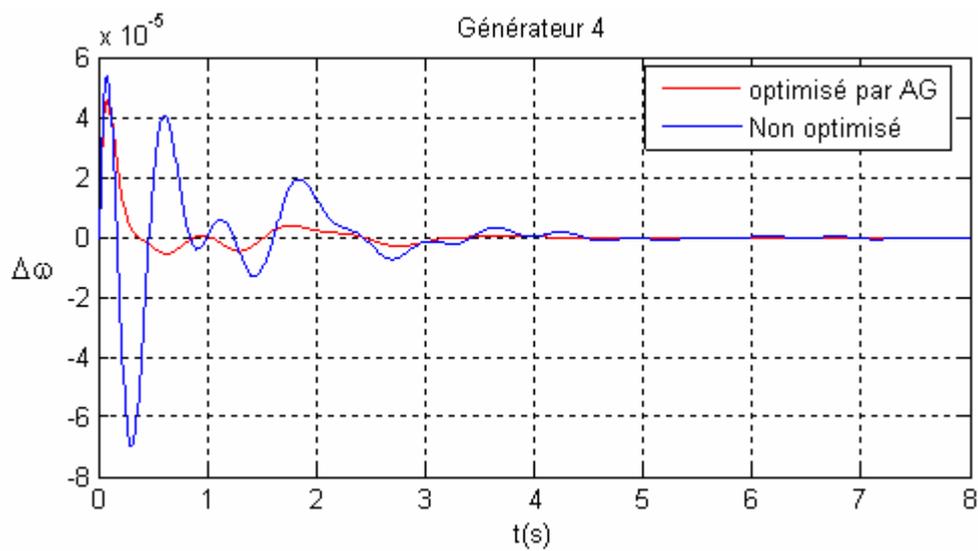
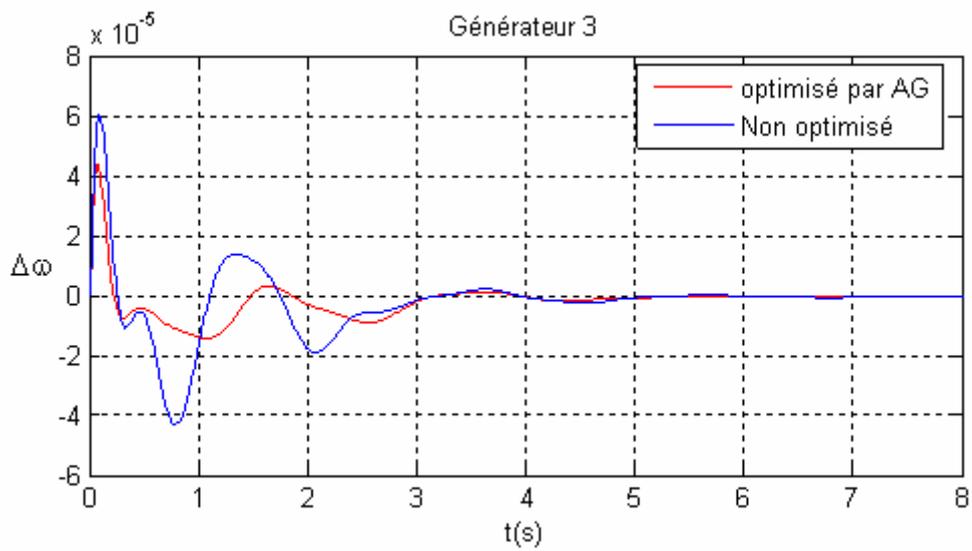
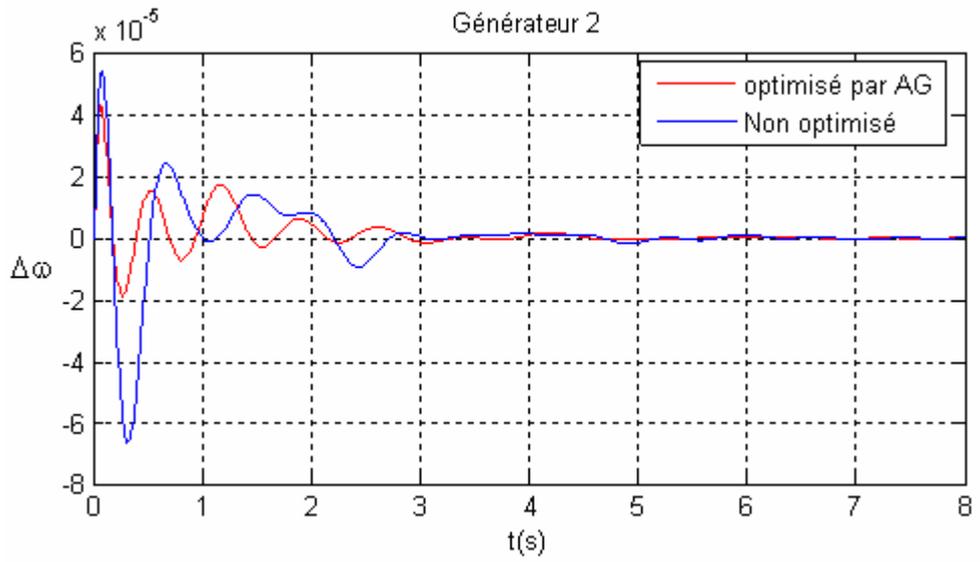


**Fig. IV.4** *Tracé des valeurs propres avec SVCs non optimisés.*

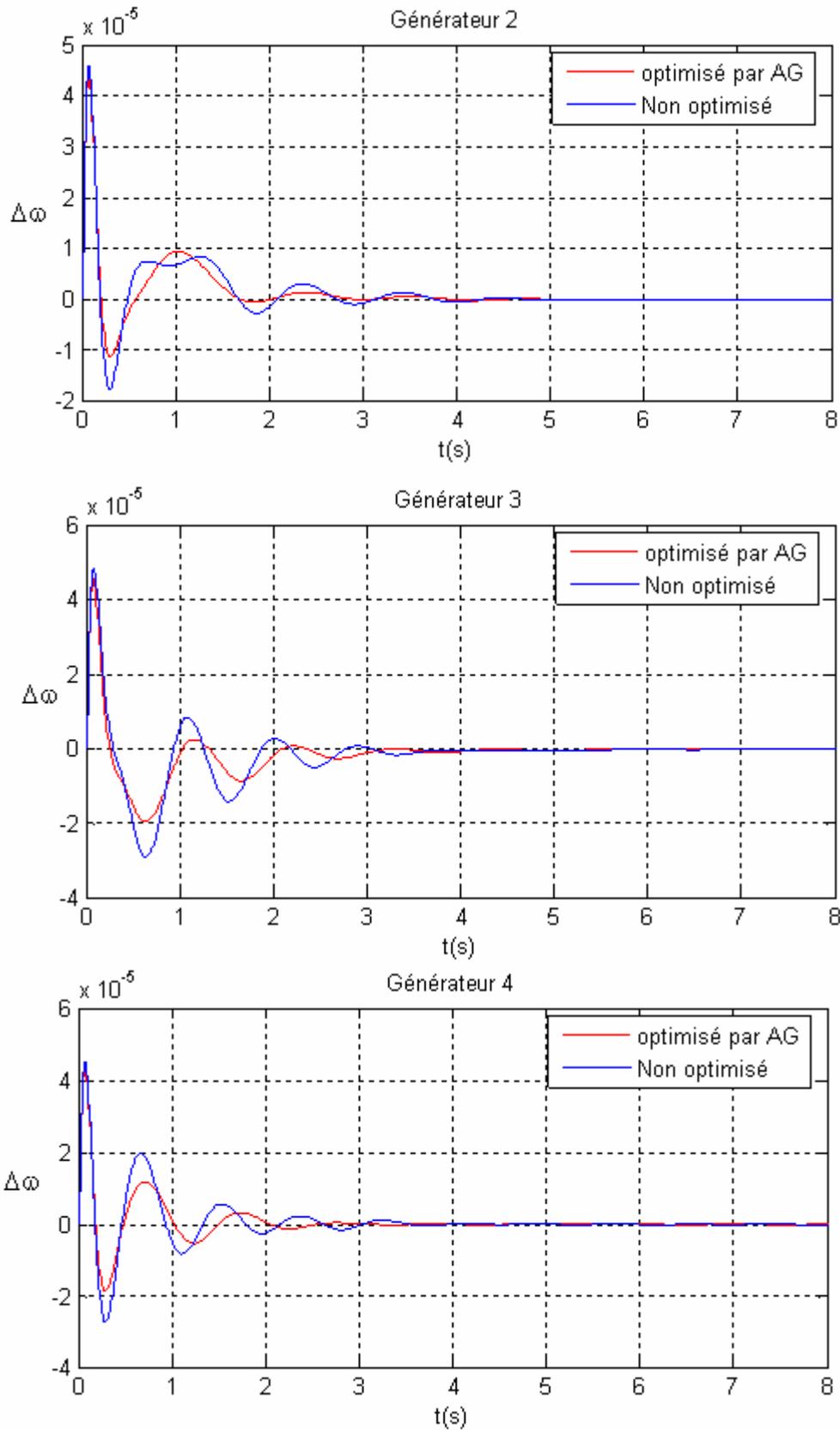


**Fig. IV.5** *Tracé des valeurs propres avec SVCs optimisés par AG.*

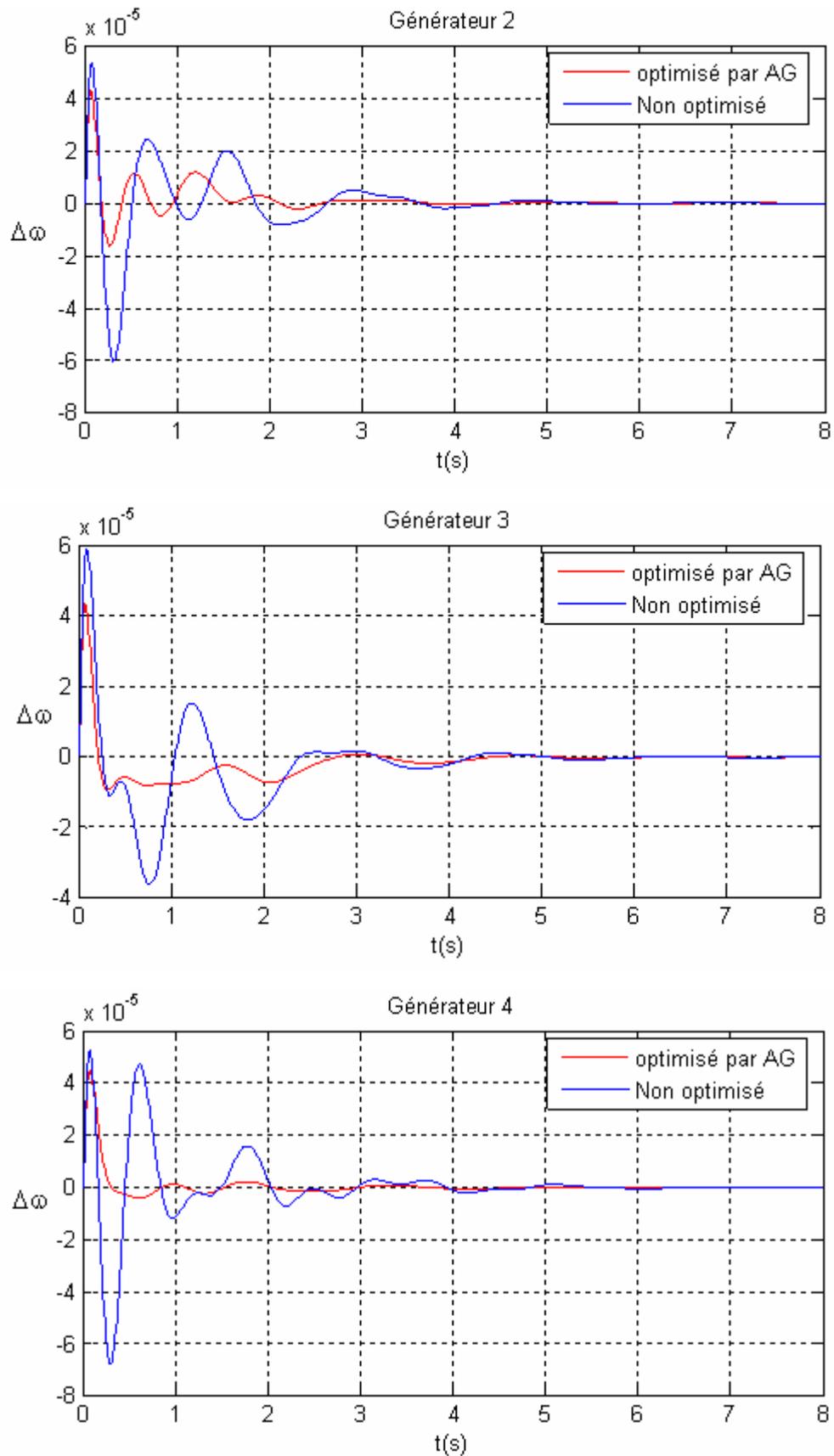
Les figures IV.6, IV.7 et IV.8 comparent les différentes déviations de la vitesse  $\Delta\omega$  pour les mêmes cas de perturbations citées plus haut. Ces résultats indiquent que l'amortissement est plus important lorsque les paramètres du SVC sont optimisés. La stabilité du système est nettement améliorée.



**Fig. IV. 6** Déviation de la vitesse des générateurs pour une forte charge avec SVC non optimisé et optimisé par AG.



**Fig. IV. 7** Déviation de la vitesse des générateurs pour une faible charge avec SVC optimisé par AG et SVC non optimisé.



**Fig. IV. 8** Déviation de la vitesse des générateurs pour un changement de topologie (suppression de ligne 6-11) avec SVC optimisé par AG et SVC non optimisé.

## IV.5 CONCLUSION

L'application des SVCs a rendu le système stable et cela sans réglage précis des paramètres. Cette stabilité sera considérablement améliorée par le biais de l'optimisation des paramètres du SVC par les algorithmes génétiques. 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. L'algorithme proposé permet de déterminer les paramètres des SVCs de manière à augmenter l'amortissement du système, quelles que soient les conditions de son fonctionnement ou de sa topologie.

Les résultats de simulation montrent que grâce à cette technique la stabilité dynamique du réseau d'énergie électrique est améliorée. Les algorithmes génétiques ont facilité la procédure d'optimisation parce qu'ils utilisent directement la fonction objective et non une de ses dérivées ou autres connaissances relatives. L'avantage est que l'on peut aisément modifier la fonction objective en y ajoutant d'autres contraintes.

Comme l'Optimisation par Essaims de Particules appartient à la famille des Algorithmes Evolutionnaires, nous lui avons consacré l'ensemble du chapitre suivant dans le but de faire une étude comparative des deux techniques. Il sera aussi question de vérifier l'impact d'une pareille optimisation sur la stabilité du réseau.

# CHAPITRE V

## OPTIMISATION DES SVCs PAR L'OEP

### V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons procéder à l'optimisation par essais de particules des paramètres des SVCs placés dans un réseau similaire à celui utilisé dans le chapitre IV et sous les mêmes conditions de fonctionnement, à savoir : le nombre de SVCs, les niveaux de charge appliqués ainsi que le changement de topologie. Cette similitude nous permettra d'effectuer une étude comparative de l'OEP et de l'AG.

Une étude paramétrique nous permettra d'ajuster les paramètres de l'OEP de manière à obtenir de meilleurs résultats d'optimisation, dans le but d'améliorer la stabilité dynamique du réseau.

### V.2 Formulation de la fonction objective

Notre objectif est d'arriver, via la procédure d'optimisation par l'OEP, à un amortissement de plus de 5% pour tous les modes, et ce, en explorant les valeurs admissibles des paramètres des contrôleurs existant dans l'espace de recherche. La procédure d'optimisation se portera sur les paramètres du SVC définis dans le chapitre III.

De manière identique à celle présentée au chapitre précédent, la fonction objective est similaire à celle de l'équation IV.3. Nous présentons dans la section suivante, la solution de ce problème par l'optimisation des paramètres des SVCs par essais de particules.

### V.3 Choix des paramètres de l'OEP

L'algorithme de l'OEP utilisé dans cette section a été détaillé dans le chapitre II. Nous pouvons modifier la position de chaque agent par le concept de vitesse. La vitesse modifiée de chaque agent s'écrira de la manière suivante [Nak 03]:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1rand_1 \times ( pbest_i - s_i^k ) + c_2rand_2 \times ( gbest - s_i^k ) \quad (V.1)$$

Le choix des paramètres reste en grande partie empirique mais suit une certaine logique. Après un grand nombre d'essais, nous avons constaté que la variation du facteur de pondération  $C_j$  n'influe pas sur le résultat, ce qui nous a permis de le maintenir fixe à une

valeur choisie égale à 2,4. Nous avons aussi fixé la population et le nombre d'itérations à 10 puis nous avons fait varier  $w_{max}$  et  $w_{min}$ .

Pour diversifier l'espace de recherche, les 4 points de fonctionnement suivants ont été considérés (mêmes conditions que dans le chapitre IV) :

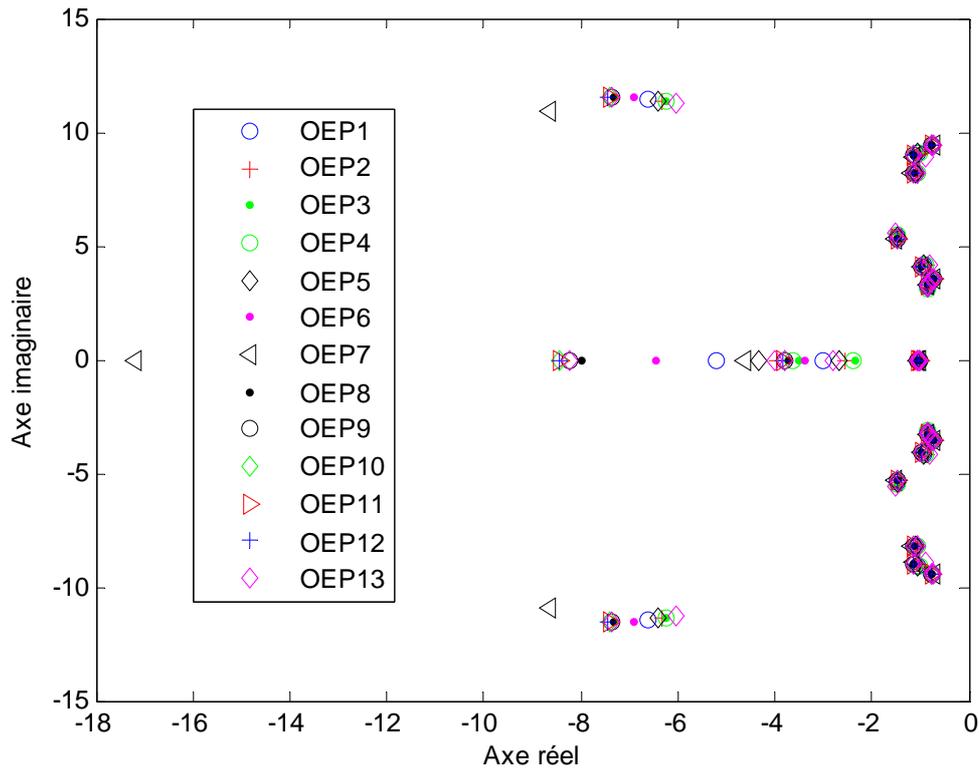
- Une configuration du réseau avec une seule ligne entre le nœud 8 et 11.
- Une forte charge égale à 1.8 de la charge nominale.
- Une faible charge égale à 0.3 de la charge nominale.
- Une charge nominale avec une perturbation de 5% du couple mécanique.

Le tableau V.1 présente les paramètres des SVCs obtenus par le biais de l'optimisation par l'OEP.

**Tableau V.1** Paramètres des SVCs obtenus après optimisation.

	Paramètres de l'OEP $w_{max}$ et $w_{min}$	Paramètres des SVCs optimisés par l'OEP		
		$G_{I1}-G_{I2}$	$K_{r1}-K_{r2}$	$T_{r1}-T_{r2}$
1	0.9	5.1569	70.6537	0.2016
	0.2	8.1346	79.5675	0.4448
2	0.9	5.8976	78.1276	0.2757
	0.3	8.8753	87.0414	0.5189
3	0.9	6.2987	82.1748	0.3158
	0.4	9.2764	91.0887	0.5590
4	0.9	6.2049	81.2287	0.3064
	0.5	9.1826	90.1425	0.5496
5	0.9	5.6266	75.3928	0.2486
	0.6	8.6043	84.3067	0.4918
6	0.9	4.7065	66.1080	0.1566
	0.7	7.6842	75.0218	0.3998
7	0.9	3.6836	55.7862	0.0543
	0.8	6.6613	64.7000	0.2975
8	0.8	4.3636	62.6485	0.1223
	0.1	7.3413	71.5623	0.3655
9	0.7	4.3157	62.1651	0.1175
	0.1	7.2934	71.0790	0.3607
10	0.6	4.2880	61.8851	0.1147
	0.1	7.2657	70.7989	0.3580
11	0.5	4.2816	61.8207	0.1141
	0.1	7.2593	70.7346	0.3573
12	0.4	4.2936	61.9418	0.1153
	0.1	7.2713	70.8557	0.3585
13	0.3	4.3175	62.1826	0.1177
	0.1	7.2952	71.0964	0.3609

La figure V.1 représente les valeurs propres du système obtenus pour chaque cas de variation des paramètres de l'OEP cité plus haut et ce pour une charge nominale. Nous constatons que le cas OEP7 présente des valeurs propres qui s'éloignent le plus de l'axe imaginaire. Cette constatation nous permet d'affirmer que les paramètres définis dans le cas OEP7 donnent les meilleurs résultats d'optimisation et seront utilisés pour tester la robustesse de la méthode OEP. Nous procéderons aussi dans la section suivante à une comparaison des résultats d'optimisation par AG avec ceux obtenus par l'OEP.



**Fig. V.1** *Tracé des valeurs propres sur le plan complexe sans SVC.*

#### V.4 Test de robustesse de l'OEP

Les résultats d'optimisation par OEP ainsi que ceux obtenus par AG nous permettent de faire une étude comparative des deux méthodes de manière à déterminer la méthode qui produit la meilleure optimisation des paramètres des SVCs [Kar 06-1] [Kar 06-2].

Le tableau V.2 présente les paramètres des SVCs optimisés par les deux méthodes étudiées.

**Tableau V.2** Paramètres des SVCs obtenus par AG et OEP.

Paramètres des SVC <sub>s</sub>	Méthode d'optimisation	Nombre Population	Nombre d'itération	$K_{ri}$	$T_{ri}$	$G_{li}$
SVC <sub>1</sub>	AG	40	30	85.6206	0.4581	2.0481
SVC <sub>2</sub>				90.4620	0.0693	4.1414
SVC <sub>1</sub>	OEP	10	10	55.7862	0.0543	3.6836
SVC <sub>2</sub>				64.7000	0.2975	6.6613

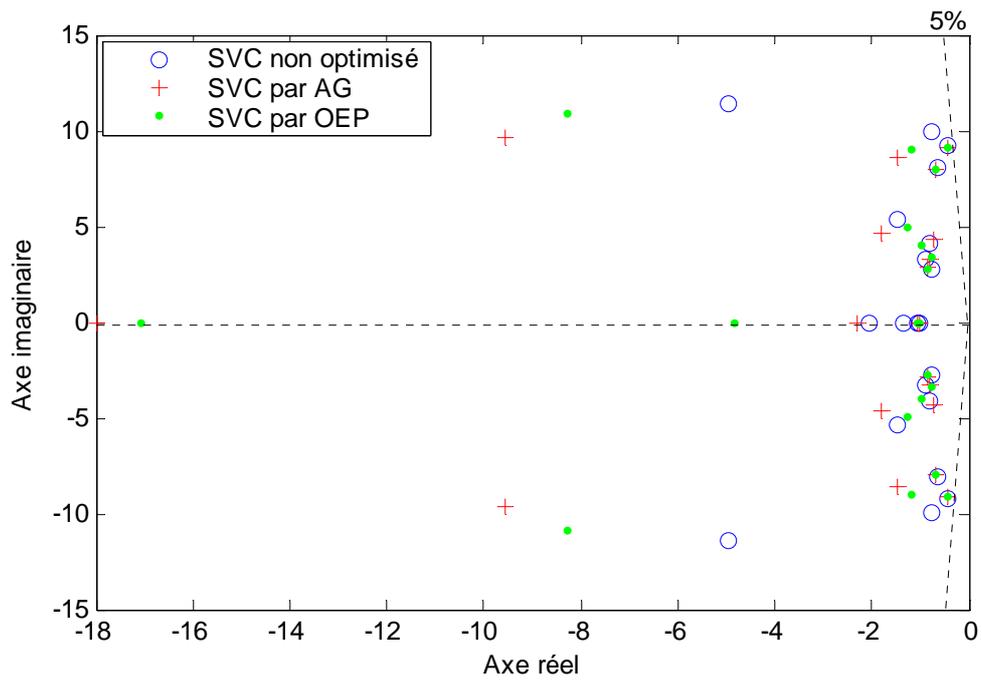
Afin de tester la robustesse du dispositif SVC optimisé par l'OEP, nous avons proposé trois cas de figures (identiques à ceux pris dans le chapitre IV):

- Une forte charge égale à 1.5 de la charge nominale.
- Une faible charge égale à 0.5 de la charge nominale.
- Un changement de topologie (ligne 6-11 ouverte).

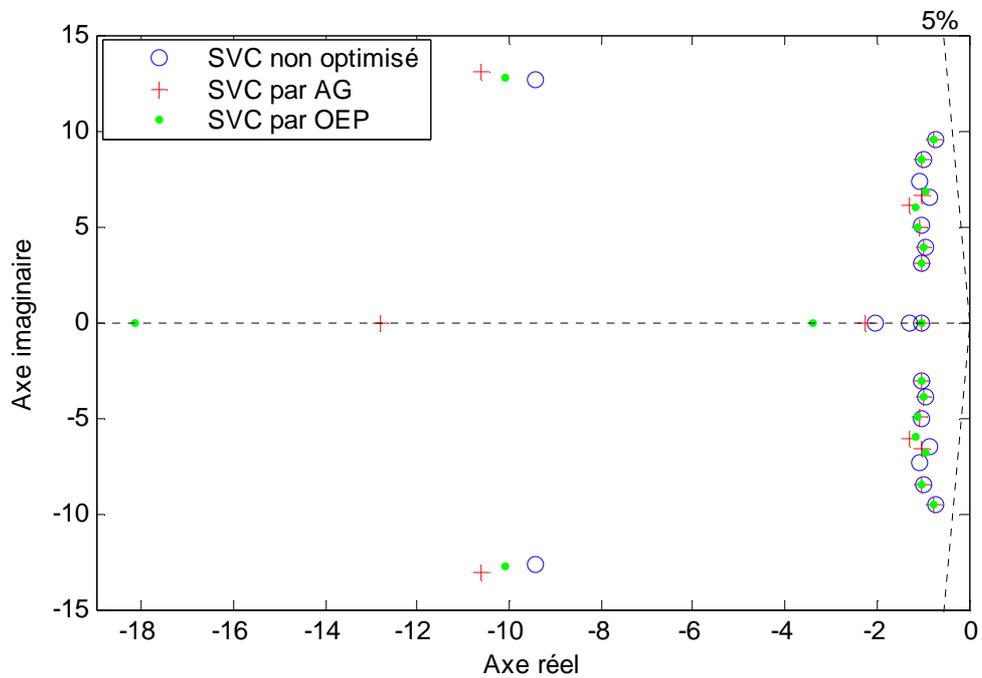
Le tracé des valeurs propres dans le plan complexe, présenté par les figures V.2, V.3 et V.4, traduit le comportement du réseau face aux différentes perturbations simulées et ce, avec SVCs non optimisés, SVCs optimisés par AG et finalement SVCs optimisés par OEP.

Nous constatons que par la seule implantation du SVC dans le réseau, les valeurs propres sont repoussées vers la partie négative du plan complexe avec un facteur d'amortissement supérieur à 5%. L'application de l'OEP permet d'améliorer cet amortissement en repoussant les valeurs d'avantage vers la gauche. Ces résultats montrent aussi une similitude entre l'optimisation des SVCs par AG et OEP lors de l'analyse des valeurs propres obtenues pour différents points de fonctionnement.

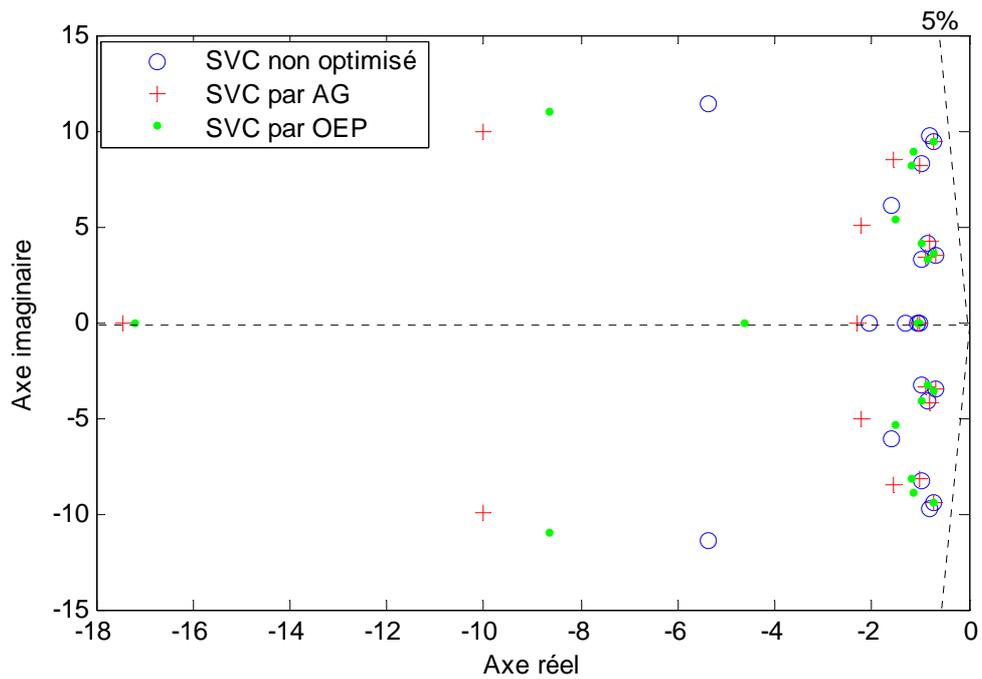
Nous constatons aussi que pour une forte charge ainsi que pour la perte de la ligne, l'optimisation par algorithme génétique donne de meilleurs résultats que ceux obtenus par l'essaim de particules. Par contre, pour les faibles niveaux de la charge, l'OEP fournit un meilleur amortissement du système de puissance que celui de l'AG.



**Fig. V.2** *Tracé des valeurs propres sur le plan complexe pour une forte charge.*

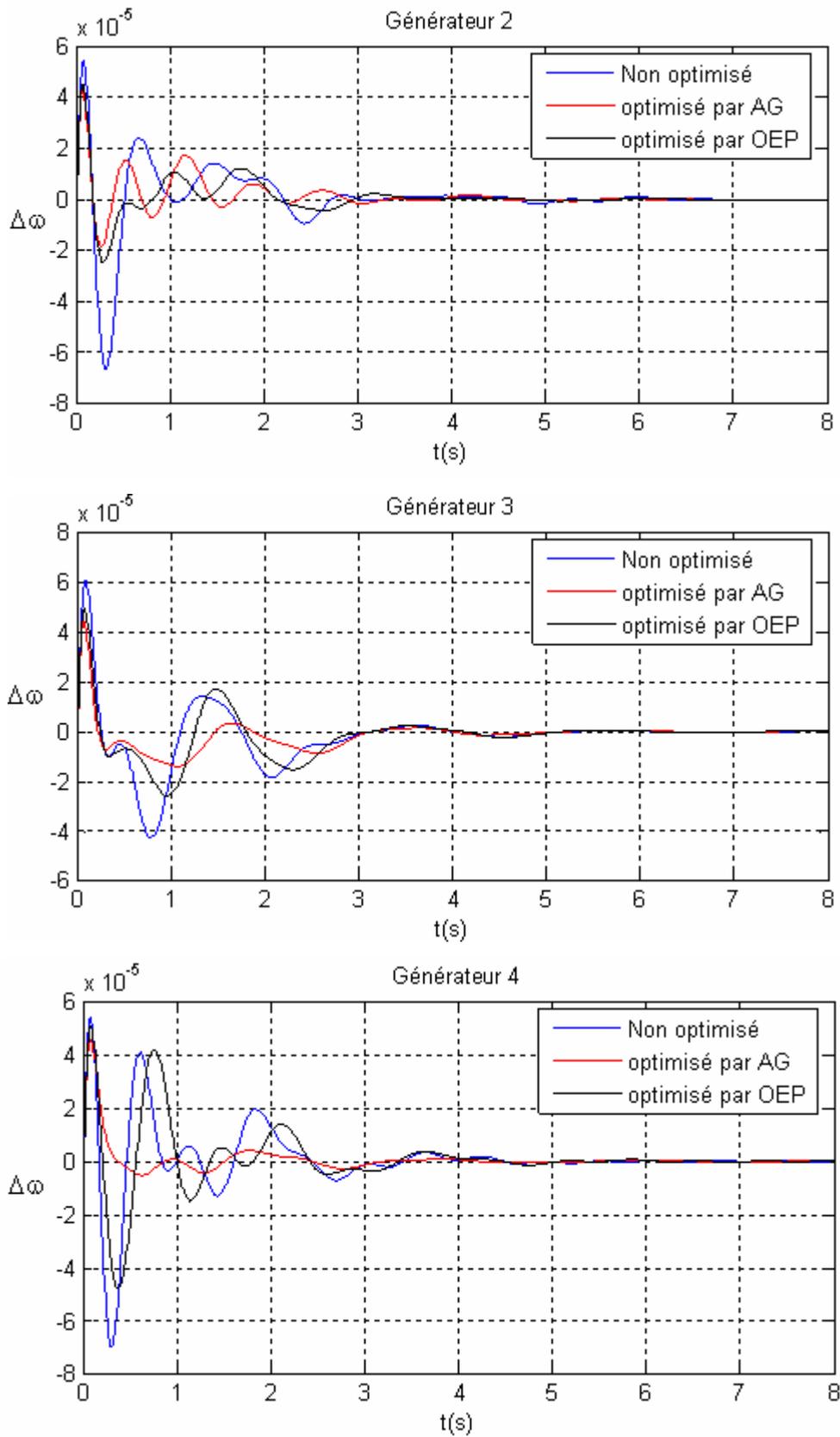


**Fig. V.3** *Tracé des valeurs propres sur le plan complexe pour une faible charge.*

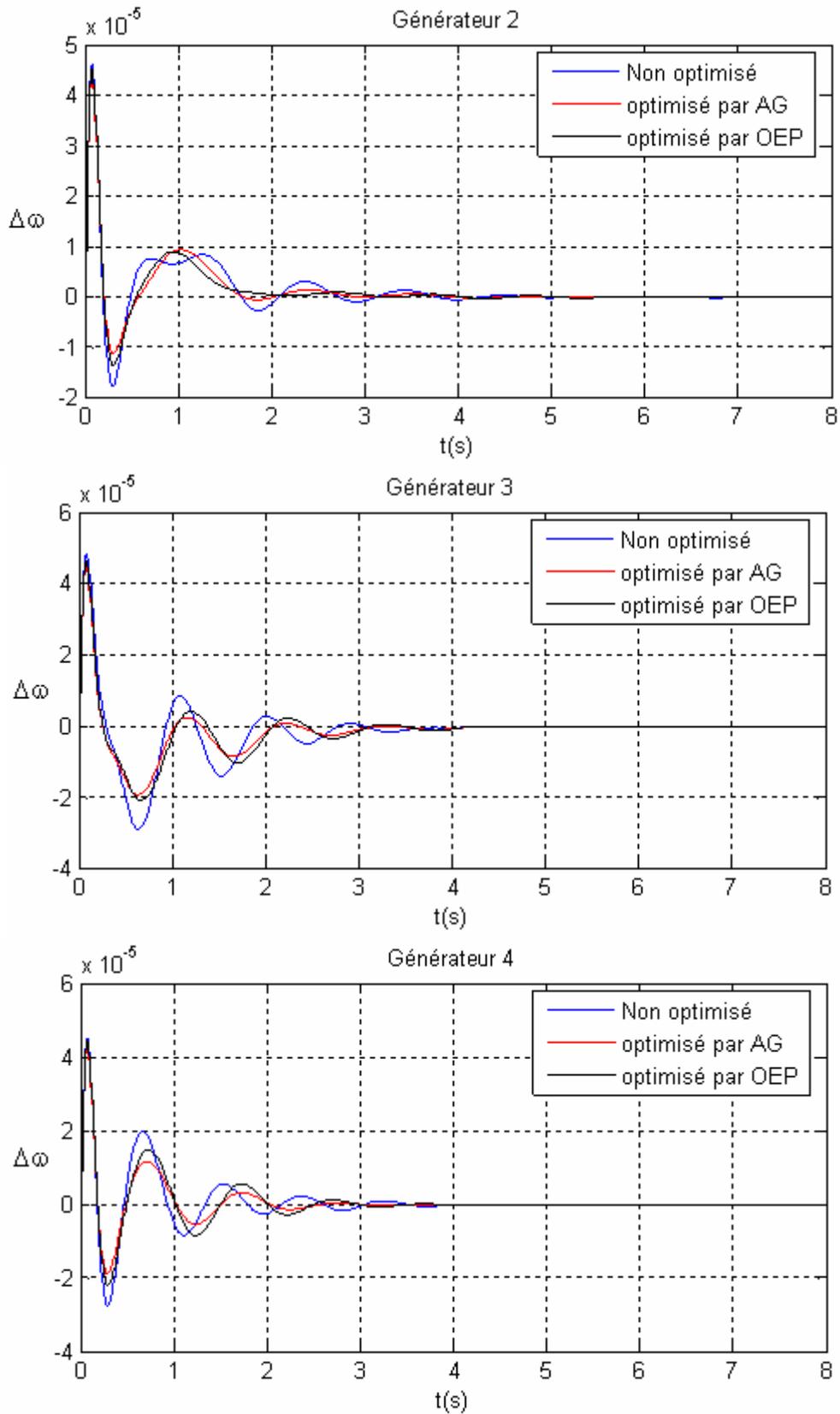


**Fig. V.4** *Tracé des valeurs propres sur le plan complexe pour un changement de topologie.*

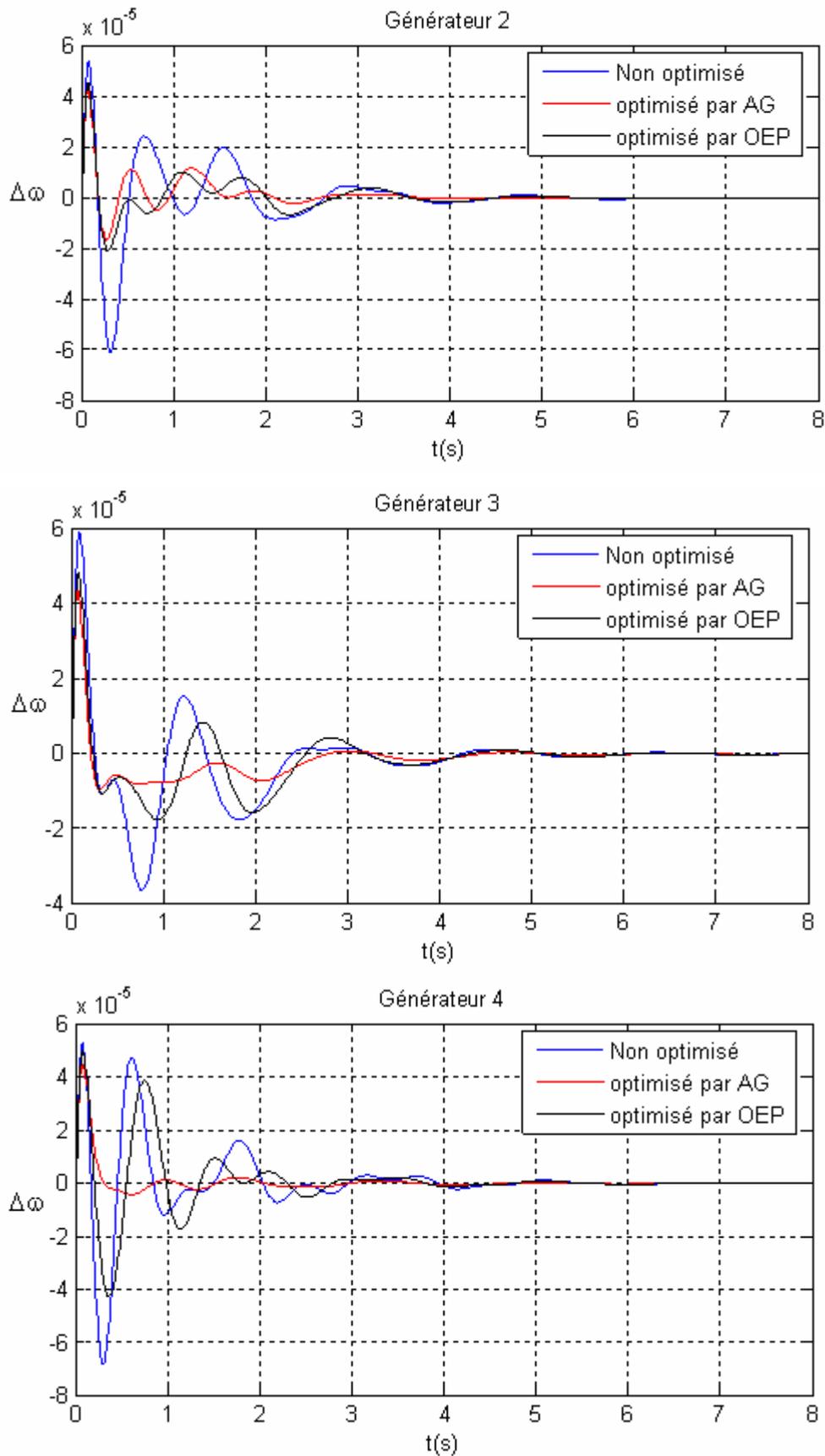
Les fig. V.5, V.6 et V.7 présentent les différentes déviations de la vitesse  $\Delta\omega$  pour les mêmes cas de perturbation cités plus haut. Ces résultats indiquent que l'amortissement est amélioré lorsque les paramètres du SVC sont optimisés par l'OEP. Le système tend vers son état initial.



**Fig. V. 5** Déviation de la vitesse des générateurs pour une forte charge avec SVC non optimisé et optimisé par AG et OEP.



**Fig. V.6** Déviation de la vitesse des générateurs pour une faible charge avec SVC non optimisé et optimisé par AG et OEP.



**Fig. V.7** Déviation de la vitesse des générateurs pour un changement de topologie (suppression de ligne 6-11) avec SVC non optimisé et optimisé par AG et OEP.

Il apparaît clairement que l'optimisation par essais de particules présente une parfaite robustesse, bien que les conditions de fonctionnement donnant ces résultats n'ont pas été pris en considération dans la procédure d'optimisation utilisée par l'OEP.

L'optimisation par AG présente une meilleure robustesse que l'OEP dans l'amélioration de la stabilité dynamique vis-à-vis des variations de niveaux de charge et de la topologie du réseau d'application. Toutefois, l'OEP présente les avantages suivants :

- Convergence plus rapide
- Population plus réduite
- Nombre d'itérations plus petit

## **V.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, une étude paramétrique a été élaborée pour déterminer les paramètres de l'algorithme OEP qui donnent les meilleurs résultats d'optimisation. Ainsi, chaque problème d'optimisation peut avoir ses propres paramètres et ses propres choix.

L'application de l'optimisation par essais de particules a rendu le système plus stable et cela pour un nombre de population et d'itérations réduit. Les résultats de simulation montrent que, grâce à cette technique, la stabilité dynamique du réseau d'énergie électrique est améliorée et la commande proposée présente une bonne robustesse vis-à-vis des conditions de fonctionnement du réseau.

# CONCLUSION GENERALE

L'étude présentée dans ce mémoire porte sur, l'application des algorithmes génétiques et de l'essaim de particules dans la synthèse et l'optimisation des paramètres des dispositifs SVCs. Le rôle de ces derniers est d'apporter l'amortissement nécessaire aux oscillations électromécaniques des générateurs, lorsque le système subit de petites perturbations autour de son point de fonctionnement.

Afin d'atteindre cet objectif, nous sommes passés par plusieurs étapes :

D'abord, comme dans toute étude des systèmes dynamiques réels, une modélisation du système électrique est développée en vue d'étudier sa stabilité en petit mouvement. Dans cette partie du travail, nous avons effectué une linéarisation des équations du système autour d'un point de fonctionnement afin d'obtenir la représentation d'état du système. La méthode d'analyse de la stabilité est basée sur la répartition des valeurs propres du système dans le plan complexe. Nous avons considéré qu'une bonne stabilité est assurée pour tous les modes d'oscillation ayant un amortissement supérieur à 5%.

Nous avons montré l'action des SVCs, dont les paramètres étaient non optimisés, sur un réseau d'application composé de 2 régions interconnectées. Ce dernier constitue un exemple typique de problèmes d'oscillations inter-régionales entre deux groupes de générateurs. Nous avons constaté, que les résultats présentent une amélioration certaine de la stabilité dynamique par rapport au cas du système sans SVC, qui demeure toutefois mal amorti.

Dans une seconde étape, nous avons abordé la synthèse des paramètres des SVCs en utilisant les algorithmes génétiques. L'objectif principal dans la procédure d'optimisation est d'obtenir des SVCs suffisamment robustes vis-à-vis d'éventuels changements dans les conditions de fonctionnement du système électrique. L'algorithme génétique proposé, permet de considérer différents points de fonctionnement ou topologies, afin d'assurer, à tout moment, une stabilité satisfaisante de l'ensemble du système.

La dernière étape consiste à appliquer l'optimisation par essaims de particules pour la synthèse des paramètres des SVCs, avec les mêmes fonctions objectives et sous les mêmes conditions de fonctionnement décrites pour l'AG. Les résultats obtenus montrent que pour les

deux techniques d'optimisation, le système présente de bonnes performances dynamiques avec un meilleur amortissement observé dans le cas de l'optimisation par AG.

Nous avons testé la robustesse des SVCs dimensionnés moyennant les deux techniques d'optimisation, en considérant différents points de fonctionnement et changements de topologie. Nous avons obtenu les mêmes performances dynamiques pour les deux méthodes comme l'atteste l'analyse des valeurs propres et les réponses temporelles obtenues. Il reste toutefois à souligner que l'OEP possède des avantages certains sur l'AG qui se résument comme suite :

- Convergence plus rapide.
- population inférieure à celle exigée par l'AG.
- nombre réduit d'itérations, inférieur à celui de l'AG.

## Perspectives

Cette étude, nous a permis de concevoir une procédure d'optimisation des paramètres des SVCs, basée les algorithmes génétiques et les essais de particules. Nous avons pu atteindre les objectifs tracés en obtenant des SVCs performants et robustes. Il reste encore beaucoup de voies à explorer mais il nous semble prioritaire de poursuivre une étude plus approfondie sur les trois thématiques suivantes :

- Tester la méthode proposée pour la synthèse des paramètres d'autres dispositifs de stabilisation tels que le TCSC, UPFC,...
- Vérifier la robustesse des contrôleurs pour les grandes perturbations qui font appel aux modèles non linéaires
- Nous avons utilisé l'optimisation par essais de particules comme méthode de base pour notre travail, il serait intéressant de la comparer à d'autres variantes de l'OEP telle que l'OEP hybride [Nak 03] [Set 05] et coopérative [Van 01] en les appliquant sur le même système de puissance.
- Appliquer ces techniques pour l'optimisation multi-objective simultanée des FACTS et de leurs localisations en considérant les critères tels la minimisation du temps de réponse et du coût de l'installation des FACTS.

# BIBLIOGRAPHIE

- [Abd 99] **Abdel-Madjid Y. L., Abido M. A., Al-Baiyat S. and Mantawy A. H.,** “ Simultaneous Stabilization of multi-machine power system via genetic algorithms.”, *IEEE-Transactions-on-Power-Systems.*, vol. 14, pp. 1428-39, Nov. 1999.
- [Abi 99] **Abido M.A. and Abdel-Magid Y. L.,** “Hybridizing rule-based power system stabilizers with genetic algorithms,” *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 14, No. 2, May 1999, pp. 600-607.
- [Abi 01] **Abido. M. A,** “Particle Swarm Optimization for Multimachine Power System Stabilizer Design”, *Proc. of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, July 2001.
- [Abi 02] **Abido M. A, Abdel-Magid Y. L.,** “ Analysis and Design of power stabilizers and FACTS Based stabilizers using genetic algorithms,” 14<sup>th</sup> PSCC, Sevilla, 24-28 June 2002. Session 14, Paper 3.
- [Alh 04] **Al-Hinai. A, A. Feliachi. A,** “ Control of microturbines in a power distributionsystem using particle swarm optimization”, West Virginia University, 2004.
- [And 82] **Anderson. P. M, and A. A. Fouad. A. A,** *Power System Control and Stability*, The IOWA state university Press, 3<sup>ème</sup> edition, 1982.
- [Bag 99] Baghli. L, Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, réseaux de neurones et des algorithmes génétiques, *PhD Thesis, Nancy, Janvier 1999.*
- [Bar 84] **Barret J. P.,** “ Stabilité transitoire.”, *Séminaire sur le fonctionnement des réseaux SONELGAZ-EDF 10-13 Novembre 1984.*
- [Bar 97] **Barret. J. P, Bornard. P, Meyer. B,** *Simulation des réseaux électriques*, Edition Eyrolles, 1997.
- [Bel 00] **Belacheheb K.,** *Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport* , Thèse de Doctorat de l'université de HENRI POINCARÉ NANCY I, 21 Juin 2001.
- [Ber 97] **Berkan. R. C, and Trubatch. S. L.,** *Fuzzy systems Design Principles*. New York : IEEE Press, 1997.

- [Bli 95] **Blickle. T and Thiele. L**, *A Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithms*, TIK-Report Nr. 11 (Version 2), December 1995, Switzzeland.
- [Bom 00] **do Bomfim. A. L. B., G.N. Taranto and D. M. Falcão**, *Simultaneous Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms*, IEEE Trans. Power system, Vol. 15, N°. 1, February 2000, pp. 163-169.
- [Bor 98] **Borne. P, Rozinoer. J, Deinlot. J. Y, Dubois. L**, *Introduction à la commande floue, Edition* Technip 1998.
- [Che 90] **Cheng, C.H., and HSO, Y.Y.**: Application of a power system stabilizer and a static VAR controller to a multimachine power system, *IEE Proc. C*, 1990, 137, (1), pp. 8-12.
- [Cho 00] **Chow J. H., Sanchez-Gasca J. J.,Ren H. and Wang S.**, “ Power System Damping Controller Design Using Multiple Input Signals,”, *IEEE Control Systems Magazine*, August 2000, pp 82-90.
- [Cle 01] **Clerc. M, Kennedy.J**, “The particle swarm: explosion stability and convergence in a multi-dimensional complex space”. IEEE Journal of Evolutionary Computation, vol. In press, No. ,2001.
- [Cle 02] **Clerc. M, Kennedy. J**, The particle swarm: explosion stability and convergence in a multi-dimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6(1), 2002, pp. 58-73.
- [Coe 96] **Coello. C.A**, “*An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multiobjective Optimization in Engineering Design*”, PHD. Dissertation, Department of Computer Science, Tulane University, 1996.
- [Das 87] **Dash, P.K., Panda, D.C., Sharad, A.M., and Hill, E.F.**: Adaptive controller for static reactive power compensators in power systems, *IEE Proc. C*, 1987, 134, (3), pp. 256-264.
- [Ele 96] **El-Emary. A. A**, Static VAR compensator, Synchronising torque coefficient, *IEE Proceedings online no.* 19960544, Paper first received 13<sup>th</sup> December 1994 and in revised form 12<sup>th</sup> April1996.
- [Far 98] **Farag W. A., Quintana V. H. and Lambert-Torres G.**, “ Enhacing the transient stability of multi-machine power systems using intelligent techniques.”, *Bulk-Power-Systems-Dynamics-and-Control-IV-Restructuring-Symposium-Proceedings*, Nat. Tech. Univ. Athens. Athens, Greece, pp. 117-25,1998.

- [Fle 90] **Fleming. R. J. and Sun. J.**, “An Optimal Multivariable Stabilizer For a Multi-Machine Plant”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.5, No.1, March 1990.
- [Fuk 00] **Fukuyama. Y, et al.** ,“ A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assesement ,” *IEEE Trans. Power Syst.* , Vol. 15, pp. 1232-11239, Nov. 2000.
- [Gen 97] **Gen. M. and Cheng. R.**, *Genetic Algorithms and Engineering Design*: John Wiley & Sons, 1997.
- [Gib 82] **Gibbard, M.J.**: Co-ordination of multimachine stabilizer gain settings for a specified level of system damping performance, *IEE Proc. C*, 1982, 129, (2), pp. 4548
- [Gol 89] **D.E. Goldeberg. D.E.**, *Genetic Algorithms in search, Optimization and Machine learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [Gra 00] **Graham. R.**, *Power System Oscillation*, M. A. Pai, Ed., Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [Gyu 88] **Gyugyi. L.**, “ Power electronics in electric utilities: Static Var Compensator” , *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 76, April 1988.
- [Gyu 90] **Gyugyi. L et al.**, “Advanced Static Var Compensator Using Gate Turn-off Thyristors for Utility Application” , *CIGRE*, pp.23-203,1990.
- [Ham 86] **Hammad. A. E.**, “Analysis of power system stability enhancement by Static Var Compensator” , *IEEE transactions in power systems*, Vol. PWRS-1, No. 4, pp. 222-227, November 1986.
- [Has 01] **Hasanović. A.**, *A Simulation and Analysis Toolbox for Power Systems and Genetic Alghorithm Based Damping Controller Design*, Master thesis, Morgantown, West Virginia 2001.
- [Has 02] **Hasanovic. A and Felialchi. A.**, Genetic Algorithm Based Inter-Area Oscillation Damping Controller Design MATLAB, *Proc. IEEE Power Eng. Society 2002 Summer Meeting*, Chicago, IL, July 2002.
- [Her 98] **Herrera. F., Lozano. M., and Verdegay. J. L.**, “Tacking real-coded Genetic Algorithm: Operators and tools for Behavioral Analysis,” *Artificial Intell.Rev*, vol. 12,pp. 265-319, 1998.
- [Hin 00] **N.G. Hingorani and L. Gyugyi**, "Understanding FACTS", *IEEE Press.*, New York ,2000.
- [Jod 94] **Jodouin. J. F.**, *les réseaux de neurones ; principes et définition*, Hermes, 1994, 124 p.

- [Ju 95] **Ju P., Handschin E. and Reyer F.**, “Genetic algorithm aided controller design with application to SVC,” *IEE Proceedings online* no. 19960330. Paper received 15th May 1995.
- [Kar 06-1] **Kartobi L., Boudour M. and Mekhaldi A.**, “Comparison study between GA and PSO applied to robust FACTS controllers.”, *Submitted to International Multi-conference on systems, Signals and Device, SSD, 2007.*
- [Kar 06-2] **Kartobi L., Boudour M. and Mekhaldi A.**, “Optimal Locations and tuning of Robust FACTS using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization ”, *Submitted to International Power System Transacts. ISPT, 2007.*
- [Kau 01] -----, **Swarm Intelligence.** San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 2001.
- [Ken 95-1] **Kennedy. J. and Eberhart. R. C.**, Particle swarm optimization. Proceedings of the IEEE conference on Neural Networks, IV, 1995, pp. 1942-1948, Piscataway, NJ.
- [Ken 95-2] **Kennedy. J., Eberhart. R.**, “Particle swarm optimization”. *Proceedings of IEEE international conference on Neural Networks(ICNN'95), Vol.IV, pp. 1942-1948, Perth, Australia,1995.*
- [Ken 01-1] **Kennedy. J , Eberhart. R. C. and Y. Shi.** Swarm intelligence. 2001, Morgan Kaufmann Publishers, San Fransisco.
- [Ken 01-2] **Kennedy. J., Eberhart. R.**, “Particle Swarm optimization” in Morgan Kaufmann Publishers, 2001“
- [Kle 91] **Klein. M, Rogers. G.J. and Kundur, P.**, “A Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power System, *IEEE Trans. On Power System*, Vol. 6, No.3, August 1991.
- [Kun 90] **Kundur P., Rogers G. J. , Wong D. Y., Wang L. et Lauby M. G.**, “A Comprehensive Computer Program Package for Small Signal Stability Analysis of Power systems”, *IEEE Trans. On PWRS*, Vol. 5, No. 4, November 1990, pp. 1076-1083.
- [Lar 81] **Larsen E. V. and Swann D. A.**, “Applying Power System Stabilizers Part I, II and III,” *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 6, June 1981, pp. 3017-3046.
- [Lat 00] **Latapy. M., Duong Phan. H.**, “The lattice structure of Chip Firing Games,” LIAFA, Université Denis Diderot, Paris 22, 2000.
- [Ler 91] **Leitch. D. P. E., Xu. L.**, Advanced SVC control for damping power system oscillations, *IEEE transactions on power systems*, VOL. 6, pp. 524-535, 1991.

- [Ler 95] **Lerman. I et Ngouenet. F.**, *Algorithmes Génétiques Séquentiels et parallèles pour une représentation Affine des Proximités*, Projet REPCO, Rapport de recherche n° 2570, INRIA Rennes, 1995.
- [Lut 96] **Lutaud-Brunet. M.**, Identification et Contrôle de processus par réseaux neuro-flous, *Thèse de doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne, 1996.*
- [Mam 75] **Mamdani. E. H.**, "Application of fuzzy Algorithms for control of simple dynamic plant.", *Proc. IEE*, Vol. 121, pp.1585, 1975.
- [Nak 03] **Naka. S., Genji. T., Yura. T., Fukuyama. Y.**, "A Hybrid Particle Swarm Optimization for Distribution State Estimation", *IEEE Transactions on power systems*, VOL.18, NO. 1, pp. 60-68. February 2003.
- [Nar 00] **Nara K.**, "States of the Arts of the Modern Heuristics Applications to Power systems", *IEEE PES Winter Meeting*, January 2000, vol. 2, pp. 1279-1283.
- [O'BR 85] **O'BRIEN, M., et LEDWICH, G.**, "Placement of static compensators for stability improvement" *IEE Proc. C*, 1985, 132, (1), pp.30-35.
- [O'BR 87] **O'BRIEN, M., et LEDWICH, G.**, Static reactive power compensator controls for improved system stability, *IEE Proc. C*, 1987, 134, (1), pp. 3842.
- [Pas 98] **J.C. Passelergue**, "Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques", Thèse de doctorat de l'INPG 26 Novembre 1998.
- [Pet 97] **P. Petitclair**, "Modélisation et Commande de structures FACTS: Application au STATCOM", Thèse de doctorat de l'INPG 16 Juillet 1997.
- [Pic 94] **Picton.P.**, *Introduction to neural networks*, Ed. Macmillan, 1994, 168p.
- [Pov 00] **Povh. D.**, « Use of HVDC and FACTS, » *Proc. of the IEEE*, vol. 88, pp. 235-45, February. 2000.
- [Ren 95] **Renders. J. M.**, *Algorithmes Génétiques et réseaux de neurones*, Ed. Hermès, 1995, 349p.
- [Rou 98] **Rouco. L.**, Eigenvalue-based Methods for Analysis and Control of Power Systeme Oscillations, *IEE Colloquium on Power Dynamics Stabilization*, University of Warwick, Coventry, England, February 1998.
- [Sad 98] **S.M. Sadeghzadeh**, "Amélioration de la stabilité transitoire et de l'amortissement des oscillations d'un réseau électrique à l'aide de SMES et de SSSC", Thèse de doctorat de l'INPG 13 Mars 1998.
- [Sad 03] **Sadegh. M. O.**, "Control of power electronic devices (FACTS) to enhance power system stability", PhD Thesis, Glasgow, March 2003.

- [Sam 83] **F. Samouhi**, "Application de la méthode de Lyapunov a l'aide de la stabilité dynamique de réseaux de transport d'énergie soumis à des perturbations", Thèse de doctorat de l'INPG, 21 Avril 1983.
- [Sar 04] **Saravanan M., Mary Raja Slochanal S., Venkatesh P. and Prince Stephen Abraham J.**, "Application Of PSO Technique For Optimal Location Of FACTS Devices Considering System Loadability And Cost Of Installation," *International Journal on Electric Power Systems Research*, 2004.
- [Set 05] **Settles M. L.** *Breeding Swarms: A GA/PSO Hybrid for real parameter optimization*, Master of science thesis, University of Idaho, May 2005.
- [Sin 02] **Singhvi. V.**, *Small Signal Stability of an Unregulated Power System*, Master's Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Mississippi, December 2002.
- [Sny 97] **Snyder. A. F.**, *Inter-Area Oscillation Damping with Power System Stabilizers and Synchronized Phasor Measurements*, Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [Son 99] **A. Sonnenmoser and P.W. Lehn**, "Line current balancing with a Unified Power Flow Controller", *IEEE Trans. On Power Delivery* , vol. 14, No. 3 , pp. 1151-1157, July 1999.
- [Sri 94] **M. Srinivas and L. M. Patnaik**, *Genetic Algorithms: A Survey*, *IEEE Computer*, Vol. 24, No. 6, pp. 17-26, June 1994.
- [Tar 98] **Taranto G. N. and Falcão D.M.**, "Robust decentralised control design using genetic algorithms in power system damping control.", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 145, No. 1, January 1998.
- [Tre 03] **Trelea. I. C.** , *L'essaim de particules vu comme un système dynamique: Convergence et choix des paramètres. Séminaire « L'optimisation par essaim de particules »*, Paris, Carré des sciences, 2 Octobre 2003.
- [Van 01] **Van Den Bergh F. and Engelbrecht A. P.**, *A Cooperative Approach to Particle Swarm Optimization*, *IEEE Transactions on Evolutionary Computing*. 2001.
- [Ves 02] **J. Vesterstrøm and J. Riget**, "Particle Swarms, Extensions for improved local, multi-modal, and dynamic search in numerical optimization." , Master's Thesis , May 2002.
- [Wan 00] **Wang Y.P., Hur D.R., Chung H.H., Watson N.R., Arrillaga J. and Maitair S.S.**, "A Genetic Algorithms Approach To Design An Optimal PI Controller

For Static Var Compensator,” *IEEE* 0-7803-6338-8/00/\$10.00(~), 2000, pp. 1557-1562.

- [Wu 91] **WU, C.J., et LEE, Y.S.:** Damping of synchronous generator by static reactive power compensator with digital controlle, *IEE Proc.*, 1991, 138, (5), pp. 427-432.
- [Yos 99] **H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama et Y. Nakanishi,** “ A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage stability.”, IEEE International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP’99), Rio de Janeiro, April 4-8, 1999.
- [Yu 83] **YU Y. N.,** *Electric power system dynamics* (Academic Press Inc., India, 1983).
- [Zad 65] **L.A.Zadeh ,** “Fuzzy sets”, *Information and control*, Vol.8,pp.338, 353, 1965.
- [Zha 00] **Zhang P. and Coonick A. H.,** “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.

# ANNEXE A

## Données de base du réseau étudié

```
global ng
ng=4;           %- Nombre de générateurs du système
npv=3;         %- Nombre de noeuds PV (code : 2)
npq=9;         %- Nombre de noeuds PQ (code : 0)
ns=1;          %- Numéro du noeud slack bus
               % (noeud balancie ou de régulation)(code : 1)
nbus=13;       %- Nombre total de noeuds du système
nbr=14;        %- Nombre total de branches du système
Hz=60;         %- Fréquence du système
accel=1.4;     %- Facteur d'accélération
               % |(pour le calcul de load flow par la méthode de Gauss Saidel)
accuracy=0.0001; %- Tolérance (accuracy) relative au load flow (méthide de Gauss Saidel)

basemva=900;   %- Puissance de base du système

maxiter=100;   %- Nombre d'itérations maximal
Nsys=1;        %- Identificateur du système

% DONNEES DES NOEUDS:
% bus data format
% bus:
% col1 number
% col2 voltage magnitude(pu)
% col3 voltage angel(degree)
% col4 p_gen (pu)
% col5 q_gen (pu)
% col6 p_load (pu)
% col7 q_laod (pu)
% col8 G shunt (pu)
% col9 B shunt (pu)
% col10 bus_type
%       bus_type -1,swing bus
%               -2,generator bus(PV bus)
%               -3,load bus (PQ bus)
% col11 q_gen_max(pu)
% col12 q_gen_min(pu)
% col13 v_rated (kv)
% col14 v_max pu
% col15 v_min pu

% Pour charge nominale
bus=[
  1  1.03  0.0 7.00 1.85 0.00  0.00 0.00 0.00 1 99.0 -99.0 22.0 1.1 .9;
  2  1.01  0.0 7.00 2.35 0.00  0.00 0.00 0.00 2 99.0 -99.0 22.0 1.1 .9;
  3  1.03  0.0 7.19 1.76 0.00  0.00 0.00 0.00 2 99.0 -99.0 22.0 1.1 .9;
  4  1.01  0.0 7.00 2.02 0.00  0.00 0.00 0.00 2 99.0 -99.0 22.0 1.1 .9;
  5  1.0103 0.0 0.00 0.00 0.00  0.00 0.00 0.00 3  0.0  0.0 230.0 1.5 .5;
  6  0.9781 0.0 0.00 2.00 0.00  0.00 0.00 0.00 3  0.0  0.0 500.0 1.5 .5;
  7  0.95  0.0 0.00 0.00 9.76  1.00 0.00 0.00 3  0.0  0.0 115.0 1.05 .95;
  8  0.9899 0.0 0.00 3.50 0.00  0.00 0.00 0.00 3  0.0  0.0 500.0 1.5 .5;
  9  0.95  0.0 0.00 0.00 17.67 1.00 0.00 0.00 3  0.0  0.0 115.0 1.05 .95;
 10 0.9879 0.0 0.00 0.00 0.00  0.00 0.00 0.00 3  0.0  0.0 230.0 1.5 .5;
 11 1.0  0.0 0.00 0.00 0.00  0.00 0.00 1.60 3 99.0 -99.0 500.0 1.5 .5;
 12 1.0125 0.0 0.00 0.00 0.00  0.00 0.00 0.00 3  0.0  0.0 230.0 1.5 .5;
 13 0.9938 0.0 0.00 0.00 0.0  0.00 0.00 0.00 3  0.0  0.0 230.0 1.5 .5];
```

```

% line data format: from bus, to bus, resistance(pu), reactance(pu),
% line charging(pu),tap ratio, tap phase, tapmax, tapmin, tapsize
% Operating condition 1- Two lines between busses 6 - 11 and 8 - 11

```

```

linedata=[
    1  5  0.0    0.0167 0.00    1.0 0. 0.  0.  0.;
    2  10 0.0    0.0167 0.00    1.0 0. 0.  0.  0.;
    5  10 0.0025 0.025  0.0437 1.0 0. 0.  0.  0.;
    10 6  0.001  0.0100 0.0175 1.0 0. 0.  0.  0.;
    6  7  0.0    0.005  0.00    1.0 0. 1.2 0.8 0.05;
    6  11 0.011  0.110  0.1925 1.0 0. 0.  0.  0.;
    6  11 0.011  0.110  0.1925 1.0 0. 0.  0.  0.;
    11 8  0.011  0.11  0.1925 1.0 0. 0.  0.  0.;
    11 8  0.011  0.11  0.1925 1.0 0. 0.  0.  0.;
    8  9  0.0    0.005  0.00    1.0 0. 1.2 0.8 0.05;
    8  13 0.001  0.01  0.0175 1.0 0. 0.  0.  0.;
    13 12 0.0025 0.025  0.0437 1.0 0. 0.  0.  0.;
    3  12 0.0    0.0167 0.0    1.0 0. 0.  0.  0.;
    4  13 0.0    0.0167 0.0    1.0 0. 0.  0.  0.];

```

```

% Machine data format
% 1.machine number,
% 2.bus number,
% 3.base mva,
% 4.leakage reactance x_l(pu),
% 5.resistance r_a(pu),
% 6.d-axis synchronous reactance x_d (pu),
% 7.d-axis transient reactance x'_d(pu),
% 8.d-axis subtransient reactance x''_d(pu),
% 9.d-axis open-circuit time constant T'_do(sec),
% 10.d-axis open-circuit subtransient time constant T''_do(sec),
% 11.q-axis synchronous reactance x_q (pu),
% 12.q-axis transient reactance x'_q(pu),
% 13.q-axis subtransient reactance x''_q(pu),
% 14.q-axis open-circuit time constant T'_qo(sec),
% 15.q-axis open-circuit subtransient time constant T''_qo(sec),
% 16.inertia constant H (sec),
% 17.M(s2/rad),
% 18.D #,

```

```

mac_con=[
    1 1 900 0.200 0.0025 1.8 0.33 0.25 8.00 0.03 1.7 0.55 0.25 0.4 0.05 6.5 0.1254 2;
    2 2 900 0.200 0.0025 1.8 0.33 0.25 8.00 0.03 1.7 0.55 0.25 0.4 0.05 6.5 0.0340 2;
    3 11 900 0.200 0.0025 1.8 0.33 0.25 8.00 0.03 1.7 0.55 0.25 0.4 0.05 6.5 0.0160 2;
    4 12 900 0.200 0.0025 1.8 0.33 0.25 8.00 0.03 1.7 0.55 0.25 0.4 0.05 6.5 0.0053 2];

```

```

% Exciter data format
% column data
% 1      exciter type
% 2      machine number
% 3      input filter time constant
% 4      voltage regulator gain K_A
% 5      voltage regulator time constant T_A (sec)
% 6      voltage regulator time constant T_B (sec)
% 7      voltage regulator time constant T_C (sec)
% 8      maximum voltage regulator output VR_max
% 9      minimum voltage regulator output VR_min
% 10     exciter constant K_e
% 11     exciter time constant T_E
% 12     E_1
% 13     saturation function S_E(E_1)
% 14     E_2
% 15     saturation function S_E(E_2)
% 16     stabilizer gain K_f
% 17     stabilizer time constant(T_f)
exc_con=[
    0 1 0.01 200.0 0.5 0 0 10.0 -10.0 0 0 0 0 0 0 ;
    0 2 0.01 200.0 0.5 0 0 10.0 -10.0 0 0 0 0 0 0 ;
    0 3 0.01 200.0 0.5 0 0 10.0 -10.0 0 0 0 0 0 0 ;
    0 4 0.01 200.0 0.5 0 0 10.0 -10.0 0 0 0 0 0 0 ];

```

# ANNEXE B

## Schémas représentatifs des FACTS

Les FACTS peuvent être classés en trois catégories : compensateurs parallèle, compensateurs série et compensateurs hybrides "série – parallèle".

### B.1 Compensateurs parallèle

#### B.1.1 Compensateurs parallèle à base de thyristors

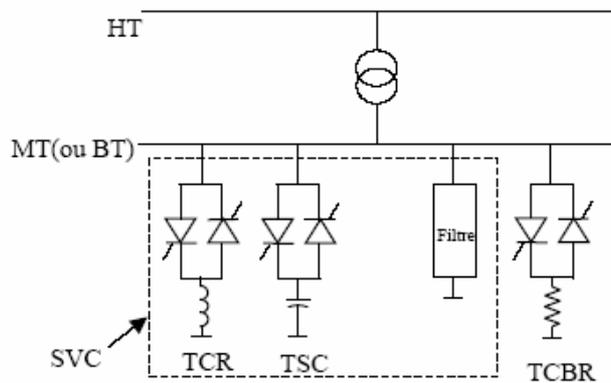


Fig.B.1 Schéma du SVC et TCBR

#### B.1.2 Compensateurs parallèle à base de thyristors GTO

La fig.B.2 représente le schéma de base d'un STATCOM. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, formées de GTO et de diode en antiparallèle. Le rôle du STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage.

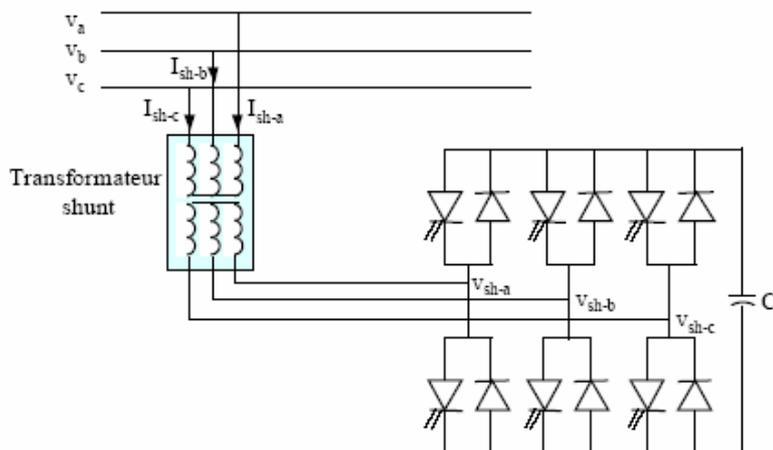
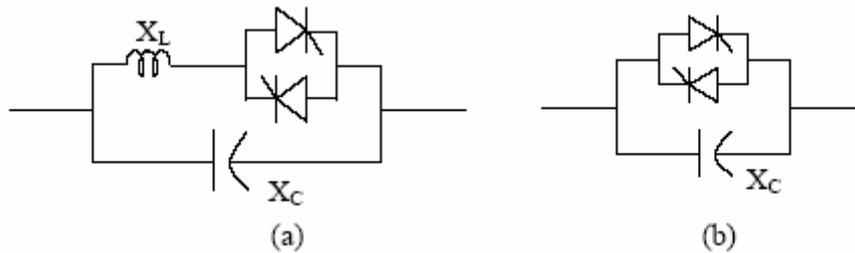


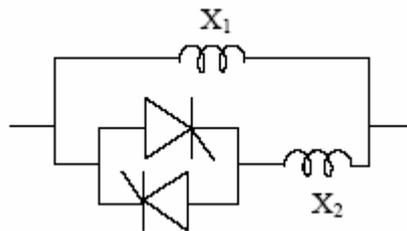
Fig.B.2 Schéma de base du STATCOM

## B.2 Compensateurs série

### B.2.1 Compensateurs série à base de thyristor



**Fig.B.3** Structure du TCSC (a) et TSSC (b)

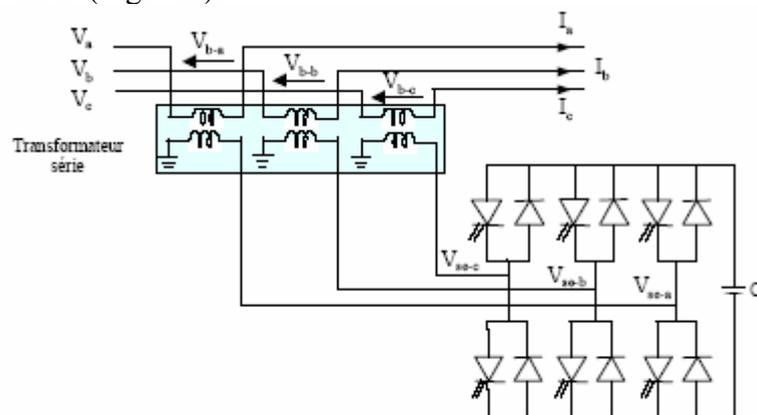


**Fig. B.4** Structure du TCSR.

Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristor (fig.B.4) est de 180 degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable  $X_1$  agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison parallèle de deux réactances.

### B.2.2 Compensateurs série à base de thyristors GTO

Le SSSC est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (Fig. B.5).

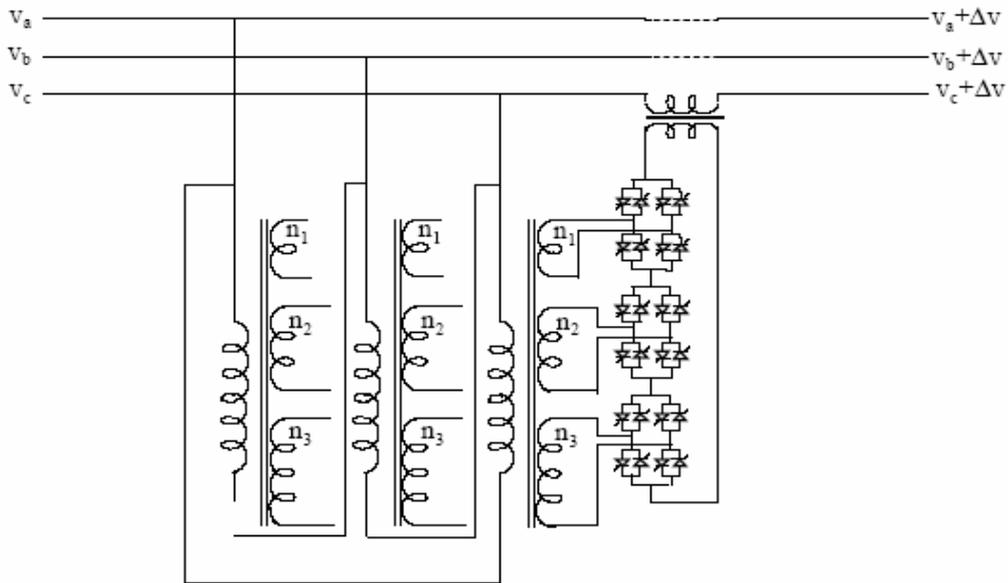


**Fig.B.5** Schéma de base du SSSC

Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne.

### B.3 Compensateurs hybrides série – parallèle

#### B.3.1 Compensateurs hybrides à base de thyristors

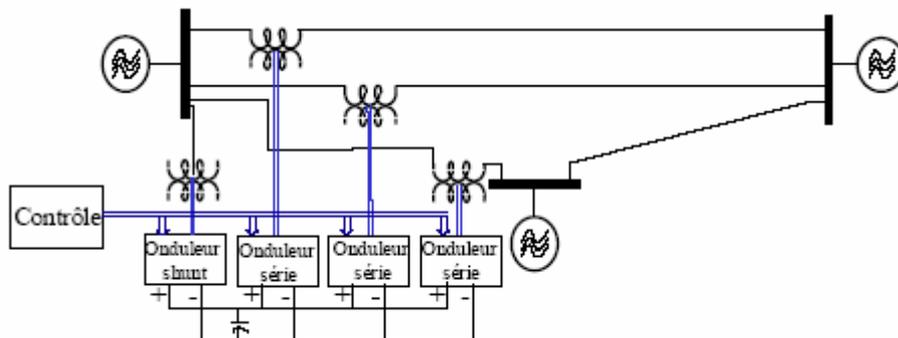


**Fig.B.6** Schéma du TCPAR

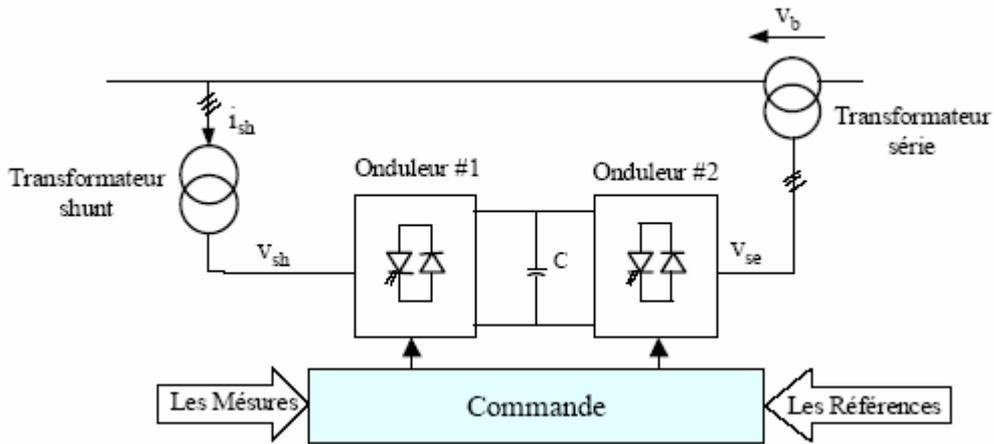
L'amplitude de la tension injectée est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle dont les rapports de transformation sont  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ . Cette combinaison donne une tension à injecter dont l'amplitude peut prendre 27 valeurs différentes.

#### B.3.2 Compensateurs hybrides à base de thyristors GTO

L'IPFC (fig.B.7) est utilisé afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau.



**Fig.B.7** Schéma de base de l'IPFC.



**Fig.B.8** Schéma de base de l'UPFC

L'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de ligne (Fig. B.8). L'onduleur no.1 est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur no. 2. Il réalise aussi la fonction de compensation d'énergie réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active, au réseau. L'onduleur no.2 injecte la tension  $V_b$  et fournit les puissances actives et réactives nécessaires à la compensation série.