



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université Amar Telidji- Laghouat**

**FACULTE : Technologie**

**DEPARTEMENT : Electrotechnique**

**MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : *Bouzidi Yassine***

**DOMAINE : Sciences et Technologies**

**FILIERE : Electrotechnique**

**OPTION : Réseaux Electriques**

**Thème**

***Etude Comparative Entre les Différentes Méthodes de  
Conception des Stabilisateurs de Puissance***

Jury de soutenance :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
ARIF Salem	Pr	Président
CHETTIH Saliha	Pr	Examinatrice
MEKHANET Mohammed	MCA	Rapporteur

**Promotion : 2020-2021**

حظي استخدام إشارات التحريض الإضافية للتحكم ولتحسين الإستقرار الديناميكي لنظام التغذية باهتمام كبير. عدة طرق نظرية تعتمد على التحكم الحديث، مثل التحكم الذكي وكذا تقنيات التحسين أستخدمت لتصميم مثبتات الإستطاعة. الهدف من هذا العمل هو تقديم مراجعة عامة للتقنيات المطبقة في تصميم مثبتات الإستطاعة. كل تصنيف يتضمن عدة نماذج وطرق تجعل من مثبتات الإستطاعة ذات فعالية ومثانة لإخماد الذبذبات الكهروميكانيكية على الترددات المنخفضة. تم إجراء تحليل نتائج المحاكات على أداء مثبتات الإستطاعة من أجل تحسين الإستقرار الديناميكي.

**الكلمات المفتاحية:** مثبت الإستطاعة، ذبذبات ضعيفة التواتر، التخمد الديناميكي، مثبت مقدم - مؤخر، مثبت تناسبي تكاملي مشتق - مثبت متعدد نطاقات التردد.

## Résumé

L'utilisation des signaux de commande d'excitation supplémentaires pour améliorer la stabilité dynamique des systèmes d'alimentation a reçu beaucoup attention. Plusieurs approches basées sur théorie du contrôle moderne et de contrôle intelligent et des techniques d'optimisation ont été appliquées à la conception du PSS. On vise dans ce travail de donner une revue des techniques appliquées uniquement sur la conception des stabilisateurs de puissance. Chaque classification comprend plusieurs modèles et méthodes qui rendent le PSS plus efficace du point de vue robustesse pour l'amortissement des oscillations électromécaniques à basses fréquences. Une analyse des résultats de simulation a été fait sur les performances des PSSs dans le but d'amélioration de la stabilité dynamique.

**Mots-clés:** Stabilisateur du système de puissance (PSS), Faibles Oscillations de Fréquence, Amortissement Dynamique, PSS Avance-Retard, PID, PSS Multi Band.

## Abstract

The usage of additional excitation control signals to improve the dynamic stability of power systems has received great attention. For the PSS design, several approaches were adopted. These approaches are generally based on modern control theory, intelligent control and optimization techniques. The aim of this work is to give a general review of techniques applied to the design of power stabilizers. Each classification includes several models and methods that allow the PSS to be more robust with regards to the damping low-frequency electromechanical oscillations. Simulation results proved the ability of the proposed PSS to improving dynamic stability.

**Keywords:** Power System Stabilizer (PSS), Low Frequency Oscillations, Dynamic Damping, PSS lead-lag, PID, PSS Multi Band.

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire*

*à ma mère*

*à mon père*

*à mes frères et mes soeurs*

*à tous mes camarades pour les bons moments*

*à tous les enseignants, qui m'ont aidé le proche ou de loin.*

## **Remerciements**

*Tout d'abord, je remercie dieu tout puissant de m'avoir donné le courage et la force pour réaliser ce mémoire.*

*Également, j'exprime mes plus profonds remerciements à Monsieur **Mohammed Mekhanet** Directeur de ce mémoire.*

*Je lui exprime toute ma gratitude pour son expérience, son soutien et son encadrement et ses qualités humaines, qui m'a offert la possibilité de réaliser ce travail.*

*Monsieur **Salem Arif**, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.*

*Madame **Saliha Chettih**, pour avoir accepté d'être examinateur de ce mémoire et pour sa participation au jury.*

*Merci aussi à Monsieur **Youcef Oubbati**, pour son aide.*

*Enfin, mes remerciements à mes enseignants et à mes collègues de l'université qui m'ont accompagné dans mon parcours.*

# Sommaire

<b>Sommaire</b>	<b>i</b>
<b>Liste des Figures</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des Tableaux</b>	<b>v</b>
<b>Notations et Symboles</b>	<b>vi</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>I Stabilité et les Modes Oscillatoires des Grands Réseaux Électriques</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction . . . . .	3
I.2 Problématique . . . . .	4
I.3 Stabilité des grands réseaux . . . . .	4
I.4 Phénomènes dynamiques dans les réseaux électriques . . . . .	4
I.4.1 Phénomènes de propagation . . . . .	5
I.4.1.1 Transitoires électromagnétiques . . . . .	5
I.4.1.2 Transitoires électromécaniques . . . . .	5
I.4.1.3 Phénomènes thermodynamiques . . . . .	5
I.5 Différents types de stabilité . . . . .	6
I.5.1 Stabilité angulaire . . . . .	7
I.5.1.1 Stabilité angulaire aux petites perturbations (en petits signaux) . . . . .	7
I.5.1.2 Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire) . . . . .	8
I.5.2 Stabilité de tension . . . . .	9

I.5.3	Stabilité de fréquence . . . . .	9
I.6	Causes d'instabilité . . . . .	9
I.7	Différents types d'oscillations à faibles fréquences . . . . .	10
I.7.1	Oscillations des modes locaux . . . . .	11
I.7.2	Oscillations des modes globaux . . . . .	11
I.7.3	Oscillations des modes de contrôle . . . . .	12
I.7.4	Oscillations des modes de torsion . . . . .	12
I.8	Conclusion . . . . .	13
<b>II</b>	<b>Conception des Stabilisateurs de Puissances</b>	<b>14</b>
II.1	Introduction . . . . .	14
II.2	Amélioration de la stabilité par les stabilisateurs de puissance . . . . .	14
II.3	Classification des PSSs suivant leur conception technologique . . . . .	16
II.3.1	PSSs analogiques . . . . .	16
II.3.2	PSSs numériques . . . . .	16
II.4	Classification des PSSs suivant leurs structure interne . . . . .	17
II.4.1	Modèle du PSS à avance retard de phase (conventionnel) . . . . .	17
II.4.2	MB-PSS(multibande) . . . . .	19
II.4.2.1	Structure interne du MB-PSS . . . . .	20
II.4.2.2	Fonction de transfert du MB-PSS . . . . .	20
II.4.2.3	Méthodologie de paramétrage du MB-PSS . . . . .	21
II.5	PSS de Type PID . . . . .	22
II.5.1	Structure d'un PSS-PID . . . . .	23
II.5.2	Détermination des paramètres du PSS-PID . . . . .	24
II.6	Classification des PSSs selon le signal d'entrée . . . . .	25
II.6.1	Stabilisateur de puissance basée sur la variation de la puissance électrique . . . . .	26
II.6.2	Stabilisateur de puissance basé sur la puissance d'accélération . . . . .	27
II.6.3	Stabilisateur hybride basé sur la puissance d'accélération . . . . .	27
II.6.4	Stabilisateur basé sur la fréquence de la tension aux bornes de la machine . . . . .	28
II.6.5	Stabilisateur basé sur la mesure mécanique de la vitesse . . . . .	28
II.6.6	Stabilisateur de débit basé sur une mesure indirecte de la fréquence interne de la machine . . . . .	29

---

II.7 Conclusion . . . . .	29
<b>III Simulation et Résultats</b>	<b>30</b>
III.1 Introduction . . . . .	30
III.2 Formulation de la fonction objectif . . . . .	30
III.3 Application au Systèmes 2 Régions 4 Machines . . . . .	32
III.3.1 Description du système . . . . .	32
III.4 Application de la procédure d'optimisation . . . . .	33
III.5 Interprétation . . . . .	38
III.6 Conclusion . . . . .	39
<b>Conclusion Générale</b>	<b>40</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	<b>42</b>
<b>Annexe</b>	<b>46</b>

# Liste des Figures

1.1	Classification des phénomènes dynamiques dans les réseaux électriques . . .	6
1.2	Classification des différents types de la stabilité des systèmes de puissance (IEEE/ CIGRE-2004) . . . . .	7
1.3	Variation d'angle de rotor. . . . .	8
1.4	Représentation des modes d'oscillatoires des grands réseaux d'électriques .	10
1.5	Système de puissance simple à deux régions . . . . .	12
2.1	Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système . . . . .	15
2.2	Structure d'un système d'excitation statique avec son AVR . . . . .	16
2.3	Modèle d'un PSS avance/retard . . . . .	18
2.4	Stabilisateur Multibande, IEEE PSS4B . . . . .	19
2.5	Schéma bloc d'un PSS PID . . . . .	22
2.6	Structure générale du PSS-PID . . . . .	24
2.7	Réponse d'un PSS-PID . . . . .	24
2.8	Schéma d'implantation d'un PSS de type $\Delta P_e$ . . . . .	27
2.9	Schéma d'implantation d'un PSS de type $\Delta f$ . . . . .	28
2.10	Schéma d'implantation d'un PSS de type $\Delta \omega$ . . . . .	29
3.1	Schéma unifilaire du réseau 2 régions 4 machines . . . . .	32
3.2	Réseau test entre 2 régions 4 machines [Matlab/Simulink] . . . . .	34
3.3	Déviations de la vitesse $\Delta \omega$ de la machine 1 en pu. . . . .	35
3.4	Déviations de la vitesse $\Delta \omega$ de la machine 2 en pu. . . . .	36
3.5	Déviations de la vitesse $\Delta \omega$ de la machine 3 en pu. . . . .	37
3.6	Déviations de la vitesse $\Delta \omega$ de la machine 4 en pu. . . . .	38

# Liste des Tableaux

2.1	Expressions des paramètres du PID d'après la méthode de Ziegler–Nicholas	25
3.1	Les modes oscillatoires dominants et leurs fréquences . . . . .	33
3.2	Paramètres d'optimisation de l'algorithme génétique . . . . .	33
3.3	Paramètres de stabilisateurs obtenus après l'optimisation par AG . . . . .	34
3.4	Paramètres des stabilisateurs kundur . . . . .	35
3.5	Paramètres des stabilisateurs MB . . . . .	35
3.6	Comparaison des pics et le temps de stabilisation de la machine 1 . . . . .	36
3.7	Comparaison des pics et le temps de stabilisation de la machine 2 . . . . .	36
3.8	Comparaison des pics et le temps de stabilisation de la machine 3 . . . . .	37
3.9	Comparaison des pics et le temps de stabilisation de la machine 4 . . . . .	38

# Notations et Symboles

AG	Algorithmes Génétiques
AVR	Automatic Voltage Regulator
BFA	Bacterial Foraging Algorithme
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
CPSS	Conventionnel PSS
DC	Direct Current
E	Tension électromotrice du générateur
EPSO	Evolutionary Particle Swarm optimization
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
H	Constante d'inertie ( $s$ )
MBPSS	Multi Band Power System Stabilizer
PCEA	Preserving Contrast Enhancement Algorithm
PID	Proportionnel, Intégrateur, Dérivateur.
PSS	Power System Stabilizer

---

SME	Single Machine Equivalent
SMIB	Single Machine Infinite Bus
$f$	Fréquence des courants alternatifs en (Hz)
$K_{PSS}$	Gain du PSS (pu)
$N_{ind}$	Nombre d'individus
$P_c$	Probabilité de croisement
$P_e$	Puissance électrique
$P_m$	Puissance mécanique
$P_u$	Puissance utile
$T_1, T_3$	Constantes de temps d'avance de phase
$T_2, T_4$	Constantes de temps de retard de phase
$T_\omega$	Constante de temps du régulateur (s)
$x$	Réactance transitoire en (pu)
$X_a$	Réactance synchrone en (pu)
$X_d$	Réactance synchrone en (pu)
$\alpha$	Partie réelle de la valeur propre
$\beta$	Partie imaginaire de la valeur propre
$\Gamma$	Matrice de perturbation
$\Delta\omega$	Déviations de la vitesse angulaire du rotor

---

$\omega$	Vitesse angulaire du rotor, en (pu)
$\delta_c$	L'angle critique.
$\delta$	L'angle de charge.
$\xi$	Facteur d'amortissement
$\lambda$	Valeur propre

# Introduction Générale

L'énergie électrique est un produit consommable particulier, unique par rapport aux autres produits, c'est qu'il doit être utilisé immédiatement. Les producteurs doivent donc satisfaire la demande des consommateurs, avec une qualité satisfaisante de façon à maintenir constamment l'équilibre entre la production et la consommation en assurant la sécurité et satisfaire l'économie de l'exploitation. Les majeures inquiétudes sollicitées par le bon fonctionnement d'un réseau électrique, c'est la conduite, caractérisant le maintien de l'équilibre entre la production et la consommation. Un bon réglage, garantit la tenue de la tension et la fréquence du réseau dans les limites acceptées, par contre la protection favorise le bon fonctionnement de la totalité des appareils électriques, constituant l'ensemble du système et finalement la stabilité assure la conservation du couplage dynamique entre la production et la consommation en cas de perturbations mineures ou majeures [1].

Une perturbation dans un point donné du réseau électrique, est suivie par une variation de tension. Les générateurs réagissent séparément suivant leurs puissances et leurs proximités de ce point. Pour maintenir la tension stable, les producteurs ont eu recours à des régulateurs électroniques de tension très rapides placés au niveau des circuits d'excitation de ces générateurs. Cette variation rapide agit directement sur le couple résistant de l'alternateur, demandant un couple moteur des turbines. L'interaction, entre un système électrique caractérisé par une dynamique très rapide et un système mécanique d'une dynamique lente, provoque un décalage angulaire au niveau des rotors des machines concernées. Le rotor essaie toujours de revenir à un point stable, ce qui génère des oscillations dites électromécaniques. Si le système n'est pas bien amorti, ces oscillations vont augmenter jusqu'au décrochage de la machine [2]. En outre, si le système de puissance n'arrive pas à compenser cette puissance, ce phénomène va persister et se retransmet à d'autres machines, ce qui peut arriver jusqu'à un blackout s'il n'est pas traité précocement. Au point de vue puissance, ceci va se traduire par une variation

de vitesse de la machine par rapport à la vitesse de synchronisme, après élimination de la perturbation, le système ne sera stable que si l'écart entre la vitesse de la machine et la vitesse de synchronisme est nul. Les systèmes de puissance modernes sont équipés d'un dispositif permettant de stabiliser cette puissance en injectant un signal additif au niveau du circuit d'excitation, afin de bien amortir ces oscillations électromécaniques. Ces dispositifs, connus sous le nom PSS (Power System Stabilizer), réagissent lors des régimes de fonctionnement transitoires. Dans la littérature et dans l'industrie, il existe plusieurs types de PSS tels que le PSS conventionnel à avance retard de phase et à paramètres fixes (CPSS), le PSS multibande, le PSS PID. Toutefois l'utilisation de ce type de PSS s'est avérée moins performante surtout en cas de changements des conditions de fonctionnement telles qu'une modification subite de la charge ou en cas d'une perturbation importante tel qu'un court-circuit [2].

Dans ce projet de fin d'étude, nous allons exposer une revue générale présentant les différentes conceptions des stabilisateurs de puissance. Puis nous présenterons une étude comparative entre quelques types de PSSs.

Nous avons opté pour trois chapitres afin de présenter ce travail : Le premier chapitre sera consacré à un petit aperçu sur la stabilité électrique des systèmes de puissance et les phénomènes dynamiques existants dans les réseaux électriques et les différents types d'oscillations.

Par contre le deuxième chapitre, sera consacré à la conception des PSSs dans leurs différents types de conception et de classement.

D'autre part, le troisième chapitre fera l'objet d'une comparaison entre trois types de PSSs, validée sur un système multimachine constitué de quatre machines et deux régions. La simulation des modèles étudiés est réalisée par l'utilisation du logiciel MATLAB/SIMULINK.

Enfin, une conclusion générale synthétisera les travaux de ce mémoire .

# Chapitre I

## Stabilité et les Modes Oscillatoires des Grands Réseaux Électriques

### I.1 Introduction

Les réseaux électriques modernes ne cessent de croître avec l'augmentation de la demande de charge. La condition principale pour le fonctionnement fiable de système de puissance est de garder les générateurs synchrones dans leurs limites avec une capacité suffisante pour répondre à la demande de charge. Par conséquent, l'analyse de la stabilité de réseau électrique est importante.

La stabilité dynamique est la capacité électrique du système pour supporter des variations ou des perturbations sans perte de synchronisme entre les machines synchrones dans le système, tout en ayant un amortissement suffisant des oscillations du système. Les générateurs, les charges 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.

Les problèmes de stabilité dynamique résultent du passage de la machine d'un état stable à un autre. Pour cela, il faut améliorer la stabilité aux petites perturbations en utilisant plusieurs dispositifs de contrôle tels que des stabilisateurs de puissance (PSS : Power System Stabilizer). Pour cela, on s'intéresse dans ce chapitre à la stabilité des systèmes qui est un

facteur essentiel pour préserver le matériel et assurer la continuité du service et utiliser le contrôleur PSS pour améliorer la stabilité.

## **I.2 Problématique**

Pour assurer une bonne stabilité dynamique des grands réseaux, l'utilisation des PSSs est devenue une solution efficace. Techniquement, il existe plusieurs types de PSSs qui diffèrent par leurs structures internes et par leur type du signal d'entrée. Le choix du type et la conception du PSS demande de la connaissance bien précise du problème à traiter par le PSS. Dans ce mémoire on donne une revue bibliographique concernant les différents types de stabilisateurs de puissance et leurs modes de conception.

## **I.3 Stabilité des grands réseaux**

Pendant des années, des recherches diverses et complexes étaient effectuées pour comprendre les problèmes de stabilité des systèmes de puissance. Ainsi de nombreuses définitions de la stabilité de systèmes de puissance étaient proposées en insistant sur les divers aspects qui reflètent la manifestation de l'état stable de système. La définition la plus récente, que nous adopterons, est le résultat d'un groupe de travail conjoint IEEE/CIGRE [3].

La stabilité d'un système de puissance est la capacité d'un système d'énergie électrique, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de retrouver le même état ou un autre état d'équilibre après avoir subi une perturbation physique, en gardant la plupart des variables de système dans leurs limites, de sorte que le système entier reste pratiquement intact.

Ainsi un système de puissance possédant un état d'équilibre est considéré comme stable, si suite à une perturbation, le système peut encore retrouver une position d'équilibre. Le système est également considéré comme stable s'il tend vers une autre position d'équilibre située dans la proximité du point d'équilibre initial [4].

## **I.4 Phénomènes dynamiques dans les réseaux électriques**

Dans le fonctionnement des réseaux électriques, plusieurs phénomènes transitoires apparaissent et peuvent être classifiés selon leurs gammes de fréquence de propagation.

Ces fréquences vont de la plus rapide comme le phénomène de propagation de la foudre au phénomène le plus lent de nature thermodynamique voir figure (1.3) [6-8].

### **I.4.1 Phénomènes de propagation**

Ce sont des phénomènes très rapides. Ils se produisent principalement au niveau des lignes de transport et correspondent à la propagation des ondes électromagnétiques suite à des coups de foudre ou des opérations de coupure (disjoncteurs), la gamme de temps de ces phénomènes s'étend de la microseconde à la milliseconde [4,7].

#### **I.4.1.1 Transitoires électromagnétiques**

Ces transitoires prennent place dans les enroulements des machines électriques et dans les dispositifs de l'électronique de puissance. Ils résultent de perturbations telles que le court-circuit, ou la commutation des thyristors.

Ils s'étendent typiquement de quelques millisecondes à quelques dixièmes de seconde [6].

#### **I.4.1.2 Transitoires électromécaniques**

Sont précisément dus aux mouvements des masses tournantes des générateurs et des moteurs, ainsi qu'à la réponse des régulateurs de tension et de vitesse, suite à une perturbation et au fonctionnement des protections.

La gamme de temps de ces phénomènes s'étend typiquement de quelques centièmes de seconde à une dizaine de secondes [6].

#### **I.4.1.3 Phénomènes thermodynamiques**

La dynamique la plus lente est celle des phénomènes thermodynamiques qui se développent dans les chaudières des centrales thermiques, suite à une perturbation de l'équilibre production consommation de puissance. ils peuvent aller de quelques dizaines de secondes à quelques dizaines de minutes [6].

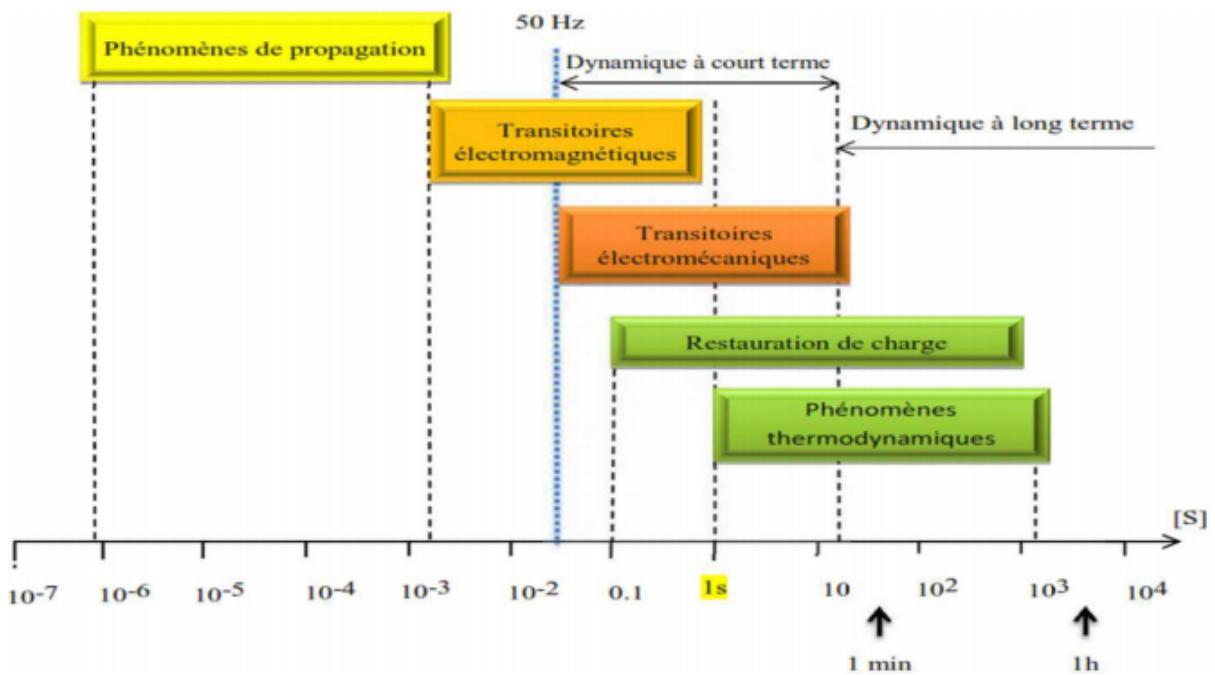


Figure 1.1: Classification des phénomènes dynamiques dans les réseaux électriques

## I.5 Différents types de stabilité

L'instabilité d'un réseau électrique peut être causée par de nombreux facteurs comme il est précisé précédemment. L'analyse des problèmes de stabilité et l'identification des facteurs contribuant à l'atteinte de stabilité ont permis d'améliorer la stabilité des réseaux électriques et de classer la stabilité en fonction de leur nature.

Pour cette classification, on se base surtout sur :

1. la nature physique de l'instabilité;
2. l'amplitude de perturbations ;
3. la plage de temps des phénomènes ;
4. les méthodes de calcul prédiction utilisée pour étudier la stabilité [3,5].

La figure (1.1) [6] adapte les problèmes de stabilité en tenant compte de tous ces paramètres.

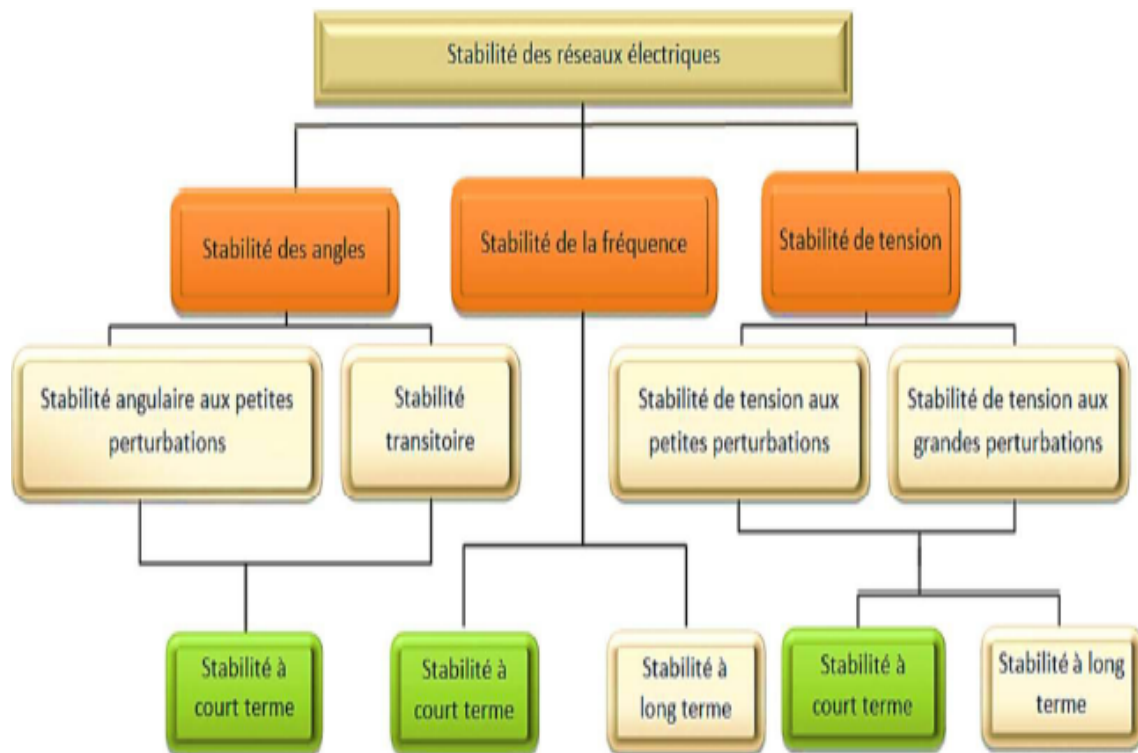


Figure 1.2: Classification des différents types de la stabilité des systèmes de puissance (IEEE/CIGRE-2004)

### I.5.1 Stabilité angulaire

La stabilité de l'angle de rotor concerne la capacité des machines synchrones d'un système de puissance inter-connecté de rester en synchronisme suite à une perturbation. Elle dépend de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre les couples électromagnétique et mécanique agissant sur le rotor de chaque machine synchrone du système.

L'instabilité qui peut résulter se produit sous forme d'augmentation des oscillations angulaires de certains générateurs pouvant conduire à une perte de synchronisme avec d'autres générateurs [3,4].

Suivant l'amplitude de la perturbation, nous pouvons caractériser la stabilité de l'angle de rotor en deux sous-catégories :

#### I.5.1.1 Stabilité angulaire aux petites perturbations (en petits signaux)

Elle est définie par la capacité du système de puissance de maintenir le synchronisme en présence des petites perturbations. Les perturbations sont considérées comme suffisamment

petites pour que la linéarisation des équations du système soit permise aux fins de l'analyse.

L'instabilité résultante se manifeste sous forme d'un écart croissant, oscillatoire ou non-oscillatoire, entre les angles de rotor [2].

### I.5.1.2 Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire)

Elle concerne la capacité du système de puissance de maintenir le synchronisme après avoir subi une perturbation sévère transitoire tel un court-circuit sur une ligne de transmission ou une perte d'une partie importante de la charge ou de la génération.

La réponse du système implique de grandes variations des angles de rotor, elle dépend de la relation non-linéaire couples-angles.

La stabilité transitoire dépend non seulement de l'amplitude des perturbations et du point de fonctionnement initial mais elle dépend également des caractéristiques dynamiques du système, elle se manifeste à court terme sous forme d'un écart croissant de façon aperiodique de certains angles de rotor.

Si l'instabilité se manifeste directement suite à la perturbation (plus précisément dans la première seconde qui suit l'élimination du défaut), elle est appelée instabilité de première oscillation (First Swing Instability), (cas 1, figure (1.2))[2], et elle s'étend sur 3 à 5 secondes.

L'instabilité transitoire peut aussi se manifester autrement, elle peut résulter de la superposition des effets de plusieurs modes d'oscillation lents excités par la perturbation, provoquant ainsi une variation importante de l'angle de rotor au-delà de la première oscillation (instabilité de multi-oscillations), (cas 2, figure (1.2)). La gamme de temps associée va de 10 à 20 secondes [2].

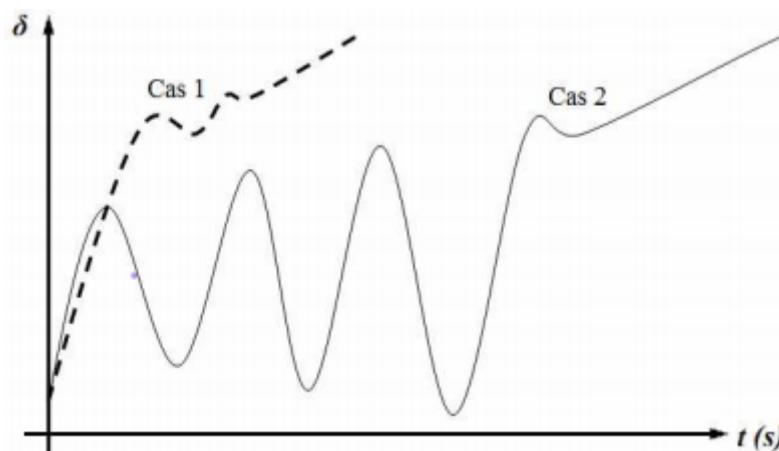


Figure 1.3: Variation d'angle de rotor.

cas 1 : Instabilité de première oscillation. Cas 2 : instabilité de multi-oscillations.

### **I.5.2 Stabilité de tension**

La stabilité de tension, par définition, se rapporte à la capacité d'un système de puissance, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de maintenir des valeurs de tensions acceptables à tous les nœuds du système après avoir subi une perturbation.

La stabilité de tension dépend donc de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre la demande de la charge et la fourniture de la puissance à la charge.

L'instabilité résultante se produit très souvent sous forme de décroissance progressive de tensions à quelques nœuds [2].

### **I.5.3 Stabilité de fréquence**

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système de maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à un important déséquilibre, entre les puissances produite et consommée [2].

## **I.6 Causes d'instabilité**

Les causes suivantes peuvent provoquer directement le blackout ou aggraver la situation du système qui pourra mener indirectement au blackout :

- Le court-circuit : un court-circuit provoque un déséquilibre important entre le couple moteur et le couple résistant.
- La surcharge ou la défaillance d'une protection.
- Branchement d'une charge importante.
- Génératrice de puissance importante chargée.
- Variations momentanées de la charge.
- Les manoeuvres d'ouverture ou de fermeture dans les lignes.

## I.7 Différents types d'oscillations à faibles fréquences

Les oscillations électromécaniques sont associées aux rotors des générateurs pendant ces oscillations, l'énergie mécanique cinétique est échangée entre les générateurs lors de l'écoulement de la puissance électrique dans le réseau. Ces oscillations peuvent être classées en deux groupes selon leurs manières d'évolution [4]:

- Oscillations spontanées, dans ce cas les oscillations se développent lorsque l'amortissement d'un mode du système devient négatif par changement graduel des conditions de fonctionnement du système.
- Oscillations dues à une perturbation, un défaut de ligne de transmission, par exemple peut entraîner des oscillations en diminuant subitement l'amortissement d'un mode, si cet amortissement devient négatif, les oscillations résultantes vont continuer ou même augmenter.

Les types des oscillations à faibles fréquences rencontrées habituellement dans les systèmes de puissance peuvent être classés en quatre groupes, figure (1.4) [4]. Généralement, la fréquence de ces oscillations fournit une bonne indication sur leurs types [4].

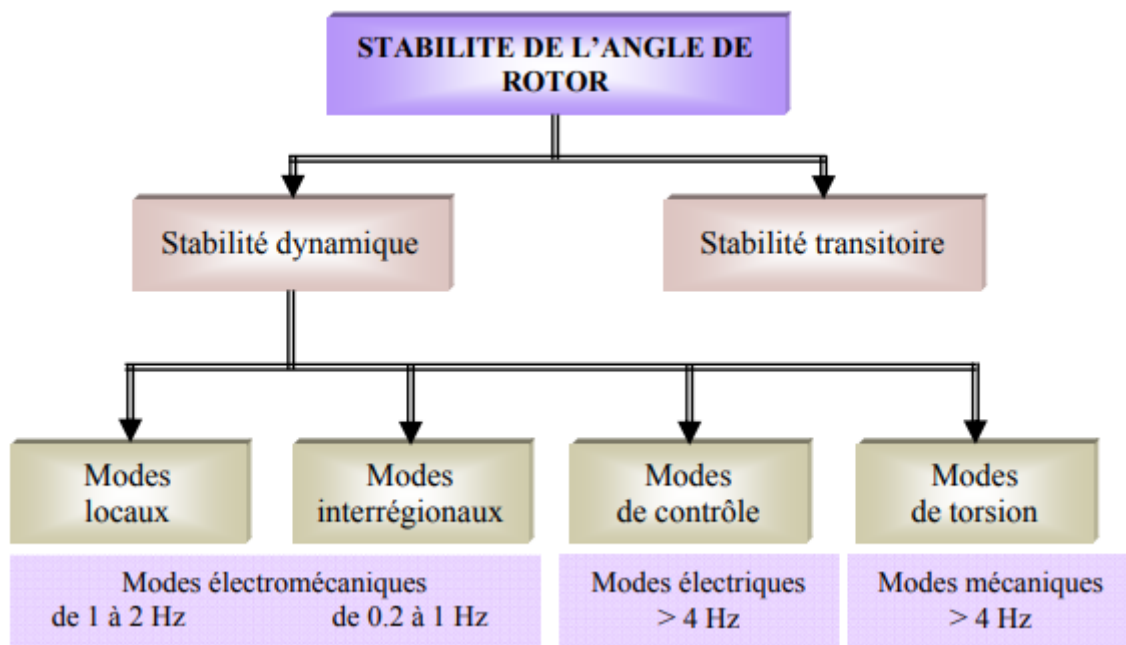


Figure 1.4: Représentation des modes d'oscillatoires des grands réseaux d'électriques

### **I.7.1 Oscillations des modes locaux**

Les modes locaux sont les modes les plus rencontrés dans les systèmes de puissance. Ils sont associés aux oscillations entre un générateur (ou un groupe des générateurs) d'une centrale électrique et le reste du système.

Le terme local est utilisé car les oscillations sont localisées dans une seule centrale ou une petite partie du système, (par exemple : les générateurs G1 et G2 oscillent ensemble par rapport au générateur G3 trouvé dans la même région, figure (1.5)) [4].

La gamme de fréquence de ces oscillations est généralement de 1 à 2 Hz. L'expérience montre que ces oscillations tendent à se produire lors de l'utilisation des régulateurs de tension possédant une réponse rapide et quand le lien de transmission entre une centrale et ses charges est très faible (IEEE, 2003).

Pour assurer un bon amortissement de ces modes, des sources d'amortissement, tel le stabilisateur de puissance, peuvent être ajoutées aux générateurs à l'origine de ces modes [4].

### **I.7.2 Oscillations des modes globaux**

Les oscillations des modes globaux, ou oscillations interrégionales, sont associées à l'oscillation entre certains générateurs d'une partie du système et certains générateurs d'une autre partie du système (par exemple : les générateurs, G1, G2, G3 et G4, de la région A oscillent ensemble par rapport au générateur G5 de la région B, figure (1.5))[4]. Les modes associés à ces oscillations présentent généralement des amortissements très faibles et, si ces derniers sont négatifs, de petites perturbations peuvent exciter des oscillations divergentes.

Les fréquences de ces oscillations se trouvent généralement dans la gamme de 0.2 à 1 Hz. Cette gamme est inférieure à celle des modes locaux car les réactances des liens entre les systèmes de puissance sont élevées.

Généralement, la fréquence naturelle et le facteur d'amortissement d'un mode interrégional décroissent lorsque l'impédance d'une ligne d'interconnexion ou la puissance transmise augmente.

Le système d'excitation et les caractéristiques des charges affectent également les oscillations des modes interrégionaux. Ainsi, ces modes présentent des caractéristiques plus complexes que ceux des modes locaux .

Étant donné que les modes interrégionaux impliquent plusieurs générateurs, un bon amortissement de tels modes peut exiger l'utilisation de stabilisateurs de puissance pour un grand nombre des générateurs [4].

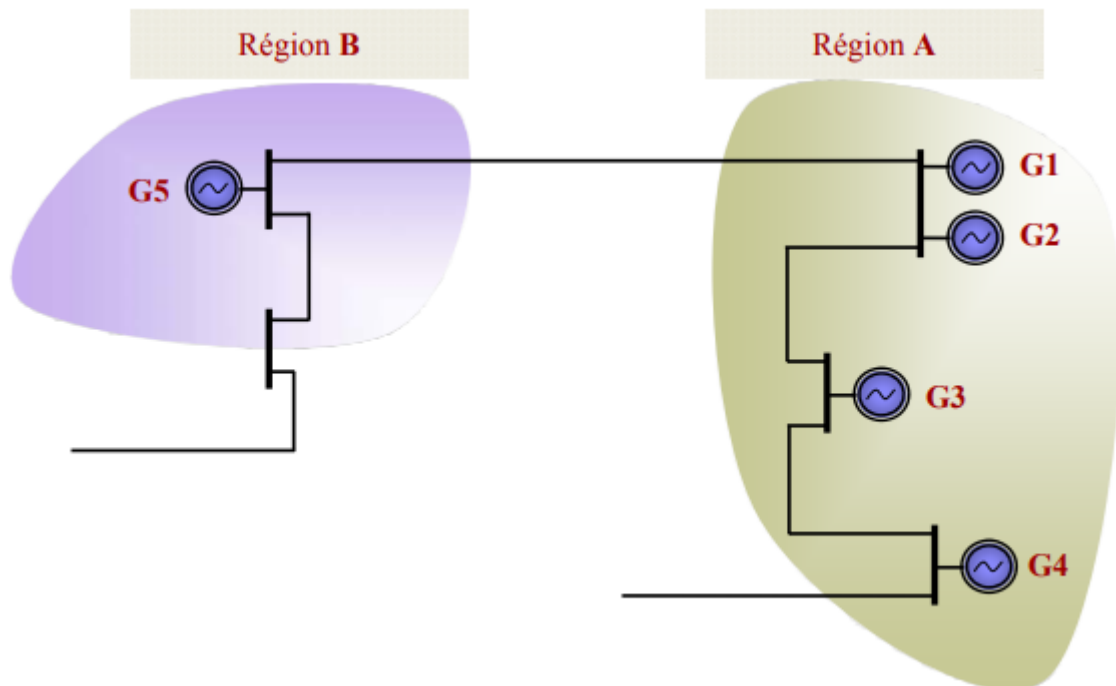


Figure 1.5: Système de puissance simple à deux régions

### I.7.3 Oscillations des modes de contrôle

Les oscillations associées aux modes de contrôle sont dues :

- Soit, aux contrôleurs des générateurs (mauvais réglage des contrôleurs des systèmes d'excitation ou des gouverneurs).
- Soit, aux autres dispositifs contrôleurs (convertisseurs HVDC, SVC,...). La fréquence de ces oscillations est supérieure à 4 Hz [4].

### I.7.4 Oscillations des modes de torsion

Ces oscillations sont essentiellement reliées aux éléments en rotation entre les générateurs et leurs turbines.

Elles peuvent aussi être produites par l'interaction des éléments de rotation avec le contrôle d'excitation, le contrôle de gouverneur, les lignes équipées avec des compensateurs de condensateurs en série....., la fréquence de ces oscillations est aussi supérieure à 4 Hz [4].

## **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une façon générale les différents types de la stabilité et on a présenté également une analyse sur la stabilité du réseau électrique en présence des petites perturbations et des oscillations électromécaniques dans les systèmes de puissance, et les phénomènes dynamiques dans les réseaux électriques et les différents types d'oscillations à faibles fréquences.

# Chapitre II

## Conception des Stabilisateurs de Puissances

### II.1 Introduction

Les stabilisateurs de puissance sont des dispositifs insérés dans les circuits d'excitations des générateurs afin de remédier le problème causé par les AVR et assure la stabilité dynamique du système.

De nombreuses méthodes et approches ont été étudiées pour concevoir le stabilisateur du système de puissance. Dans cette partie, on présentera les méthodes utilisées pour la conception des PSSs.

### II.2 Amélioration de la stabilité par les stabilisateurs de puissance

Un PSS permet d'ajouter un signal de tension proportionnel à la variation de vitesse de rotor dans l'entrée du régulateur de tension du générateur figure (2.1) [9], un couple électrique en phase avec la variation de vitesse de rotor est ainsi produit dans le générateur.

Le PSS va s'opposer à toutes les faibles oscillations en forçant le système d'excitation à varier au plus juste et au bon moment. Par conséquent, l'ensemble du système de contrôle d'excitation (AVR et PSS) doit assurer les points suivants [5]:

- Supporter les premières oscillations faisant suite à une grande perturbation.
- Assurer la stabilité transitoire du système.
- Maximiser l'amortissement des oscillations électromécaniques associées aux modes locaux ainsi qu'aux modes inter-régionaux sans effets négatifs sur les autres modes.
- Minimiser la probabilité d'effets défavorable.

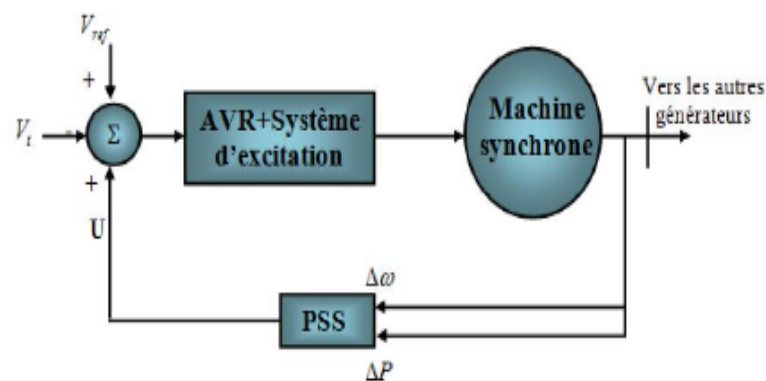


Figure 2.1: Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système

Le système d'excitation est équipé de contrôleurs, appelés habituellement régulateurs de tension (AVR) figure (2.2) [10].

Ces derniers sont très importants pour l'équilibre de la puissance réactive qui sera fournie où absorbée selon les besoins des charges. Le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation de l'alternateur pour régler le flux magnétique dans la machine et ramène la tension de sortie de la machine aux valeurs souhaitées. Une caractéristique très importante d'un régulateur de tension est sa capacité à faire varier rapidement la tension d'excitation.

Le système d'excitation est un système auxiliaire qui alimente les enroulements rotoriques pour exciter la machine synchrone afin que cette dernière puisse fournir le niveau de puissance demandé.

En régime permanent, ce système fournit une tension et un courant continu mais il doit être capable également de faire varier rapidement la tension d'excitation en cas de perturbation sur le réseau [6].

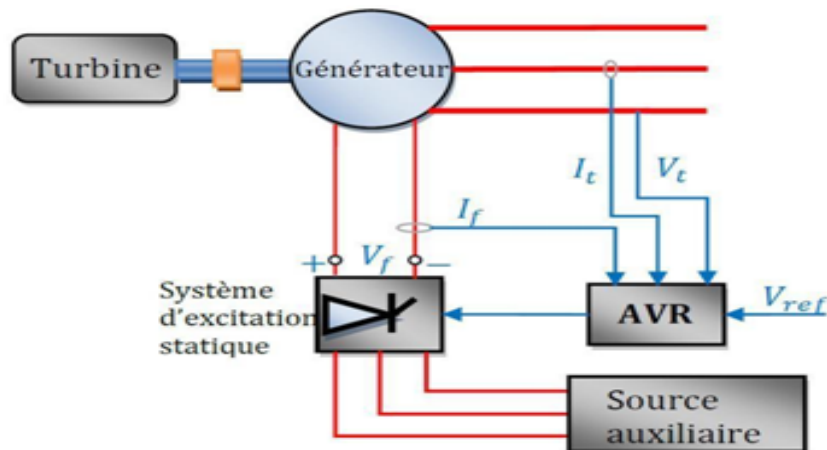


Figure 2.2: Structure d'un système d'excitation statique avec son AVR

## II.3 Classification des PSSs suivant leur conception technologique

Plusieurs modèles de PSS ont été proposés avec différentes fonctions de transfert, voici une classification de ces dispositifs suivant leur conception technologique :

### II.3.1 PSSs analogiques

On les appelle aussi les PSS conventionnels (CPSS). Ce type de PSS est caractérisé par des paramètres fixes, son inconvénient c'est la dégradation de ces performances avec le changement du point de fonctionnement, car il ne peut pas s'adapter à toutes les situations [6].

### II.3.2 PSSs numériques

Les fonctions de transfert de base sont les mêmes que celle des PSSs de type analogique. La différence réside dans le fait que les paramètres de la fonction de transfert et/ou la sortie se calculent par des calculateurs.

Beaucoup de méthodes numériques sont utilisées dans le but de concevoir un PSS numérique le plus performant possible.

Le meilleur PSS est celui qui procure le meilleur degré de stabilité au système de

puissance, et la meilleure atténuation des oscillations rotoriques lorsque les conditions de fonctionnement changent [6].

## II.4 Classification des PSSs suivant leurs structure interne

Parmi les structures classiques les plus utilisées, nous distinguons trois catégories de PSS:

- PSS à avance retard de phase.
- PSS multi bande.
- PSS à action PID (Proportionnel, Intégrateur, Dérivateur.).

Ces trois types de PSS ont aussi plusieurs variantes, mais leur principal rôle, c'est d'injecter un signal de tension (proportionnel à la variation du signal à détecter, représentant le mode néfaste) dans l'entrée du régulateur de tension (AVR). Le PSS va s'opposer aux faibles oscillations en forçant le système d'excitation à répondre de la façon la plus fiable. Dans cette section, nous allons présenter les structures internes des différents types de PSS, en passant par les PSSs à avance retard (qui sont les PSS les plus utilisés vu leurs simplicité), puis les PSSs multibande caractérisés par leurs possibilités de traiter trois gammes de mode séparément, et finalement on présentera les PID qui sont des régulateurs classiques très connus, souvent utilisés dans l'industrie et ont prouvés leur performance comme stabilisateur de puissance [6].

### II.4.1 Modèle du PSS à avance retard de phase (conventionnel)

Le type de PSS le plus utilisé est connu sous le nom de PSS conventionnel (ou PSS avance/retard). Ce type a montré sa grande efficacité dans le maintien de la stabilité aux petites perturbations. Ce PSS utilise la variation de vitesse de rotor comme entrée, il se compose généralement de quatre blocs, figure (2.3) [6]:

- Bloc d'amplificateur.
- Bloc de filtre passe-haut "filtre Washout".

- Bloc de compensation de phase.
- Un limiteur.

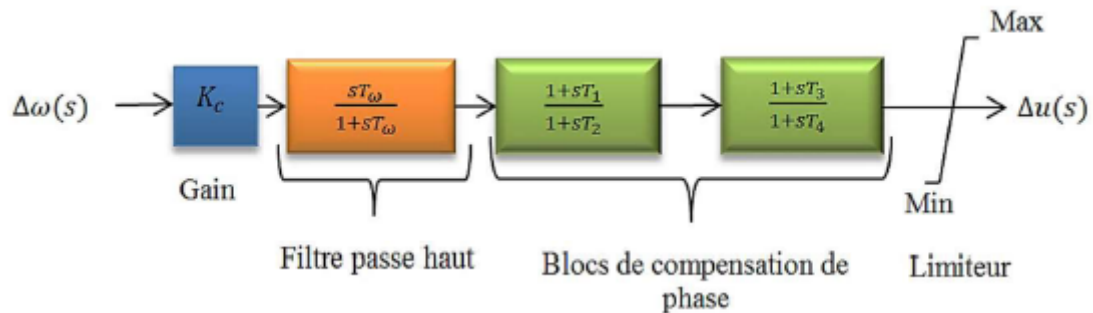


Figure 2.3: Modèle d'un PSS avance/retard

#### A) Amplificateur:

Il détermine la valeur de l'amortissement introduit par le PSS. Théoriquement, sa valeur ( $K_{PSS}$ ) doit correspondre à l'amortissement maximal [11], généralement  $K_{PSS}$  varie généralement de 0.01 à 100 [12].

#### B) Filtre passe-haut "filtre Wash-out":

Il élimine les oscillations à très basse fréquence (inférieure à 0.2 Hz) présentées dans le signal d'entrée.

Il supprime également la composante continue de la vitesse (la composante "DC" correspondant au régime statique), le PSS ne réagit donc que lorsqu'il y a des variations de vitesse.

La constante de temps de ce filtre ( $T_\omega$ ) doit être suffisamment grande pour permettre aux signaux, généralement ( $T_\omega$ ) varie de 1 à 20 secondes, une amélioration remarquable sur la stabilité de la première oscillation est obtenue avec une valeur ( $T_\omega$ ) fixée à 10 secondes [13].

#### C) Filtre compensation de phase

L'origine de l'amortissement négatif est, comme nous l'avons vu, associée au retard de phase introduit entre le couple électrique du générateur  $\Delta T_e$  et l'entrée du système d'excitation  $\Delta V_{er}$ . Pour mieux garantir la stabilité du système, deux étages (au moins) de compensations de phase sont nécessaires.

D) **Limiteur**

Le PSS est conçu pour améliorer l'amortissement du système en cas de petites variations autour d'un point d'équilibre. Son objectif n'est pas de restaurer la stabilité du système aux perturbations sévères (la stabilité transitoire) [14], les valeurs minimales et maximales du limiteur s'étendent de  $\pm 0.02$  à 0.1 par-unité [15].

**II.4.2 MB-PSS(multibande)**

Contrairement au stabilisateur conventionnel, qui est composé d'une série de filtres en cascade (passe haut et avance-retard de phase).

Le MB-PSS figure( 2.4)[6] est constitué de trois étages découplés en fréquence (basses, moyennes et hautes fréquences) qui permettent d'obtenir un stabilisateur robuste vis-à-vis l'ensemble des modes d'oscillations à amortir, il est plus performant que le PSS conventionnel et permet l'amortissement de tous les modes d'oscillations que l'on trouve dans un réseau électrique [16].

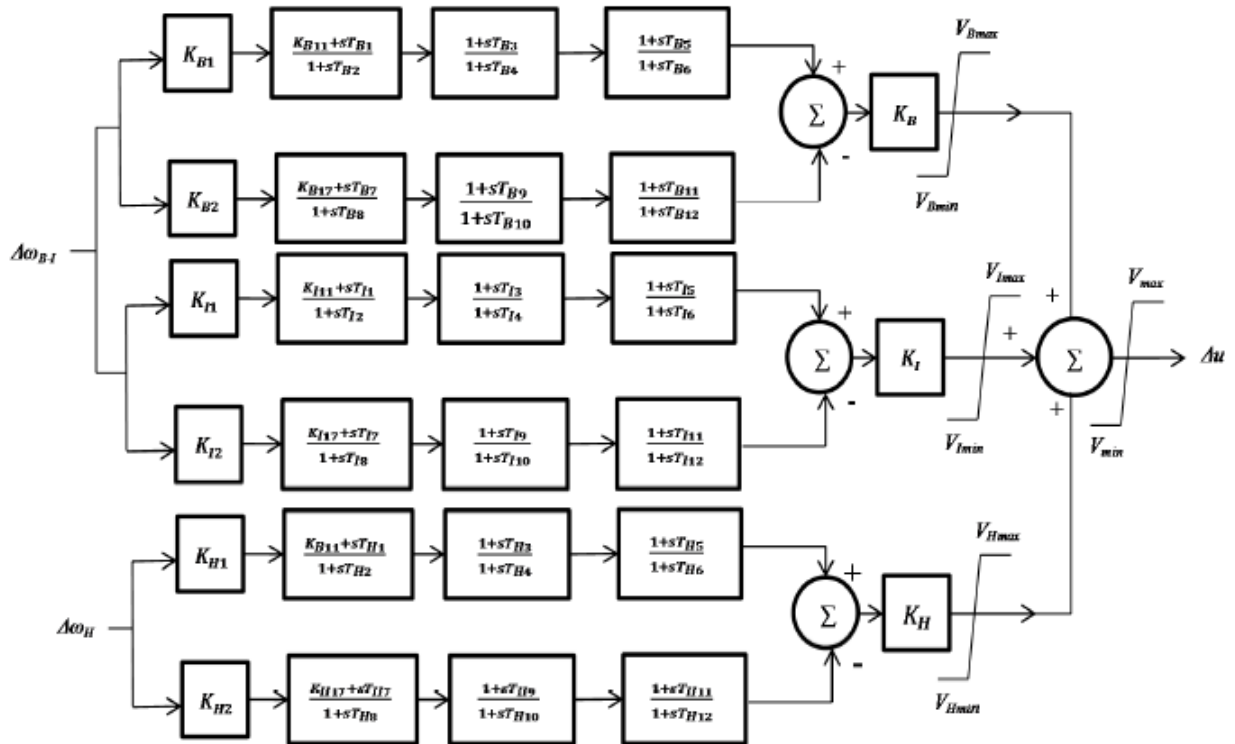


Figure 2.4: Stabilisateur Multibande, IEEE PSS4B

### II.4.2.1 Structure interne du MB-PSS

L'entrée du MB-PSS est basée sur trois déviations de vitesse différentes (la déviation de basse fréquence  $\Delta\omega_B$ , la déviation de vitesse pour les fréquences intermédiaires  $\Delta\omega_I$  et la déviation de vitesse haute fréquence  $\Delta\omega_H$ ).

La déviation de vitesse du rotor  $\Delta\omega_H$  est utilisée directement comme le signal d'entrée pour le transducteur supérieur. Le signal de sortie de ce bloc est ensuite injecté comme une entrée à la partie basse et intermédiaire du PSS4B, pour créer un signal qui représente les hautes oscillations.

Par ailleurs, la puissance électrique ( $P_e$ ) est utilisée comme entrée pour le transducteur inférieur, le signal de puissance électrique doit passer par un bloc intégral pour être considéré comme un signal de vitesse [17], ensuite sa sortie est utilisée comme entrée de la partie haute fréquence.

### II.4.2.2 Fonction de transfert du MB-PSS

La fonction de transfert du MB-PSS est illustrée par la figure (2.4), elle est constituée de trois branches distinctes, chacune comprend un filtre passe-bande et se compose de deux autres sous branches représentant les filtres de déphasage symétriques qui contiennent trois éléments à avance retard de phase et des gains individuels.

Cette structure de filtre simple et robuste offre une flexibilité d'accord remarquable. La bande basse s'occupe de phénomènes oscillants très lents tels que les modes communs trouvés sur un système isolé, à titre d'exemple le mode commun naturel d'Hydro-Québec est généralement de 0.05 Hz [18].

La bande intermédiaire est utilisée pour les modes interzonaux habituellement compris entre 0,2 et 0,8 Hz. La bande haute traite des modes locaux de la centrale électrique et inter-machines dans la plage de 0,8 à 4,0 Hz [18].

Le signal de sortie  $\Delta\mu$  est formé par une sommation des signaux  $V_B, V_I$  et  $V_H$  issus des filtres. En outre, le MB-PSS est muni de limiteurs pour chaque sortie de tension comme ces congénères, cette fonctionnalité améliore la flexibilité et l'efficacité du MB-PSS en permettant un contrôle maximal de chaque bande indépendamment de la plage dynamique totale du PSS [18].

### II.4.2.3 Méthodologie de paramétrage du MB-PSS

Malgré que le nombre des paramètres constituant le MB-PSS est très élevés, leur réglage est simple, dans cette partie, nous allons exposer le mode de réglage proposé par les concepteurs de ce type de PSS publié en 2006 par le CIGRE [18].

Les deux articles publiés par, pratiquement il existe différentes façons de régler les paramètres de MB-PSS en fonction du degré d'optimisation que l'on veut atteindre [19,20].

Cependant, la stratégie la plus simple et la plus utilisée pour les filtres à bande différentielle est l'approche symétrique [18].

Avec cette approche, il est possible de définir le PSS avec seulement deux types de paramètres de haut niveau qui sont les trois fréquences centrales de filtrage  $F_B$ ,  $F_I$  et  $F_H$  les gains  $K_B$ ,  $K_I$  et  $K_H$ . Bien que les paramètres des filtres différentiels de type PSS4B puissent être ajustés de diverses façons, une méthode de réglage simple basée sur trois filtres passe-bandes symétriques respectivement accordés à  $F_B$ ,  $F_H$  et  $F_I$  est la plus souvent utilisée, pour la bande haute, les constantes de temps et les gains des branches sont calculés d'après les équations suivantes [19,21]:

$$T_{H2} = T_{H7} = x = \frac{1}{2\pi\sqrt{RF_H}} \quad (2.1)$$

$$T_{H1} = \sqrt{\frac{T_{H2}}{R}} \quad (2.2)$$

$$T_{H8} = T_{H7} \cdot R \quad (2.3)$$

$$K_{H1} = K_{H2} = \frac{R^2 + R}{R^2 - 2R + 1} \quad (2.4)$$

Les constantes de temps  $T_{H2}$  et  $T_{H7}$  sont directement dérivées de la fréquence centrale du filtre  $F_H$ , tandis que les constantes de temps  $T_{H1}$  et  $T_{H8}$  sont calculées, en utilisant les valeurs de  $T_{H2}$  et  $T_{H7}$  d'après les équations (2.2) et (2.3). L'équation (2.4) est utilisée pour calculer les gains  $K_{H1}$  et  $K_{H2}$  afin d'obtenir un gain uniforme pour le filtre différentiel. Le gain de bande est donc égal à  $K_H$ . Les valeurs restantes sont considérées constantes [19,20].

Les expressions similaires sont également valables pour les deux autres bandes. En tout cas, 24 paramètres au total sont à ajuster.

Afin de faciliter l'utilisation de ce type de PSS et de fournir un calcul efficace et rapide des paramètres du PSS, Hydro Québec et ABB ont conçu en 2006 un logiciel de réglage des paramètres de ces PSS, nommé «MB-PSS Tool» [18].

Puis les recherches qui se succèdent utilisent les méthodes métaheuristiques pour la détermination des paramètres du MB-PSS. Pour cette fin, en 2007, Sumanbabu et al [21], ont utilisé l'algorithme BFA (Bacterial Foraging Algorithm), en 2008, Castrillon et Colome [22], ont investigué l'utilisation de deux algorithmes EPSO (Evolutionary Particle Swarm optimization) et robuste  $H_\infty$ , et en 2013 Khodabakhshian s'est appuyé sur l'algorithme PCEA (Preserving Contrast Enhancement Algorithm) [23]. Remarquons que toutes ces méthodes sont efficaces mais compliquées et fastidieuses.

## II.5 PSS de Type PID

En 1922, Nicholas Minorsky présenta une commande à appliquer dans les systèmes de contrôle de position. En effet, il formula une loi de commande appelée maintenant contrôleur (PID), il a établi cette loi de commande en observant la façon de gouverner un navire, les premiers régulateurs de type PID utilisés dans le domaine d'électricité, ont été dédiés à la commande des chaudières, le contrôle du niveau d'eau et de la pression de la vapeur [24]. Ce régulateur PID est utilisé de nos jours dans tous les domaines de contrôle.

Il est devenu l'outil standard avec l'apparition de la commande des processus à partir des années quarante du siècle passé. Dans les processus de commande moderne, la plupart des boucles de contrôle sont de type PID [25].

Pratiquement, tous les contrôleurs PID aujourd'hui sont numériques et à base de microprocesseurs, ceci a permis de les doter d'autres fonctionnalités qui les rendent le plus courants dans les systèmes de contrôle modernes.

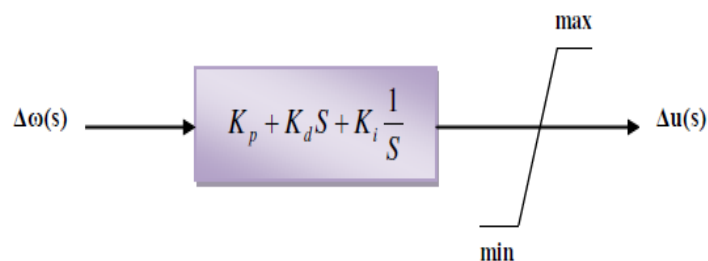


Figure 2.5: Schéma bloc d'un PSS PID

### II.5.1 Structure d'un PSS-PID

La structure générale du PSS-PID est schématisée par la figure (2.6). Tout comme le régulateur PID. Un PSS-PID, est la combinaison de trois actions de commande qui sont [6]:

- a) Un gain amplificateur dit proportionnel ( $K_p$ ) qui agit beaucoup plus sur l'erreur dynamique, en effet un gain plus grand réduit l'erreur statique (sans l'annuler) et rend le système plus rapide mais en revanche, il affecte le degré de stabilité du système, l'action de ce correcteur de type proportionnel est donnée par [6]:

$$P = K_p \cdot \varepsilon(t) \quad (2.5)$$

Ou  $\varepsilon(t)$  est l'erreur de réglage.

- b) Un bloc intégrateur caractérise par son gain  $K_I$  qui a pour rôle d'annuler l'erreur statique, son intérêt principal est donc de corriger et d'améliorer la précision, son action est exprimée par [6]:

$$I = K_I \int_0^t d\varepsilon(t)dt \quad (2.6)$$

- c) Un bloc dérivateur caractérisé par le coefficient  $K_d$  qui permet principalement de générer une correction dérivée qui a un effet stabilisant conduisant à limiter les grandes variations de l'erreur, ceci permet d'amortir les oscillations, de stabiliser le système et d'améliorer le temps de réponse du système, son action déviatrice est exprimée par [6]:

$$D = K_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Puisque chaque paramètre a sa propre influence sur la dynamique et la stabilité du système, leur association en un régulateur de type PSS devient bénéfique pour l'amélioration de la rapidité, la précision et la stabilité, ainsi la sortie d'un PSS-PID est donnée alors par (voir aussi la figure (2.6)) [6] :

$$U(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_I \int_0^t d\varepsilon(t)dt + K_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (2.8)$$

Ce qui donne la fonction de transfert suivante [6] :

$$F_{PSS-PID} = K_p + K_I/s + sK_D \quad (2.9)$$

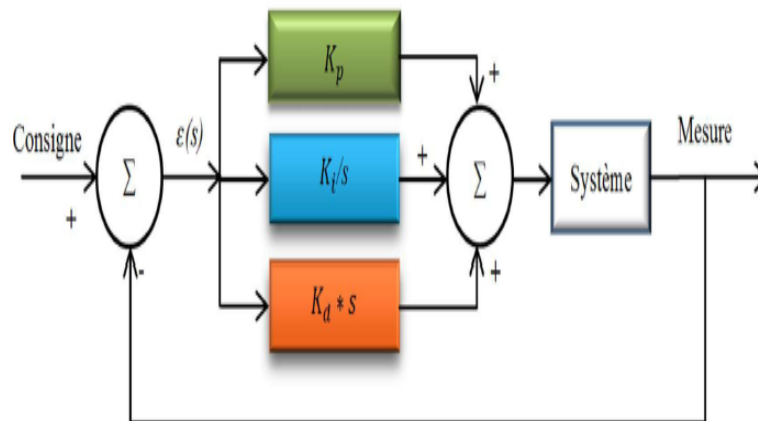


Figure 2.6: Structure générale du PSS-PID

## II.5.2 Détermination des paramètres du PSS-PID

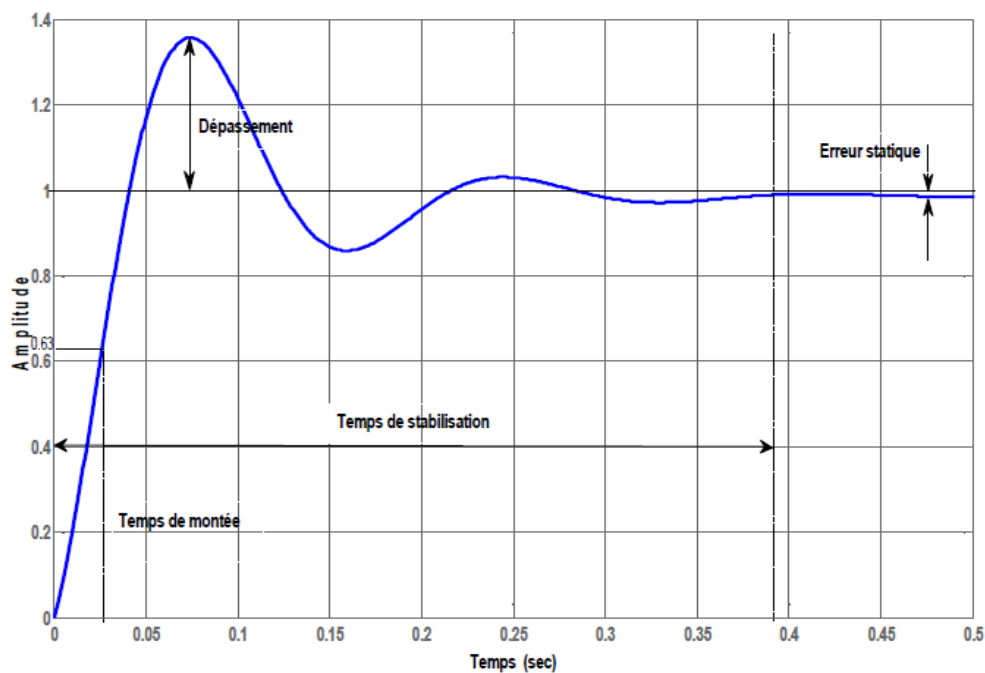


Figure 2.7: Réponse d'un PSS-PID

Le problème de conception d'un PSS-PID réside dans la détermination de ces paramètres ( $K_P$ ,  $K_I$  et  $K_D$ ). Plusieurs méthodes basées sur des essais expérimentaux sur le comportement du système ont été développées pour cette fin.

Citons la méthode de Ziegler et Nichols qui n'est utilisable que si le système étudié

supporte les dépassements (rapport entre le premier pic et la consigne), voir figure (2.7)[6]. Cette méthode consiste à déterminer expérimentalement le gain critique  $K_{cr}$  correspondant à une oscillation  $\omega_{cr} = 2\pi/T_{cr}$ , puis calculer les paramètres du PSS-PID à partir du tableau suivant [27,28].

Tableau 2.1: Expressions des paramètres du PID d'après la méthode de Ziegler–Nicholas

	Cas du PID-PSS parallèle	Cas du PSS-PID série
$K_p$	$\frac{3}{5K_{cr}}$	$\frac{K_{cr}}{6}$
$K_i$	$\frac{2K_p}{T_{cr}}$	$\frac{2T_{cr}}{7}$
$K_d$	$\frac{K_p T_{cr}}{8}$	$\frac{T_{cr}}{5}$

D'autres méthodes ont été élaborées pour la détermination des paramètres du régulateur PID en général et du PSS-PID particulier. Nous citons principalement les méthodes analytiques basées sur les fonctions de transfert (placement des pôles, méthode lambda,.....), les méthodes heuristiques (logique floue, réseaux de neurones,.....etc.) [29,30].

Les méthodes de réponse en fréquence telles que les ondelettes et les méthodes numériques d'optimisation, celles-ci sont les plus adaptées à déterminer les paramètres accordés de plusieurs régulateurs.

## II.6 Classification des PSSs selon le signal d'entrée

Bien que la puissance de sortie du générateur soit décidée par le couple moteur de la turbine, la puissance de sortie du générateur peut aussi être changée par le changement transitoire de la valeur d'excitation.

Le PSS détecte ce changement de puissance et contrôle cette valeur d'excitation, et par conséquent réduit les oscillations de puissance rapidement, le choix du signal local, pouvant être utilisé en tant qu'une entrée du PSS pour contribuer à générer une action de contrôle de stabilisation, est basé sur plusieurs considérations [31,32]:

- Le signal choisi doit être sensible aux oscillations rotoriques des machines. En d'autres termes, il doit détecter le mode oscillatoire néfaste pour que le contrôleur fournisse une action influente et stabilisatrice.

- On doit minimiser au maximum l'influence du signal d'entrée sur les autres modes d'oscillation.
- L'influence sur l'entrée des PSSs et sur les sorties des autres contrôleurs, en l'absence des oscillations dans le système de puissance, doit être faible ou nulle.

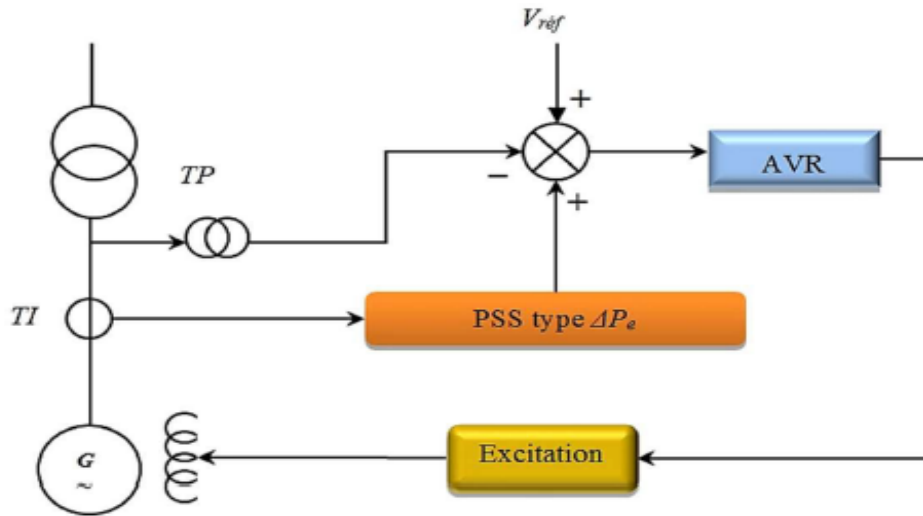
Ces considérations sont été prises en compte dans un certain nombre de modèles dans de nombreuses applications réelles, exigeant le montage d'un PSS sur les systèmes d'excitation d'un générateur.

Plusieurs études se sont penchées sur l'effet de chaque entrée. Ceci a permis de conclure que la vitesse et /ou la fréquence est le meilleur signal d'entrée pour les modes interzonaux, par contre l'utilisation de la variation de la puissance est commode pour atténuer les oscillations dues aux modes locaux [33,34].

Les différents types des PSSs proposés par l'IEEE sont identifiés par le signal d'entrée (à détecter). Le type le plus simple est celui qui a pour une entrée la variation de la puissance électrique ( $\Delta P_e$ ). Ensuite on a utilisé comme entrée la variation de la vitesse ( $\Delta\omega$ ) et/ou la variation de la fréquence ( $\Delta f$ ), ces deux signaux ont été adoptés en vue d'améliorer la stabilité du mode interrégional. Les figures (2.8), (2.9) et (2.10) présentent respectivement le schéma de ces PSSs pour différentes entrées, de ce point de vue il existe plusieurs types de PSSs que nous allons présenter brièvement ci-après:

### **II.6.1 Stabilisateur de puissance basée sur la variation de la puissance électrique**

Ce stabilisateur utilise la composante électrique ( $\Delta P_e$ ) comme variable d'entrée, puisque le taux de variation de la puissance mécanique est limité par la dynamique de la turbine, ces stabilisateurs prouvent leur efficacité pour l'amortissement des modes locaux, mais cette efficacité est limité lorsque les oscillations électromécaniques sont plus lents (de fréquence inférieure à 0.5 Hz) [35,6].

Figure 2.8: Schéma d'implantation d'un PSS de type  $\Delta P_e$ 

## II.6.2 Stabilisateur de puissance basé sur la puissance d'accélération

La puissance d'accélération ( $P_a$ ) est la différence entre la puissance mécanique et la puissance électrique, ce type de PSS utilise à son entrée la mesure de la puissance mécanique à travers un capteur de position.

Cette entrée améliore la réponse dynamique en ralentissant les modes d'oscillation rotoriques, mais ces stabilisateurs pourraient générer une forte oscillation de puissance réactive chaque fois que les paramètres de puissance sont modifiés, dans de tels cas, une réduction des gains de stabilisation est souvent utilisée pour limiter ces effets nuisibles [4,38,35].

## II.6.3 Stabilisateur hybride basé sur la puissance d'accélération

Ce PSS est basé sur la dérivée d'une mesure de vitesse combinée avec la mesure de la puissance électrique  $P_e$  filtrée de façon à ne garder que les phénomènes lents liés à la dynamique de la turbine.

Les deux composantes de puissance sont ensuite combinées pour produire une puissance d'accélération qui est finalement intégrée pour grouper un signal de vitesse, d'où la désignation  $\Delta P - \Delta \Omega$ .

Ce principe est utilisé dans la plupart des stabilisateurs modernes bien que l'ordre élevé du filtre passe-bas utilisé pour extraire la puissance mécanique déforme indirectement la

phase et le gain de ce signal dans la zone de coupure, à savoir la gamme des fréquences intermédiaires (0.2 à 1 Hz) caractérisant les modes interzonaux [6].

#### II.6.4 Stabilisateur basé sur la fréquence de la tension aux bornes de la machine

En utilisant les fréquences externes mesurées aux bornes de la machine, le stabilisateur  $\Delta f$  offre une bonne performance pour les modes interzonaux lents, mais il est beaucoup moins efficace pour les modes locaux car la fréquence interne diffère de la fréquence externe pour les phénomènes rapides [37,6,35-38].

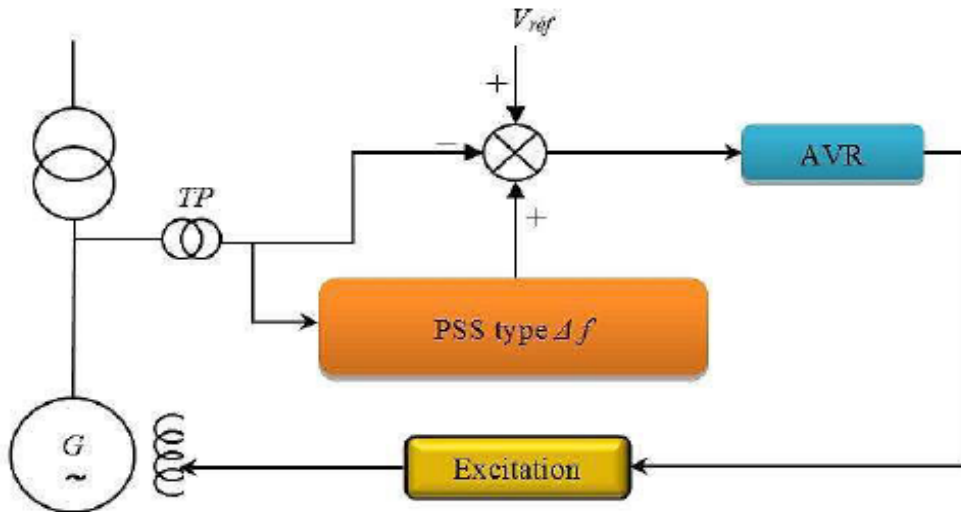
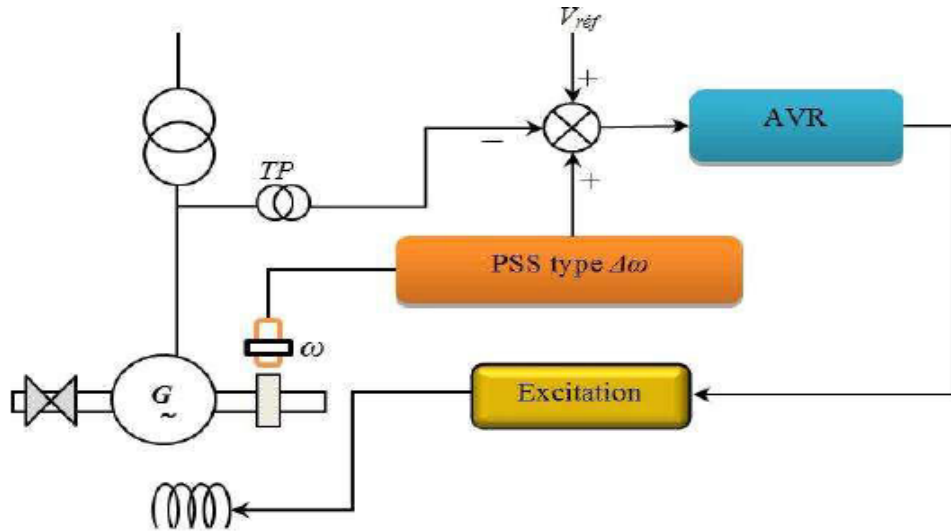


Figure 2.9: Schéma d'implantation d'un PSS de type  $\Delta f$

#### II.6.5 Stabilisateur basé sur la mesure mécanique de la vitesse

Ces stabilisateurs de vitesse de type  $\Delta\omega$  sont équipés d'un capteur mécanique, placé au niveau de l'axe horizontal de la machine.

Sur les unités de production avec un axe vertical, les capteurs doivent être installés spécialement, ce qui rend le coût d'installation plus élevé. De plus, ces capteurs sont sensibles aux imperfections mécaniques du système tel que les mouvements latéraux de la tige qui génèrent ainsi un bruit de fond dans la mesure [35,6].

Figure 2.10: Schéma d'implantation d'un PSS de type  $\Delta\omega$ 

### II.6.6 Stabilisateur de débit basé sur une mesure indirecte de la fréquence interne de la machine

Ce type de stabilisateurs utilise exclusivement une mesure sur des variables électriques de la machine (tension et courant). L'algorithme utilisé pour mesurer la vitesse du rotor est basé sur l'utilisation du phaseur de tension interne.

L'une des caractéristiques majeures de ce type de PSS est qu'il prend en compte les discontinuités générées par les défauts et les transitoires, il permet ainsi de prendre en charge les oscillations de hautes fréquences [6].

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a survolé la structure des PSSs et les modèles des différents PSSs les plus utilisés. Pour chaque type de PSS, nous avons décrit la structure interne et la fonction de transfert.

D'autre part, nous avons conclu que dans tous les cas le problème essentiel rencontré lors de la conception d'un PSS réside dans la détermination de ces paramètres internes.

# Chapitre III

## Simulation et Résultats

### III.1 Introduction

La stabilité du système se détériore en présence des perturbations faibles amplitudes comme dans le cas d'ouverture d'un sectionneur ou fortes lors d'un court-circuit, les oscillations de différentes natures naissent sur les réseaux de puissance électriques. Par conséquent, pour tester efficacement les performances d'un stabilisateur de puissance PSS, il est essentiel d'utiliser un réseau test qui permet de reproduire les différents phénomènes qui apparaissent sur les réseaux.

Dans ce chapitre, un algorithme d'optimisation des paramètres des stabilisateurs de puissance, basé sur les algorithmes génétiques, sera implémenté et appliqué sur le système multi machine.

L'objectif est de trouver les paramètres optimaux des stabilisateurs de puissance, qui assurent un amortissement satisfaisant des oscillations rotoriques et comparer entre les différents types de PSS sur la stabilité des réseaux électriques, on a utilisé l'environnement MATLAB pour la modélisation du système.

### III.2 Formulation de la fonction objectif

Dans cette section, une procédure d'optimisation des paramètres de plusieurs PSSs simultanément sera décrite.

Les PSSs doivent stabiliser le système quel que soit son point de fonctionnement, pour chaque point de fonctionnement considéré un modèle linéaire du système électrique est obtenu, l'équation (3.1) décrit le modèle linéaire d'un système électrique établi autour d'un point de fonctionnement  $k$  suivant.

$$\dot{X} = A_K.X(t) + B_K.U(t) + \Gamma_k.P(t) \quad k = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3.1)$$

$m$  est le nombre de points de fonctionnement considérés. L'ensemble des points de fonctionnement est décrit, non pas par un seul système, mais par une famille de systèmes linéaires.

Soit le nombre de stabilisateurs installés, ils sont décrits par leur fonction de transfert donnée par:

$$U_i(s) = K_i \frac{sT_{\omega i}}{1 + sT_{\omega i}} \left( \frac{1 + sT_{1i}}{1 + sT_{2i}} \right) \left( \frac{1 + sT_{3i}}{1 + sT_{4i}} \right) \Delta\omega_i(s) \quad (3.2)$$

La constante de temps du filtre  $T_\lambda$  est fixe pendant la procédure d'optimisation. Les paramètres à optimiser sont donc le gain  $K$  et les constantes de temps des blocs de compensation de phase  $T_1, T_2, T_3$  et  $T_4$ .

Soit  $\lambda_{kj}$  la  $j^{me}$  valeur propre du système en boucle fermée (avec PSS) pour le  $K^{me}$  point de fonctionnement et  $\xi_{kj}$  le coefficient d'amortissement associé défini par :

$$\begin{cases} \lambda_{kj} = \alpha_{kj} + i\beta_{kj} \\ \xi = -\frac{\alpha_{kj}}{\sqrt{\alpha_{kj}^2 + \beta_{kj}^2}} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.3)$$

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

Les oscillations sont caractérisées par la fréquence oscillatoire en Hertz donnée par :

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

Nous regroupons tous les coefficients d'amortissement du  $K^{me}$  point de fonctionnement dans le vecteur  $\Xi_k$ .

L'objectif est de chercher dans un domaine limité les paramètres des stabilisateurs assurant un amortissement acceptable pour tous les points de fonctionnement, pour cela il faut s'assurer que tous les coefficients soient supérieurs à une valeur bien définie, nous pouvons alors formuler le problème de la manière suivante:

$$\text{Maximiser } F = \min(\min(\Xi_k)) \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (3.5)$$

Sujet à:

$$\begin{cases} K_{imin} \leq K_i \leq K_{imax} \\ T_{rimin} \leq T_{ri} \leq T_{rimax} \end{cases} \quad r = 1..4 \quad i = 1, 2, \dots, i \quad (3.6)$$

Le problème ainsi défini est un problème d'optimisation complexe car la fonction objective dépend des valeurs propres d'une large matrice, il est donc difficile de le résoudre en utilisant les méthodes conventionnelles [39].

Dans la section suivante, le problème sera résolu en utilisant les algorithmes génétiques.

### III.3 Application au Systèmes 2 Régions 4 Machines

#### III.3.1 Description du système

Pour Faire une étude comparative entre les PSSs proposés, dans ce travail, les paramètres des PSSs ont été optimisés par l'algorithme génétique en utilisant une fonction objectif afin d'étudier le phénomène des oscillations électromécaniques et minimiser le vecteur des coefficients d'amortissement.

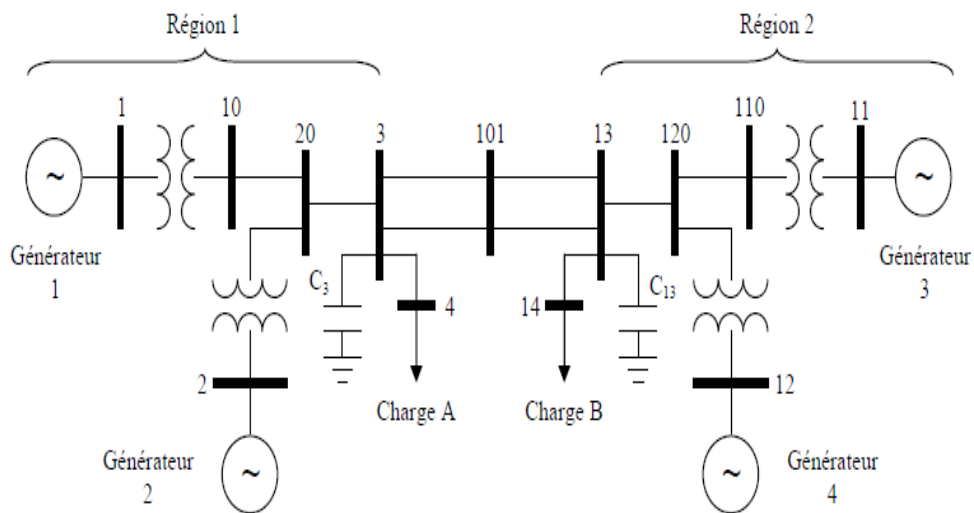


Figure 3.1: Schéma unifilaire du réseau 2 régions 4 machines

Le système montre sur la figure (3.1) est constitué de deux régions reliées à travers une ligne de 220 km avec une puissance de 413MW qui s'écoule de la région 1 vers la région 2, les deux régions sont symétriques et chacune comporte deux générateurs.

Tous les générateurs ont les mêmes paramètres, les données du système se trouvent dans l'annexe.

Nous avons simulé un défaut triphasé au noeud 101 survenu à  $t=1.1s$ . La ligne est ouverte à  $t = 1.19s$  et le défaut disparaît. Puis, on referme la ligne à l'instant  $t=1.2s$  après élimination du défaut, le temps de simulation est de 10s.

Tableau 3.1: Les modes oscillatoires dominants et leurs fréquences

Mode	Fréquence (Hz)	Type
$0.046 \pm 2.901i$	0.4618	<b>inter-régionale</b>
$-0.183 \pm 5.999i$	0.9547	<b>inter-régionale</b>
$-0.188 \pm 5.987i$	0.9529	<b>inter-régionale</b>

### III.4 Application de la procédure d'optimisation

Le problème essentiel c'est de minimiser au maximum les oscillations électromécaniques, ce problème a été transformé en un problème d'optimisation.

La technique d'optimisation AG est utilisée comme moyen de réglage des paramètres du PSS. Les paramètres d'optimisation par les algorithmes génétiques sont donnés par le tableau (3.2). Le tableau (3.3) montre les paramètres des PSSs obtenus après optimisation.

Tableau 3.2: Paramètres d'optimisation de l'algorithme génétique

Paramètres de l'AG		
Type de codage	Binaire	$0.1 \leq K \leq 100$ $0.1s \leq T_1 \leq 1s$ $0.01s \leq T_2 \leq 0.1s$
Taille de la population	50	
Taille du chromosome Probabilité de croisement	96	
Points de croisement	2	
Probabilité de mutation	0.1	
Nombre de générations	50	

Le circuit Simulink utilisé sous Matlab est le suivant :

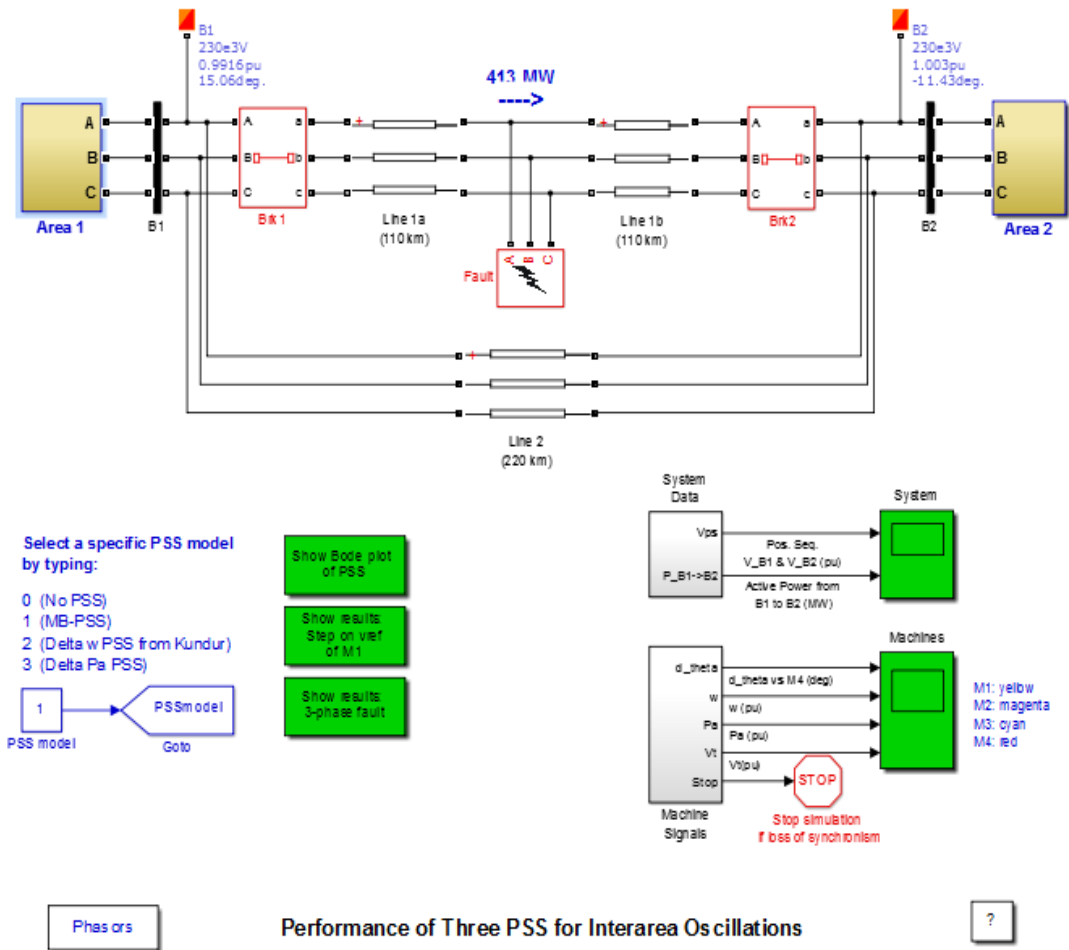


Figure 3.2: Réseau test entre 2 régions 4 machines [Matlab/Simulink]

Après simulation, les paramètres optimisés des quatre PSSs placés au niveau des générateurs sont présentés dans le tableau (3.3) ci-dessous.

Tableau 3.3: Paramètres de stabilisateurs obtenus après l'optimisation par AG

N° Gén	K	$T_{\omega}(s)$	$T_1(s)$	$T_2(s)$
G1	83.9376	20	0.2235	0.0714
G2	23.2141	20	0.3682	0.0202
G2	67.0918	20	0.3224	0.0301
G3	100	20	0.1671	0.0121

Par contre les paramètres des quatre PSSs identiques utilisés par Kundur sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.4: Paramètres des stabilisateurs kundur

N° Gén	K	$T_{\omega}(s)$	$T_1(s)$	$T_2(s)$
G1,2,3 et 4	30	10	0.05	0.02

D'autre part, les paramètres des PSSs multi-bandes sont donnés par le tableau ci-dessous

:

Tableau 3.5: Paramètres des stabilisateurs MB

N° Gén	K	$F_L(\text{Hz})$	$K_L$	$F_I(\text{Hz})$	$K_I$	$F_H(\text{Hz})$	$K_H$
G1,2,3 et 4	1	0,2	30	1,25	40	12	160

Après simulation, les réponses oscillatoires dynamiques des quatre générateurs menus par les différents types de PSSs (Kundur, Muti-Bandes, PSS optimisé par l'algorithme génétique) sont présentées par les figures :

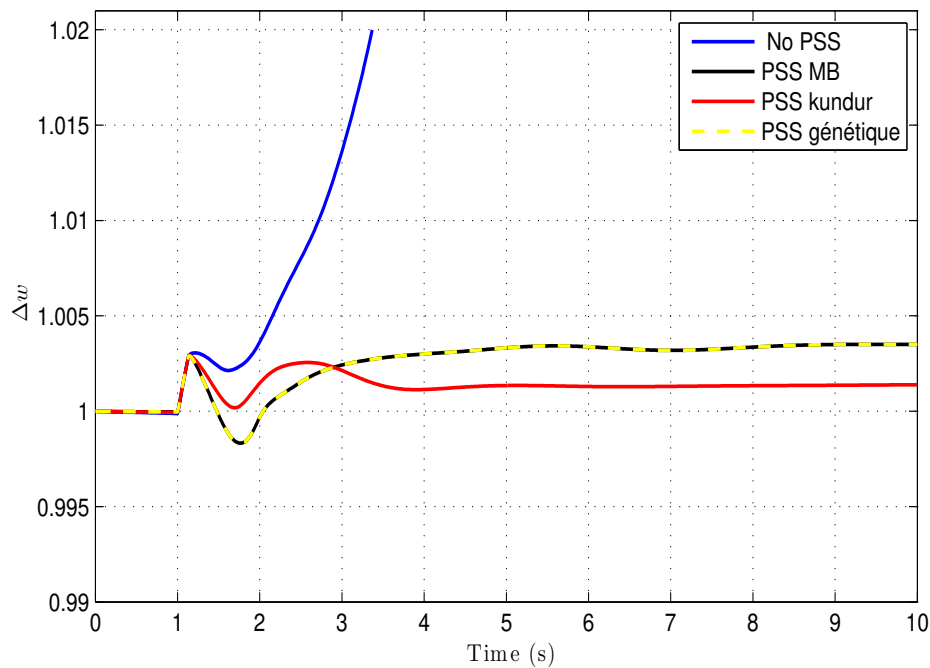
Figure 3.3: Déviations de la vitesse  $\Delta\omega$  de la machine 1 en pu.

Tableau 3.6: Comparaison des pics et le temps de stabilisation de la machine 1

Courbe $\Delta\omega_1$	1 <sup>er</sup> Pic	2 <sup>me</sup> Pic	Temps de stabilisation
No PSS	+1.003	+1.002	divergence
PSS MB	+1.003	+0.998	4s
PSS KUNDUR	+1.003	+1	3.8s
PSS génétique	+1.003	+0.998	4s

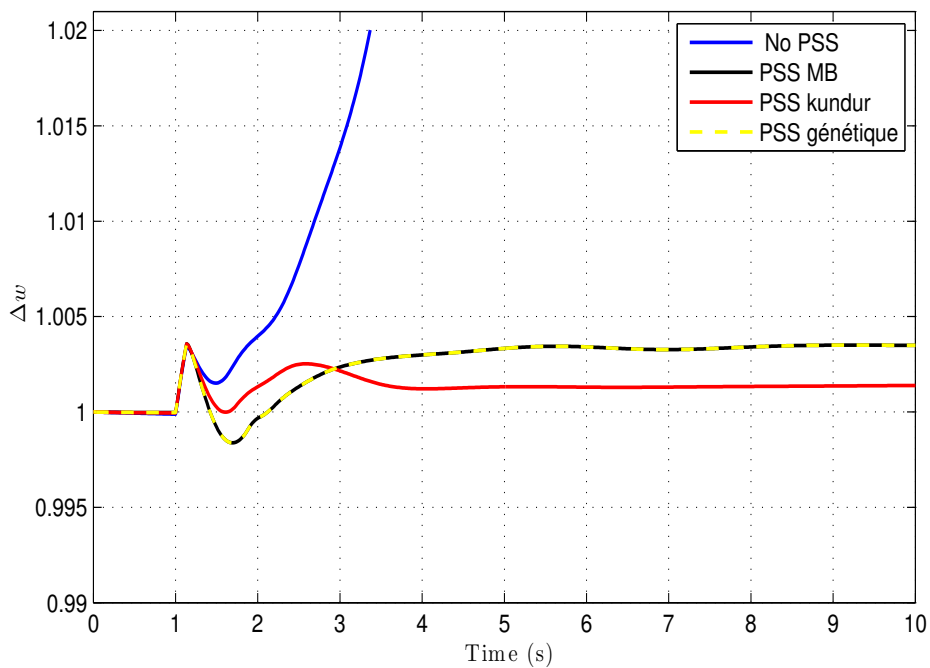
Figure 3.4: Déviations de la vitesse  $\Delta\omega$  de la machine 2 en pu.

Tableau 3.7: Comparaison des pics et le temps de stabilisation de la machine 2

Courbe $\Delta\omega_2$	1 <sup>er</sup> Pic	2 <sup>me</sup> Pic	Temps de stabilisation
No PSS	+1.004	+1.002	divergence
PSS MB	+1.004	+0.998	4s
PSS KUNDUR	+1.004	+1	3.8s
PSS génétique	+1.004	+0.998	4s

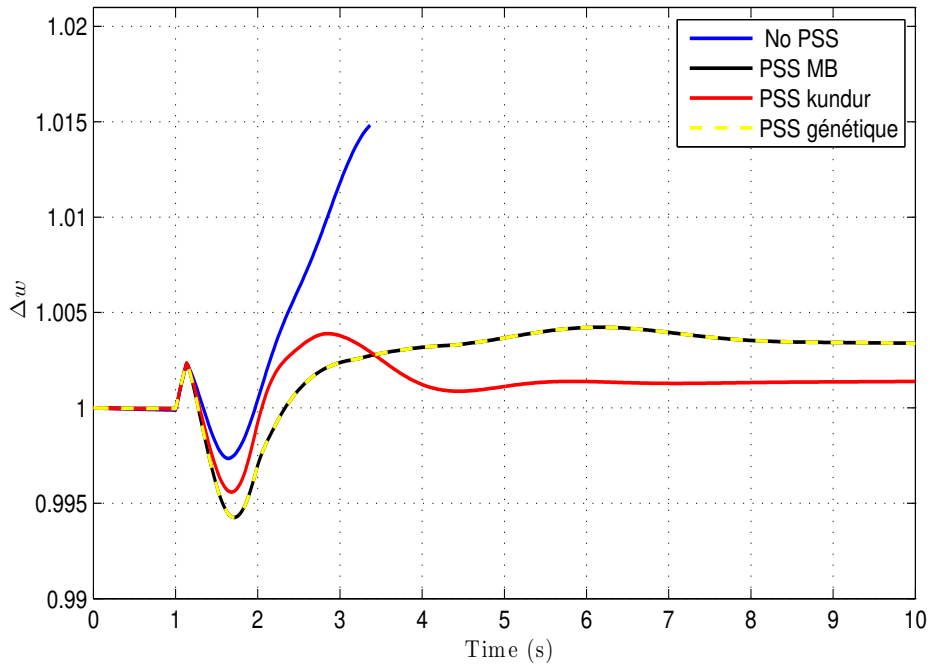
Figure 3.5: Déviations de la vitesse  $\Delta\omega$  de la machine 3 en pu.

Tableau 3.8: Comparaison des pics et le temps de stabilisation de la machine 3

Courbe $\Delta\omega_3$	1 <sup>er</sup> Pic	2 <sup>me</sup> Pic	Temps de stabilisation
No PSS	+1.002	+0.997	divergence
PSS MB	+1.002	+0.994	6s
PSS KUNDUR	+1.002	+0.996	5.5s
PSS génétique	+1.002	+0.994	6s

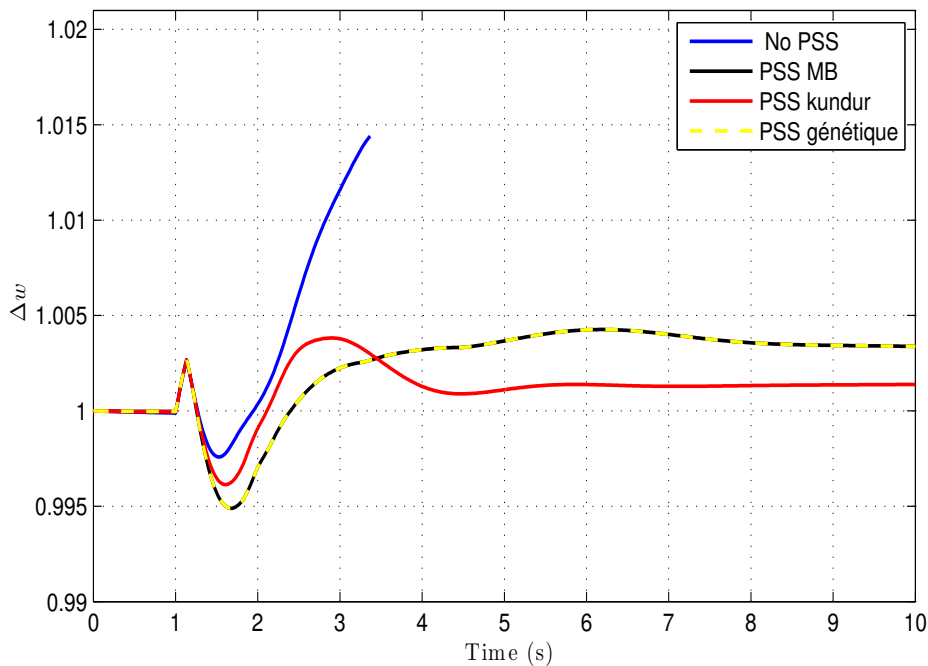
Figure 3.6: Déviations de la vitesse  $\Delta\omega$  de la machine 4 en pu.

Tableau 3.9: Comparaison des pics et le temps de stabilisation de la machine 4

Courbe $\Delta\omega_4$	1 <sup>er</sup> Pic	2 <sup>me</sup> Pic	Temps de stabilisation
No PSS	+1.002	+0.997	divergence
PSS MB	+1.002	+0.994	6s
PSS KUNDUR	+1.002	+0.996	5.5s
PSS génétique	+1.002	+0.994	6s

### III.5 Interprétation

Une perturbation est effectuée par un défaut triphasé, ce qui rend le réseau très oscillant, générant des oscillations non amorties et provoquant la divergence du système. Les figures (3.3, 3.4, 3.5 et 3.6) comparent les différentes déviations de la vitesse rotorique des 4 générateurs et montrent la divergence de la vitesse pour le cas d'un réseau sans PSS.

Avec la présence du stabilisateur de système de puissance (PSS) le réseau retourne à un nouveau point de stabilité suivant le point de fonctionnement, il est alors nécessaire de placer

un PSS pour accroître la stabilité de l'ensemble du système.

Les tableaux (3.6, 3.7, 3.8 et 3.9) exposent les pics et le temps de stabilisation, les résultats montrent qu'en utilisant les PSS, le système devient stable contrairement au cas où les générateurs ne sont pas munis d'un stabilisateur de puissance. D'autre part, on remarque aussi que le PSS optimisé par l'algorithme génétique abouti presque aux mêmes performances qu'un PSS multi-bandes.

En conséquence, il est clair que tous les PSSs ont bien rétabli l'équilibre au maximum après six secondes, pour les pics on constate presque les mêmes résultats pour chaque type utilisé.

Finalement, on peut dire que l'utilisation des PSSs prouve leurs performances et leur efficacité face au rétablissement de la stabilité globale du système.

## III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons comparé les résultats obtenus issue d'un:

- Système de régulation sans PSS.
- Système de régulation avec PSS MB.
- Système de régulation avec PSS Kundur.
- Système de régulation avec PSS optimisé par l'algorithme génétique.

L'analyse des résultats obtenus montre que l'utilisation de PSS est nécessaire pour l'amélioration de la stabilité de système et pour une bonne performance du système, nous avons bien remarqué l'impact de l'utilisation de l'algorithme génétique pour un défaut de court circuit triphasé, les résultats ont été satisfaisantes et prometteuses.

# Conclusion Générale

Les variations des charges et les manœuvres provoquent dans un réseau électrique des perturbations générées par les réponses dynamiques des générateurs. Ces oscillations de petites amplitudes peuvent se dupliquer jusqu'à la génération d'un blackout. Plusieurs solutions sont proposées, comme l'emplacement des stabilisateurs de puissance (PSSs) au niveau des circuits d'excitation des machines synchrones et les dispositifs de système de transmission à courant alternatif flexible (FACTS) au niveau des lignes peuvent aider à amortir les oscillations des systèmes de puissance. L'objectif de notre travail est de donner un aperçu sur les PSSs et leurs différents types et conception et de comparer les réponses des sorties. Pour atteindre cet objectif, nous avons trois types de PSSs (MB PSS, KUNDUR PSS, PSS optimisé par l'algorithme génétique).

L'optimisation des paramètres des stabilisateurs de puissance par les algorithmes génétiques a été abordée. Il a été montré que, le problème d'instabilité dans les systèmes électriques pouvait être traduit sous la forme d'un simple problème d'optimisation, avec une fonction objective basée sur le coefficient d'amortissement des modes oscillatoires. L'algorithme proposé permet de déterminer les paramètres des stabilisateurs de manière à augmenter l'amortissement du système, quelles que soient les conditions de son fonctionnement. Les résultats de simulation montrent que grâce à cette technique la stabilité est considérablement 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 autre connaissance relative.

Afin d'évaluer les performances des stabilisateurs de puissance, on a utilisé le MATLAB pour la simulation. D'après cette interprétation des courbes et des tableaux que nous avons expliqués, nous avons conclu que l'évaluation des performances du contrôleur PSS avec nos

paramètres optimisés et l'autre PSSs sont proche.

Les perspectives de ce travail peuvent être mentionnées comme suit :

- Appliquer cette technique pour les grands réseaux électriques.
- Développement des stabilisateurs de puissance pour maintenir toujours la stabilité des systèmes électriques.
- Appliquer des autres méthodes d'optimisation et comparer les résultats pour affiner la recherche des solutions optimales.
- Utiliser d'autres dispositifs pour améliorer la stabilité des réseaux électriques comme FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems).

# Références Bibliographiques

- [1] Bésanger, Yvon. Vers l'amélioration de la sécurité des réseaux électriques de puissance. Diss. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2006.
- [2] Saoudi, Kamel. Stabilisateurs intelligents des systèmes électro-énergétiques. Diss. 2018.
- [3] Kundur, Prabha, et al. "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions." IEEE transactions on Power Systems 19.3 (2004): 1387-1401.
- [4] Alkhatib, Hasan. Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques: optimisation de la régulation par une méthode métaheuristique. Diss. Université Paul Cézanne-Aix-Marseille III, 2008.
- [5] Shankar, R., and P. Kundur. "Power system stability and control II." New York, McGraw-Hill Books pp581 (1994).
- [6] M.Mekhanet. « Conception des Stabilisateurs de Puissance d'un Réseau Électrique Multimachine: Optimisation et Auto-Ajustement en Temps Réel » Thèse (Doctorat, Université de Laghouat).2018
- [7] Cutsem T.V., Systèmes électriques de Puissance I. Cours ELEC 029, Département d'électricité, Électronique et Informatique : Institut Montefiore, Université de Liège, 2002
- [8] Quoc, Tuan Tran. Modélisation et amélioration des performances des réseaux électriques. Diss. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2000.

- [9] Ghouraf, D. E., & Naceri, A. (2016). Commande robuste H [infinity] optimisée par l'algorithme génétique appliquée à la régulation automatique d'excitation des générateurs synchrones puissants (Application sous GUI/MATLAB). *Nature & Technology*, (14), 2.
- [10] Madani, N., Boutbel, M., & Latreche, A. (2018). Coordination PSS/STATCOM en vue d'améliorer la stabilité d'un réseau électrique (Doctoral dissertation, Université Abderrahmane Mira-Bejaia).
- [11] Shahraki, E. G. (2003). Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy 1).
- [12] Anderson, Paul M. *Power System Control and Stability: Vol. I*. Science Press, 1977.
- [13] Ghouraf, Djamel Eddine, and Abdellatif Naceri. "Commande par PSS pour améliorer la stabilité du système électro-énergétique." *Acta electrotechnica* 54.1 (2013).
- [14] Pal, Bikash, and Balarko Chaudhuri. *Robust control in power systems*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [15] Fleming, R. J., M. A. Mohan, and K. Parvatisam. "Selection of parameters of stabilizers in multimachine power systems." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 5 (1981): 2329-2333.
- [16] Larsen, E. V., and D. A. Swann. "Applying power system stabilizers part I: general concepts." *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems* 6 (1981): 3017-3024.
- [17] Hammer, Anders. *Analysis of IEEE power system stabilizer models*. MS thesis. Institutt for elkraftteknikk, 2011.
- [18] Grondin, R., et al. "Wide-band power system stabilizer." *Proc. Cigré Canada Conf. on Power Systems*, Montreal. 2006.
- [19] Grondin, R., et al. "Modeling and closed-loop validation of a new PSS concept, the multi-band PSS." *2003 IEEE power engineering society general meeting (IEEE Cat. No. 03CH37491)*. Vol. 3. IEEE, 2003.
- [20] Kamwa, I., R. Grondin, and G. Trudel. "IEEE PSS2B versus PSS4B: the limits of performance of modern power system stabilizers." *IEEE transactions on power systems* 20.2 (2005): 903-915.

- 
- [21] Sumanbabu, B., et al. "Robust tuning of modern power system stabilizers using bacterial foraging algorithm." 2007 IEEE congress on evolutionary computation. IEEE, 2007.
- [22] Castrillon, N. J., and D. G. Colome. "New methodology to tune adaptive and robust multi-band PSSs." 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. IEEE, 2008.
- [23] Khodabakhshian, Amin, and Reza Hemmati. "Multi-machine power system stabilizer design by using cultural algorithms." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 44.1 (2013): 571-580.
- [24] Bennett, Stuart. "A brief history of automatic control." *IEEE Control Systems Magazine* 16.3 (1996): 17-25.
- [25] Astrom, K. J. "Control System Design-Department of Mechanical and Environmental Engineering." University of California (2002): 162-168.
- [26] Bevrani, Hassan, and Hossein Bevrani. "PID tuning: robust and intelligent multi-objective approaches." *Advances in PID Control* (2011): 167.
- [27] Temel, Sena, Semih Yağlı, and Semih Gören. "P, pd, pi, pid controllers." Middle East Technical University, Electrical and Electronics Engineering Department (2013).
- [28] Li, Yun, Kiam Heong Ang, and Gregory CY Chong. "PID control system analysis and design." *IEEE Control Systems Magazine* 26.1 (2006): 32-41.
- [29] Visioli, Antonio. "Tuning of PID controllers with fuzzy logic." *IEE Proceedings-Control Theory and Applications* 148.1 (2001): 1-8.
- [30] Chen, Junghui, and Tien-Chih Huang. "Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control." *Journal of process control* 14.2 (2004): 211-230.
- [31] Farmer, Richard G. "Power system dynamics and stability." *The Electric Power Engineering Handbook 2* (2001).
- [32] E. Mitsubish, "Power System Stabilizer (PSS)," Japan 1998

- [33] Larsen, E. V., and D. A. Swann. "Applying power system stabilizers part II: Performance objectives and tuning concepts." *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems* 6 (1981): 3025-3033.
- [34] Larsen, E. V., and D. A. Swann. "Applying power system stabilizers Part III: Practical considerations." *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems* 6 (1981): 3034-3046.
- [35] SUMINA, Damir, Neven BULIĆ, and Srđan SKOK. "Stabilization of the Electromechanical Oscillations of Synchronous Generator." *Strojarstvo: časopis za teoriju i praksu u strojarstvu* 53.3 (2011): 209-219.
- [36] Anderson, Paul M., and Aziz A. Fouad. *Power system control and stability*. John Wiley & Sons, 2008.
- [37] Grondin, R., et al. "The multi-band PSS: A flexible technology designed to meet opening markets." *Proc. CIGRÉ 2000* (2000): 39-201.
- [38] Trudnowski, Danial, Matt Donnelly, and Eric Lightner. "Power-system frequency and stability control using decentralized intelligent loads." *Proceedings of the 2005/2006 IEEE Power and Energy Society Transmission and Distribution Conference and Exposition*. 2006.
- [39] Do Bomfim, Antonio LB, Glauco N. Taranto, and Djalma M. Falcao. "Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms." *IEEE Transactions on Power systems* 15.1 (2000): 163-169.
- [40] Tolba, Abdelmadjid. *Commande des systèmes d'énergie de puissance par des approches heuristiques modernes*. Diss. Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.

# Annexe

Tableau 1: Générateur

Sb= 900MVA	f=60hz	H=6.5s	Xd=1.8pu	Xd'=0.3pu	Xd''=0.25pu	Xq=1.7pu
Xq'=0.55pu	Xq''=0.25pu	Xl=0.2pu	Tdo'=8s	Tdo''=0.03s	Tqo'=0.4s	Tqo''=0.05s

Tableau 2: Transformateur

Sb= 900MVA	f=60hz	V1=20kv	V2=230kv	R1=0.00001pu
R1=0.00001pu	L1=0pu	L2=0.15pu	Rm=500pu	Lm=500pu

Tableau 3: Ligne de transmission

3 Phases	60 hz	220 km
R0=1.61 Ohms/km	R1=0.05 Ohms/km	L0=0.0061 H/km
L1=0.0014 H/km	C0=5.2489e-9 f/km	C1=8.7748e-9 f/km