

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



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Réseaux électriques

Présenté par

FRIDJAT Hocine et GHERBI Ilies et HACHEFA Mokhtar

Thème

**Performance de système électro-énergétique par
différentes techniques avancées**

Soutenu le 16/06/2021. Devant le jury composé de :

Mr. ALLAL Abd El Rahim

Maitre de conférences Président

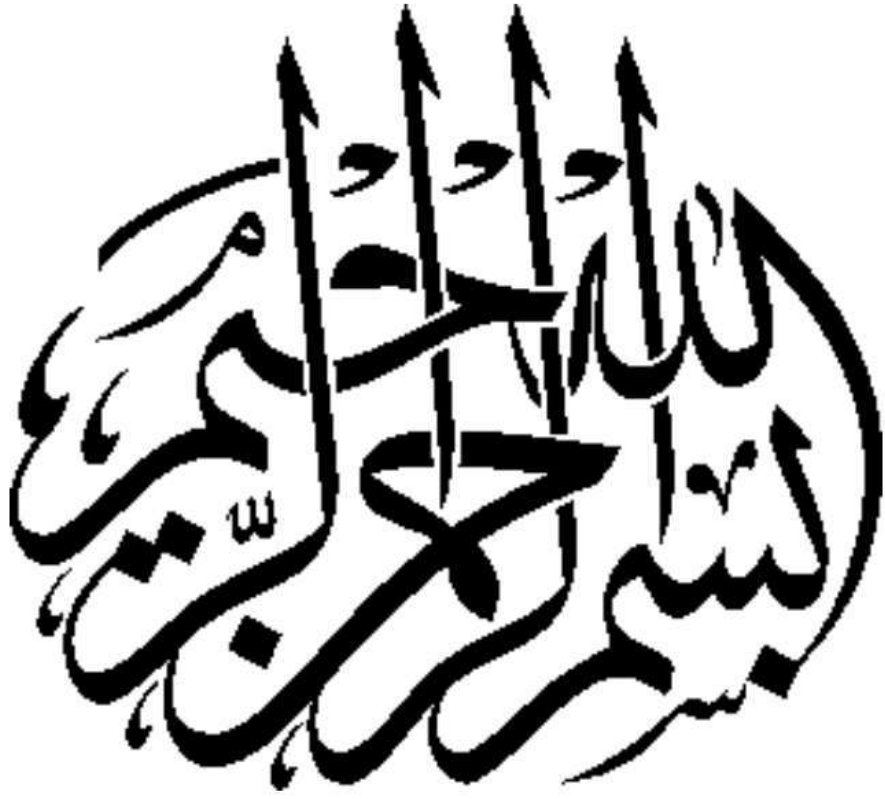
Dr. TOUIL Slimane

Maitre de conférences Rapporteur

Mr. MAMMARI Oussama

Maitre de conférences Examineur

Année Universitaire 2020/2021



﴿ رَبَّنَا لَا تُؤَاخِذْنَا إِنْ نَسِينَا أَوْ أَخْطَأْنَا رَبَّنَا وَلَا تَحْمِلْ عَلَيْنَا إَصْرًا كَمَا حَمَلْتَهُ
عَلَى الَّذِينَ مِنْ قَبْلِنَا رَبَّنَا وَلَا تُحَمِّلْنَا مَا لَا طَاقَةَ لَنَا بِهِ وَاعْفُ عَنَّا وَاعْفِرْ لَنَا
وَارْحَمْنَا أَنْتَ مَوْلَانَا فَانصُرْنَا عَلَى الْقَوْمِ الْكَافِرِينَ ﴾ سورة البقرة : الآية 286 .

" صدق الله العظيم "

Remerciements

Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissant de m'avoir donné le courage et

la patience durant toutes ces années d'études.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur

***Dr : Touil Slimane**, Docteur à L'Université Echahid Hamma Lakhdar*

d'El Oued , pour avoir dirigé ce travail.

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

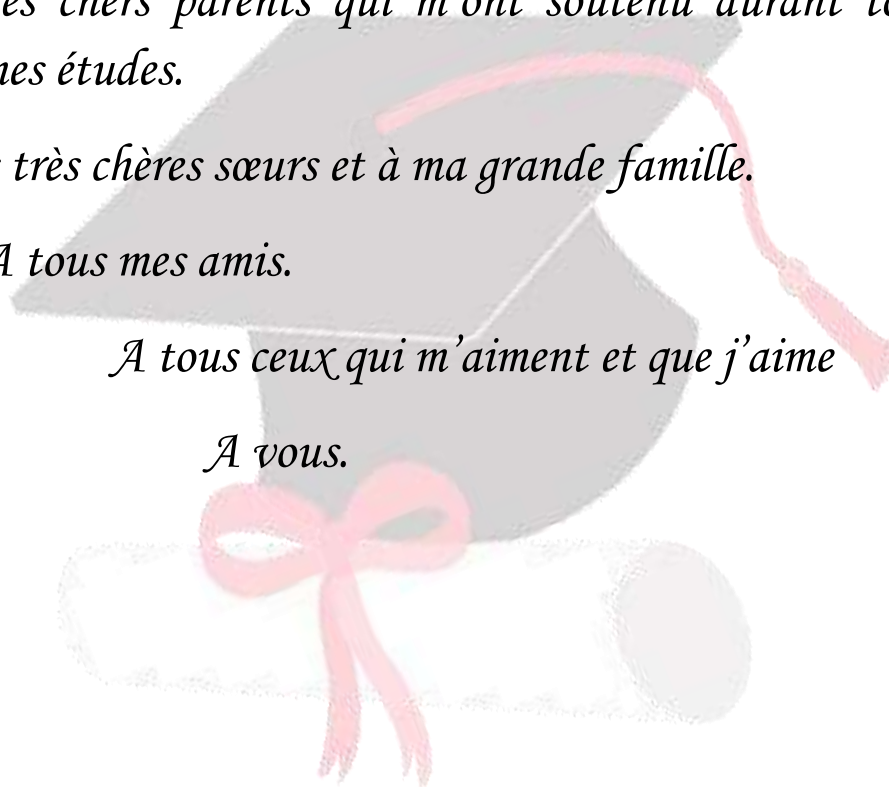
À mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

À mes très chères sœurs et à ma grande famille.

À tous mes amis.

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime

À vous.



Résumé

Résumé

Dans ce travail, on a proposé une nouvelle méthode de conception d'un stabilisateur intelligent, non linéaire robuste combinant le régulateur conventionnel et le régulateur par logique floue pour les systèmes de puissance mono et multi-machines. Les caractères non linéaire et robuste de l'approche préconisée préserve la stabilité en amortissant les oscillations indépendamment du point de fonctionnement et ce même en présence des variations paramétriques. La simulation de deux systèmes de puissance de Kundur a permis d'évaluer les performances du stabilisateur proposé face aux différents contingents couramment rencontrés dans le réseau. Les résultats de simulation obtenus pour différents points de fonctionnement après élimination de défaut ont montré que le stabilisateur flou FPSS proposé, assure une bonne stabilité et améliore l'amortissement des oscillations. Ainsi les oscillations locales et interzones sont amorties de façon rapide et efficace. Les résultats obtenus sont comparés à ceux des stabilisateurs : sans stabilisateur de puissance (sans PSS),

avec stabilisateur PSS (avec PSS) et stabilisateur floue PSS (FPSS). Les résultats obtenus ont montré que le stabilisateur flou PSS assure globalement de meilleures performances comparativement aux stabilisateurs précités.

Mots clés : stabilisateur du système de puissance(PSS), régulateur par logique flou (FPSS), système de puissance mono et multi-machine

المخلص :

الشبكة أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها لنقاط التشغيل المختلفة بعد التخلص من الخطأ أن المثبت الضبابي المقترح FPSS يضمن ثباتاً جيداً ويحسن تخميد التذبذبات. وبالتالي ، فإن التذبذبات المحلية وبين المناطق تخمد بسرعة وكفاءة. تتم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع تلك الخاصة بالمثبتات: بدون مثبت الطاقة (بدون PSS ، مع مثبت) PSS مع PSS ومثبت PSS الضبابي (FPSS) أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن مثبت PSS الضبابي يوفر أداءً أفضل بشكل عام مقارنة بالمثبتات المذكورة أعلاه.

الكلمات الأساسية: مثبت نظام الطاقة (PSS) ، منظم المنطق الضبابي (FPSS) ، نظام الطاقة الفردي ومتعدد الآلات.

*Table
des
Matières*

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale A

CHAPITRE I: stabilité du système de puissance

I.1. Introduction	4
I.2. Définition de stabilité des systèmes d'énergie électrique	4
I.3. Description générale du système de la puissance étudié "SMIB"	4
I.4. Causes d'instabilité	5
I.5. Différents types de stabilité	5
I.5.1. Stabilité de l'angle de rotor	6
I.5.1.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique)	8
I.5.1.2. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire)	8
I.5.2. Stabilité de tension	14
I.5.3. Stabilité de fréquence	15
I.6. Introduction aux contrôleurs	15
I.6.1. Nouveaux types de PSS	15
I.7. Analyse de la performance et critères de bonne régulation	16
I.7.1. Critères de simulation	16
I.8. Conclusion	19

CHAPITRE II: Modélisation du Système Électro-énergétique

II.1. Introduction	21
II.2. Modèle de la machine synchrone	22
II.2.1. Équations électriques	23
II.2.2. Équations mécaniques	25
II.2.3. Effet dynamique du circuit de champ	28

II.3. Régulation du générateur	32
II.3.1. Régulateur de fréquence et modèle de la turbine	32
II.3.2. Régulateur de tension et modèle du système d'excitation	34
II.4. Modèle de power system stabiliser PSS	38
II.4.1. Modèle du système d'excitation avec PSS	39
II.4.2. Fonctionnement et modèle de PSS	40
II.4.3. Réglage des paramètres de PSS	44
II.4.3.1. Méthode de compensation de phase	44
II.4.3.2. Méthode du résidu	46
II.4.3.3. Méthode de placement des pôles	48
II.4.4. Emplacement optimal des PSSs	49
II.5. Résultat et discussion	50
II.5.1. Exécution du système étudié avec PSS	50
II.5.2. Etude comparative entre la mise en œuvre du système étudié avec, et sans PSS	51
II.6. Conclusion	56
 <i>CHAPITRE III: Stabilisation par logique floue</i>	
III.1. Introduction	58
III.2. Apparition de la logique floue	58
III.3. Intérêts de la logique floue	58
III.4. Utilisation de la logique floue pour le contrôle	59
III.5. Théorie des ensemble floue	60
III.5.1. Notion d'appartenance partielle	60
III.5.2. Fonction d'appartenance (FA)	60
III.5.2.1. Fuzzification "Degré d'appartenance"	64
III.5.3. Opérateurs logiques flous	64
III.5.3.1. Choix des opérateurs	64
III.5.4. Règles floues	66
III.5.4.1. Logique floue et l'intelligence artificielle	66
III.5.4.1.1. Prédicat	67
III.5.4.1.2. Inférence	67
III.5.4.1.3. Conclusion	67
III.5.4.2. Mécanisme d'inférence de Mamdani	68
III.5.4.3. Défuzzification	71

III.5.4.4.Règles « libres » et « en tableau »	71
III.6.Contrôleur flou	72
III.6.1.Différentes étapes de la commande floue	73
III.7.PSS basés sur la logique floue	73
III.7.1.Sélection de variables d'entrée et de sortie	74
III.7.2.Fonction d'appartenance	74
III.7.3. Base de règles floues	76
III.7.4.Défuzzification	77
III.7.5.Mise en œuvre de la logique floue	78
III.8.Étude comparative entre la mise en œuvre du système aux différents cas	79
III.9.Conclusion	83
 <i>CHAPITRE IV: Résultat et validation</i>	
IV.1.Introduction	85
IV.2.Application au système mono machine SMIB	85
IV.2.1.Description du système de puissance	85
IV.2.2.Résultats de simulation	86
IV.3.Application à un système multi-machines	88
IV.3.1.Description du réseau étudié	88
IV.3.2.Amortissement des oscillatoires inter-régions	89
IV.3.3.Intérêt de l'amortissement des oscillations inter-régions	90
IV.3.4.Résultats de simulation	90
IV.3.4.1.Système sans stabilisateur	91
IV.3.4.2.Evaluation de performance et comparaison	93
IV.3.4.3.Test de robustesse	97
IV.4. Conclusion	100
Conclusion générale	102
Bibliographie	

An orange, shield-like shape with rounded corners and a subtle drop shadow, centered on the page.

Liste des figures

Figure		Page
CHAPITRE I: stabilité du système de puissance		
I.1	Système standard IEEE type SMIB avec commande d'excitation du générateur synchrone puissant	5
I.2	Classification des différents types de la stabilité de système électro-énergétique	7
I.3	Variation d'angle de rotor	9
I.4	Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini	10
I.5	Relation puissance- angle de rotor	10
I.6	Variation d'angle de rotor	11
I.7	Courbes (a : puissance-angle) et (b : variation d'angle de rotor) du générateur suite à un défaut de transmission	13
I.8	Caractéristiques de la réponse indicielle d'un système	17
CHAPITRE II: Modélisation du Système Électro-énergétique		
II.1	Circuit équivalent de la machine synchrone connectée a un jeu de barre infini	22
II.2	Modèle classique de générateur	23
II.3	Relation (puissance-angle) du générateur et le coefficient de couple synchronisant	24
II.4	Couple mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur	25
II.5	Schéma bloc du système (mono machine-jeu de barre infini) avec le Modèle classique	27
II.6	Circuits équivalents relatifs de l'enchaînement du flux de la machine et courant	28
II.7	Représentation de schéma fonctionnel avec la constante Efd	31
II.8	Structure générale d'un système de force motrice-générateur	33
II.9	Structure d'un système d'excitation statique avec son AVR	35
II.10	Système d'équitation statique (thyristor) avec AVR	36
II.11	Représentation du schéma bloc avec l'excitateur et AVR	38
II.12	Représentation du schéma bloc avec AVR et PSS	38
II.13	Système d'excitation statique avec AVR et PSS	39
II.14	Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système	42
II.15	Modèle d'un PSS avance/retard	42
II.16	Modèle de Heffron-Philips d'un système (mono-machine-jeu de barre infini)	44
II.17	Déplacement de valeur propre par la rotation du résidu associé	46
II.18	Ensemble (système-PSS) en boucle fermée	48
II.19	Présente la variation du position angulaire	50
II.20	Présente la variation de la vitesse angulaire	50
II.21	Présente la variation du couple électrique	51
II.22	Présente la variation de la tension terminale	51
II.23	Présente la variation du position angulaire	52
II.24	Présente la variation de la vitesse angulaire	52
II.25	Présente la variation du couple électrique	53

LISTE DES FIGURES

II.26	Présente la variation de la tension terminale	53
II.27	Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport la variation d'angle	54
Chapitre III: Stabilisation par logique floue		
III.1	Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou	60
III.2	Fonction caractéristique	61
III.3	Fonction d'appartenance	61
III.4	Fonction d'appartenance, variable et terme linguistique	62
III.5	Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux	63
III.6	Fonction d'appartenance singleton	63
III.7	Fuzzification	64
III.8	Traitement flou	66
III.9	Implication	68
III.10	Fuzzification	69
III.11	Activation	69
III.12	Implication	70
III.13	Agrégation des règles	70
III.14	Défuzzification par centre de gravité	71
III.15	Structure de base d'un contrôleur flou	73
III.16	Fonctions d'appartenance pour l'accélération	75
III.17	Fonctions d'appartenance pour la variation de vitesse	76
III.18	Fonctions d'appartenance pour la tension	76
III.19	Exécution de contrôleur de logique floue	78
III.20	Présente la variation de la position angulaire	79
III.21	Présente la variation de la vitesse angulaire	80
III.22	Présente la variation du couple électrique	80
III.23	Présente la variation de la tension terminale	81
III.24	Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport l'angle	81
Chapitre IV: Résultat et validation		
IV.1	Schéma simplifié d'une machine synchrone connectée à un jeu de barres infini	85
IV.2	Variations de la position angulaire	86
IV.3	Variations de la vitesse angulaire	86
IV.4	Variations de la puissance électrique	86
IV.5	Variations de tension terminale	86
IV.6	Variations de la position angulaire	87
IV.7	Variations de la vitesse angulaire	87
IV.8	Variations de la puissance électrique	87
IV.9	Variations de tension terminale	87
IV.10	Représentation schématique des deux régions du système étudié	88
IV.11	Exemple mécanique analogue aux oscillations inter-régions	89
IV.12	Configuration d'un générateur équipé supplémentaire stabilisateur	91

LISTE DES FIGURES

IV .13	Représentation du réseau test sur MATLAB/Simulink.	91
IV .14	Présente la variation des tensions des bus (1 et 2)	92
IV .15	Présente la variation de Puissance active de ligne(B1 à B2)	92
IV .16	Présente la variation des angles de rotors des générateurs vs G4	92
IV .17	Présente la variation de Vitesses angulaires des générateurs	92
IV .18	Présente la variation des Puissances actives des générateurs	92
IV .19	Présente la variation des Tensions terminale des générateurs	92
IV .20	Ecarts des vitesses des générateurs	94
IV .21	Ecarts des angles des générateurs	94
IV .22	Puissance électrique des générateurs (1 ^{er} scénario).	95
IV .23	Variation de la tension terminale des générateurs (1 ^{er} scénario)	96
IV .24	Variation de la commande des générateurs (1 ^{er} scénario).	96
IV .25	Ecarts des vitesses des générateurs	98
IV .26	Ecarts des angles des générateurs	98
IV .27	Puissance électrique des générateurs (2 ^{ème} scénario)	98
IV .28	Variation de la tension terminale des générateurs (2 ^{ème} scénario).	99
IV .29	Variation de la commande des générateurs (2 ^{ème} scénario).	99

Tableau		Page
<i>CHAPITRE II: Modélisation du Système Électro-énergétique</i>		
<i>II.1</i>	Comparaison des critères temporels instantanés du système avec et sans PSS	54
<i>II.2</i>	Comparaison des critères temporels intégraux du système avec et sans PSS	55
<i>CHAPITRE III: Stabilisation par logique floue</i>		
<i>III.1</i>	Base de règles floues et base de règles classiques	67
<i>III.2</i>	Implication représentée en tableau	71
<i>III.3</i>	Variables floues pour la fonction d'appartenance	75
<i>III.4</i>	Base de règles de contrôleur a logique floue	77
<i>III.5</i>	Comparaison des critères temporels instantanés	82
<i>III.6</i>	Comparaison des critères temporels intégraux	82

Notations

et

Symboles

Liste des notations

Acronymes:

SMIB	Single Machine Infinite Bus (machine unique reliée à un nœud infini)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, en français l'Institut des Ingénieurs électriciens et électroniciens.
IAE	Critère, Intégrale de l'Erreur Absolue (Integral of Absolute Error)
ISE	Critère, Intégrale du Carrée de l'Erreur (Integral of Square Error)
ITAE	Critère, Intégrale de l'Erreur Absolue pondérée par le Temps (Integral Time multiplied by Absolute Error)
SVCs	(Static Var Compensator systèmes)
HVDC	High-voltage direct current, en française Le courant continu haute tension (CCHT)
RNA	Réseau de neurones artificiel
FACTS	Flexible AC Transmission System
AVR	Automatic Voltage Regulator (régulateur automatique de tension)
PSS	Power System Stabilizer (stabilisateur du système de puissance)
Mamdani	Le mécanisme d'inférence le plus couramment utilisé dans fuzzy (Ebrahim Mamdani)
FLPSS	Fuzzy logic PSS
FUZZY	La logique floue (fuzzy logic, en anglais)
Trimf	Mode triangulaire
Gaussmf	Mode gaussienne
Gauss2mf	Mode gaussienne

Symboles:

$E = f_{em}$	Force électromotrice du générateur (pu)
$E_B = E_0$	La tension du jeu de barre infini (pu)
E_t	impédance externe de réseau (pu)
E_{fd}	La tension de sortie d'excitation (pu)
X	Réactance synchrone et réactance transitoire (pu)
$X_e = X_E$	Réactance de ligne. (Pu)
X_g	Réactance de générateur (pu)
P_e	Puissance électrique (pu)
P_m	Puissance mécanique (pu)
P_e	Puissance électrique (pu)
S	Puissance apparent (pu)
T_e	Couple électrique (pu)
T_A	Le couple d'amortissement (pu)
T_s	Le couple synchronisant (pu)
T_m	Couple mécanique fourni par la turbine (pu)
T_e	Couple électromagnétique (pu)
K_s	Coefficient de couple synchronisant (pu)
K_A	Coefficient de couple d'amortissent (pu)
K_D	Coefficient d'amortissement du générateur (pu)
K_{PSS}	Le gain de stabilisateur avance retard de phase (pu)
$S\Psi_{fd}$	Flux de circuit de générateur synchrone (pu)
Ψ_d	Flux de stator (pu)

L_{ads}	Inductances propres d'un enroulement du stator (pu)
i_d	Courant du générateur axe direct (pu)
i_q	Courant du générateur axe quadratique (pu)
R_a	Résistance par phase statorique (pu)
ω_0	Vitesse de synchronisme.(pu)
$\Delta\omega$	Variation da vitesse de rotor
ω_n	Pulsation naturel
ω_i	Fréquence du mode λ_i en rad/sec
H	Constante d'inertie
ξ_{cr}	Valeur critique du facteur d'amortissement
δ	Angle de rotor
σ_{cr}	Marge de stabilité absolue
Δf	Variation de la fréquence du jeu de barre
$D_p \%$	Dépassement maximum en pour cent
t_p	Temps de pic
$t_r(5\%)$	Temps de réponse (temps d'établissement)
$\varepsilon(t)$	L'erreur dynamique associée a la réponse indicielle du système

A large, light orange decorative shape with rounded corners and a slight shadow, centered on the page. It contains the title text.

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des deux dernières décennies, les systèmes électriques sont confrontés à de sérieux défis. La libéralisation du marché de l'électricité crée des scénarios opérationnels plus complexes que par le passé. La dépendance toujours croissante à l'électricité dans la société moderne signifie que les systèmes énergétiques fonctionnent à 100% de leur capacité et avec la plus grande sécurité. De plus, aujourd'hui, la qualité de l'énergie électrique est devenue une préoccupation majeure des consommateurs et des fournisseurs. Par conséquent, des normes strictes de développement et d'exploitation sont de plus en plus nécessaires.

Dans ces conditions, la stabilité des systèmes électriques devient l'une des principales difficultés des fournisseurs d'électricité. Ces systèmes doivent rester stables pour toutes les petites variations près des points de fonctionnement ainsi que pour les situations graves. Les nouvelles méthodes et technologies visant à améliorer la stabilité des systèmes font donc l'objet de recherches très approfondies.

Beaucoup de ces méthodes modernes ont déjà été appliquées dans des domaines industriels de pointe tels que l'aéronautique et la robotique. On peut alors s'interroger sur leur efficacité dans la conception des régulateurs de tension et de vitesse qui assurent la stabilité des réseaux électriques.

Le Régulateur Automatique de Tension (AVR) et le Régulateur de Vitesse ou Gouverneur se caractérisent par un échange de puissance électrique légèrement atténué entre deux ou plusieurs zones.

L'AVR et le Gouverneur ne peuvent à eux seuls assurer la bonne marche des réseaux électriques sans le recours à un stabilisateur. Le stabilisateur, communément appelé stabilisateur de réseau électrique (PSS), ajoute un amortissement supplémentaire en excitant le générateur contre une erreur de vitesse ou une variation de puissance électrique. Il ajoute donc une autre boucle indépendante.

Cette nouvelle configuration est plus efficace et atténue relativement bien les vibrations locales et inter-zones. Néanmoins, il faut noter que Le PSS et le AVR agissent simultanément, indépendamment et de manière non synchronisée sur l'excitation du générateur. Un compromis est donc fait afin d'assurer le bon fonctionnement de l'ensemble. Ainsi, Avec l'ajout du PSS, il y a généralement une certaine dégradation de la qualité de la régulation de tension.

Une autre méthode PSS repose sur la logique floue. La raison en est la possibilité d'introduire des connaissances exprimées sous forme de règles d'inférence afin de déterminer les fonctions d'appartenance, sur la base de l'expérience humaine dans le domaine. Notamment, la mise en œuvre de la théorie des ensembles flous dans la commande des processus. Par simulation, nous visualiserons et comparerons le temps d'atténuation des oscillations liées aux systèmes électriques (machine synchrone connectée à un réseau infini) quand elles sont sujettes à une perturbation, afin de voir l'effet de l'intelligence artificielle sur le système par rapport au système conventionnel, c'est-à-dire l'amélioration supplémentaire de la stabilité du système électrique.

Les PSS et la logique floue sont toujours considérés comme une solution performante pour l'amortissement des modes électromécaniques locaux, mais en revanche, leur rôle dans l'amortissement des modes interrégionaux est toujours considéré comme faible. Par conséquent, notre but est d'assurer un amortissement maximal des modes interrégionaux ainsi que des modes locaux. Pour atteindre ce but, nous suggérons un réglage optimal du PSS et de la logique floue "FUZZY". Cela permet d'assurer un amortissement satisfaisant des oscillations du rotor et de garantir la stabilité globale du système pour différents points de fonctionnement.

Ce thème est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente tout d'abord la définition d'un système électrique, puis l'étude d'un système électrique composé d'une machine synchrone connectée par une ligne de transmission à un jeu de barres infini, les divers types de stabilité et les différentes méthodes d'analyse de la stabilité transitoire, et l'amélioration de la stabilité par les SPS, et leurs nouveaux types, à la fin du chapitre nous avons analysé les performances et les critères d'une bonne régulation.

Au deuxième chapitre, nous avons abordé la modélisation du système électrique et du PSS (Power System Stabilizer) pour les études de stabilité angulaire et la constitution classique du PSS (classique ou avance/retard).

Le troisième chapitre est consacré à une présentation théorique de la logique floue qui est une méthode basée sur des règles d'inférence pour assurer une bonne amélioration de la stabilité des systèmes électriques.

Finalement, le quatrième chapitre vise à évaluer les schémas-blocs du régulateur avec les paramètres de référence et présente un résultat de simulation dans MATLAB pour simuler et analyser les performances du résultat afin de tirer une conclusion générale

CHAPITRE I

*Stabilité du système de
puissance*

I.1. Introduction:

Lors de l'étude du comportement des réseaux d'énergie électriques, l'un des problèmes les plus importants que l'on rencontre souvent est l'étude de la stabilité. En effet, depuis la révolution industrielle au milieu du XVIII siècle, la demande en électricité ne fait qu'augmenter pour pouvoir faire fonctionner les usines et desservir les ménages. Les réseaux électriques ont bien évidemment connu un développement important. Il s'est donc avéré urgent d'examiner en tout temps le comportement des réseaux face à de faibles et/ou de grandes perturbations. Ces perturbations, qui peuvent être d'origine diverses, sont la source d'une différence entre la puissance mécanique (la production) et la puissance électrique (la consommation)[1].

Dans ce chapitre, nous voulons traiter les titres suivants :

- La définition de stabilité des réseaux électriques.
- Les différents types de stabilité.
- Introduction aux contrôleurs PSS, et leurs nouveaux types.
- Analyse de la performance et critères de bonne régulation

I.2.Définition de stabilité des systèmes d'énergie électrique:

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 [2].

« 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 [3].

I.3. Description générale du système de la puissance étudié "SMIB" :

Un réseau SMIB (Single Machine Infinité Bus System)est constitué d'une machine synchrone qui alimente un réseau électrique de puissance infinie (c'est-à-dire dont la

puissance est largement supérieure à celle de la génératrice synchrone) au travers de lignes et d'un transformateur. La machine synchrone est modélisée par une force électromotrice constante E derrière une réactance X_e . Le nœud infini est un point où la tension est constante et fixée en module et en phase (inertie très grande des autres machines).

La figure (I.1) représente un système standard *IEEE* type *SMIB* (Single Machine Infinité Bus System) avec la commande d'excitation du Générateur Synchrone Puissant (*GSP*) [4].

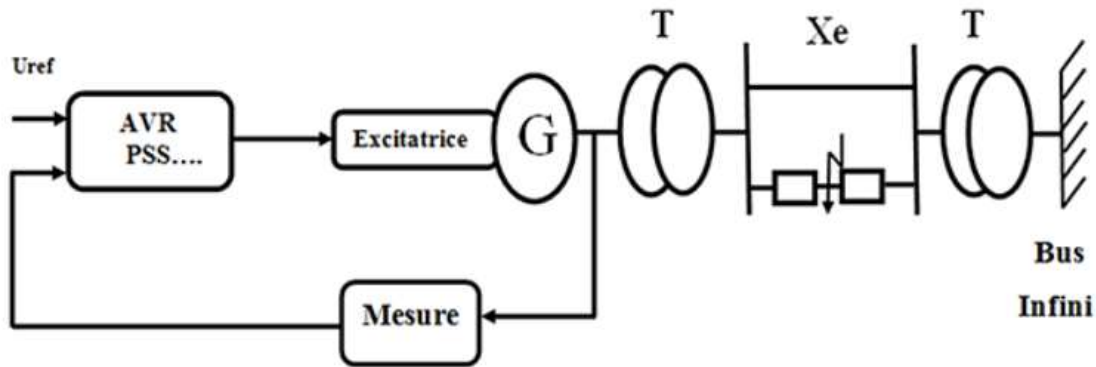


Figure I.1. Système standard *IEEE* type *SMIB* avec commande d'excitation du générateur synchrone puissant.

I.4. Causes d'instabilité [5]:

Les causes sont diverses et variées dans les différents blackouts. Ces causes peuvent provoquer directement le blackout ou aggraver la condition 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: à charge nominale, les alternateurs ont un faible couple synchronisant car la valeur de l'angle interne δ se rapproche de 90° . Si l'angle δ dépasse 90° le système devient instable.
- La défaillance d'une protection.

I.5. Différents types de stabilité :

Pour analyser et résoudre les problèmes d'instabilité dans les systèmes électro-énergétique, il est indispensable de regrouper les différents groupes de stabilité. Cette classification de la stabilité est basée sur les considérations suivantes[6]:

- la nature physique de l'instabilité résultante.
- l'amplitude de la perturbation.
- la plage de temps nécessaire pour assurer la stabilité.
- les dispositifs et les processus nécessaires pour assurer la stabilité.

Habituellement, la stabilité est divisée en trois groupes, à savoir[3]:

- la stabilité de l'angle de rotor.
- la stabilité de tension.
- la stabilité de fréquence.

La figure(I.2) présente ces principales catégories de stabilité d'un système de puissance et leurs sous-catégories.

Traditionnellement, le problème de la stabilité a été de maintenir le fonctionnement synchrone des générateurs du système. Ainsi, pour avoir une production satisfaisante de la puissance électrique, toutes les machines synchrones du système doivent fonctionner en synchronisme. Cet aspect de la stabilité est influencé par les dynamiques de l'angle de rotor de générateur et de la relation puissance-angle.

L'instabilité peut également avoir lieu sans perte de synchronisme. Par exemple, un système composé d'un générateur alimentant un moteur à induction peut devenir instable en raison de l'effondrement de la tension de la charge. Dans ce cas, c'est la stabilité et le contrôle de la tension qui créent le problème, plutôt que le maintien du synchronisme. Ce type d'instabilité peut aussi se produire dans le cas de charges couvrant une vaste zone dans un grand système.

Un autre type d'instabilité peut avoir lieu : dans l'éventualité d'un fort écart entre la puissance de la charge et la puissance de la génération, les contrôleurs principaux des générateurs et de la charge deviennent importants. S'ils ne sont pas bien coordonnés, il est possible que la fréquence du réseau devienne instable. Des unités de générations et/ou de charges peuvent finalement être déclenchées en entraînant une panne du système. Dans ce cas, les générateurs peuvent rester en synchronisme mais le système devient instable[3].

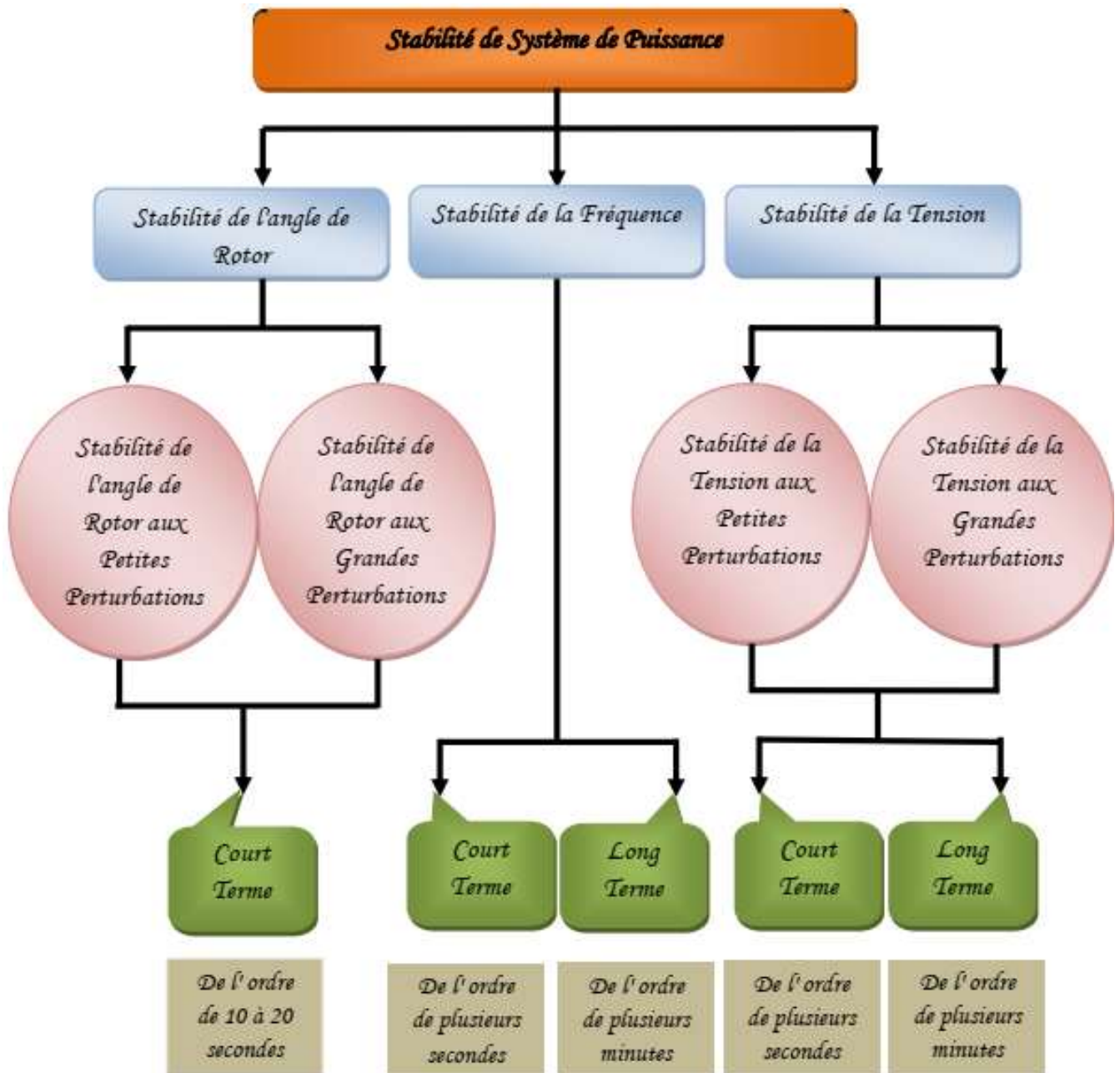


Figure I.2. Classification des différents types de la stabilité de système électro-énergétique[3].

I.5.1. Stabilité de l'angle de rotor :

Etant donné que la génération de puissance électrique dépend principalement des machines synchrones, un aspect important est le fonctionnement de ces générateurs au synchronisme[7].

Au synchronisme, les rotors de chaque machine synchrone du système tournent à la même vitesse électrique et les angles entre les champs magnétiques, rotoriques et statoriques, restent constants.

En fonctionnement nominal équilibre, la puissance électrique fournie par le générateur aux charges est égale, en négligeant les pertes, à la puissance mécanique fournie par la turbine.

Quand le système est perturbé, la puissance électrique de la machine varie rapidement, mais la variation de puissance mécanique fournie à la machine est relativement lente. En raison de cette différence de vitesse de réponse, un écart temporaire d'équilibre de puissance a lieu. Par conséquent, ce déséquilibre de puissance entraîne une variation des couples agissant sur le rotor.

Ceci entraîne une accélération ou décélération du rotor selon le sens du déséquilibre, voire un glissement du champ de synchronisme en entraînant une perte de synchronisme du générateur avec le reste du système[8]. Si l'équilibre de puissance n'est pas rétabli, la machine est mise hors service par une protection de survitesse ou de perte de synchronisme, et la stabilité du Système est mise en danger.

Suite à une perturbation au système, le facteur principal qui détermine l'évolution de l'état du système est l'écart entre les angles de rotor. (Les angles sont mesurés par rapport à une référence tournante au synchronisme). Nous pouvons dire que les angles de rotor d'un système de puissance peuvent évaluer selon deux scénarios[9]:

- Soit, les angles de rotor s'accroissent ensemble et oscillent à l'unisson. Ils peuvent éventuellement atteindre de nouvelles valeurs stables. Tant que les écarts entre les angles de rotor restent constants, le Système reste stable et il demeure au synchronisme.
- Soit, un ou plusieurs angles de rotor s'accroissent plus rapidement que les autres. Alors, les écarts entre les angles de rotor divergent dans le temps. Le système devient par conséquent instable et il perd le synchronisme.

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 (stabilité dynamique) :

« Elle se définit par la capacité du système de puissance de maintenir le synchronisme en présence des petites perturbations. L'instabilité résultante se manifeste sous forme d'un écart croissant, oscillatoire ou non-oscillatoire, entre les angles de rotor »

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 apériodique 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 S_w ing Instability), (cas 1, figure (I.3)), 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 (I.3)). La gamme de temps associée va de 10 à 20 secondes[3].

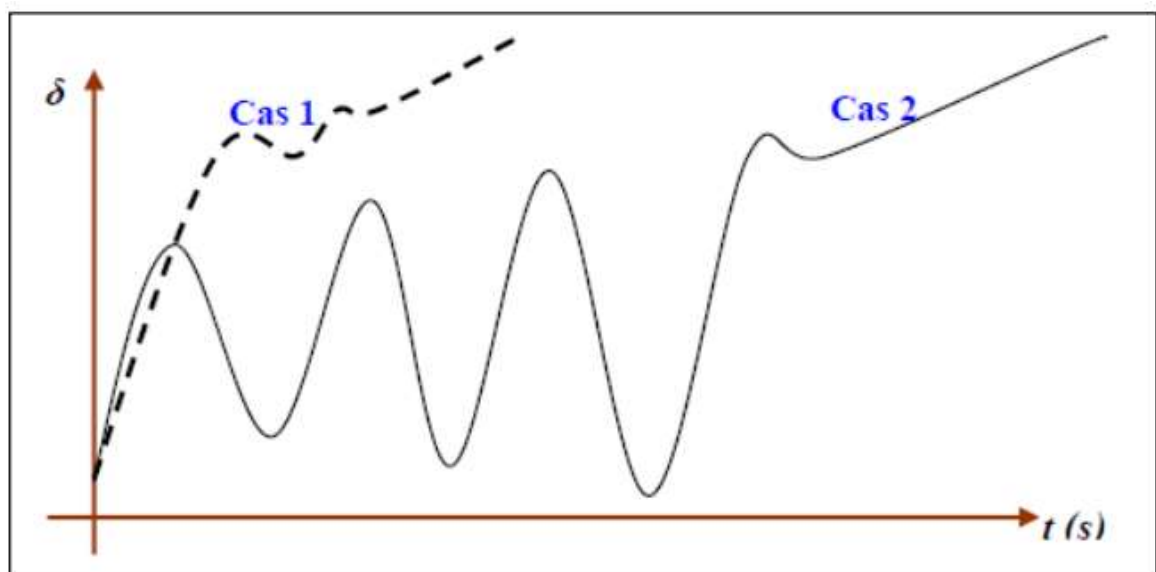


Figure I.3. Variation d'angle de rotor.

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

Le concept de stabilité transitoire peut être expliqué par une approche graphique simple, à savoir le critère d'égalité des aires (Equal Area Criterion). Cette approche regroupe l'équation du mouvement et la courbe (P- δ) traditionnelle représentant la relation entre la puissance produite par le générateur et l'angle de rotor [8].

Pour expliquer cette approche, nous prenons un système de puissance simple constitué d'un générateur synchrone connecté à un jeu de barre infini via une ligne de transmission,

figure (I.4) [3]. Le générateur est modélisé par une source de tension idéale E_g en série avec une réactance X_g (modèle classique). La ligne et le transformateur sont représentés par la réactance X_E .

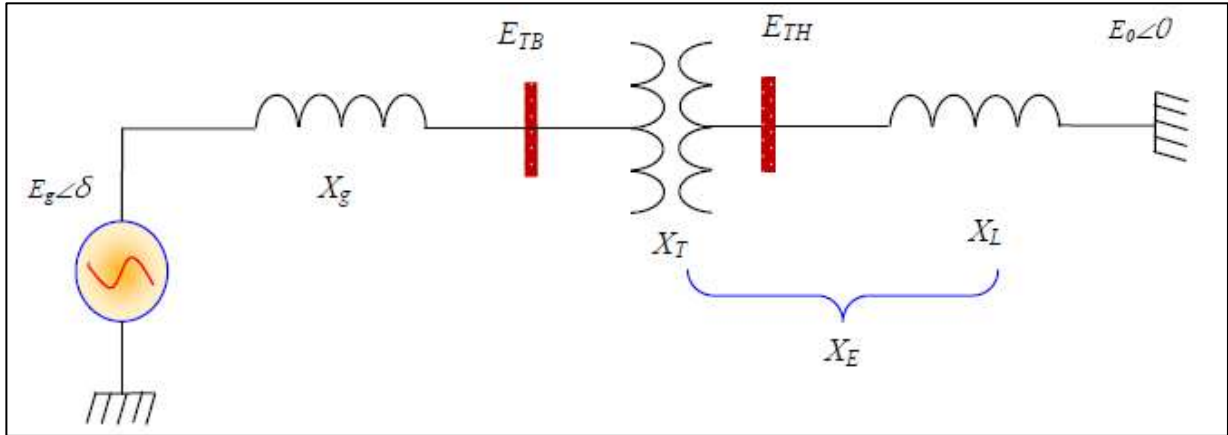


Figure 1.4. Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini.

a. Relation puissance-angle de rotor :

Dans l'état équilibré, la puissance produite par le générateur P_e est donnée par l'équation suivante :

$$P_e = \frac{E_g E_0}{X_g + X_L} \sin \delta \quad (\text{I.1})$$

Où, δ , l'angle de rotor (dit ici, l'angle de puissance), est le déphasage entre la tension interne du générateur E_g et la tension du jeu de barre infini E_0 . L'équation (I.1) est représentée graphiquement à la figure (I.5).

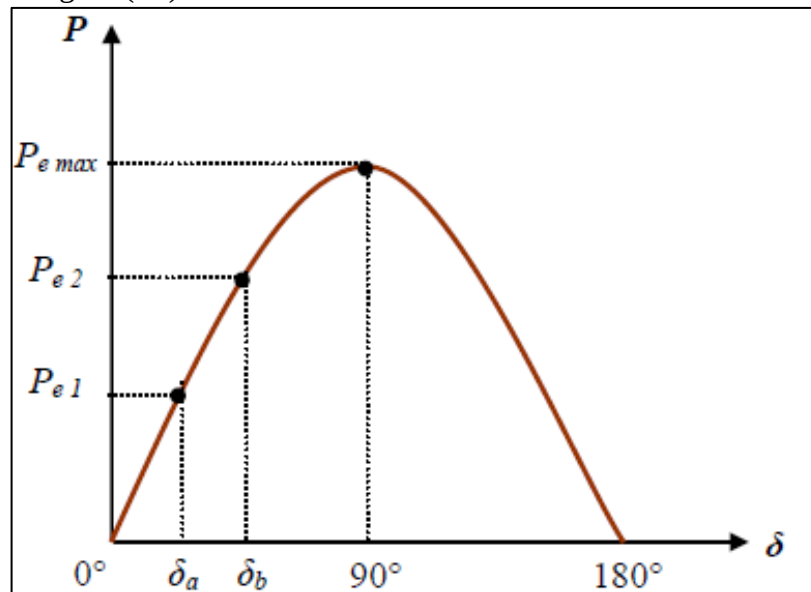


Figure I.5. Relation puissance- angle de rotor.

Lors de l'équilibre, la puissance électrique P_{e1} est égale à la puissance mécanique appliquée pour l'angle correspondant δ_a .

Un brusque changement sur la charge du générateur entraîne une variation de la puissance mécanique, et par conséquent de la puissance électrique, par exemple de P_{e1} à P_{e2} , figure (I.5).

Le rotor va donc accélérer de sorte que l'angle de puissance augmente, de δ_a à δ_b , pour pouvoir fournir une puissance supplémentaire à la charge. Cependant, l'accélération du rotor ne peut pas s'arrêter instantanément. Ainsi, bien que la puissance développée pour l'angle δ_b soit suffisante pour la charge, le rotor va dépasser l'angle δ_b jusqu'à ce qu'un couple opposé suffisant soit développé pour arrêter cette accélération. L'énergie supplémentaire va entraîner le ralentissement du rotor et la diminution de l'angle de puissance. Suivant l'inertie et l'amortissement du système, les oscillations de l'angle de rotor résultant vont ou s'amortir, et la machine restera stable (cas 1, figure (I.6)), ou diverger, et la machine deviendra instable en perdant le synchronisme avec le système (cas 2, figure (I.6)) [3].

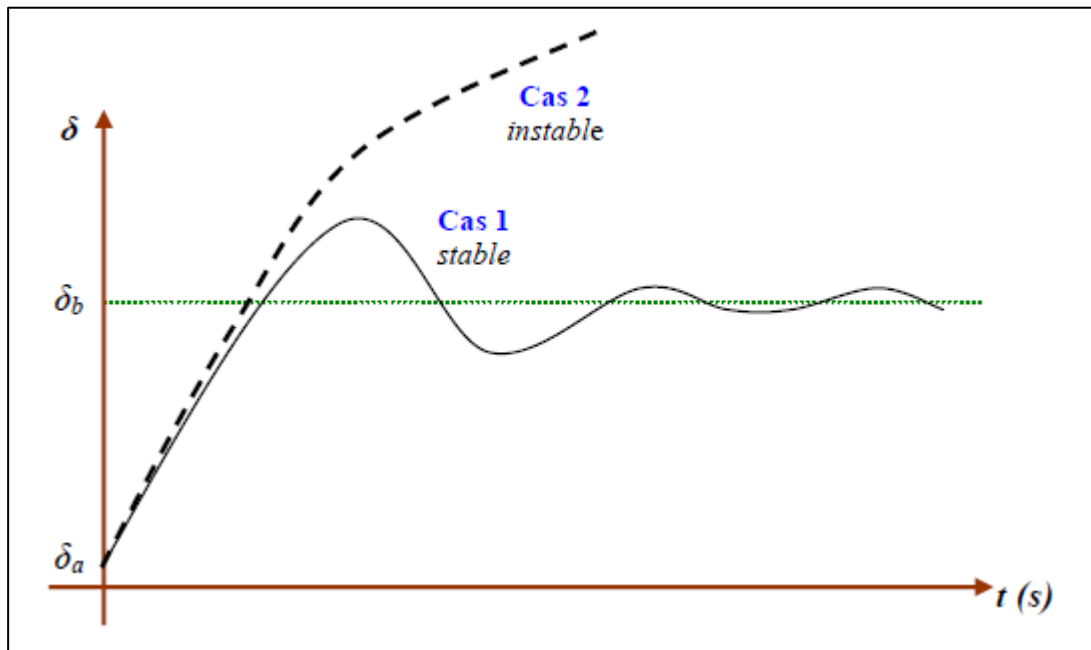


Figure I.6. Variation d'angle de rotor.

b. Critère d'égalité des aires :

Considérons un défaut, tel un défaut sur la ligne de transmission, appliqué au système précédent disparaissant après quelques périodes du système. Ceci va modifier l'écoulement de puissance et, par conséquent, l'angle de rotor δ . Retraçons la courbe (P - δ) en tenant compte de ce défaut, figure (I.7). En dessous de cette courbe, nous pouvons considérer deux zones[10]:

- La première zone (zone A_1 , zone d'accélération) se situe au-dessous de la droite horizontale correspondante au point de fonctionnement initial (la droite de charge). Elle est limitée par les deux angles de rotor (δ_0 et δ_1) correspondants à l'apparition et à la disparition de défaut. Cette zone est caractérisée par l'énergie cinétique stockée par le rotor du fait de son accélération : $P_m > P_e$.
- La deuxième zone (zone A_2 , zone de décélération), qui commence après l'élimination du défaut, se situe en dessus de la droite de charge : elle est caractérisée par la décélération du rotor : $P_m < P_e$.

Si le rotor peut rendre dans la zone A_2 toute l'énergie cinétique acquise durant la première phase, le générateur va retrouver sa stabilité. Mais si la zone A_2 ne permet pas de restituer toute l'énergie cinétique, la décélération du rotor va continuer jusqu'à la perte de synchronisme.

La relation entre les aires des zones (A_1 et A_2) et la stabilité transitoire peut être mathématiquement expliquée comme suit :

Rappelons tout d'abord que l'équation du mouvement de générateur est donnée par la relation suivante :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \quad (\text{I.2})$$

H : la constante d'inertie.

ω_0 : la vitesse de synchronisme.

P_m : la puissance mécanique fournie au générateur.

P_e : la puissance électrique du générateur.

En multipliant cette équation par $2 \cdot \frac{d\delta}{dt}$, en intégrant par rapport au temps et en faisant un changement de variables, nous obtenons :

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 + cte = \int_{\delta_0}^{\delta_2} \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) \cdot d\delta \quad (\text{I.3})$$

δ_0 : l'angle de rotor, initial, à l'instant de l'application de défaut.

δ_2 : l'angle de rotor à la fin de la période transitoire.

Ainsi, lorsque: $t = 0 \Rightarrow \delta = \delta_0$ $\frac{d\delta}{dt} = 0 \Rightarrow$ la constant cte = 0.

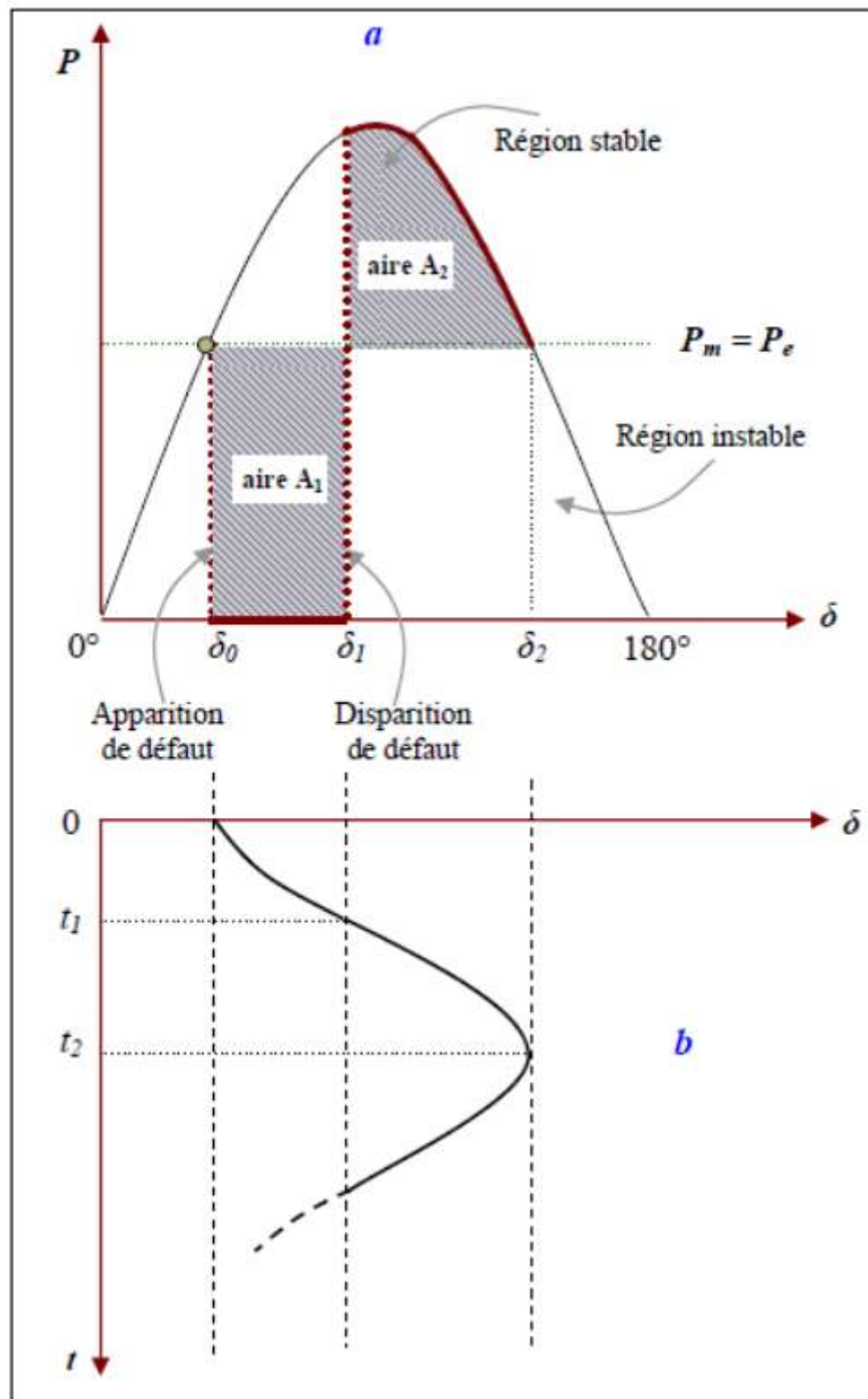


Figure I.7. Courbes (a : puissance-angle) et (b : variation d'angle de rotor) du générateur suite à un défaut de transmission[10].

Après l'élimination du défaut, l'angle δ va s'arrêter de varier et le générateur va retrouver sa vitesse de synchronisme, lorsque $\frac{d\delta}{dt} = 0$.

Par conséquent, l'équation (I.4) s'écrit comme suit :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_2} \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) \cdot d\delta = 0 \quad (\text{I.4})$$

$$\Rightarrow \int_{\delta_0}^{\delta_1} \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) \cdot d\delta + \int_{\delta_0}^{\delta_1} \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) \cdot d\delta = 0 \quad (\text{I.5})$$

Où : δ_1 est l'angle de rotor à l'instant de l'élimination de défaut.

$$\Rightarrow A_1 - A_2 = 0 \quad (\text{I.6})$$

Ainsi, la limite de la restauration de la stabilité transitoire se traduit mathématiquement par l'égalité des aires de la zone A_1 et de la zone A_2 : cette condition est appelée critère d'égalité des aires (Equal Area Criterion).

Par conséquent, les contrôleurs de la stabilité transitoire peuvent améliorer la stabilité soit en diminuant la zone d'accélération (zone A_1), soit en augmentant la zone de décélération (zone A_2) Cela peut être réalisé soit en augmentant la puissance électrique, soit en diminuant la puissance mécanique.

En outre, un système statique d'excitation avec une tension maximale élevée et d'un régulateur de tension possédant une action "puissante" et rapide représente un moyen très efficace et économique pour assurer la stabilité transitoire[11]. Enfin, une amélioration significative de la stabilité transitoire est obtenue avec des systèmes très rapides de détection des défauts et de disjoncteurs.

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 ».

Elle est peut être classée en deux catégories ; la stabilité de tension aux grandes perturbations et aux petites perturbations :

✓ **Stabilité de tension aux grandes perturbations:** Le souci dans ce cas est de maintenir des tensions normales aux nœuds de réseau électrique après une grande perturbation. La stabilité est déterminée ici par les caractéristiques du système et de charge, et par les interactions entre les différents dispositifs de commande de tension dans le système.

✓ **Stabilité de tension aux petites perturbations:** elle est définie comme la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement permises en présence des grandes perturbations à savoir la perte d'équipement de transport ou de production, le court-circuit,...etc [12].

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 ».

I.6.Introduction aux contrôleurs:

Le contrôle supplémentaire auxiliaire du système d'excitation AVR, vaguement connu sous le nom du Stabilisateur type PSS(Power System Stabiliser) est devenu le moyen le plus répandu pour l'amélioration de l'amortissement des oscillations basse fréquence dans les réseaux électriques (i.e. l'amélioration de stabilité dynamique et statique).

La puissance de sortie d'un générateur est déterminée par le couple mécanique. Cependant cette dernière peut varier par l'action du champ d'excitation de l'alternateur. Le PSS étant ajouté, il détecte la variation de la puissance de sortie électrique et contrôle l'excitation de manière à amortir rapidement les oscillations de puissance[13].

I.6.1. Nouveaux types de PSS:

Avec le développement de la technologie des semi conducteurs, de nouveaux algorithmes sont maintenant implantés, et ceci pour remplacer les PSSs analogiques (classique ou conventionnel) par des dispositifs à commande intelligente, à titre d'exemple [13]:

- Remplacement du PSS par un réseau de neurones artificiel (RNA).
- Remplacement du PSS par un contrôleur flou.
- PSS optimisé par l'algorithme génétique.
- PSS optimisé par essaims de particules (swarm intelligence based PSS).
- PSS hybrides.

I.7. Analyse de la performance et critères de bonne régulation :

I.7.1. Critères de simulation :

La performance d'un contrôleur nécessite des critères pour évaluer le "bon" comportement du système. Elle peut être spécifiée dans le domaine temporel et/ou fréquentiel[14].

Les caractéristiques dynamiques peuvent être décrites en examinant la réponse à une entrée typique (tel un échelon unité, ...). Ainsi, les spécifications de la réponse transitoire (tels le dépassement maximum, le temps de réponse, le temps de pic, ...) tout comme les critères intégraux (tels IAE, ISE, ITAE, ...) peuvent être utilisés comme indicateurs de performance des boucles de régulation[15].

a. Critères temporels instantanés :

La réponse indicielle (réponse à un échelon unité) d'un système oscillant du deuxième ordre est donnée à la figure (I.8) [16].

Nous définissons les paramètres critiques apparaissant sur cette figure :

❖ Dépassement maximum D_p :

Il est la mesure de la valeur maximale atteinte par la réponse indicielle lors de son premier dépassement.

Cette valeur est souvent pondérée par la valeur finale : on parle alors de dépassement maximum en pour cent, noté (D_p %) et calculé par la relation suivante :

$$D_p \% = \frac{y_{max} - y_f}{y_f} \cdot 100 \quad (I.8)$$

Le dépassement maximum s'exprime en fonction du facteur d'amortissement comme suit :

$$D_p = \frac{\pi \xi}{e \sqrt{1 - \xi^2}} \cdot 100 \quad (I.9)$$

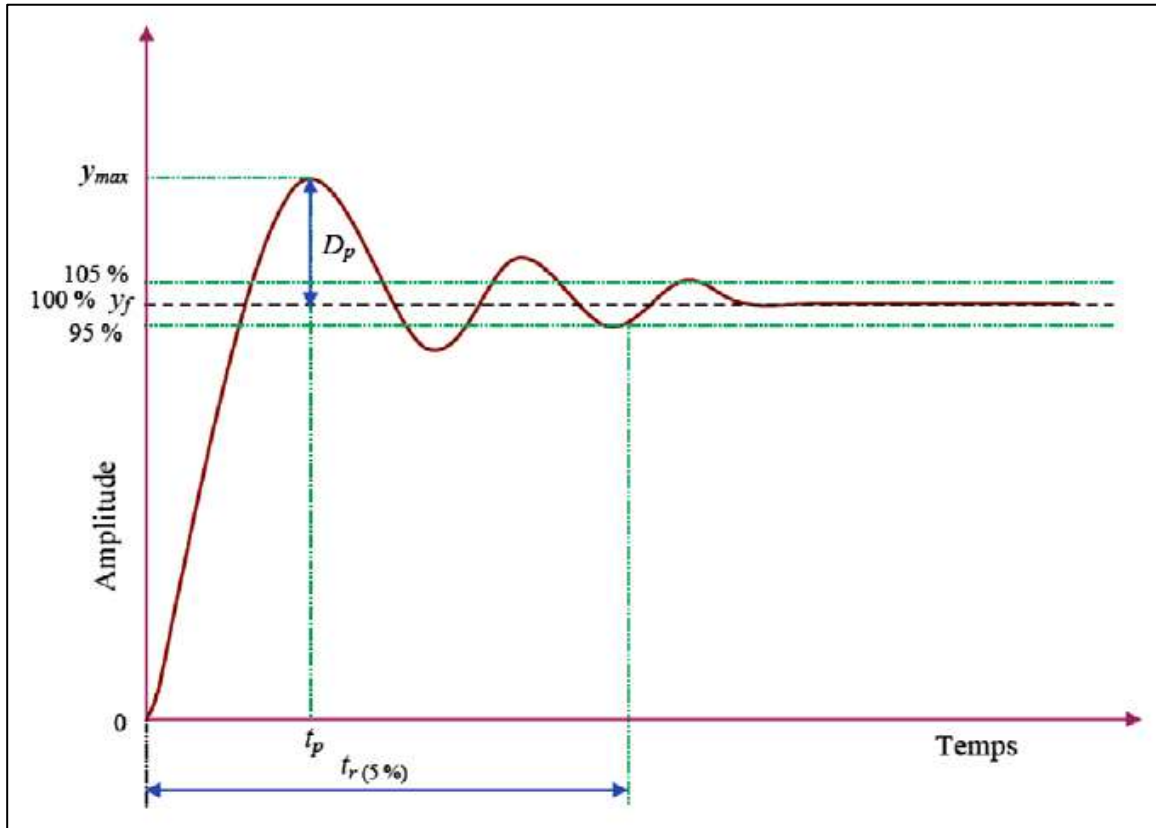


Figure I.8. Caractéristiques de la réponse indicielle d'un système.

❖ **Temps de pic t_p :**

Ce paramètre correspond à l'abscisse du dépassement maximum. Ce paramètre de temps peut être déterminé analytiquement en fonction du facteur d'amortissement et de la pulsation naturelle d'oscillation, comme suit :

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (\text{I.10})$$

❖ **Temps de réponse (temps d'établissement) $t_r(5\%)$:**

Il correspond au temps nécessaire à la réponse indicielle pour atteindre sa valeur finale avec une tolérance de $\pm n\%$ près. La tolérance 5% est la plus communément utilisée. Ce paramètre caractérise la rapidité relative de la réponse du système. La relation approximative entre le temps de réponse, le facteur d'amortissement et la pulsation naturelle d'oscillation est donnée comme suit :

$$t_p(5\%) \approx \frac{3}{\omega_n \xi} \quad , \quad \text{avec : } 0 < \xi < 1 \quad (\text{I.11})$$

La valeur critique du temps de réponse de la stabilité dynamique (dite aussi stabilité dynamique) varie d'un opérateur de système de puissance à l'autre. Généralement, elle s'étend de 10 à 20 secondes[14].

Finalement, nous pouvons remarquer qu'une augmentation du facteur d'amortissement aboutit à une diminution du dépassement maximum et du temps de réponse.

b. Critères temporels intégraux :

Soit $\varepsilon(t)$ l'erreur dynamique associée à la réponse indicielle du système. Différents critères typiques peuvent être utilisés pour caractériser la performance du système régulé. Nous les définissons ci-dessous

❖ Critère IAE, Intégrale de l'Erreur Absolue (Integral of Absolute Error) :

Le critère de performance est le suivant :

$$IAE = \int_0^t |\varepsilon(t)| dt \quad (\text{I.12})$$

Etant donné que ce critère prend en compte tous les éléments de la réponse harmonique, il est donc important lorsque la réponse du système est oscillatoire ; les faibles amortissements ne sont pas ainsi conseillés.

❖ Critère ISE, Intégrale du Carré de l'Erreur (Integral of Square Error) :

Le critère de performance est alors le suivant :

$$ISE = \int_0^t \varepsilon^2(t) dt \quad (\text{I.13})$$

En général, le fait de travailler avec le carré de l'erreur amplifie l'importance des valeurs de sortie qui s'écartent le plus de la valeur finale.

❖ Critère ITAE, Intégrale de l'Erreur Absolue pondérée par le Temps (Integral Time multiplied by Absolute Error) :

Le critère de performance est le suivant :

$$ITAE = \int_0^t t |\varepsilon(t)| dt \quad (\text{I.14})$$

Puisque la valeur du critère *ITAE* est pondérée par le temps, l'erreur statique est fortement pénalisée : les systèmes à réponse très oscillatoire sont ainsi pénalisés.

En règle générale, le système sera d'autant mieux réglé que le critère intégral choisi sera minimal.

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une façon générale les différents types de stabilité.

Nous avons présenté également une analyse fine sur la stabilité aux petites perturbations et les oscillations électromécaniques présentes dans les systèmes de puissance. Cette étude nous a ainsi permis de mettre en évidence les points importants suivants :

- Un système de puissance doit présenter un point d'équilibre stable dans les conditions de fonctionnement normales.
- Un système de puissance est stable s'il retrouve un état d'équilibre acceptable après avoir été soumis à une perturbation.
- La stabilité angulaire aux petites perturbations est habituellement considérée comme la capacité du système de puissance à maintenir le fonctionnement synchrone des générateurs pour de faibles variations des charges et des sources.
- Les oscillations électromécaniques sont généralement dues aux modes naturels du système. Ainsi, nous ne pouvons pas les éliminer. Cependant, leurs fréquences et leurs amortissements peuvent toujours être modifiés.
- Les stabilisateurs de puissance (PSS), par leur efficacité et leur coût réduit, sont les moyens habituels non seulement pour éliminer les effets négatifs des régulateurs de tension, mais aussi pour amortir les oscillations électromécaniques du système. En outre, l'amortissement assuré par les PSS permet au système de fonctionner au-delà même de la limite de la stabilité à l'état équilibré.

CHAPITRE II

Modélisation du Système Électro-énergétique

II.1. Introduction

Étape l'importance, lorsqu'on veut analyser et commander un système d'énergie électrique, consiste à trouver un bon modèle mathématique. Généralement, un modèle, dans l'analyse des systèmes, est un ensemble d'équations ou de relations, qui décrit convenablement les interactions entre les différentes variables étudiées, dans la gamme de temps considérée et avec la précision désirée, pour un élément ou un même système physique, peut donner lieu à des modèles différents.

Généralement, pour établir un modèle de réseau électrique pour les études dynamiques, on tient compte uniquement des équipements en activité pendant la plage temporelle du phénomène dynamique considéré. Le résultat est donc le modèle de connaissance complet du système : il se compose d'équations différentielles ordinaires non-linéaires et d'équations algébriques[17].

La stabilité peut être considérablement améliorée en utilisant des systèmes en boucle fermée avec des systèmes de contrôle adaptés. Au fil des années, un effort de recherche important était affecté pour une meilleure conception de tels contrôleurs. Il y a principalement deux moyens rapides permettant d'améliorer la stabilité :

- L'utilisation d'un contrôleur côté générateur (PSS) : signal de contrôle supplémentaire dans le système d'excitation du générateur.
- L'utilisation d'un contrôleur coté de lignes de transmission : signal de contrôle supplémentaire dans le système FACTS (Flexible AC Transmission System).

Ces systèmes restent très chers pour être installés uniquement pour une raison d'amortissement des oscillations.

Les contrôleurs PSSs qui sont des systèmes simples et faciles à installer, pratiques, efficaces et moins chers, sont les systèmes les plus utilisés pour améliorer la stabilité aux petites perturbations. Nous allons donc les utiliser dans notre étude.

Les modèles présentés dans ce chapitre concernent les éléments suivants :

- Modèle de la machine synchrone .
- Régulation du générateur:
 - Régulateur de fréquence et modèle de la turbine .
 - Régulateur de tension et modèle du système d'excitation .
- Modèle de PSS (Power System Stabilizer).

II.2. Modèle de la machine synchrone

L'énergie électrique est généralement produite par les machines synchrones. Ces dernières sont caractérisées par une vitesse de rotation de l'arbre de sortie de chaque machine égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, un couple mécanique issu d'une énergie primaire source, comme l'énergie hydraulique, l'énergie nucléaire ou l'énergie chimique, est appliqué à l'axe de la machine synchrone via un lien mécanique intermédiaire, à savoir la turbine. Le champ magnétique rotorique est généré habituellement par un circuit d'excitation alimenté par courant continu. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor : ceci impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. Ainsi, les enroulements du stator sont soumis à des champs magnétiques qui varient périodiquement. Une fem de courant alternatif est donc induite dans le stator [3].

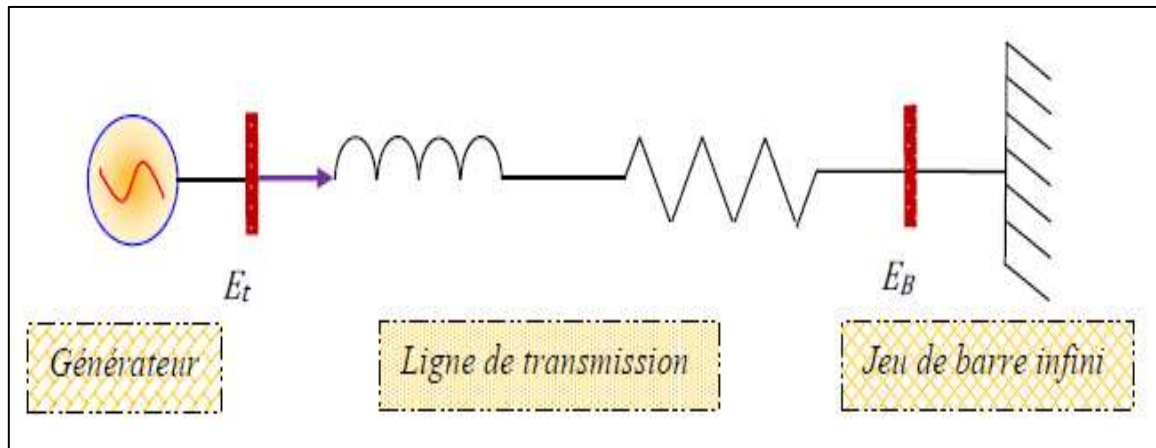


Figure II.1. Circuit équivalent de la machine synchrone connectée à un jeu de barre infini.

Le modèle du générateur et de ses contrôles se limite habituellement aux équations différentielles ordinaires couplées entre elles. Il existe plusieurs modèles, allant du plus simple, le modèle classique représentant seulement les caractéristiques électromécaniques du générateur [9].

Les grandeurs de machine (générateur) sont représentées sur la figure (II.1)

$\langle E' \rangle$: f_{em} du générateur induite.

$\langle E_B \rangle$: La tension du jeu de barre infini.

$\langle X \rangle$: Réactance synchrone et réactance transitoire.

$\langle \delta \rangle$: La variation d'oscillation de rotor en rad.

Ce modèle néglige l'amortissement produit par les courants de Foucault dans le corps de rotor (on suppose que la $f_{em} \langle E' \rangle$ est constant).

II.2. 1. Équations électriques:

Nous allons déterminer les équations algébriques du stator de cette machine.

Le courant de la ligne est exprimé par l'expression suivant :

$$I = \frac{E' \angle 0^\circ - E_B \angle -\delta^\circ}{jX} = \frac{E' - (E_B \cos \delta - jE_B \sin \delta)}{jX} \quad (\text{II.1})$$

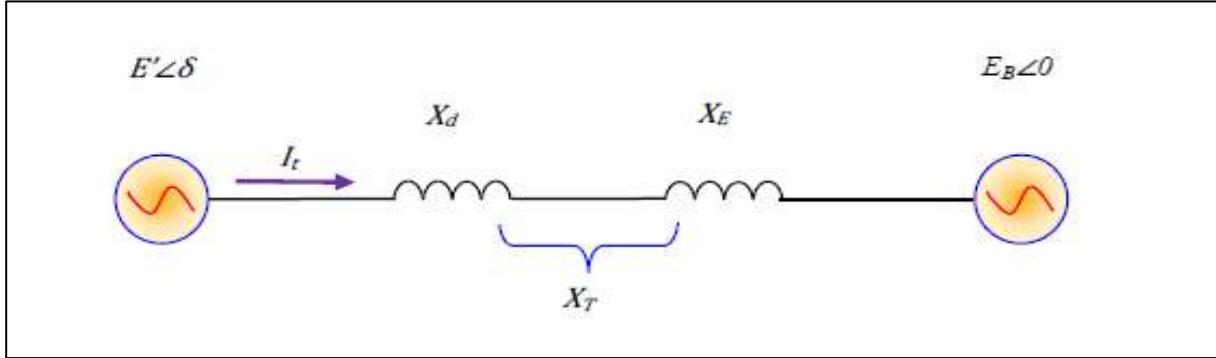


Figure II.2. Modèle classique de générateur.

Les puissances électriques (apparente S , active P , réactive Q) de la machine sont donnée par:

$$S = P_e + jQ_e = \frac{E' E_B \sin \delta}{X} + j \frac{E' (E' - E_B \cos \delta)}{X} \quad (\text{II.2})$$

Étant donné que les phénomènes transitoires dans le stator sont négligés, le couple électrique est donc égale à la puissance électrique active en per-unit. Ainsi $T_e = P_e$.

$$T_e = P_e = \frac{E' E_B}{X} \sin \delta \quad (\text{II.3})$$

Un déséquilibre entre les couples mécanique et électromagnétique agissant sur le rotor, provoque une variation du mouvement du rotor, par rapport à une référence synchrone tournante. Ainsi le couple électromagnétique joue un rôle important dans la stabilité angulaire. Ce couple est généralement produit par les interactions entre les trois circuits du stator de générateur, le circuit d'excitation et d'autres circuits tels les enroulements amortisseurs [9].

Suit à une perturbation, les variations du couple électromagnétique peuvent s'exprimer en fonction des variations d'angle de rotor $\Delta\delta$ et de vitesse $\Delta\omega$, suivant l'équation(II.4) [18]:

$$\Delta T_e = T_s + T_A = K_s \Delta\delta + K_A \Delta\omega \quad (\text{II.4})$$

K_s : Coefficient de couple synchronisant.

K_A : Coefficient de couple d'amortissement.

Le couple synchronisant T_s est donnée par la composante $T_s = K_s \Delta\delta$, il représente la variation de couple électromagnétique en phase avec la variation d'angle de rotor $\Delta\delta$.

Le couple synchronisant est produit par les interactions les enroulements du stator et la composante fondamentale du flux de l'entrefer. Ce couple tend à accélérer le rotor pour le ramener à sa position initiale. Il agit comme un couple de rappel d'un ressort d'un système mécanique, masse-ressort [19].

Pour des petites déviations du point de fonctionnement, le coefficient de couple synchronisant K_s est représenté par la pente de la courbe de la relation (puissance-angle), comme le montre la figure (II.3).

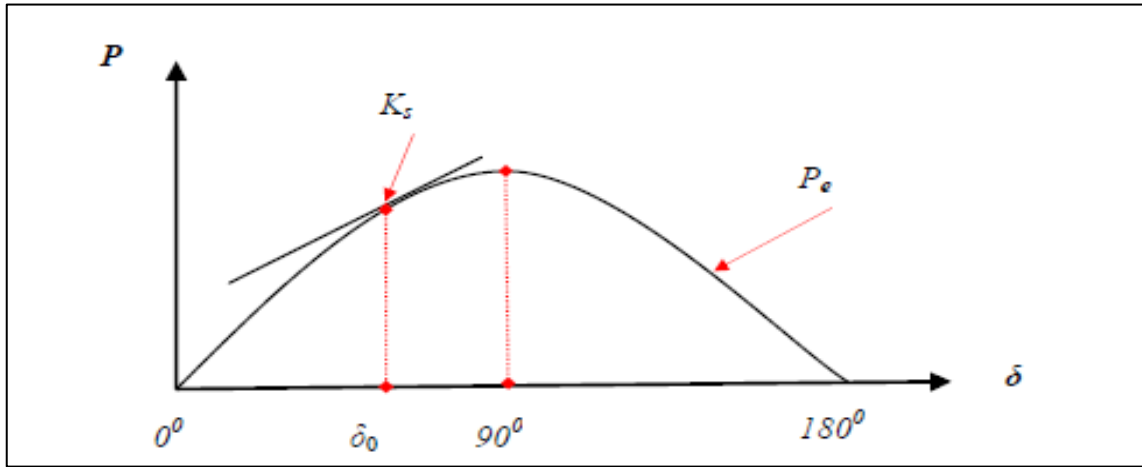


Figure II.3. Relation (puissance-angle) du générateur et le coefficient de couple synchronisant.

Si δ_0 est l'angle de puissance à l'état équilibré, entre la tension interne du générateur E' et la tension du jeu de barre infini E_B la pente de courbe à δ_0 est simplement la dérivée de la fonction puissance-angle:

$$K_s = \left. \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \right|_{\delta_0} = \frac{E' E_B}{X} \cos \delta_0 \quad (\text{II.5})$$

Le couple synchronisant détermine alors la capacité du système de supporter une grande perturbation sans perdre le synchronisme : il est un facteur important pour la stabilité transitoire. En cas des petites perturbations, le couple synchronisant détermine la fréquence des oscillations.

Le couple d'amortissement T_A est donné par la composante, $T_A = K_A \Delta\omega$ il représente la variation de couple électromagnétique en phase avec la variation de vitesse de rotor $\Delta\omega$.

II.2.2. Équations mécaniques:

Les propriétés mécaniques des machines synchrones se modélisent généralement à l'aide de l'équation, du mouvement basée sur le théorème du moment cinétique [20]. Cette équation présente une importance fondamentale dans l'étude des oscillations électromécaniques, car ces oscillations représentent un phénomène important dans la plupart des systèmes électro énergétiques, en particulier ceux qui contiennent de lignes de transmission longues [20]. Dans le fonctionnement à l'état d'équilibre, toutes les machines synchrones du système tournant à la même vitesse angulaire électrique. Le couple mécanique T_m est de même sens que le sens de l'axe du générateur. Le couple électrique T_e est de sens opposé à la rotation et ce couple mécanique [8], figure (II.4). Lors d'une perturbation, un ou plusieurs générateurs peuvent être accélérés ou ralentis et il y a donc risque de perdre le synchronisme. Ceci peut avoir impact important sur la stabilité du système et les générateurs perdant le synchronisme doivent être débranchés, sinon ils pourraient être sévèrement endommagés.

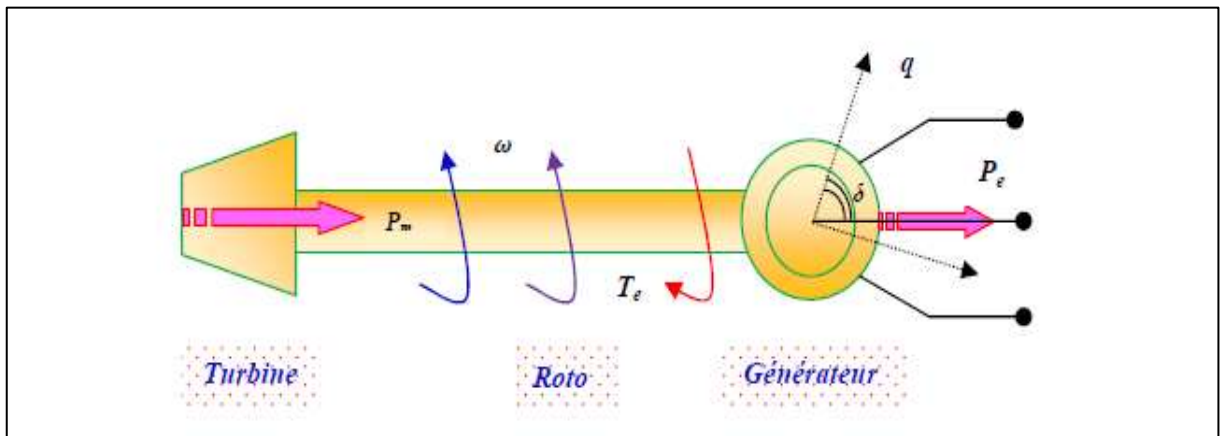


Figure II.4. Couple mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur.

S'il y a un déséquilibre des couples agissants sur le rotor de la machine, cette dernière va accélérer ou ralentir selon l'équation du mouvement suivant:

$$\Delta\dot{\omega} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \quad (\text{II.6})$$

Avec H constant d'inertie (en secondes) représentant l'inertie totale de toutes les masses tournantes connectées à l'arbre du générateur. Pour des oscillations à faibles fréquences, le courant induit dans les enroulements amortisseurs est négligeable. Par conséquent les enroulements amortisseurs peuvent être complètement négligés dans la modélisation du système. Si les enroulements amortisseurs sont ignorés, le couple d'amortissement produit par ces enroulements amortisseurs est donc également négligeable. Pour tenir compte de la composante du couple négligée, on introduit dans l'équation du mouvement un terme de compensation K_D (nommé aussi coefficient d'amortissement) en pu [21]. Ce coefficient représente l'amortissement naturel du système:

Il empêche l'accroissement des oscillations, à moins qu'une source d'amortissement négatif soit introduite (tel le régulateur de tension du système d'excitation).

L'équation du mouvement peut être donc réécrite comme suit:

$$\Delta\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H} (T_m T_e K_D \Delta\omega_r) \quad (\text{II.7})$$

L'équation de l'angle de rotor est donnée par:

$$\Delta\dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega_0 \quad (\text{II.8})$$

Avec:

$\Delta\dot{\omega}_r$: Déviation de la vitesse angulaire du rotor, en pu.

ω_0 : vitesse de synchronisme (vitesse de base), en sec / rad, ($\omega_0 = 2\pi f$, f Fréquence nominale, en Hz).

T_m : Couple mécanique fourni par la turbine, en pu.

T_e : Couple électromagnétique associée à la puissance électrique P_e produite du générateur, ($T_e = \frac{P_e}{\omega_r}$), en pu.

K_D : Coefficient d'amortissement du générateur, en pu.

δ : Angle de rotor, en rad.

D'après transformation de LAPLACE des équations (II.7) et (II.8), après on remplace ΔT_e . On trouve:

$$\begin{cases} S\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - K_s \Delta\delta - K_D \Delta\omega_r) \\ S\Delta\delta = \omega_0 \Delta\omega_r \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

On va réécrire l'équation précédente sous forme matricielle:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-K_D}{2H} & \frac{-K_S}{2H} \\ \frac{1}{2H} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (\text{II.10})$$

L'équation (II. 10) à la forme ($\dot{x} = Ax + Bu$), les éléments de matrice dépendant des paramètres de système K_D , H , X_T et la condition initial est présentée par la valeur de E' et δ_0 .

Cet équation (II. 10) décrire le signal de performance est représenté dans le schéma de bloc ci-dessous:

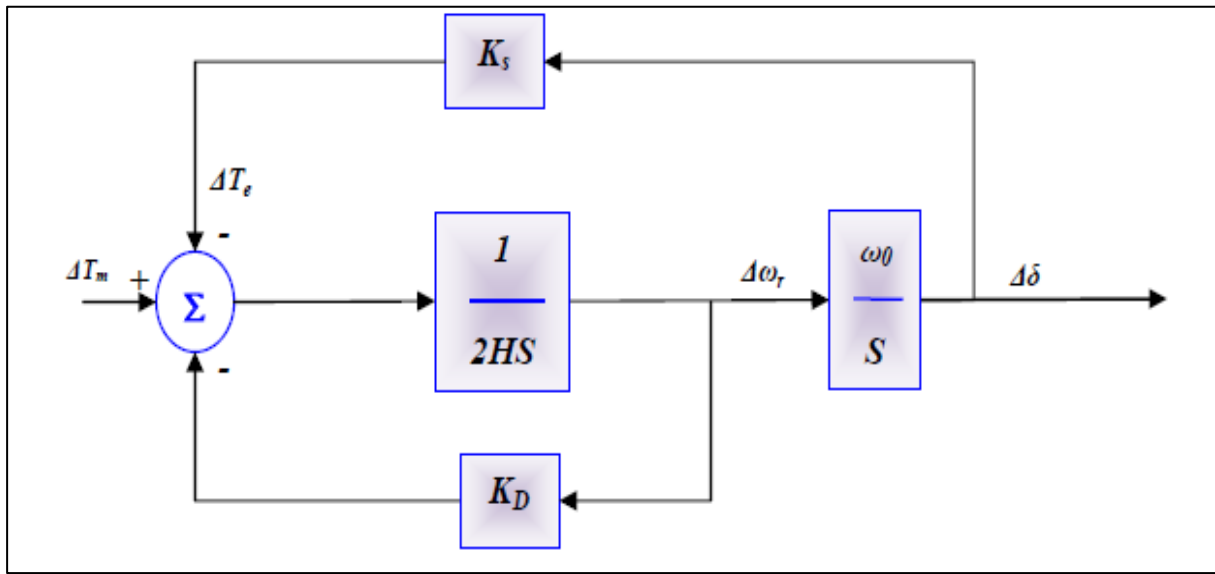


Figure II.5 Schéma bloc du système (mono machine-jeu de barre infini) avec le Modèle classique.

D'après le schéma bloc précédent, on est formé notre système sous forme équation différentiel à deuxième ordre.

$$\Delta\delta = \frac{\omega_0}{S} \left(\frac{1}{2HS} (-K_S \Delta\delta - K_D \Delta\omega_r + \Delta T_m) \right) = \frac{\omega_0}{S} \left(\frac{1}{2HS} \left(-K_S \Delta\delta - K_D \left[\frac{S \Delta\delta}{\omega_0} \right] + \Delta T_m \right) \right) \quad (\text{II.11})$$

On faire simplifier d'équation afin d'obtenir le résultat suivant:

$$S^2 = \frac{K_D}{2H} S + \frac{K_S \omega_0}{2H} = 0 \quad (\text{II.12})$$

A l'aide d'équation (II.11), On peut déterminer pulsation naturel ω_n et aussi le facteur d'amortissement ξ .

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_s \omega_0}{2H}} \\ \xi = \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{2HK_s \omega_0}} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

II.2.3. Effet dynamique du circuit de champ:

L'équation de flux de circuit de générateur synchrone est donne:

$$S\psi_{fd} = \omega_0(e_{fd} - R_{fd}i_{fd}) = \omega_0 \frac{R_{fd}}{L_{adu}} E_{fd} - \omega_0 R_{fd} i_{fd} \quad (\text{II.14})$$

Où : E_{fd} est la tension de sortie d'excitation.

Les circuits équivalents reliant le flux de la machine et leurs courants sont montrés dans la figure suivant:

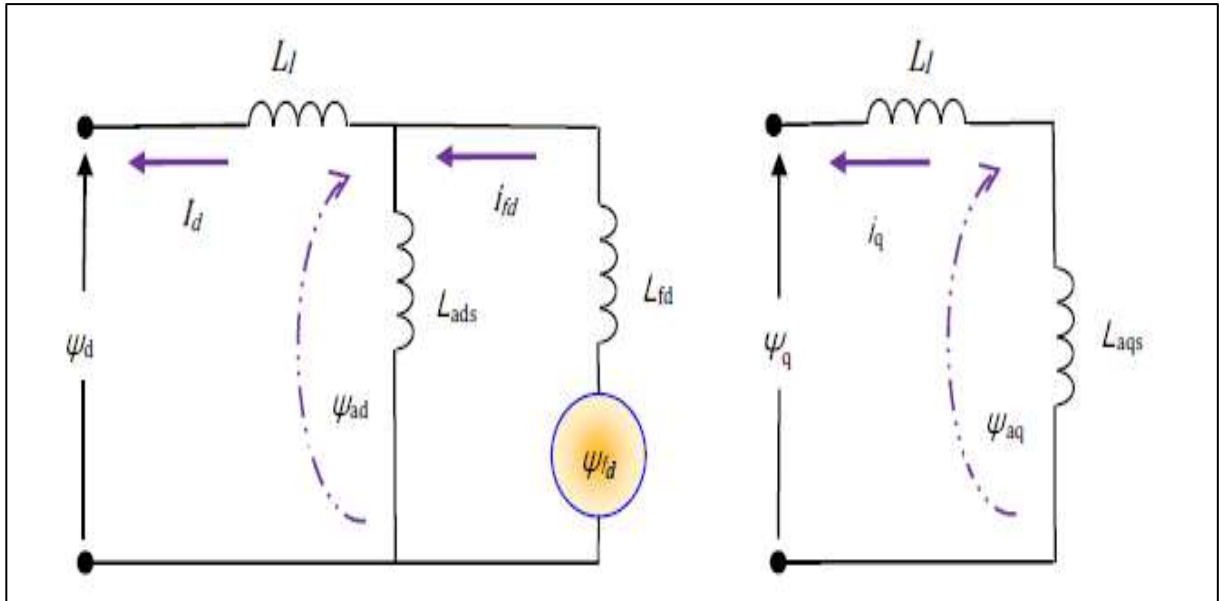


Figure II.6. Circuits équivalents relatifs de l'enchaînement du flux de la machine et courant.

Le flux de stator et de rotor sont données par:

$$\begin{cases} \psi_d = -L_l i_d + L_{ads}(-i_q + i_{fd}) = -L_l i_d + \psi_{ad} \\ \psi_q = -L_l i_q + L_{aqs}(-i_d) = -L_l i_q + \psi_{aq} \\ \psi_{fd} = L_{ads}(-i_d + i_{fd}) + L_{fd} i_{fd} = L_{fd} i_{fd} + \psi_{ad} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

On peut trouver i_{fd} à partir l'équation (II.15):

$$i_{fd} = \frac{\psi_{fd} - \psi_{ad}}{L_{fd}} \quad (\text{II. 16})$$

Le flux mutuel dans l'axe d peut être écrite en termes de ψ_{fd} et i_d .

$$\psi_{ad} = -L_{ads}i_d + L_{ads}i_{fd} = L_{ads}i_d + \frac{L_{ads}}{L_{fd}}(\psi_{fd} - \psi_{ad}) = L'_{ads}(-i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}}) \quad (\text{II. 17})$$

$$\text{Où : } L'_{ads} = 1/\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}}$$

Puisque il n'y a pas de circuits rotorique pris en compte dans l'axe q, la liaison de flux mutuelle est donnée par:

$$\psi_{aq} = -L_{aqs}i_q \quad (\text{II. 18})$$

Le couple d'entrefer (le couple électromagnétique) est:

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d = \psi_{ad} i_q - \psi_{aq} i_d \quad (\text{II. 19})$$

L'équation suivant est montré de la tension de stator avec on néglige le terme $S\psi_{fd}$ et la variation de vitesse:

$$\begin{cases} e_d = -R_a i_d - \psi_q = -R_a i_d + (L_l i_q - \psi_{aq}) \\ e_q = -R_a i_q + \psi_d = -R_a i_q - (L_l i_d - \psi_{ad}) \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$

La tension aux bornes de la machine et du jeu de barre infini exprimé en termes d'axe d et d'axe q. Composants est donnée comme suit:

$$\begin{cases} \bar{E}_t = e_d + j e_q \\ \bar{E}_B = E_{Bd} + j E_{Bq} \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

L'équation de contraintes de réseau pour le système représenté sur la figure (II.1)

$$\begin{cases} \bar{E}_t = \bar{E}_B + (R_E + jX_E)\bar{I}_t \\ (e_d + j e_q) = (E_{Bd} + j E_{Bq}) + (R_E + jX_E)(i_d + j i_q) \end{cases} \quad (\text{II. 22})$$

Résolution en composants de d et de q donnés:

$$\begin{cases} e_d = R_E i_d - X_E i_q + E_{Bd} \\ e_q = R_E i_q - X_E i_d + E_{Bq} \end{cases} \quad (\text{II. 23})$$

$$\text{Où : } \begin{cases} E_{Bd} = E_d \sin \delta \\ E_{Bq} = E_q \cos \delta \end{cases}$$

On détermine l'expression des i_d et i_q , à partir des équations (II-23) et (II-20):

$$\begin{cases} i_d = X_{Tq} \frac{\left[\Psi_{fd} \left(\frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \right) - E_B \cos \delta \right] - R_T E_B \sin \delta}{D} \\ i_q = R_T \frac{\left[\Psi_{fd} \left(\frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \right) - E_B \cos \delta \right] - X_{Td} E_B \sin \delta}{D} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Tel que:

$$\begin{cases} R_T = R_a + R_E \\ X_{Tq} = X_E + (L_{aqs} + L_l) = X_E + X_{qs} \\ X_{Td} = X_E + (L'_{ads} + L_l) = X_E + X_{ds} \\ D = R_T^2 + X_{Td} X_{Tq} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

On veut poser l'équation (II.24) sous forme linéaire

$$\begin{cases} \Delta i_d = m_1 \Delta \delta + m_2 \Delta \Psi_{fd} \\ \Delta i_q = n_1 \Delta \delta + n_2 \Delta \Psi_{fd} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Avec:

$$\begin{cases} m_1 = \frac{E_B (X_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0)}{D} \\ n_1 = \frac{E_B (R_T \sin \delta_0 - X_{Td} \cos \delta_0)}{D} \\ m_2 = \frac{X_{Tq}}{D} \frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \\ n_2 = \frac{R_T}{D} \frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Par linéarisation de l'équation (II-17) et (II-18) on a:

$$\begin{cases} \Delta \Psi_{ad} = \dot{L}'_{ads} \left(-\Delta i_d + \frac{\Delta \Psi_{fd}}{L_{fd}} \right) = \left(\frac{1}{L_{fd}} - m_2 \right) L'_{ads} \Delta \Psi_{fd} - m_2 L'_{ads} \Delta \delta \\ \Delta \Psi_{aq} = -L_{aqs} \Delta i_q = n_2 L_{aqs} \Delta \Psi_{fd} - n_1 L_{aqs} \Delta \delta \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Par linéarisation de l'équation (II-16) et substituant $\Delta \Psi_{fd}$ de l'équation (II-28) donnée:

$$\Delta \Psi_{ad} = \frac{\Psi_{fd} - \Psi_{ad}}{L_{ad}} = \frac{1}{L_{fd}} \left(1 - \frac{L'_{fd}}{L_{fd}} + m_2 L'_{ads} \right) \Delta \Psi_{fd} + \frac{1}{L_{fd}} m_1 L'_{ads} \Delta \delta \quad (\text{II.29})$$

La forme linéaire d'équation est:

$$\Delta T_e = \Delta \Psi_{ad0} \Delta i_q + i_{q0} \Delta \Psi_{ad} - \Delta \Psi_{aq0} \Delta i_d - i_{d0} \Delta \Psi_{aq} \quad (\text{II.30})$$

En remplace Δi_d , Δi_q , $\Delta \Psi_{ad}$ et $\Delta \Psi_{aq}$ dans les équations (II-26), (II-28) et (II-29) nous obtenons:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta \Psi_{fd} \quad (\text{II.31})$$

Tel que:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} \Big|_{\Delta \Psi_{fd}=cte} = n_1(\Psi_{ad0} + L_{aqs}i_{d0}) - m_1(\Psi_{aq0} + L_{aqs}i_{q0}) \\ K_2 = \frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} \Big|_{\Delta \delta=cte} = n_2(\Psi_{ad0} + L_{aqs}i_{d0}) - m_2(\Psi_{aq0} + L_{aqs}i_{q0}) + \frac{L_{aqs}}{L_{fd}}i_{q0} \end{cases} \quad (\text{II. 32})$$

Et remplace l'équation (II-31) dans l'équation (II-20), qu'il devient:

$$\begin{cases} S\Delta\omega_r = \frac{1}{2H}(\Delta T_m - K_1\Delta\delta - K_2\Delta\Psi_{fd} - K_D\Delta\omega_r) \\ S\Delta\delta = \omega_0\Delta\omega_r \end{cases} \quad (\text{II. 33})$$

Par équation (II-16) et substituant l'expression à Δi_{fd} de l'équation (II-29) et en utilisant l'équation (II-33) les équations de système final désirée obtenons sont:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta\Psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 34})$$

Avec:

$$\begin{cases} a_{11} = -\frac{K_D}{2H} \\ a_{12} = -\frac{K_1}{2H} \\ a_{13} = -\frac{K_2}{2H} \\ a_{21} = \omega_0 = 2\pi f_0 \\ a_{32} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L'_{ads} \\ a_{33} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left(1 + \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} + m_2 L'_{ads} \right) \\ b_{11} = \frac{1}{2H} \\ b_{32} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} \end{cases} \quad (\text{II. 35})$$

Avec ΔT_m et ΔE_{fd} dépends des commandes de moteur et d'excitation. L'inductance mutuelle L_{ads} , dans les équations ci-dessus sont saturés valeur.

La figure (II.7) montre la représentation de schéma fonctionnel de la petite exécution de signal du système.

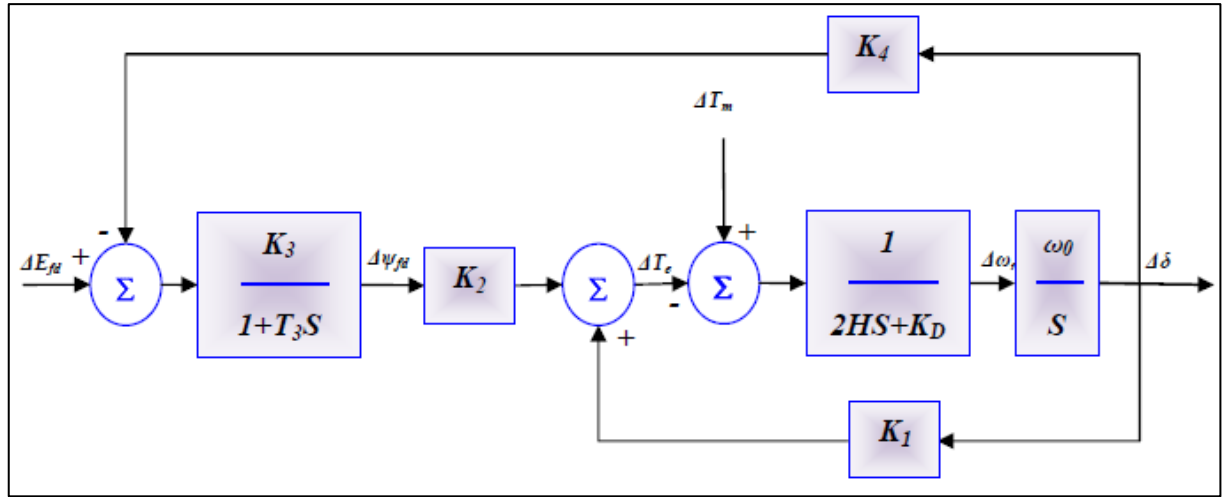


Figure II.7 Représentation de schéma fonctionnel avec la constante E_{fd} .

La variation $\Delta\psi_{fd}$ est déterminée par équation dynamique de circuit de champ:

$$S\Delta\psi_{fd} = a_{32}\Delta\delta + a_{33}\Delta\psi_{fd} + b_{32}E_{fd} \quad (\text{II. 36})$$

Par des limites groupant K_2 $\Delta\psi_{fd}$ et réarrangeant

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{K_3}{1 + T_3S} (\Delta E_{fd} - K_4\Delta\delta) \quad (\text{II. 37})$$

Tel que:

$$\begin{cases} K_3 = -\frac{b_{32}}{a_{33}} \\ K_4 = -\frac{a_{32}}{b_{32}} \\ T_3 = -\frac{1}{a_{33}} = K_3 T_{d0} \frac{L_{adu}}{L_{fd}} \end{cases} \quad (\text{II. 38})$$

II.3. Régulation du générateur:

Si l'équilibre des puissances actives n'est plus assuré, la fréquence de synchronisme dans le système sera changée, alors qu'un déséquilibre des puissances réactives entraînera une variation des tensions du système par rapport à leurs valeurs de référence.

Pour assurer une génération satisfaisante d'énergie électrique, pour un grand nombre de points de fonctionnement, le couple mécanique ΔT_m appliqué au rotor et la tension d'excitation E_{fd} doivent être réglés systématiquement pour s'accommoder de toute variation du système.

Le système responsable de la génération du couple mécanique et ainsi de l'entraînement du rotor du générateur est appelé "système de force motrice". Le contrôle de la fréquence (ou contrôle de la puissance active) associé à ce système maintient la vitesse nominale des

générateurs en assurant de ce fait une fréquence constante. Par ailleurs, le système d'excitation est responsable de la tension d'excitation fournie au générateur. Les valeurs du système d'excitation pour enfin obtenir les tensions désirées aux bornes du générateur [9].

II.3.1. Régulateur de fréquence et modèle de la turbine:

Un système de force motrice, figure (II.8), se compose de la source d'énergie primaire, de la turbine (équipé d'un servomoteur) et du régulateur de fréquence (gouverneur) [22].

La turbine transforme l'énergie potentielle de la source en énergie de rotation de l'arbre (rotor) sur lequel est placé l'alternateur. L'alternateur convertit la puissance mécanique fournie par la turbine en puissance électrique de sortie. La vitesse de l'arbre de la turbine est mesurée précisément et comparée à la vitesse de référence. Le régulateur de fréquence (vitesse) agit ensuite sur le servomoteur pour ouvrir et fermer les vannes de contrôle et modifier par conséquent la vitesse de générateur. Ainsi le rôle de la turbine est d'entraîner le rotor du générateur à la vitesse synchrone correspondant à la fréquence du système de puissance.

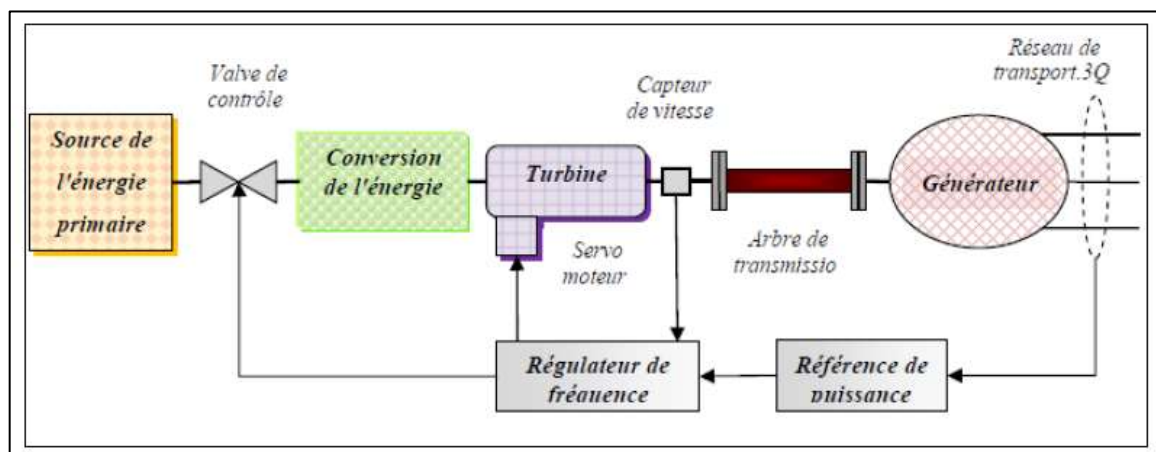


Figure II.8. Structure générale d'un système de force motrice-générateur.

Les turbines à vapeur utilisées dans les centrales thermiques (charbon, gaz, pétrole, nucléaire) sont constituées d'un certain nombre de roues, successivement fixes et mobiles, portant des ailettes le long desquelles la vapeur se déplace. Au fur et à mesure que la vapeur progresse axialement dans la turbine, sa pression diminue et la taille des ailettes augmente. Ces différentes roues sont généralement groupées en plusieurs étages, particulièrement dans les centrales de grande puissance. La division de la turbine en étages permet de réchauffer la vapeur entre les étages en assurant, par conséquent, un meilleur rendement au cycle thermique [7].

Le gouverneur forme une boucle de retour qui surveille la vitesse du rotor à chaque instant.

Considérons par exemple une perturbation de l'équilibre des puissances actives. Dans les toutes premières secondes, l'énergie correspondante va être prélevée sur l'énergie cinétique des masses tournantes des unités de production. Ceci va entraîner une perturbation de la vitesse de rotation de ces unités. Cet écart de vitesse doit être détecté et corrigé automatiquement par les gouverneurs. Ces gouverneurs doivent changer l'admission de fluide (vapeur, gaz ou eau) dans les turbines de manière à ramener les vitesses et donc la fréquence du réseau, autour de leurs valeurs nominales.

Dans l'analyse de la stabilité transitoire ou dynamique, la réponse temporelle du système de la force motrice à une perturbation est considérée comme plus lente que la plage de l'étude de la force motrice peut être extrêmement simplifiée. Pour une analyse de stabilité transitoire d'une durée de quelques secondes, le modèle du système de la force motrice peut être supprimé en considérant que le couple mécanique de la turbine reste constant [22].

II.3.2. Régulateur de tension et modèle du système d'excitation:

Le système d'excitation est un système auxiliaire qui alimente les enroulements d'excitation de 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 [7].

Actuellement, des systèmes d'excitation variés sont employés. Trois principaux types peuvent être identifiés [23].

- ❖ Les systèmes d'excitation à courant continu (CC):

Ils utilisent une génératrice à courant continu avec collecteur comme source de puissance du système d'excitation.

- ❖ Les systèmes d'excitation à courant alternatif (CA):

Ils utilisent un alternateur et des redresseurs statiques ou tournants pour produire le courant continu nécessaire dans l'enroulement d'excitation de la machine synchrone.

- ❖ Les systèmes d'excitation statiques (système ST):

Dans ce cas, le courant d'excitation est fourni par un redresseur commandé. Sa puissance est fournie soit directement par le générateur à travers un transformateur donnant le niveau approprié de tension, soit par des enroulements auxiliaires montés dans le générateur.

Le système d'excitation sont équipés de contrôleurs, appelés habituellement régulateurs de tension (Automatic Voltage Regulator: AVR), figure (II.9). Ces derniers sont très important

pour l'équilibre de la puissance réactive qui sera fournie où absorbée selon les besoins des charges. En outre ces contrôleurs représentent un moyen très important pour assurer la stabilité transitoire du système électro énergétique. Le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation de l'alternateur pour régler le flux magnétique dans la machine et "ramener" 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.

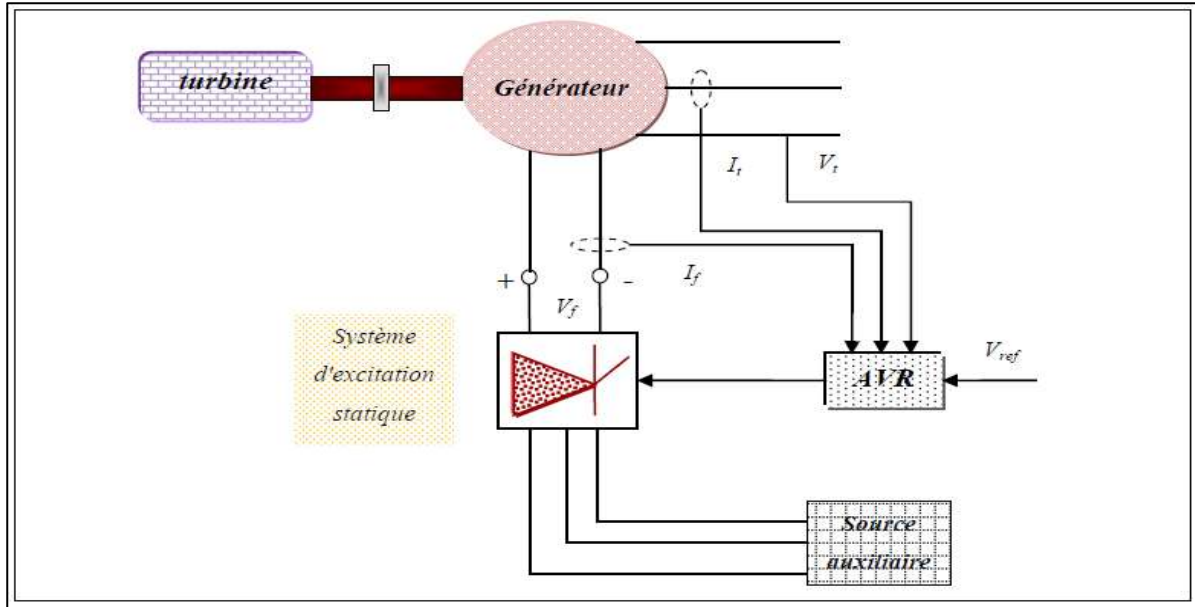


Figure II.9. Structure d'un système d'excitation statique avec son AVR.

Le groupe IEEE task forces présente périodiquement des recommandations pour la modélisation des éléments d'un système de puissance dont les systèmes d'excitation [23]. Plusieurs modèles sont suggérés pour chaque type de système d'excitation. Les systèmes d'excitation statiques étant les plus installés actuellement, nous avons donc choisi dans notre étude d'utiliser le modèle du système IEEE-STIA, modèle le plus utilisé dans la littérature. Ce type de système d'excitation se caractérise par sa rapidité et sa sensibilité [19].

La tension aux bornes de générateur E_t peut être exprimée en forme complexe:

$$\begin{cases} \bar{E}_t = e_d + je_q \\ E_t^2 = e_d^2 + e_q^2 \end{cases} \quad (\text{II. 39})$$

D'appliquer une petite perturbation, on peut écrire:

$$(E_{t0} + \Delta E_t)^2 = (e_{d0} + \Delta e_d)^2 + (e_{q0} + \Delta e_q)^2 \quad (\text{II. 40})$$

En négligeant plus haut limites d'ordre d'expression l'équation ci-dessus réduite à:

$$E_{t0}\Delta E_t = e_{d0}\Delta e_d + e_{q0}\Delta e_q \quad (\text{II. 41})$$

Donc:

$$\Delta E_t = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} \Delta e_d + \frac{e_{q0}}{E_{t0}} \Delta e_q \quad (\text{II.42})$$

En termes de valeur perturbée, équation(II.20) peut être écrit:

$$\begin{cases} \Delta e_d = -R_a \Delta i_d - (L_l \Delta i_q - \Delta \Psi_{aq}) \\ \Delta e_q = -R_a \Delta i_q - (L_l \Delta i_d - \Delta \Psi_{ad}) \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

En utilisant les équations (II.26) et (II.28), nous obtenons:

$$\Delta E_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \Psi_{fd} \quad (\text{II.44})$$

Où:

$$\begin{cases} K_5 = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} (-R_a m_1 + L_1 n_1 + L_{aqs} n_1) + \frac{e_{q0}}{E_{t0}} (-R_a n_1 + L_1 m_1 + L'_{ads} m_1) \\ K_6 = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} (-R_a m_2 + L_1 n_2 + L_{aqs} n_2) + \frac{e_{q0}}{E_{t0}} \left(-R_a n_2 + L_1 m_2 + L'_{ads} \left(\frac{1}{L_{fd}} - m_1 \right) \right) \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

Pour l'analyse à échelle réduite, le système d'excitation de thyristor comme montré dans la figure (II.10) est considéré la non linéarité associée avec le plafond sur l'excitateur produire la tension représenté près E_{FMIN} et E_{FMAX} ce qui est ignoré pour des études de petit perturbation.

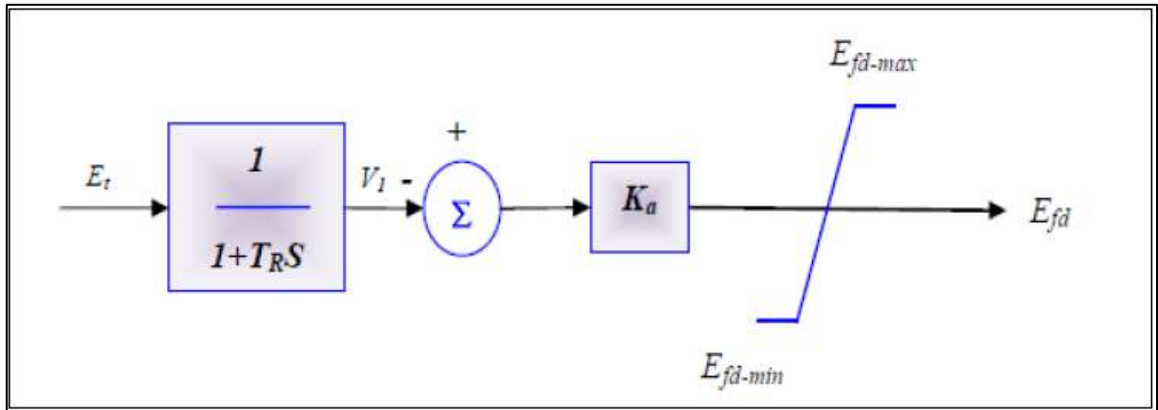


Figure II.10. Système d'équitation statique (thyristor) avec AVR.

À partir du bloc de la figure (II.10), en utilisant perturbé valeurs, nous avons:

$$\Delta V_1 = \frac{1}{1 + T_R S} \quad (\text{II.46})$$

D'où:

$$\Delta V_1 = \frac{1}{T_R} (\Delta E_t - \Delta V_1) \quad (\text{II.47})$$

On remplace ΔE_t dans l'équation (II.44), nous obtenons:

$$S \Delta V_1 = \frac{1}{T_R} (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \Psi_{fd} - \Delta V_1) \quad (\text{II.48})$$

D'après le bloc 2 de la figure (II.10), nous obtenons:

$$E_{fd} = K_A(V_{ref} - V_1) \quad (\text{II. 49})$$

En termes de valeurs perturbées, nous avons:

$$\Delta E_{fd} = K_A(-\Delta V_1) \quad (\text{II. 50})$$

L'équation dynamique du circuit de champ montrée dans l'équation (II.36), devient:

$$S\Psi_{fd} = a_{31}\Delta\omega_r + a_{32}\Delta\delta + a_{33}\Delta\Psi_{fd} + a_{34}\Delta V_1 \quad (\text{II. 51})$$

Où:

$$a_{34} = -b_{32}K_A = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A \quad (\text{II. 52})$$

L'expression de a_{31}, a_{32}, a_{33} rester sans changement, nous avons premier ordre commande le modèle pour l'excitateur, l'ordre du système global est augmenté près 1; la nouvelle variable d'état supplémentaire est Δv_1 .

$$\Delta V_1 = a_{41}\Delta\omega_r + a_{42}\Delta\delta + a_{43}\Delta\Psi_{fd} + a_{44}\Delta V_1 \quad (\text{II. 53})$$

Avec:

$$\begin{cases} a_{41} = 0 \\ a_{42} = \frac{K_5}{T_R} \\ a_{43} = \frac{K_6}{T_R} \\ a_{44} = \frac{1}{T_R} \end{cases} \quad (\text{II. 54})$$

L'espace d'état complet de modèle pour le système d'alimentation, incluant le système d'excitation de la figure (II. 7) à la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\Psi}_{fd} \\ \Delta\dot{v}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta\Psi_{fd} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\Delta T_m] \quad (\text{II. 55})$$

La figure (II.11) montre le schéma fonctionnel obtenu en bloc de la figure (II.7) pour inclure le capteur de tension et le régulateur automatique de tension avec excitateur. La représentation est applicable à n'importe quel type d'excitateur, avec $G_{ex}(S)$ représentation de la fonction de transfert d'AVR et excitateur. Pour un thyristor-excitateur $G_{ex}(S) = K_A$.

Le signal terminal d'erreur de tension, qui forme le bloc de capteur de tension d'entrée est donné par:

$$\Delta E_t = K_5\Delta\delta + K_6\Delta\Psi_{fd} \quad (\text{II. 56})$$

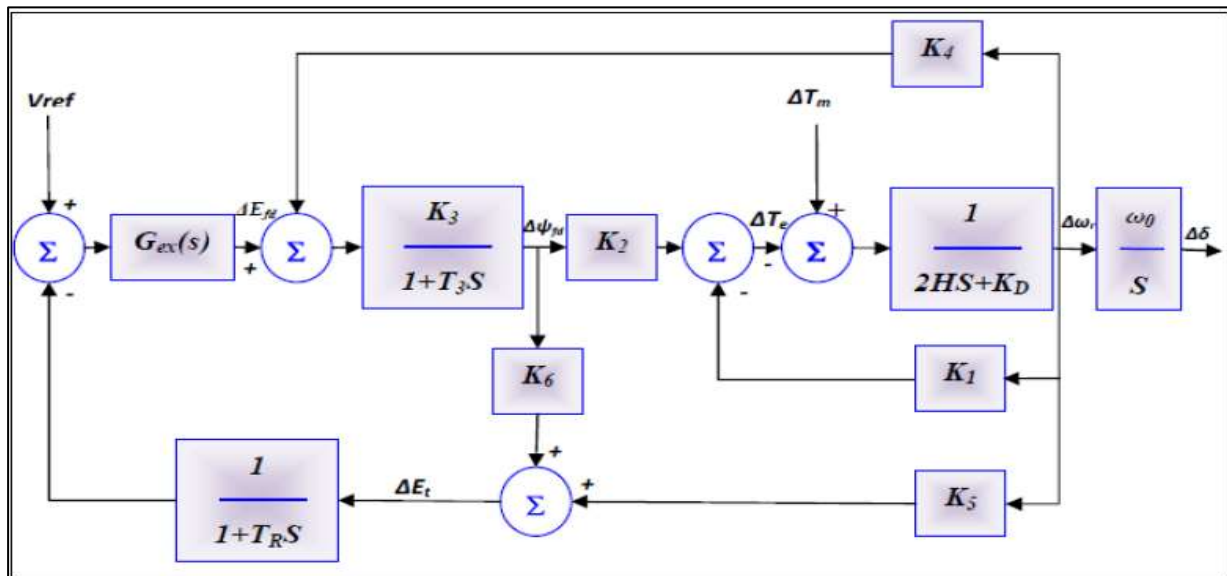


Figure II.11. Représentation du schéma bloc avec l'excitateur et AVR.

Le coefficient K_6 est toujours positif tandis que K_5 peut être dépendre positif ou négatif de la condition. Et impédance externe de réseau $R_E + jX_E$. La valeur de K_5 a un significatif portant sur l'influence d'AVR sur l'amortissement de l'oscillation de système [24].

II.4.Modèle de power system stabiliser PSS [24]:

La fonction de base du stabilisateur de système de puissance est d'ajouter l'atténuation à l'oscillation de rotor de générateur en commandant son excitation, utilisant les signaux stabilisants auxiliaires. A fourniture atténuant, le stabilisateur doit produire un composant de la base théorique de *PSS* est illustrée par du schéma fonctionnel, comme le montre la figure ci-dessous.

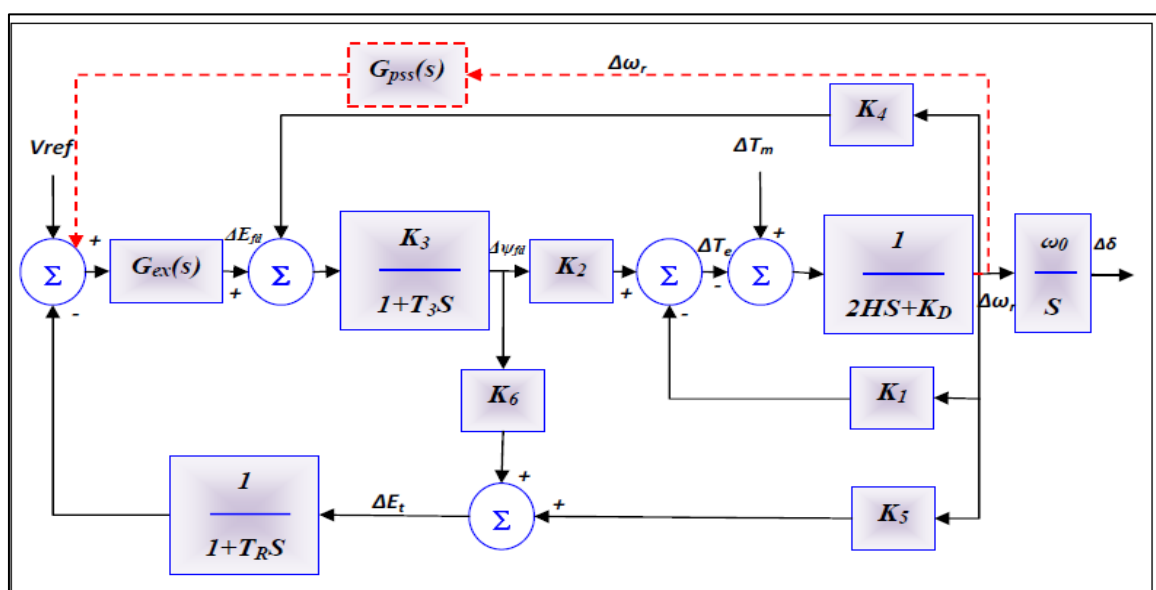


Figure II.12. Représentation du schéma bloc avec AVR et PSS.

II.4.1. Modèle du système d'excitation avec PSS [24]:

Puisque le but de PSS est d'introduire un composant de couple d'amortissement. Un signal logique pour employer pour l'excitation de contrôle de générateur est la déviation de vitesse $\Delta\omega_r$. La fonction de transfert de PSS ($G_{pss}(S)$), devrait avoir les circuits appropriés de compensation de phase pour compenser le retard de phase entre l'entrée d'excitateur et le couple électrique. Ce qui suit est une brève description de la base de la configuration PSS et de considération dans la sélection des paramètres.

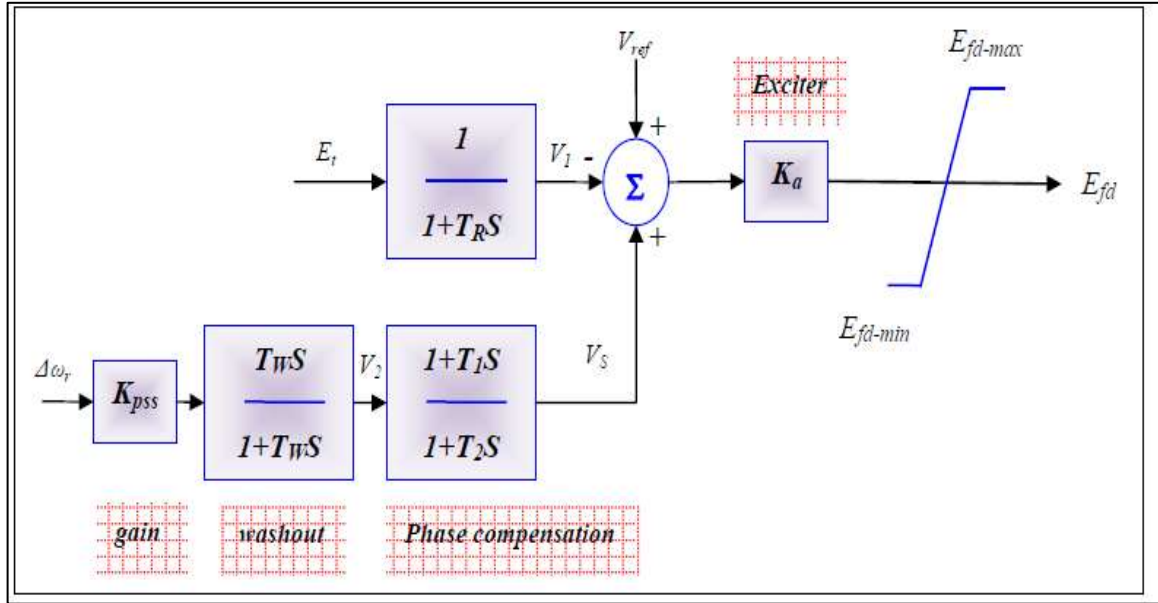


Figure II.13. Système d'excitation statique avec AVR et PSS.

Du bloc 4 de la figure (II.13), d'emploi des valeurs perturbées, nous avons:

$$S\Delta V_2 = \frac{ST_W}{1 + ST_W} (K_{PPS}\Delta\omega_r) \rightarrow S\Delta V_2 = K_{PPS}S\Delta\omega_r - \frac{1}{T_W}\Delta V_2 \quad (\text{II. 57})$$

Remplacer $S\Delta\omega_r$ donné par l'équation (II-34), nous obtenons l'expression suivant pour $S\Delta V_2$ en termes de variables d'état:

$$S\Delta V_2 = a_{51}\Delta\omega_r + a_{52}\Delta\delta + a_{53}\Delta\Psi_{fd} + a_{54}\Delta V_2 + \frac{K_{PPS}}{2H}\Delta T_m \quad (\text{II. 58})$$

Avec:

$$\begin{cases} a_{51} = K_{PPS}a_{11} \\ a_{52} = K_{PPS}a_{12} \\ a_{53} = K_{PPS}a_{13} \\ a_{54} = \frac{1}{T_W} \end{cases} \quad (\text{II. 59})$$

Du bloc (5):

$$\Delta V_s = \Delta V_2 \left(\frac{1 + ST_1}{1 + ST_2} \right) \rightarrow \Delta V_s = \frac{T_1}{T_2} S \Delta V_2 + \frac{1}{T_2} \Delta V_2 - \frac{1}{T_2} \Delta V_s \quad (\text{II. 60})$$

L'équation (II-61) est résulté par substitution $S \Delta V_2$ donné par l'équation (II-55).

$$S \Delta V_5 = a_{61} \Delta \omega_r + a_{62} \Delta \delta + a_{63} \Delta \Psi_{fd} + a_{64} \Delta V_1 + a_{65} \Delta V_2 + a_{66} \Delta V_s + \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{PSS}}{2H} \Delta T_m \quad (\text{II. 61})$$

Tel que:

$$\begin{cases} a_{61} = \frac{T_1}{T_2} a_{51} \\ a_{62} = \frac{T_1}{T_2} a_{52} \\ a_{63} = \frac{T_1}{T_2} a_{53} \\ a_{64} = \frac{T_1}{T_2} a_{54} \\ a_{65} = \frac{T_1}{T_2} a_{55} + \frac{1}{T_1} \\ a_{66} = \frac{1}{T_2} \end{cases} \quad (\text{II. 62})$$

Du bloc 2, nous obtenons:

$$\Delta E_{fd} = K_A (\Delta V_s - \Delta V_1) \quad (\text{II. 63})$$

L'équation de circuit de champ, avec PSS inclus, devient:

$$S \Delta \Psi_{fd} = a_{32} \Delta \delta + a_{33} \Delta \Psi_{fd} + a_{34} \Delta V_2 + a_{36} \Delta V_s \quad (\text{II. 64})$$

$$\text{Avec: } a_{36} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A$$

L'équation (II-59) récapitule le modèle complet du l'état-espace, où on inclure le PSS, avec $\Delta T_m = 0$.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_r \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\psi} \\ \Delta \dot{V}_1 \\ \Delta \dot{V}_2 \\ \Delta \dot{V}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \psi_{fd} \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_s \end{bmatrix} \quad (\text{II. 65})$$

II.4.2.Fonctionnement et modèle de PSS:

Un PSS permet d'ajouter un signal de tension proportionnel à la variation de vitesse de rotor dans l'entrée du régulateur de tension (AVR) du générateur, figure (II. 14). Un couple électrique en phase avec la variation de vitesse de rotor est ainsi produit dans le générateur. Par conséquent, avec un système d'excitation rapide et fort, l'avantage présenté par un couple synchronisant important est toujours assuré et le problème de la décroissance du couple

d'amortissement est corrigé [25,19]. 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[26]:

- supporter les premières oscillations faisant suite à une grande perturbation ; c.-à-d. assurer la stabilité transitoire du système.
- maximiser l'amortissement des oscillations électromécaniques associées aux modes locaux
- ainsi qu'aux modes interrégionaux sans effets négatifs sur les autres modes.
- minimiser la probabilité d'effets défavorables, à savoir :
 - les interactions avec les phénomènes de hautes fréquences dans le système électro-énergétique telle la résonance dans le réseau de transport.
 - les instabilités locales dans la bande de l'action désirée du système de contrôle.
- être suffisamment robuste pour permettre au système de contrôle d'assurer ses objectifs pour divers points de fonctionnement probables du système électro-énergétique. Le choix du signal d'entrée de *PSS* représente une étape critique dans la conception du *PSS*.

Plusieurs considérations interviennent dans ce choix, telles :

- la sensibilité du signal d'entrée aux oscillations électromécaniques (autrement dit, les modes oscillatoires doivent être "observables" dans le signal choisi).
- l'insensibilité du signal d'entrée du *PSS* à son propre signal de sortie. D'une façon similaire, la sensibilité doit être très la plus faible possible pour les signaux de sortie d'autres *PSS*.

Un bon résultat peut être obtenu si l'entrée du *PSS* est la variation de la vitesse de rotor ($\Delta\omega$), la variation de puissance produite du générateur (ΔP_e) ou la fréquence du jeu de barre (Δf). Etant donné que le *PSS* est utilisé pour produire un couple électrique proportionnel à la variation de vitesse, il apparaît donc plus convenable d'utiliser la variation de vitesse ($\Delta\omega$) comme entrée du *PSS*. Cependant, quel que soit le signal d'entrée, la fonction de transfert du *PSS* doit compenser les caractéristiques de phase du système d'excitation, des parties électriques du générateur et des autres parties électriques du système. L'ensemble de ces dernières déterminent la fonction de transfert entre l'entrée du système d'excitation (ΔV_{er}) et le couple électrique du générateur (ΔT_e), [27]. Cette fonction de transfert est dénotée $GEP(s)$, figure (II.14).

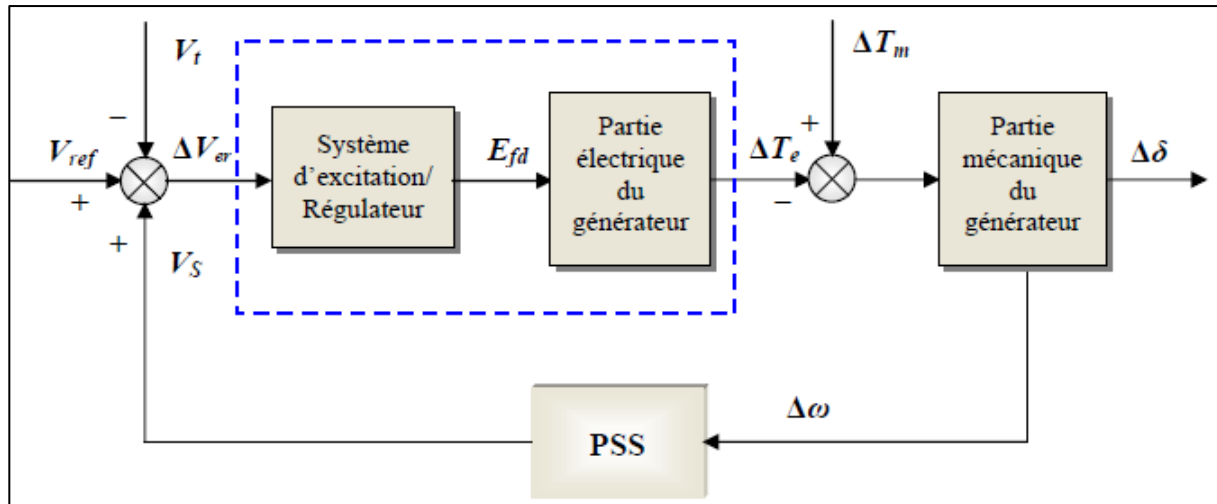


Figure II.14. Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système.

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 (II.15) :

- un bloc d'amplificateur.
- un bloc de filtre passe-haut "filtre washout".
- un bloc de compensation de phase.
- un limiteur.

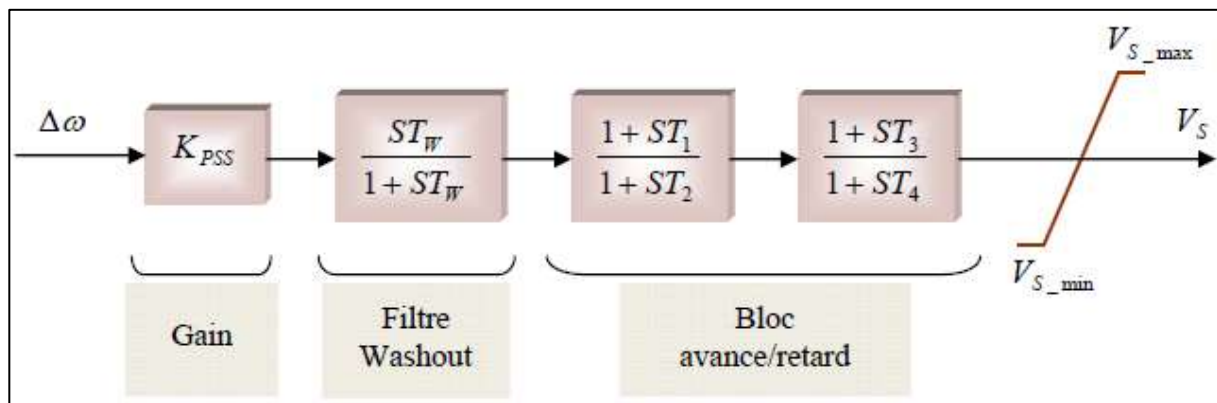


Figure II.15. Modèle d'un PSS avance/retard.

a) L'amplificateur :

Il détermine la valeur de l'amortissement introduit par le PSS. Théoriquement, sa valeur (K_{PSS}) doit correspondre à l'amortissement maximal. Toutefois, la valeur du gain doit satisfaire l'amortissement des modes dominants du système sans risquer de dégrader la

stabilité des autres modes ou la stabilité transitoire[26]. Généralement, K_{PSS} varie généralement de 0.01 à 50[4].

b) Le filtre passe-haut "filtre washout":

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_ω) doit être suffisamment grande pour permettre aux signaux, dont la fréquence est située dans la bande utile, d'être transmis sans atténuation. Mais, elle ne doit pas être trop grande pour éviter de mener à des variations indésirables de tension de générateur pendant les conditions d'îlotage. Généralement, T_ω varie de 1 à 20 secondes. Une amélioration remarquable sur la stabilité de la première oscillation est obtenue avec une valeur T_ω fixée à 10 secondes [14].

c) Le 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 (ΔT_e) et l'entrée du système d'excitation(ΔV_{er}).

Par conséquent, le PSS fournit l'avance de phase nécessaire pour compenser le retard de phase de la fonction de transfert GEP . Pratiquement, un bloc de phase d'avance pure ne suffit pas pour réaliser la compensation de phase nécessaire ; ainsi, un bloc d'avance/retard de phase est souvent utilisé. Pour mieux garantir la stabilité du système, deux étages (au moins) de compensations de phase sont nécessaires. La fonction de transfert de chaque étage est une simple combinaison de pole-zéro, les constantes de temps d'avance et de retard étant réglables. La gamme de chaque constante de temps s'étend généralement de 0.01 à 6 secondes.

Mais pour des considérations de réalisation physique, les constantes de temps de retard sont considérées fixes et généralement autour de la valeur de 0.05 secondes[28].

d) Le 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). Le PSS a parfois tendance à perturber le bon fonctionnement du régulateur de tension en le saturant lorsque ce dernier essaye de maintenir la tension lors des conditions transitoires. Ainsi, le PSS doit être équipé d'un limiteur afin de réduire son influence indésirable durant les phases transitoires[27]. Les valeurs minimales et maximales du limiteur s'étendent de ± 0.02 à 0.1 per-unit[29].

II.4.3. Réglage des paramètres de PSS:

Le problème de la conception d'un PSS est de déterminer les valeurs de ses paramètres pour:

- augmenter l'amortissement des modes du système.
- assurer une stabilisation robuste.

La minimisation des risques probables des interactions défavorables et des effets négatifs sur les autres modes oscillatoires du système représente aussi un point critique important qui influence le réglage de PSSs. En outre, les valeurs des paramètres du PSS doivent être réglées sans entraîner d'effet négatif dans la restauration de la stabilité transitoire.

De nombreuses méthodes sont proposées dans la littérature pour le réglage des paramètres de PSS. Généralement, la plupart de ces méthodes sont basées sur l'analyse des valeurs propres du système.

II.4.3.1.Méthode de compensation de phase:

Pour expliquer le réglage des paramètres de *PSS* par la méthode de compensation de phase, nous prenons un système simple consistant en un générateur connecté à un jeu de barre infini, figure (II.16). Le modèle linéaire de ce système peut être graphiquement illustré par la représentation de Heffron-Philips [14], comme le montre la figure (II.16).

Les termes $K1.....K6$ sont les constantes de linéarisation.

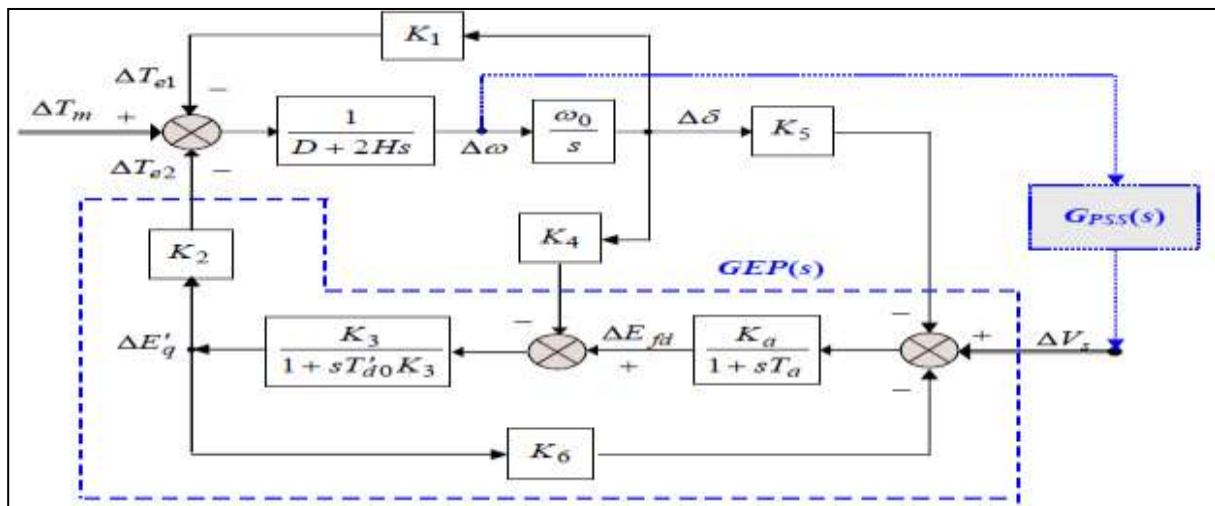


Figure II.16. Modèle de Heffron-Philips d'un système (mono-machine-jeu de barre infini).

L'objectif principal d'un PSS est d'introduire une composante d'un couple électrique sur le rotor de la machine synchrone, ce couple est proportionnel à l'écart entre la vitesse actuelle du rotor et la vitesse de synchronisme.

Lorsque le rotor oscille, ce couple agit comme un couple d'amortissement pour atténuer les oscillations. La fonction de transfert $GEP(s)$ et le retard de phase de la boucle électrique peuvent être dérivés du modèle de Heffron-Philips. Ils sont donnés par les deux relations suivantes [30].

$$GEP(s) = \frac{K_a K_3 K_2}{(1 + sT_a)(1 + sT_{d0}' K_3) + K_a K_3 K_2} \Big|_{s = \lambda = \sigma = j\omega} \quad (\text{II.66})$$

$$Phi_{GEP} = \angle GEP(s) \Big|_{s = \lambda = \sigma = j\omega} \quad (\text{II.67})$$

Avec : $\lambda = \sigma + j$ est la valeur propre calculée pour le système sans signal de stabilisation. Pour simplifier, nous considérons que les paramètres à régler du PSS sont le gain K_{PSS} et les constantes de temps $T1$ et $T3$ (avec $T1=T3$), les autres paramètres sont fixés (avec $T2=T4$)

Ainsi, la fonction de transfert de PSS peut se réécrire comme suit:

$$G_{PSS}(s) = K_{PSS} \frac{sT\omega}{1 + sT\omega} \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^2 = K_{PSS} \times G_f(s) \quad (\text{II.68})$$

Étant donné que l'avance de phase du PSS (Phi_{GEPSS}) est égale à la phase (Phi_{GEP}) la constante de temps $T1$ est donnée, tout calcul fait, par la relation suivante:

$$T_1 = T_3 = \frac{\tan(\beta)}{\omega - \sigma \times \tan(\beta)} \quad (\text{II.69})$$

Avec:

$$\beta = \frac{1}{2} \left(-Phi_{GEP} - \tan^{-1} \left(\frac{\omega}{\sigma} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\omega T \omega}{1 + \sigma T \omega} \right) + 2 \tan^{-1} \left(\frac{\omega T_2}{1 + \sigma T_2} \right) \right) \quad (\text{II.70})$$

Le gain du PSS, quant à lui, est donné par la relation suivante [33]:

$$K_{PSS} = \frac{4\omega_n \xi H}{K_2 |GEP(s)| |G_f(s)|} \Big|_{s = \lambda = \sigma = j\omega} \quad (\text{II.71})$$

Avec:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\omega_0 k_1}{2H}} \quad (\text{II.72})$$

ω_0 : La vitesse de synchronisme du système, en rad/s.

ω_n : La pulsation naturelle d'oscillation en rad/s.

La valeur ω_n représente la solution de l'équation caractéristique de la boucle mécanique figure (II.1). Elle est définie par l'équation suivante (coefficient d'amortissement K_D négligée).

$$2Hs^2 + \omega_0 = 0, \text{ Avec: } s = \pm j\omega_n \quad (\text{II.73})$$

II.4.3.2. Méthode du résidu:

Nous avons vu que le filtre avance/retard du PSS est utilisé pour compenser le retard de phase de la fonction de transfert $GEP(s)$. En déterminant la valeur du retard de phase, nous pouvons ainsi calculer les constantes de temps (avance/retard) nécessaires pour assurer la compensation demandée. Pour ce faire, l'angle de phase de résidu peut être utilisé [31].

Considérons la forme suivante de la fonction de transfert du PSS pour un système à une entrée/une sortie:

$$H(s) = K_{PSS} \frac{sT_\omega}{1 + sT_\omega} \left[\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right]^m \quad (\text{II.74})$$

Où : m est le nombre d'étages de compensation (généralement $m = 2$)

La figure (II.17) montre l'effet du résidu sur le déplacement de valeur propre dans la partie gauche du plan complexe.

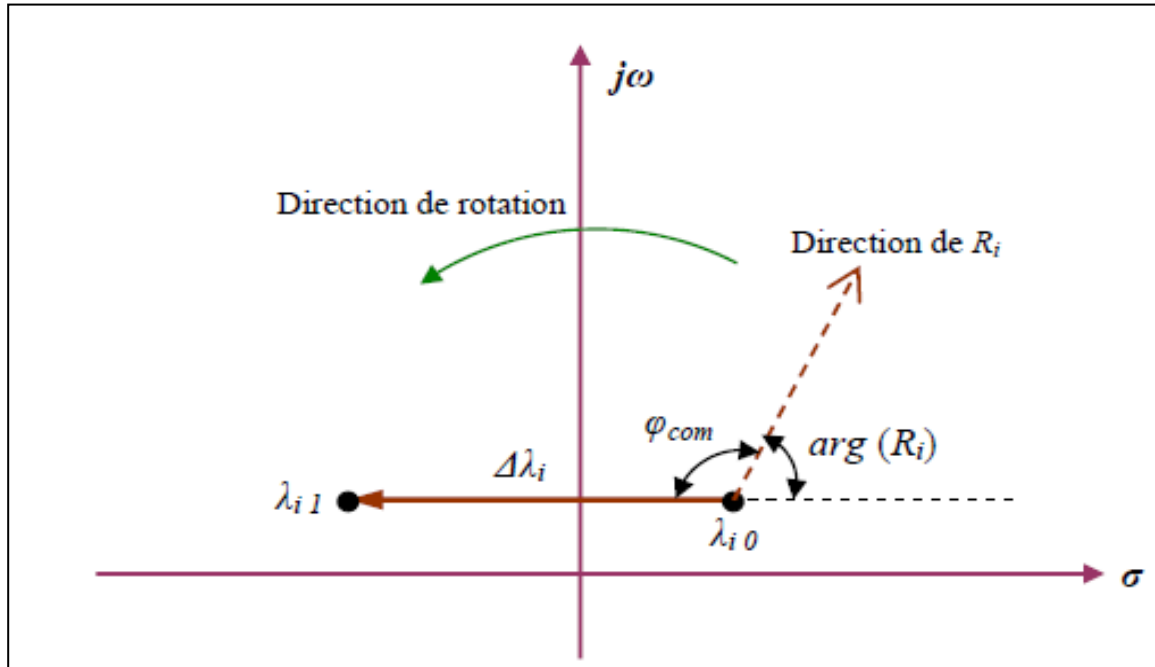


Figure II.17. Déplacement de valeur propre par la rotation du résidu associé.

L'angle de phase φ_{com} , nécessaire pour diriger la direction du résidu R_i de sorte que la valeur propre associée λ_i se déplace parallèlement à l'axe réelle, peut être calculé par l'équation suivante:

$$\varphi_{com} = 180^\circ - \arg(R_i) \quad (\text{II. 75})$$

Où : $\arg(R_i)$ est l'angle de phase du résidu R_i .

Par conséquent, les constantes de temps T_1 et T_2 , du bloc avance/retard nécessaires pour obtenir l'angle φ_{com} , peuvent être calculées comme suit [31]:

$$T_1 = \alpha T_2, \quad T_2 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}} \quad (\text{II. 76})$$

$$\text{Avec : } \alpha = \frac{1 - \sin\left(\frac{\varphi_{com}}{m}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\varphi_{com}}{m}\right)} \quad (\text{II. 77})$$

Où : ω_i est la fréquence du mode λ_i en rad/sec.

Pour calculer le gain K_{PSS} , nous pouvons réécrire la fonction transfert du PSS comme suit:

$$H(s) = K_{PSS} \cdot H_f(s) \quad (\text{II. 78})$$

Le déplacement des valeurs propres est donné ci-dessous:

$$\Delta\lambda_i = |\lambda_{i1} - \lambda_{i0}| = R_i H(\lambda_i) \quad (\text{II. 79})$$

En remplaçant l'équation (II. 78) dans la dernière équation, nous obtenons pour gain K_{PSS} la valeur littérale suivante [3-32]:

$$K_{PSS} = \left| \frac{\lambda_{i1} - \lambda_{i0}}{R_i \cdot H_f(\lambda_i)} \right| \quad (\text{II. 80})$$

Une autre méthode peut être utilisée pour régler le gain K_{PSS} : la méthode traditionnelle de Ziegler et Nichols basée sur l'étude du régime critique de la réponse harmonique du système en boucle fermée. On cherche ainsi le gain produisant l'instabilité. Le test consiste à augmenter lentement le gain de stabilisateur jusqu'à l'observation de l'instabilité. Pour un signal d'entrée de type variations de vitesse, ce test doit être effectué avec une charge maximale et des conditions de transport d'énergie satisfaisantes. Le savoir-faire montre, en général, que le gain désiré représente le tiers du gain à l'instabilité:

$$K_{st} = \frac{K_{inst}}{3} \quad [3-33]$$

II.4.3.3. Méthode de placement des pôles :

Cette méthode consiste à déterminer les valeurs des paramètres d'un PSS de sorte que tous les pôles du système en boucle fermée se trouvent placés en des positions spécifiées préalablement dans le plan complexe. Cette méthode peut être mathématiquement décrite en considérant la représentation suivante du système [3-15-34] figure(II.18).

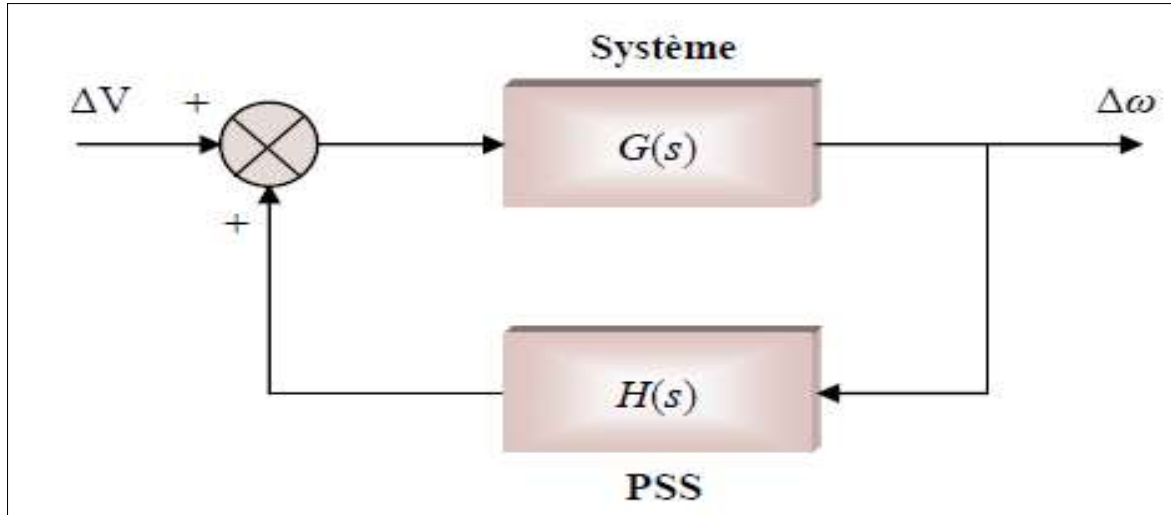


Figure II.18. Ensemble (système-PSS) en boucle fermée.

Où: $G(s)$ est la fonction de transfert du système entre le signal de référence ΔV du régulateur de tension de générateur, où le PSS doit être installé, et la variation de vitesse de rotor $\Delta\omega$. $H(s)$ est la fonction de transfert de PSS.

Les pôles de $G(s)$ sont justement les valeurs propres du système linéarisé en boucle ouverte. La fonction de transfert du système entier en boucle fermée $F(s)$ devient:

$$1 - G(s)H(s) = 0 \quad (\text{II. 81})$$

$$\Rightarrow H(s) = \frac{1}{G(s)} \quad (\text{II. 82})$$

Si $\lambda_i = 1, 2, \dots, n$, sont les valeurs propres spécifiées préalablement, l'équation (II.17) peut ainsi se réécrire comme suit:

$$H(\lambda_i) = \frac{1}{G(\lambda_i)} \quad (\text{II. 83})$$

$$\frac{1}{G(\lambda_i)} = K_{\text{PSS}} \cdot \frac{\lambda_i T_\omega}{1 + \lambda_i T_\omega} \cdot \frac{1 + \lambda_i T_1}{1 + \lambda_i T_2} \cdot \frac{1 + \lambda_i T_3}{1 + \lambda_i T_4} \quad (\text{II. 84})$$

Par conséquent, nous obtenons un ensemble d'équations algébriques linéaires. En résolvant ces équations, nous pouvons déterminer les valeurs des paramètres désirés du PSS qui assurent le placement précis des valeurs propres.

II.4.4. Emplacement optimal des PSSs:

Tous les générateurs du système ne participent pas aux modes dominants: tous les générateurs n'ont donc pas besoin d'être équipés des PSSs. En outre, il faut tenir compte des interactions négatives entre les PSSs qui augmentent avec le nombre de ces derniers. Enfin, il faut tenir compte des critères économiques.

Ainsi, la première étape de la mise en œuvre des PSSs, est de trouver les emplacements optimaux des PSSs nécessaires et de déterminer leur nombre. Ce problème a fait l'objet, depuis une dizaine d'années, d'un grand nombre de recherche[35-36-37-38-39-40]. Les approches les plus efficaces proposées sont basées sur l'analyse modale du système linéarisé:

- Le mode Shape.
- Les facteurs de participations.
- Les résidus.

Comme nous l'avons vu, les amplitudes des résidus associés aux modes dominants de la fonction de transfert du système en boucle ouverte peuvent être utilisées pour déterminer les placements les plus efficaces pour installer les PSSs. Les amplitudes des facteurs de participation ou du mode Shape permettent de déterminer l'influence de chaque variable d'état dans les modes oscillatoires associés. Ces méthodes peuvent donc nous fournir des indications importantes sur l'emplacement optimal des PSSs dans le système pour réaliser un meilleur amortissement par rapport à des critères donnés.

Sachant que des emplacements différents des PSSs entraînent des oscillations totalement différentes, des PSSs "mal placés" peuvent donc ne pas répondre aux objectifs. Pour cela, il faut bien choisir la méthode qu'il faut appliquer pour déterminer les bons emplacements des PSSs. Les méthodes mentionnées ci-dessus donnent généralement de bons résultats, mais la recherche de méthodes plus efficace reste toujours actuelle.

II.5.Résultat et discussion :

II.5.1.Exécution du système étudié avec PSS :

D'après le chapitre (II) précédent, on peut utiliser MATLAB/simulink pour l'application du modèle de la figure (II.12).

➤ Paramètre schéma bloc de simulation

$K_1=0.7635$, $K_2=0.8643$, $K_3=0.3230$, $K_4=1.4188$, $K_5 = 0.1462$, $K_6=0.4166$, $K_{exc}=200$.

Les résultats de simulation pour chacun d'angle de charge, de la vitesse angulaire, du couple électrique et de la tension terminale montré au-dessous.

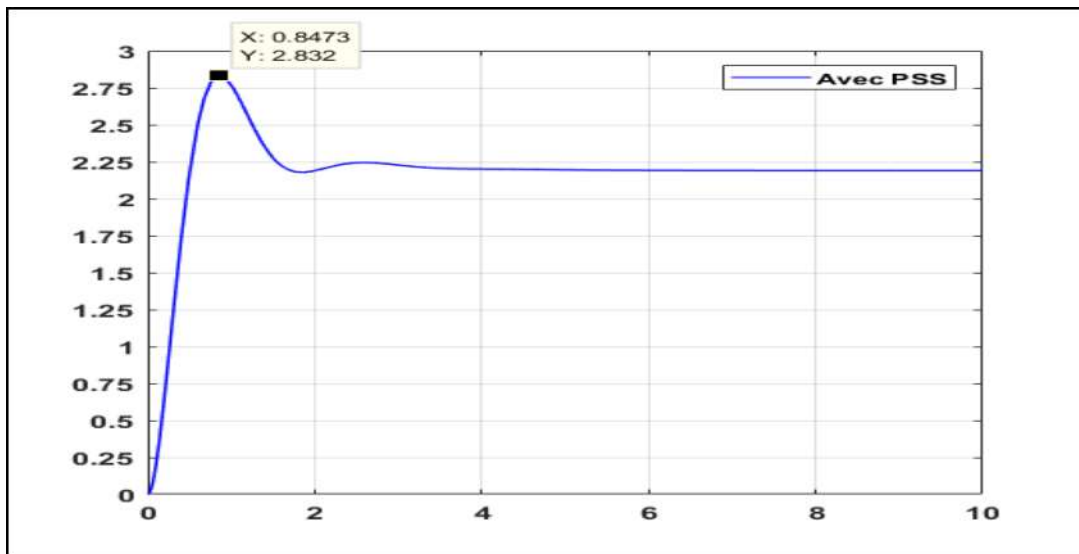


Figure II.19. Présente la variation du position angulaire.

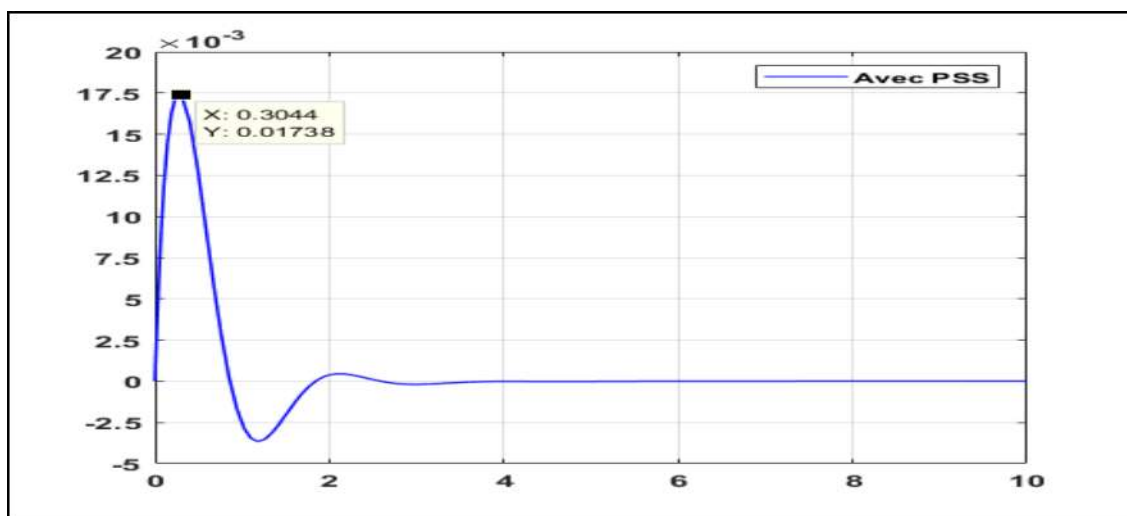


Figure II.20. Présente la variation de la vitesse angulaire.

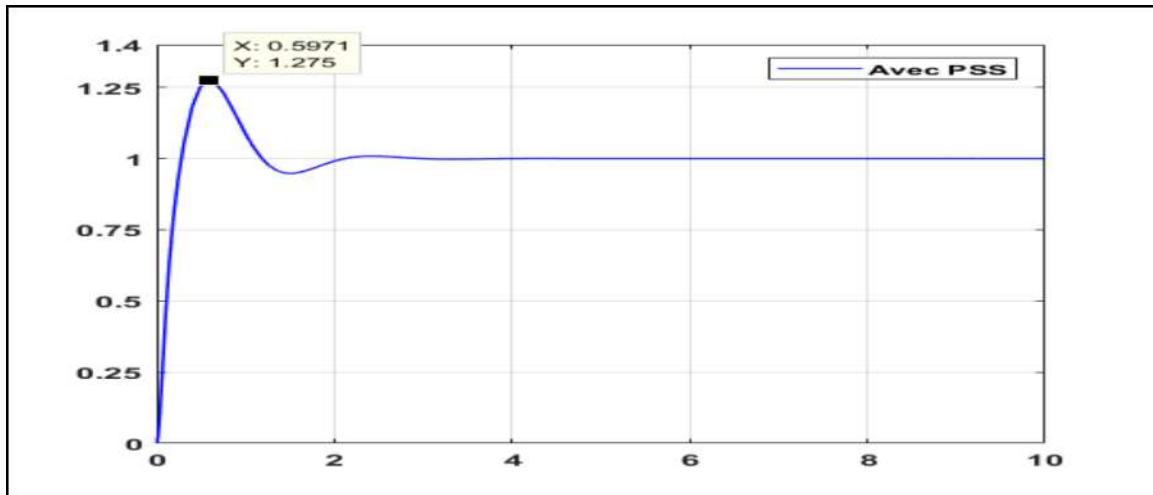


Figure II.21. Présente la variation du couple électrique.

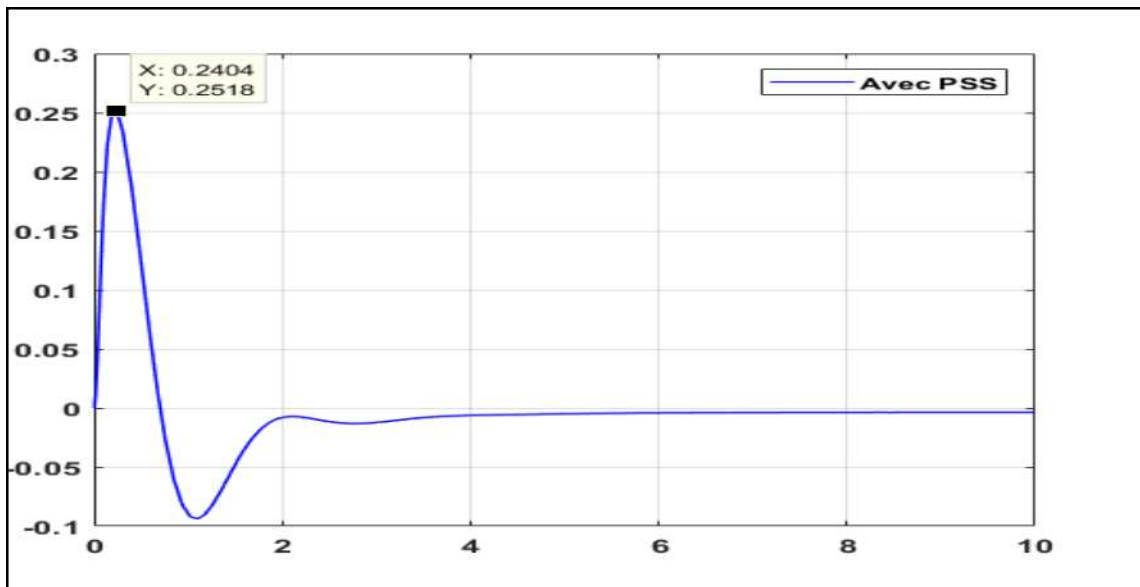


Figure II.22. Présente la variation de la tension terminale.

II.5.2. Etude comparative entre la mise en œuvre du système étudié avec, et sans PSS :

Nous avons comparé entre les deux cas suivants, où notre système est connecté avec le régulateur *PSS* conventionnelle et l'autre sans régulateur, puis choisissez le choix le plus efficace et le meilleur selon le critère de performance qui permettent à la bonne exploitation du système.

D'après le chapitre (II) précédent, on peut utiliser MATLAB/simulink pour l'application les deux schémas blocs dans la figure (II.12), et la figure (II.11).

Cette représentation du réseau SMIB+AVR dans la figure(II.22).

➤ **Paramètre schéma bloc de simulation:**

$K_1=0.7635$, $K_2=0.8643$, $K_3=0.3230$, $K_4=1.4188$, $K_5 = 0.1462$, $K_6=0.4166$, $K_{exc}=200$.

Les résultats de simulation dans les figures (II.23), (II.24), (II.25), (II.26), et (II.27) est montré au-dessous, pour chacun d'angle de charge, de la vitesse angulaire, du couple électrique et de la tension terminale, avec PSS est sans PSS.

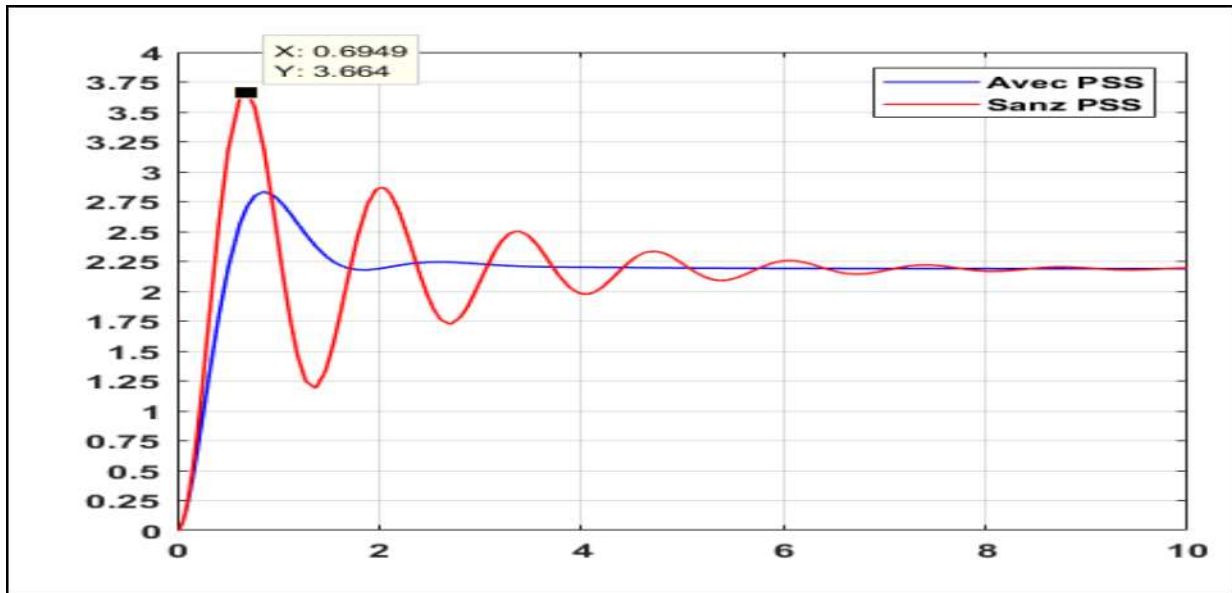


Figure II.23. Présente la variation du position angulaire.

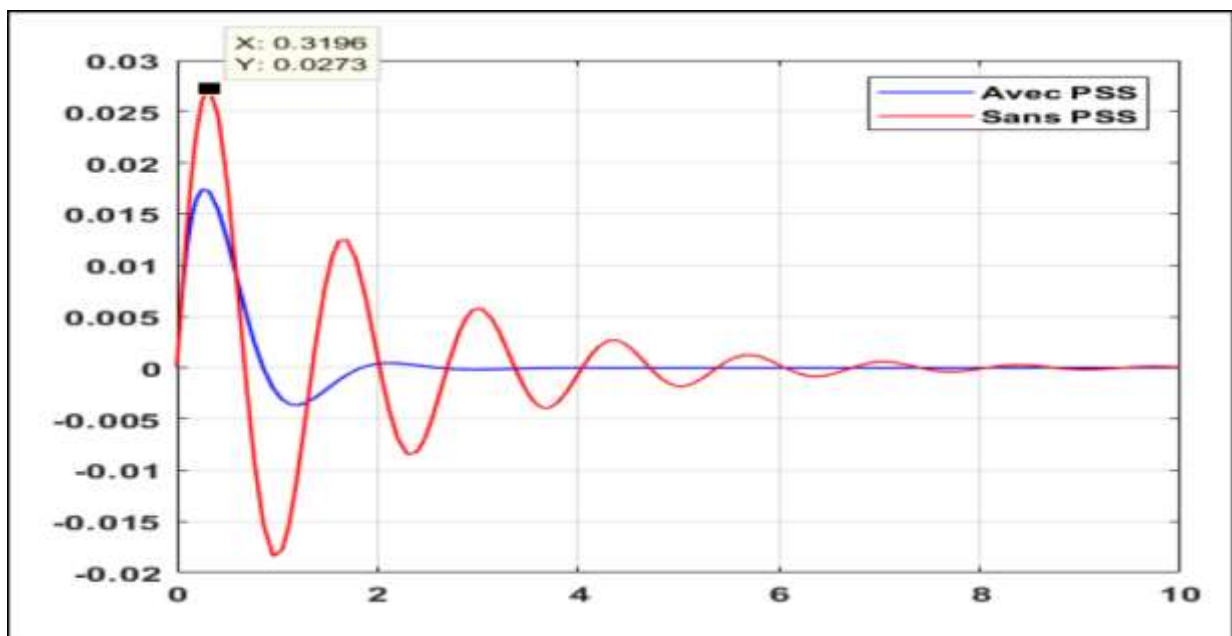


Figure II.24. Présente la variation de la vitesse angulaire.

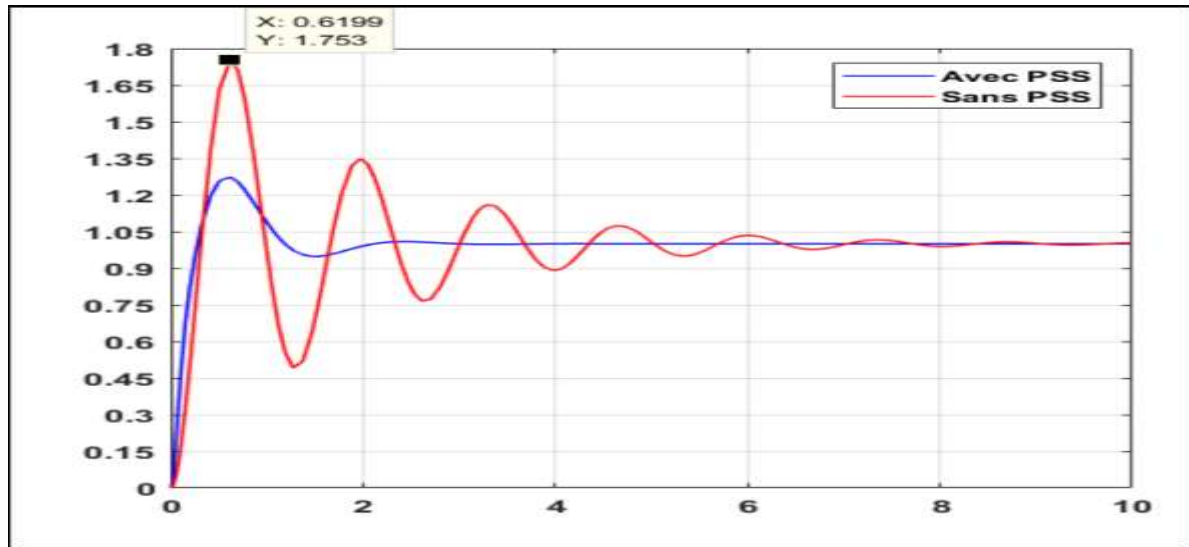


Figure II.25. Présente la variation du couple électrique.

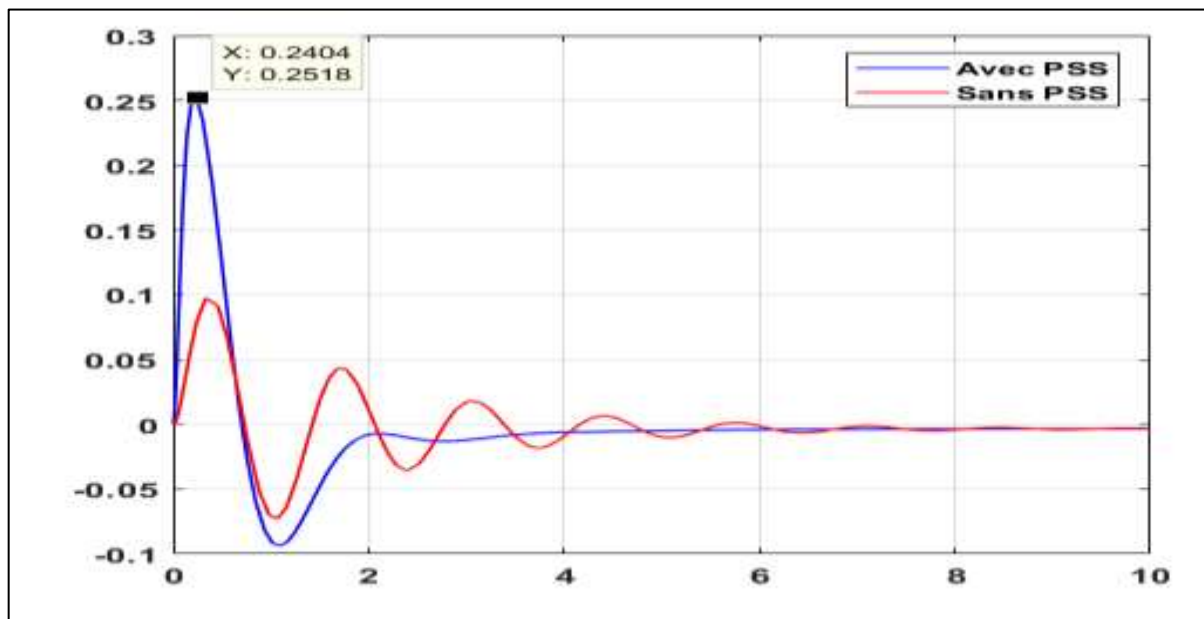


Figure II.26. Présente la variation de la tension terminale.

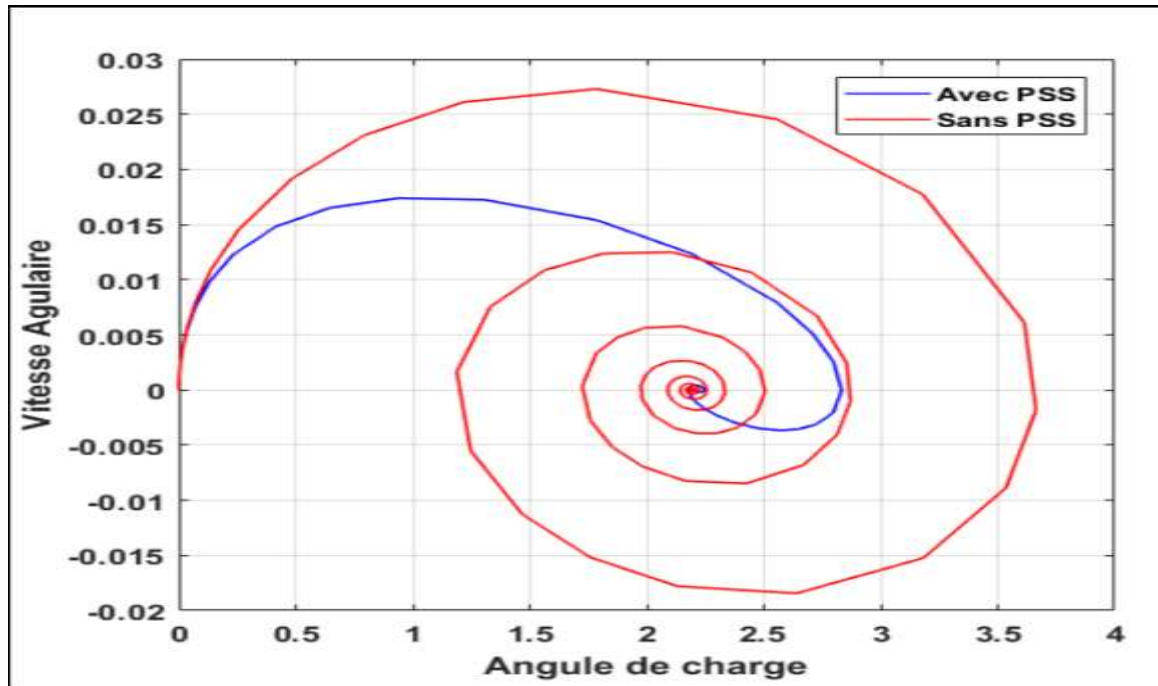


Figure II.27. Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport la variation d'angle.

Afin de connaître l'effet de la stabilisateur *PSS*, on peut appliquer des quelques critères dans les deux cas, où le système était avec *PSS* conventionnelle et sans *PSS*.

Premièrement, Nous définissons les paramètres “des critères temporels instantanés” sur le tableau (II.1), pour chacun courbe d'angle de charge, de la vitesse angulaire et du couple électrique :

Les cas	Sans <i>PSS</i>			Avec <i>CONV PSS</i>		
La courbe	δ	ω	T_e	δ	ω	T_e
D_p	1.419	0.0271	0.0271	0.638	0.01833	0.304
t_p	0.6734	0.314	0.6331	0.8358	0.2658	0.5604
t_r (5%)	4.752		4.753	1.385		1.606

Tableau II.1. Comparaison des critères temporels instantanés du système avec et sans *PSS*.

Lors nous faisons déplacer le *PSS* au système, ce dernier va à la stabilité tôt (1.385s pour l'angle de charge, et 1.606s pour le couple électrique). Par contre, dans le cas sans *PSS* le système devient stable à 4.752s, et à 4.753s pour l'angle et le couple électrique, respectivement.

Deuxièmement, les différents critères typiques peuvent être utilisés pour caractériser la performance du système régulé les paramètres des critères temporels intégraux ([IAE]Integral of Absolute Error, [ISE] Intégral of Square Error, et aussi [ITAE] Intégral Time multiplied by Absolute Error), on peut montrer sur le tableau (II.2).

Les cas	Sans PSS	Avec CONV PSS
<i>IAE</i>	0.1495	0.1169
<i>ISE</i>	0.007102	0.007336
<i>ITAE</i>	0.3273	0.2232

Tableau II.2. Comparaison des critères temporels intégraux du système avec et sans PSS.

Nous avons connait d'après les chapitres précédents, le système sera d'autant mieux réglé lors le critère intégral choisi sera minimal.

Du tableau au-dessus on peut vérifier que le système avec PSS conventionnelle mieux réglé, parce que l'intégrale de l'erreur absolue est minimale par rapport le cas sans PSS ($IAE_{minimal} = IAE_{avecCONVPSS} = 0.1169$), aussi l'intégrale de l'erreur absolue pondérée par le temps est minimale ($ITAE_{minimal} = ITAE_{avecCONVPSS} = 0.2232$).

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, au début nous avons présenté la modélisation du système électro-énergétique pour les études de la stabilité angulaire, en plus nous avons présenté d'une façon générale le modèle et le fonctionnement du stabilisateur *PSS*. En outre, Le réglage de paramètres des *PSSs* et leurs emplacements sont des facteurs critiques pour assurer convenablement le bon fonctionnement des *PSSs*.

Pour la première point (la modélisation du système électro-énergétique) Nous avons abordé ici, les points ci-dessous :

- Le modèle choisi pour machine synchrone du système est du troisième ordre. Les équations différentielles de la machine sont décrites par les trois variables δ, ω, E' . Ce modèle convient bien pour les études de stabilité angulaire.
- Le modèle du système de la force motrice (la turbine et leurs régulateurs ...) peut être supprimé en considérant que le couple mécanique de la turbine reste constant.
- Le système d'excitation et leurs régulateurs sont aussi modélisés.
- Le modèle complet de l'état-espace, incluant le *PSS*, avec $\Delta T_m = 0$

Et pour la fonctionnement du stabilisateur *PSS* en remarqué que les stabilisateurs de puissance (*PSSs*) conventionnelle, par leur efficacité et leur coût réduit, sont les moyens habituels non seulement pour éliminer les effets négatifs des régulateurs de tension, mais aussi pour amortir les oscillations électromécaniques du système.

Dans le chapitre suivant nous présentons quelque aspects théoriques de la logique floue, ainsi que les bases de son application pour la commande de processus.

CHAPITRE III

*Stabilisation par logique
floue*

III.1. Introduction

La logique floue est une forme de logique à valeurs multiples dans laquelle les valeurs de vérité des variables peuvent être tout nombre réel compris entre 0 et 1 inclus. Il est utilisé pour gérer le concept de vérité partielle, où la valeur de la vérité peut varier entre complètement vrai et complètement faux. En revanche, dans la logique booléenne, les valeurs de vérité des variables ne peuvent être que les valeurs entières 0 ou 1. La logique floue est basée sur l'observation que les gens prennent des décisions basées sur des informations imprécises et non numériques. Les modèles ou ensembles flous sont des moyens mathématiques de représenter des informations vagues et imprécises (d'où le terme flou). Ces modèles ont la capacité de reconnaître, de représenter, de manipuler, d'interpréter et d'utiliser des données et informations vagues et peu sûres. La logique floue a été appliquée à de nombreux domaines, de la théorie du contrôle à l'intelligence artificielle. Dans ce chapitre, nous présenterons quelque aspect théorique de la logique floue, ainsi que les bases de son application pour la commande de processus.

III.2.Apparition de la logique floue :

Le terme d'ensemble flou apparaît pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi A.

Zadeh, de l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé «Ensembles flous» (Fuzzy sets). Il a réalisé depuis de nombreuses avancées théoriques majeures dans le domaine et a été rapidement accompagné par de nombreux chercheurs développant des travaux théoriques.

Parallèlement, certains chercheurs se sont penchés sur la résolution par logique floue de problèmes réputés difficiles. Ainsi en 1975, le professeur Mamdani à Londres développe une stratégie pour le contrôle des procédés et présente les résultats très encourageants qu'il a obtenus sur la conduite d'un moteur à vapeur. En 1978, la société danoise F.L.Smith réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est là la première véritable application industrielle de la logique floue[41].

III.3.Intérêts de la logique floue [42]:

La logique floue trouve ses origines dans un certain nombre de constatations :

- La connaissance que l'être humain a d'une situation quelconque est généralement imparfaite,
 - elle peut être incertaine (il doute de sa validité),
 - ou imprécise (il a du mal à l'exprimer clairement).

- L'être humain résout souvent des problèmes complexes à l'aide de données approximatives:

La précision des données est souvent inutile. Par exemple, pour choisir un appartement, il pourra prendre en compte la surface, la proximité de commerces, la distance du lieu de travail, le loyer, sans pour autant avoir besoin d'une valeur très précise de chacune de ces données.

- Dans l'industrie ou les techniques, les opérateurs résolvent souvent des problèmes complexes de manière relativement simple et sans avoir besoin de modéliser le système.

De même, tout le monde sait qu'un modèle mathématique n'est pas nécessaire pour conduire une voiture et pourtant une voiture est un système très complexe.

- Plus la complexité d'un système augmente, moins il est possible de faire des affirmations précises sur son comportement.

De ces constatations viennent naturellement les déductions suivantes :

- Plutôt que de modéliser le système, il est souvent intéressant de modéliser le comportement d'un opérateur humain face au système.
- Plutôt que par des valeurs numériques précises, le fonctionnement doit être décrit par des qualificatifs globaux traduisant l'état approximatif des variables.

III.4.Utilisation de la logique floue pour le contrôle :

La logique floue est bien connue des automaticiens pour ses applications dans le contrôle-commande de procédés, appelé alors couramment « contrôle flou ». Tout comme un contrôleur (ou correcteur) classique, le contrôleur flou s'insère dans la boucle de régulation et calcule la commande à appliquer au procédé suivant une ou plusieurs consignes et une ou plusieurs mesures effectuées sur celui-ci[41].

Les bases de règles floues sont intéressantes en commande car elles permettent :

- de prendre en compte une expertise existante de nature qualitative.
- de prendre en compte des variables que l'on sait difficilement intégrer dans la boucle.
- d'améliorer le fonctionnement de contrôleurs classiques, par :
 - autoréglage hors ligne ou en ligne des gains de ces contrôleurs,
 - modification de leur sortie en fonction d'événements qui ne peuvent pas être pris en compte par une technique classique.

III.5. Théorie des ensemble floue :

III.5.1. Notion d'appartenance partielle :

Dans la théorie des ensembles, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. La notion d'ensemble est à l'origine de nombreuses théories mathématiques. Cette notion essentielle ne permet cependant pas de rendre compte de situations pourtant simples et rencontrées fréquemment. Parmi des fruits, il est facile de définir l'ensemble des pommes. Par contre, il sera plus difficile de définir l'ensemble des pommes mûres. On conçoit bien que la pomme mûrit progressivement... la notion de pomme mûre est donc graduelle. C'est pour prendre en compte de telles situations qu'a été créée la notion d'ensemble flou. La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle : chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis. Les contours de chaque ensemble flou Figure (III.1) ne sont pas « nets », mais « flous » ou « graduels » [41] .

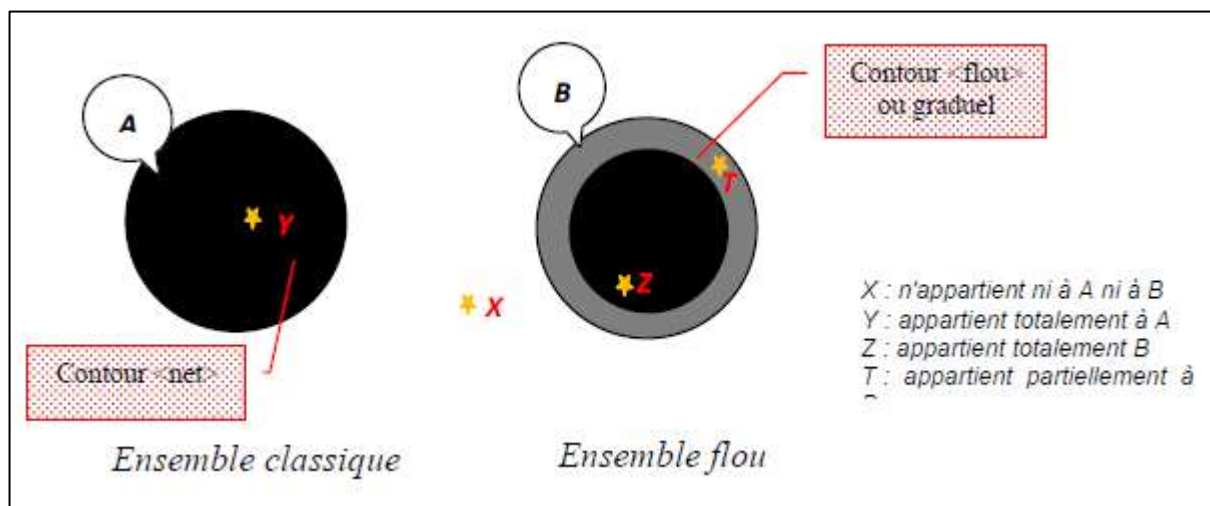


Figure III.1. Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.

III.5.2. Fonction d'appartenance (FA) :

Un ensemble flou est défini par sa «fonction d'appartenance», qui correspond à la notion de «fonction caractéristique» en logique classique. Supposons que nous voulions définir l'ensemble des personnes de «taille moyenne». En logique classique, nous conviendrons par exemple que les personnes de taille moyenne sont celles dont la taille est comprise entre 1.60m et 1.80m. La fonction caractéristique de l'ensemble Figure (III.2).

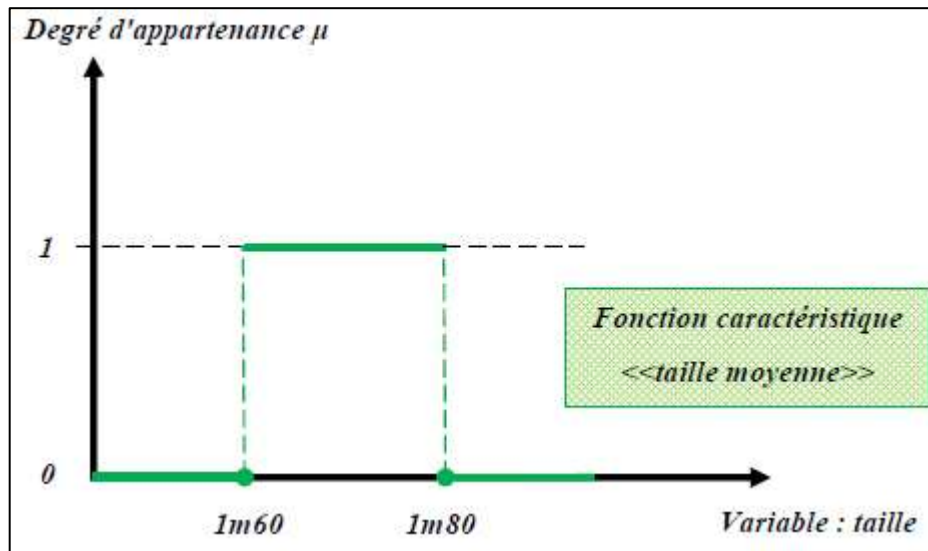


Figure III.2. Fonction caractéristique.

Donne «0» pour les tailles hors de l'intervalle $[1.60m; 1.80m]$ et «1» dans cet intervalle.

L'ensemble flou des personnes de «taille moyenne» sera défini par une «fonction d'appartenance» qui diffère d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle $[0, 1]$. A chaque taille possible correspondra un «degré d'appartenance» à l'ensemble flou des « tailles moyennes » Figure (III.3), compris entre 0 et 1.

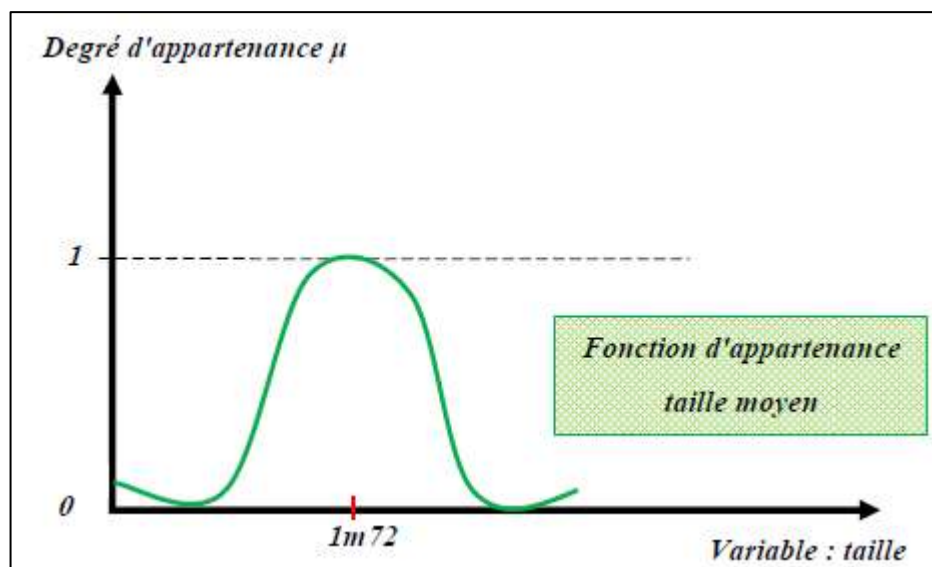


Figure III.3. Fonction d'appartenance.

Plusieurs ensembles flous peuvent être définis sur la même variable, par exemple les ensembles « taille petite », « taille moyenne » et « taille grande », notions explicitées chacune par une fonction d'appartenance Figure (III.4).

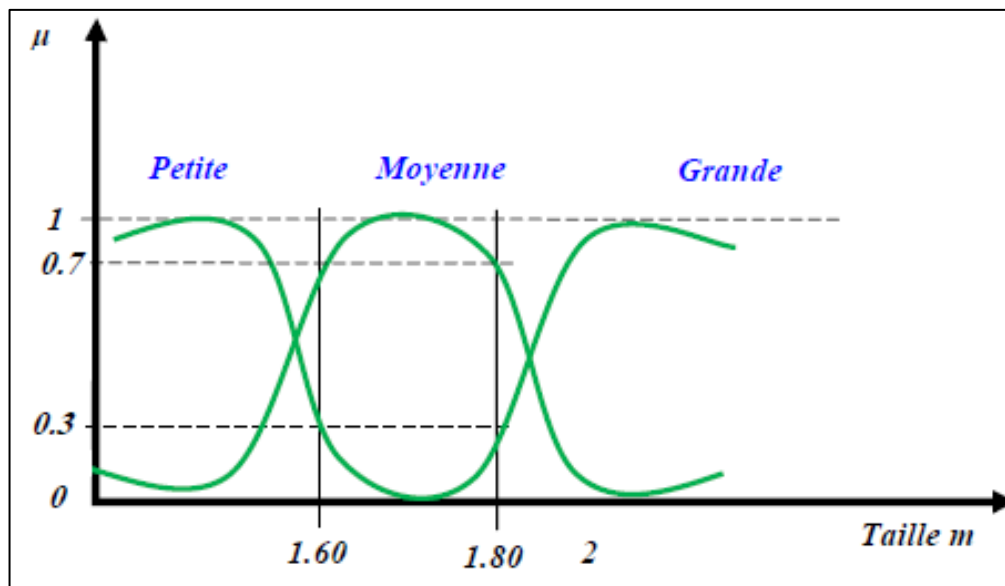


Figure III.4. Fonction d'appartenance, variable et terme linguistique.

Cet exemple montre la gradualité que permet d'introduire la logique floue. Une personne de 1.80m appartient à l'ensemble « taille grande » avec un degré 0.3 et à l'ensemble « taille moyenne » avec un degré de 0.7. En logique classique, le passage de moyen à grand serait brusque. Une personne de 1.80m serait par exemple de taille moyenne alors qu'une personne de 1.81m serait grande, ce qui choque l'intuition. La variable (par exemple : taille) ainsi que les termes (par exemple : moyenne, grande) définis par les fonctions d'appartenance portent respectivement les noms de variable linguistique et de termes linguistiques. Comme cela sera vu plus loin, variables et termes linguistiques peuvent être utilisés directement dans des règles[41].

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme (FA triangulaire, FA trapézoïdale, FA gaussienne...etc.) Toutefois, elles sont souvent définies par des segments de droites, et dites « linéaires par morceaux » Figure (III.5).

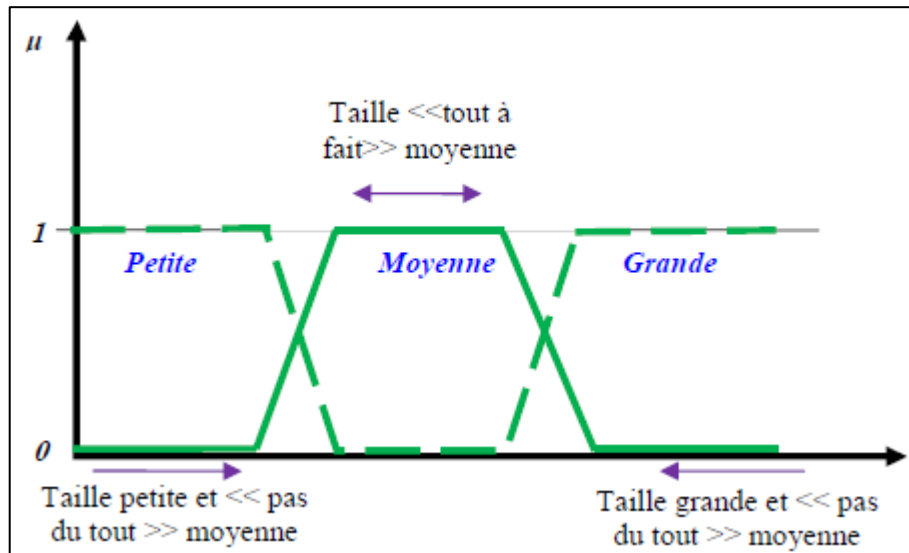


Figure III.5. Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux.

Les fonctions d'appartenance « linéaires par morceaux » sont très utilisées car :

- elles sont simples,
- elles comportent des points permettant de définir les zones où la notion est vraie, les zones où elle est fausse, ce qui simplifie le recueil d'expertise.

Dans certains cas, les fonctions d'appartenance peuvent être égales à 1 pour une seule valeur de la variable et égales à 0 ailleurs, et prennent alors le nom de « fonctions d'appartenance singletons ». Un singleton flou Figure (III.6) défini sur une variable réelle (taille) est la traduction dans le domaine flou d'une valeur particulière (taille de Paul) de cette variable.

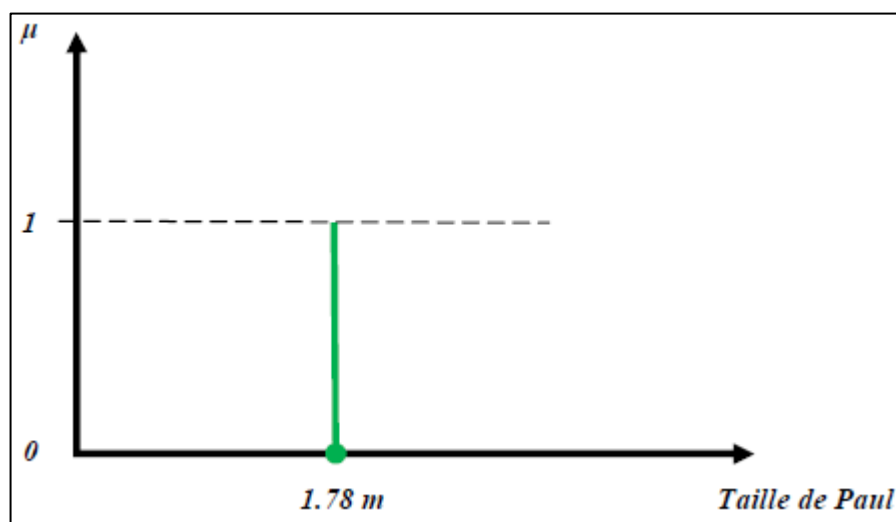


Figure III.6. Fonction d'appartenance singleton.

III.5.2.1. Fuzzification "Degré d'appartenance" :

L'opération de fuzzification permet de passer du domaine réel au domaine du flou. Elle consiste à déterminer le degré d'appartenance d'une valeur (mesurée par exemple) à un ensemble flou.

Par exemple Figure (III.7), si la valeur courante de la variable « entrée » est de 2, le degré d'appartenance à la fonction d'appartenance « entrée faible » est égal à 0.4 qui est le résultat de la fuzzification[41] .

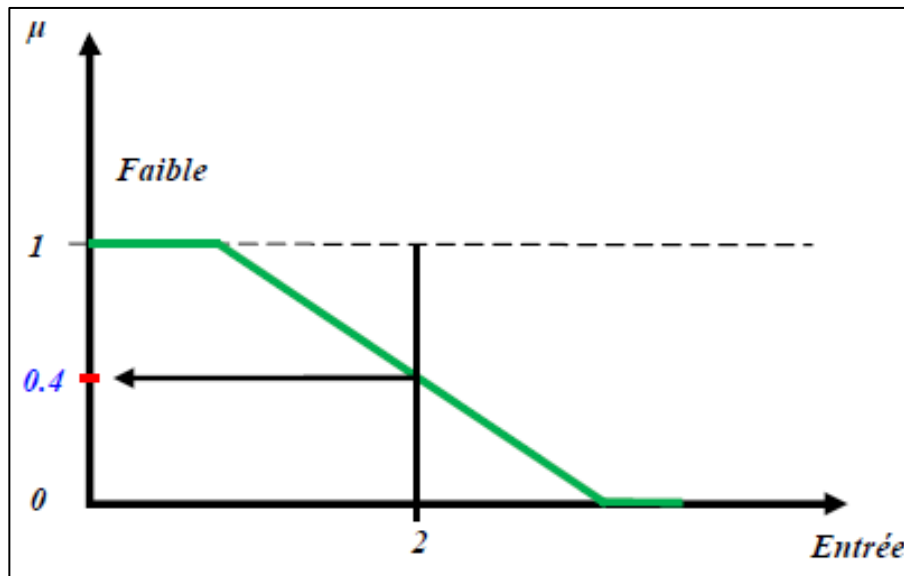


Figure III.7. Fuzzification.

On peut aussi dire que la proposition « entrée faible » est vraie à 0,4. On parle alors de degré de vérité de la proposition. Degré d'appartenance et degré de vérité sont donc des notions similaires.

III.5.3. Opérateurs logiques flous :

Ces opérateurs permettent d'écrire des combinaisons logiques entre notions floues, c'est-à-dire de faire des calculs sur des degrés de vérité. Comme pour la logique classique, on peut définir des opérateurs (ET), (OU), (négation) [41].

Exemple : Appartement Intéressant = Loyer Raisonnable ET Surface Suffisante.

III.5.3.1. Choix des opérateurs :

Il existe de nombreuses variantes dans ces opérateurs (cf. annexe). Cependant, les plus répandus sont ceux dits «de Zadeh» décrits ci-dessous. Leur utilisation sera reprise dans l'exemple didactique d'utilisation d'une base de règles floues[41]. Dans ce qui suit, le degré de vérité d'une proposition A sera noté $\mu(A)$.

a) Intersection :

L'opérateur logique correspondant à l'intersection d'ensembles est le *ET*. Le degré de vérité de la proposition ($A \text{ ET } B$) est le minimum des degrés de vérité de A et de B :

$$\mu(A \text{ ET } B) = \text{MIN}(\mu(A), \mu(B))$$

Exemple :

$$\left| \begin{array}{c} \text{« Température Basse » est varie à 0.7} \\ \text{<ET>} \\ \text{« Pression Faible » est varie à 0.5} \\ \Downarrow \\ \text{est donc varie à 0.5} = \text{MIN}(0.7 ; 0.5) \end{array} \right|$$

Remarque : l'opérateur *ET* de la logique classique est bien respecté : $0 \text{ ET } 1$ donne bien 0.

b) Union :

L'opérateur logique correspondant à l'union d'ensembles est le *OU*. Le degré de vérité de la proposition « $A \text{ OU } B$ » est le maximum des degrés de vérité de A et de B :

$$\mu(A \text{ OU } B) = \text{MAX}(\mu(A), \mu(B))$$

Exemple :

$$\left| \begin{array}{c} \text{« Température Basse » est varie à 0.7} \\ \text{<OU>} \\ \text{« Pression Faible » est varie à 0.5} \\ \Downarrow \\ \text{est donc varie à 0.7} = \text{MAX}(0.7 ; 0.5) \end{array} \right|$$

Remarque : l'opérateur *OU* de la logique classique est bien respecté : $0 \text{ OU } 1$ donne bien 1.

c) Complément :

L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est la négation.

$$\mu(\text{NON } A) = 1 - \mu(A).$$

Exemple :

$$\left| \begin{array}{c} \text{<NON>} \\ \text{« Température Basse » est varie à 0.7} \\ \Downarrow \\ \text{est donc varie à 0.3} = (1 - 0.7) \end{array} \right|$$

Remarque : l'opérateur négation de la logique classique est bien respecté : $NON(0)$ donne bien 1 et $NON(1)$ donne bien 0.

III.5.4. Règles floues :

III.5.4.1. Logique floue et l'intelligence artificielle :

La logique floue a pour objectif de formaliser et de mettre en œuvre la façon de raisonner d'un être humain. En cela, elle peut être classée dans le domaine de l'intelligence artificielle. L'outil le plus utilisé dans les applications de logique floue est la base de règles floues. Une base de règles floues est composée de règles qui sont généralement utilisées en parallèle, mais peuvent également être enchaînées dans certaines applications[41].

Une règle est du type :

SI « prédicat » ALORS « conclusion »

Par exemple : « SI température élevée et pression forte ALORS ventilation forte et soupape grande ouverte ».

Les bases de règles floues, tout comme les systèmes experts classiques, fonctionnent en s'appuyant sur une base de connaissance issue de l'expertise humaine. Il y a néanmoins de grandes différences dans les caractéristiques et le traitement de cette connaissance Tableau (III.1). Une règle floue comporte trois étapes fonctionnelles résumées dans la Figure (III.8).

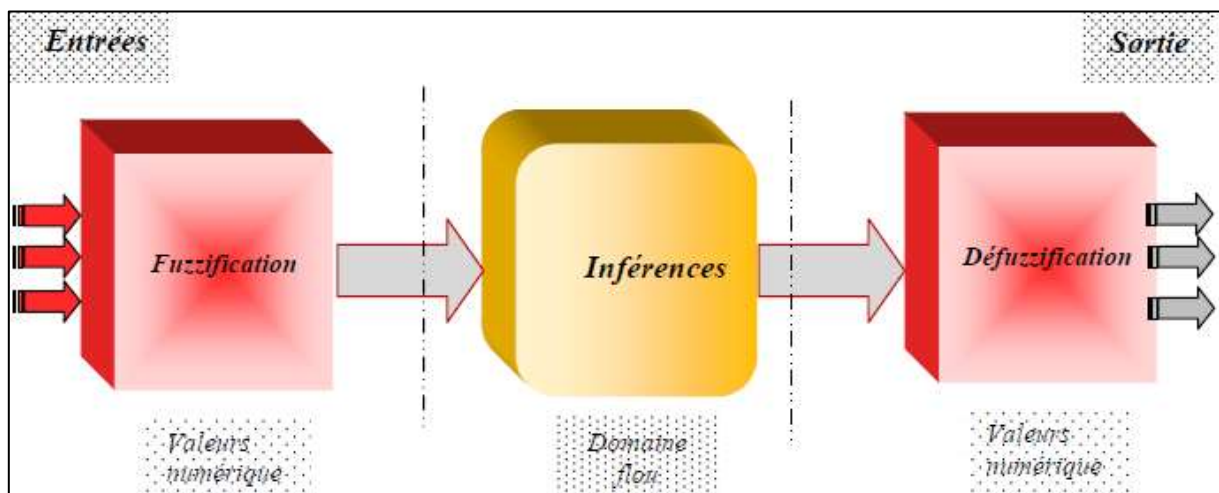


Figure III.8. Traitement flou.

Base de règles floues	Base de règles classiques (système expert)
Peu de règles	Beaucoup de règles
Traitement graduel	Traitement booléen
Enchaînement possible mais peu utilisé	Règles enchaînées $A \text{ OU } B \implies C$ $C \implies D$ $D \text{ ET } A \implies E$
Règles traitées en parallèle	Règles utilisées une par une, séquentiellement
Interpolation entre règles pouvant se contredire	Pas d'interpolation, pas de contradiction

Tableau III.1. Base de règles floues et base de règles classiques.

III.5.4.1.1.Prédicat :

Un prédicat (encore appelé prémisses ou condition) est une combinaison de propositions par des opérateurs *ET*, *OU*, *NON*. Les propositions « température élevée » et « pression forte » de l'exemple précédent sont combinées par l'opérateur *ET* pour former le prédicat de la règle[41].

III.5.4.1.2.Inférence :

Le mécanisme d'inférence le plus couramment utilisé est celui dit « de Mamdani ». Il représente une simplification du mécanisme plus général basé sur « l'implication floue » et le « modus ponens généralisé ». Seules les bases de règles « de Mamdani » sont utilisées dans ce qui suit[41].

III.5.4.1.3.Conclusion :

La conclusion d'une règle floue est une combinaison de propositions liées par des opérateurs (*ET*).

Dans l'exemple précédent, « ventilation forte » et « soupape grande ouverte » sont la conclusion de la règle.

On n'utilise pas de clauses (*OU*) dans les conclusions, car elles introduiraient une incertitude dans la connaissance (l'expertise ne permettrait pas de déterminer quelle décision prendre). Cette incertitude n'est pas prise en compte par le mécanisme d'inférence de Mamdani, qui ne permet de gérer que des imprécisions. Les règles floues « de Mamdani » ne sont donc a priori pas adaptées à du diagnostic de type « diagnostic médical » pour lequel les conclusions sont incertaines. La théorie des possibilités, inventée par Lotfi Zadeh, apporte dans ces cas une méthodologie adéquate.

De même, la négation est a priori interdite dans les conclusions pour des règles de *Mamdani*. En effet, si une règle avait par exemple la conclusion « Alors ventilation non moyenne », il serait impossible de dire si cela signifie « ventilation faible » ou « ventilation forte ». Ce serait encore un cas d'incertitude[41].

III.5.4.2. Mécanisme d'inférence de *Mamdani* :

Une base de règles floues de *Mamdani* comprend donc des règles linguistiques faisant appel à des fonctions d'appartenance pour décrire les concepts utilisés Figure (III.9). Le mécanisme d'inférence comprend les étapes suivantes[41]:

▪ Fuzzification

La fuzzification consiste à évaluer les fonctions d'appartenance utilisées dans les prédicats des règles, comme illustré par la Figure (III.10) :

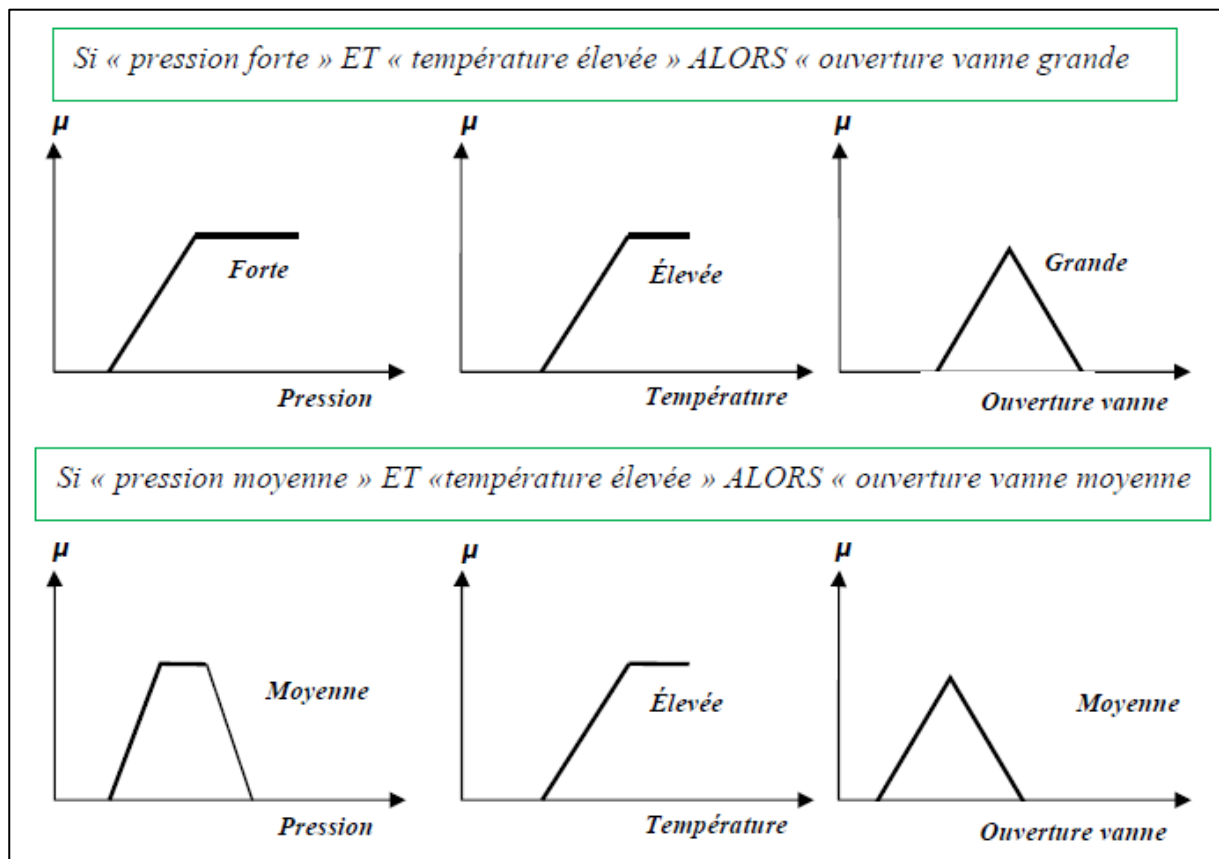


Figure III.9. Implication.

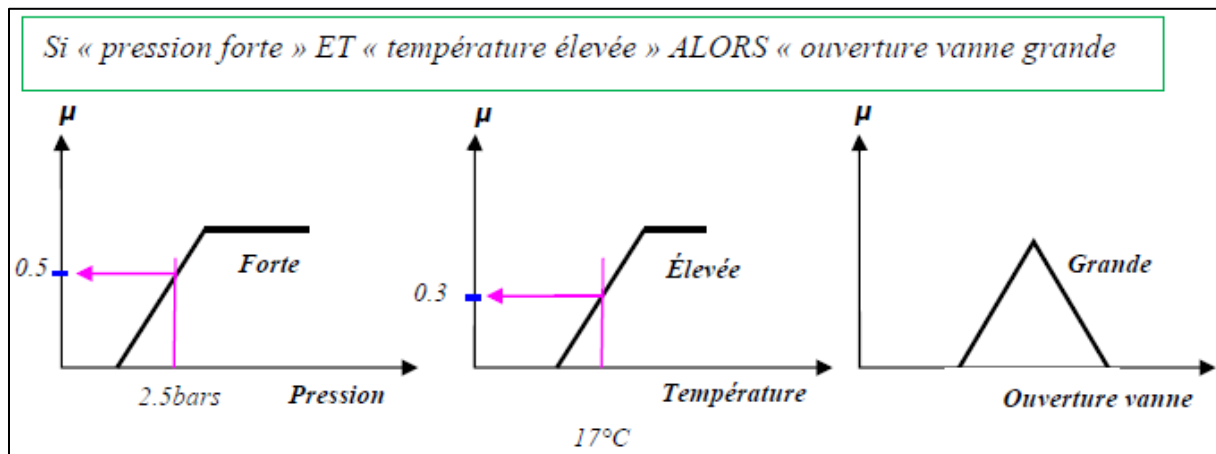


Figure III.10. Fuzzification.

▪ Degré d'activation :

Le degré d'activation d'une règle est l'évaluation du prédicat de chaque règle par combinaison logique des propositions du prédicat, comme illustré figure (III.11). Le (ET) est réalisé en effectuant le minimum entre les degrés de vérité des propositions.

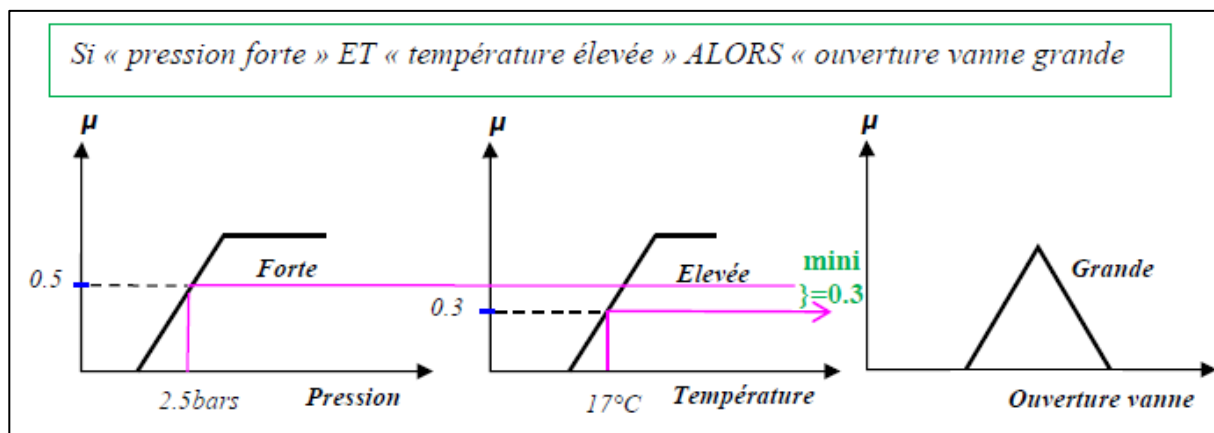


Figure III.11. Activation.

▪ Implication :

Le degré d'activation de la règle permet de déterminer la conclusion de la règle, c'est l'implication. Il existe plusieurs opérateurs d'implication, mais le plus utilisé est le «minimum».

L'ensemble flou de conclusion est construit en réalisant le minimum entre le degré d'activation et la fonction d'appartenance, sorte d'«écrêtage» de la fonction d'appartenance de conclusion Figure (III.12).

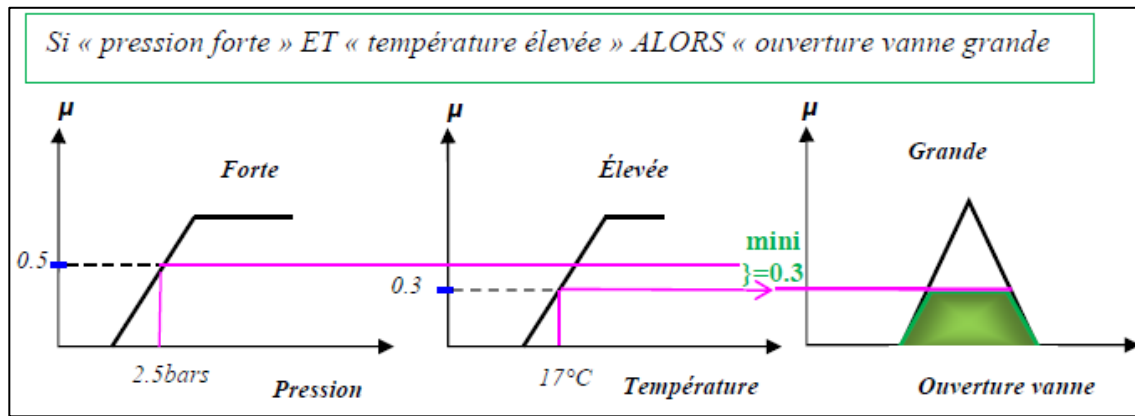


Figure III.12. Implication.

■ Agrégation :

L'ensemble flou global de sortie est construit par agrégation des ensembles flous obtenus par chacune des règles concernant cette sortie.

L'exemple suivant présente le cas où deux règles agissent sur une sortie. On considère que les règles sont liées par un (OU) logique, et on calcule donc le maximum entre les fonctions d'appartenance résultantes pour chaque règle Figure (III.13).

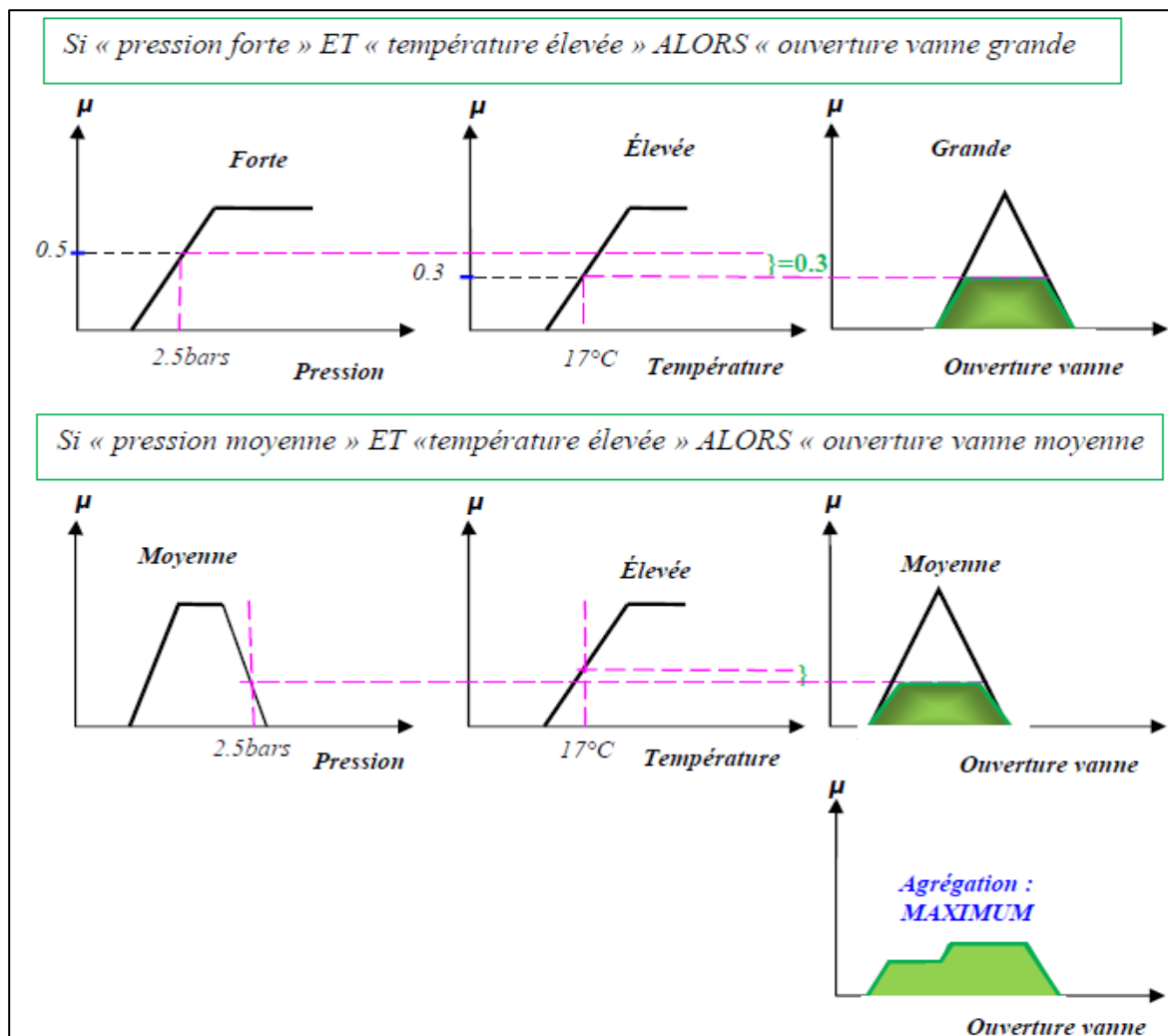


Figure III.13. Agrégation des règles.

III.5.4.3. Défuzzification :

A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer du « monde flou » au « monde réel », c'est la défuzzification. Il existe plusieurs méthodes, la plus souvent rencontrée étant le calcul du «centre de gravité» de l'ensemble flou Figure (III.14) [41] .

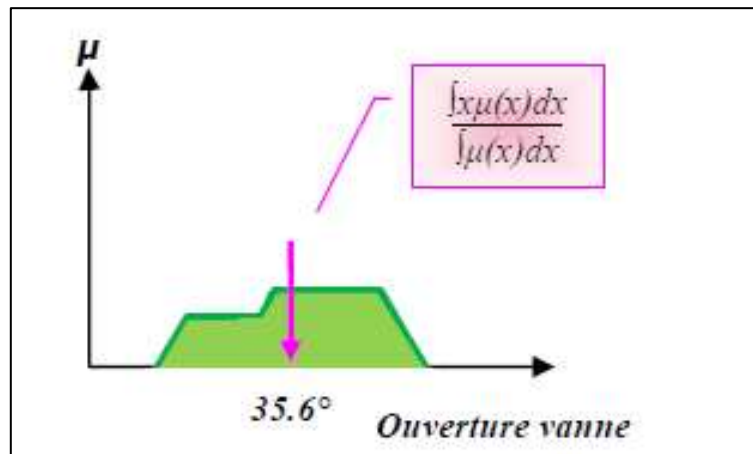


Figure III.14. Défuzzification par centre de gravité.

III.5.4.4. Règles « libres » et « en tableau » [41]:

Les bases de règles floues, dans leur cas général, sont donc définies par des fonctions d'appartenance sur les variables du système, et par des règles qui peuvent être écrites textuellement. Chaque règle fait appel à des entrées et des sorties qui peuvent être différentes, comme le montre l'exemple qui suit :

R1 : SI « température élevée » ALORS « sortie élevée »

R2 : SI « température moyenne » ET « pression basse » ALORS « sortie moyenne »

R3 : SI « température moyenne » ET « pression élevée » ALORS « sortie basse »

R4 : SI « température basse » ET « pression élevée » ALORS « sortie très basse »

Schématiquement, on peut représenter les « zones d'action » des règles et leur recouvrement dans le tableau du tableau (III.2)

ression/Température	Basse	Moyenne	Élevée
Élevée	Sortie très basse	Sortie basse	Sortie élevée
Basse		Sortie moyenne	Sortie élevée

Tableau III.2. Implication représentée en tableau.

On constate que :

- tout l'espace n'est pas forcément couvert ; la combinaison « température basse et pression basse » n'est pas ici prise en compte ; l'explication est par exemple que cette combinaison n'est physiquement pas possible pour cette machine, ou qu'elle ne nous intéresse pas ; il est préférable de le vérifier car il peut s'agir d'un oubli .
- la première règle ne prend en compte que la température ; cette situation est tout à fait normale dans la mesure où elle reflète correctement l'expertise existante. Beaucoup d'applications définissent cependant des « tableaux » de règles. Dans cette optique , l'espace est « quadrillé », et à chaque « case » correspond une règle. Cette approche a l'avantage d'être systématique, mais :
 - elle ne permet pas toujours de traduire simplement (en un minimum de règles) l'expertise existante,
 - elle n'est applicable que pour deux voire trois entrées, alors que des bases de règles «libres » peuvent être bâties avec un nombre important de variables.

Remarques :

- Une base de règles floues a un comportement statique non linéaire par rapport à ses entrées.
- Les bases de règles floues ne sont pas dynamiques en elles-mêmes, bien qu'elles utilisent souvent comme entrées des variables traduisant la dynamique du système (dérivées, intégrales, ...) ou le temps.

III.6. Contrôleur flou :

La figure ci-dessous illustre le structure schématique du contrôleur de logique floue qui se compose d'une interface de Fuzzification, une base de connaissances, la prise de décision logique, et interface défuzzification[43,24] .

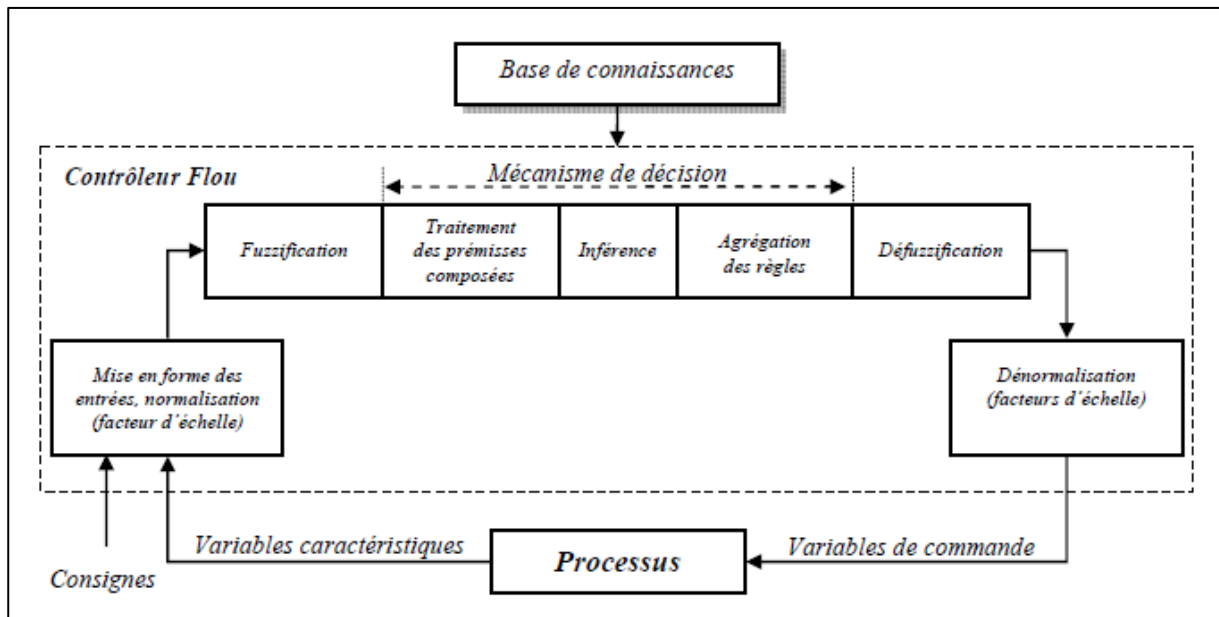


Figure III.15. Structure de base d'un contrôleur flou.

III.6.1. Différentes étapes de la commande floue :

On distingue classiquement les étapes ci-dessous dans la structure d'un contrôleur flou[24]:

- l'identification des variables pour d'entrée et de sortie.
- la construction de règles de contrôle.
- établir l'approche pour décrire l'état du système en termes de sous-ensembles flous, soit établir méthode de Fuzzification et fonctions d'appartenance floues.
- sélection de la règle compositionnel d'inférence.
- méthode La défuzzification est l'étape qui permet de transformer l'ensemble flou, obtenu par le calcul précédent, en une grandeur de commande à appliquer au processus.

Dans la section suivant, on peut expliquer les étapes précédentes avec PSS basés sur la logique floue.

III.7. PSS basés sur la logique floue :

Le stabilisateur de système de puissance est utilisé pour améliorer le rendement du générateur synchrone. Cependant, il en résulte dans la mauvaise performance dans diverses conditions de chargement qui a mis en œuvre avec PSS classiques. A cet effet, le besoin de logique floue PSS se pose. Le contrôleur flou utilisé dans stabilisateur système électro-énergétique est normalement une deux entrées et une composante de sortie unique. C'est

généralement un système *MISO*. Les deux entrées sont changement de vitesse angulaire et le taux de variation de la vitesse angulaire tandis que la sortie du contrôleur logique floue est un signal de tension. Une modification de la tension de la rétroaction au système d'excitation en fonction de la puissance accélération sur une unité est utilisée pour améliorer la stabilité du système. Les signaux de stabilisation sont calculés en utilisant les fonctions d'appartenance floue standard en fonction de ces variables[24].

III.7.1. Sélection de variables d'entrée et de sortie :

On fait définir les variables d'entrée et de contrôle, c'est-à-dire, déterminer quels états du processus doivent être observées et doivent être considérées comme des mesures de contrôle.

Pour les modèles *FLPSS*, l'accélération et la déviation de vitesse du générateur peuvent être observés et ont été choisis comme le signal d'entrée du PSS floue. Les performances dynamiques du système pourraient être évaluées par l'examen de la courbe de réponse de ces deux variables.

La tension est à la sortie du contrôleur logique floue[24].

Pratiquement, la vitesse d'axe seulement est facilement disponible. Le signal d'accélération peut être dérivé des signaux de vitesses mesurées à deux instants successifs d'échantillonnage à l'aide d'équation au-dessous :

$$\Delta\omega(k) = \frac{(\Delta\omega(k) - \Delta\omega(k - 1))}{\Delta T} \quad (\text{III. 1})$$

III.7.2.Fonction d'appartenance :

Les variables choisies pour ce contrôleur sont la déviation de vitesse, d'accélération et de tension, en cela, la déviation de la vitesse et l'accélération sont les variables d'entrée et la tension est variable de sortie. Le nombre de variables linguistiques décrivant les sous-ensembles flous d'une variable varie en fonction de la demande (l'application). Généralement, un nombre impair est utilisé. Un nombre raisonnable est sept. Toutefois, la multiplication des sous-ensembles flous entraîne une augmentation correspondante du nombre de règles. Chaque variable linguistique a sa fonction d'appartenance floue. La fonction d'appartenance mappe les valeurs nettes dans des variables de floues. Les fonctions d'appartenance triangulaires sont utilisées pour définir le degré d'appartenance. Il est important de ne pas que le degré d'adhésion joue son rôle important dans la conception[24] .

Un contrôleur flou. Chacune des variables d'entrée et de sortie de flous est affecté sept sousensembles flous linguistiques variant de grand négatif (NB) à grand positif (PB). Chaque

sous-ensemble est associé à la fonction de d'appartenance triangulaire à partir d'un ensemble de sept fonctions d'appartenance pour chaque variable floue.

NB	NEGATIVE BIG
NM	NEGATIVE MEDIUM
NS	NEGATIVE SMALL
ZE	ZERO
PS	POSITIVE SMALL
PM	POSITIVE MEDIUM
PB	POSITIVE BIG

Tableau III.3. Variables floues pour la fonction d'appartenance.

Les variables sont normalisées en multipliant avec des gains respectifs de $K1$, $K2$, $K3$, afin que leur valeur comprise entre -1 et 1. Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie ont 50% de chevauchement entre les sous-ensembles flous adjacents [51]. La fonction d'appartenance pour l'accélération, la vitesse et la tension sont indiquées à la figure suivant:

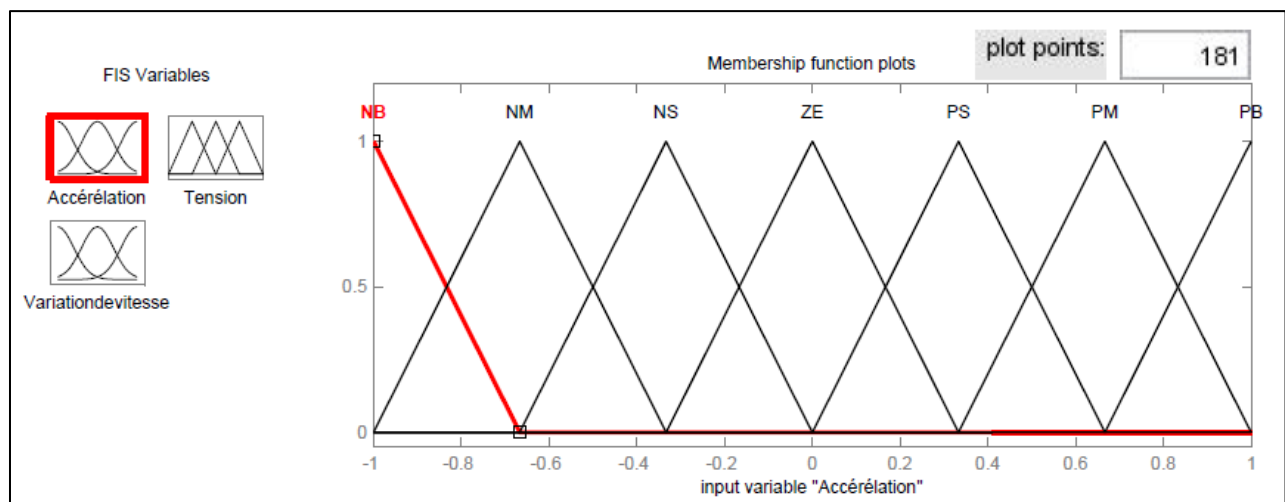


Figure III.16. Fonctions d'appartenance pour l'accélération.

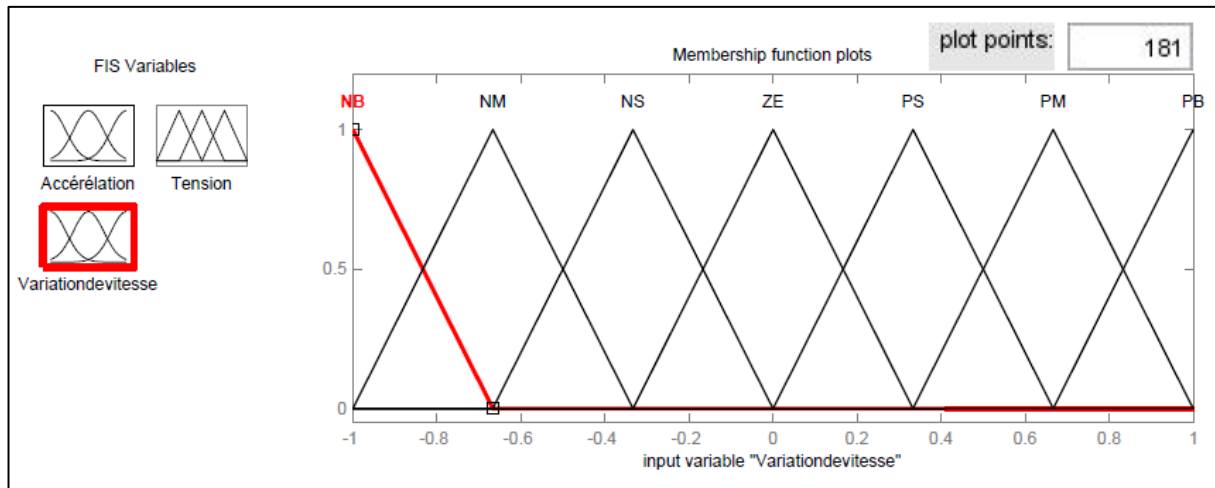


Figure III.17. Fonctions d'appartenance pour la variation de vitesse.

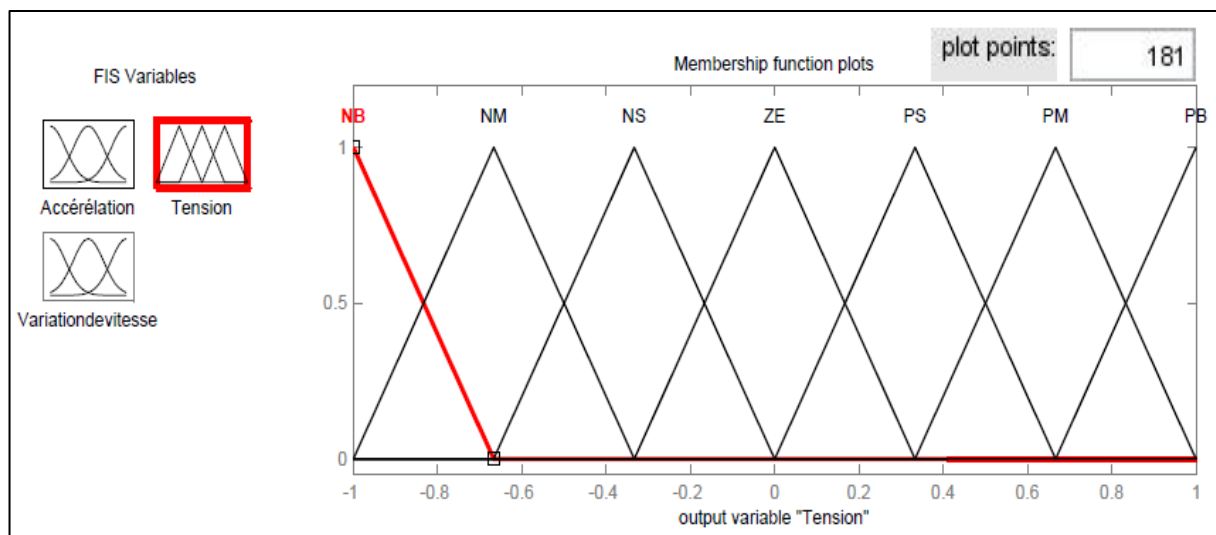


Figure III.18. Fonctions d'appartenance pour la tension.

III.7.3. Base de règles floues [45]:

Un ensemble de règles qui définissent la relation entre l'entrée et la sortie de du contrôleur à logique floue peut être trouvé utilisant la connaissance disponible dans le domaine de concevoir PSS[24]. Ces règles sont définies en utilisant les variables linguistiques. Les deux entrées, la vitesse et l'accélération, se traduisent (49) règles pour chaque machine. Les règles typiques ont la structure suivante :

- **Règle(1):** si la variation de vitesse est *NB* (NEGATIVE BIG), ET l'accélération est *NB* ALORS la tension (la sortie de PSS floue) est *NB*.

- **Règle(2):** si la variation de vitesse est *ZE* (ZERO), ET l'accélération est *NS* (NEGATIVE SMALL) ALORS la tension (la sortie de PSS floue) est *NS*.
- **Règle(3) :** si la variation de vitesse est *PB* (POSITIVE BIG), ET l'accélération est *NM* (NEGATIVE MEDIUM) ALORS la tension (la sortie de PSS floue) est *PM* (POSITIVE MEDIUM). Et ainsi de suite...

Toutes les 49 règles régissant le mécanisme sont expliquées dans le tableau (III.4), où tous les symboles sont définis dans la terminologie de base de logique floue.

Variation de vitesse	Accélération						
	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>
<i>NM</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>
<i>NS</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>
<i>ZE</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>
<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>
<i>PM</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>

Tableau III.4. Base de règles de contrôleur a logique floue.

La sortie de stabilisateur est obtenue en appliquant une règle particulière exprimée sous forme de fonctions d'appartenance. Finalement l'appartenance de sortie de la règle est calculée. Cette procédure est suivie pour toutes les règles et avec chaque règle un résultat est obtenu.

Nous utilisons le mécanisme d'inférence le plus couramment utilisé est celui dit « de Mamdani ». Précédemment, on peut connaître les étapes (Fuzzification, degré d'activation, implication et agrégation).

III.7.4. Défuzzification :

Généralement, la solution d'un problème utilisant les ensembles flous, est un résultat exprimé en termes de valeurs floues (fonctions d'appartenance). D'autre part, pour exploiter ou appliquer physiquement ces résultats, on doit utiliser des valeurs ordinaires. Cette opération qui consiste à convertir les valeurs floues en valeurs ordinaires, s'appelle la défuzzification.

La méthode de défuzzification la plus utilisée est certainement, la méthode du centre de gravité, dont le principe est de prendre l'abscisse du centre de gravité de la surface de la fonction d'appartenance résultante.

Dans le cas d'un univers de discours discret, cette méthode donne :

$$y = \frac{\sum_1^n \mu(x_i)x_i}{\sum_1^n \mu(x_i)} \text{ avec : } X = (x_1 \dots \dots \dots x_2) \quad (\text{III. 2})$$

Cependant, cette méthode de défuzzification est parfois complexe et demande des calculs importants. C'est pour cette raison qu'on utilise souvent une autre méthode plus simple qui est la méthode du maximum, dont le principe est de prendre l'abscisse du maximum de la fonction d'appartenance résultante [43].

III.7.5. Mise en œuvre de la logique floue[45]:

La représentation de diagramme bloc du contrôleur à logique floue mise en application sur simple machine (générateur synchrone) a connecté au réseau infini. Comme dans la figure suivante :

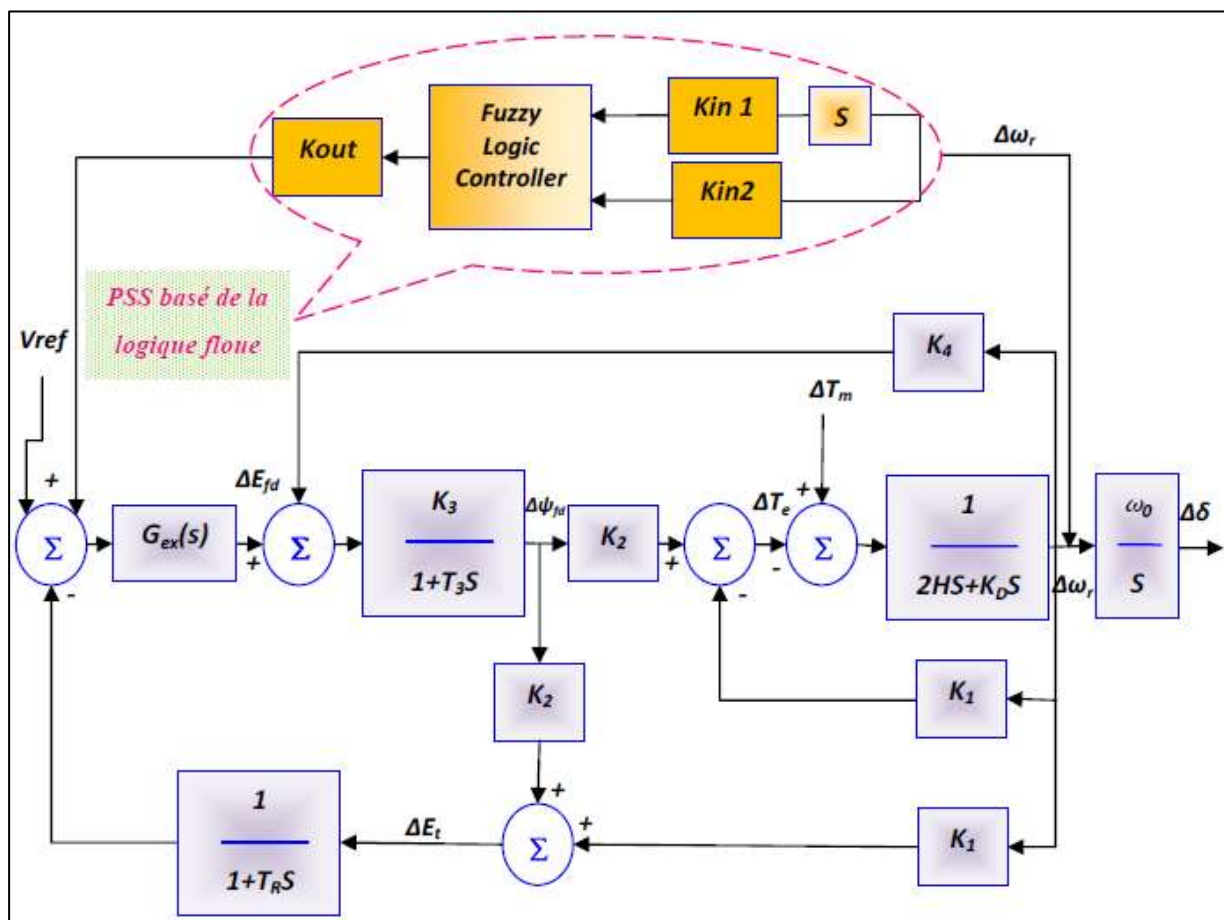


Figure III.19. Exécution de contrôleur de logique floue.

III.8. Étude comparative entre la mise en œuvre du système aux différents cas :

Nous avons comparé entre les trois cas : où notre système est :

- sans régulateur *PSS*.
- connecté avec régulateur *PSS* conventionnelle.
- connecté avec régulateur *FLPSS* (*PSS* flou).

Simultanément, nous exécutons les schémas blocs des figures (II.12), (II.11) et de la figure(III.19), pour les mêmes paramètres.

A partir des critères de performance, nous obtenons le bon choix qui permette à la bonne exploitation du système.

Les résultats de simulation dans les figures (III.20), (III.21), (III.22), (III.23) et (III.24) montré au-dessous, pour chacun d'angle de charge, de la vitesse angulaire, du couple électrique et de la tension terminale.

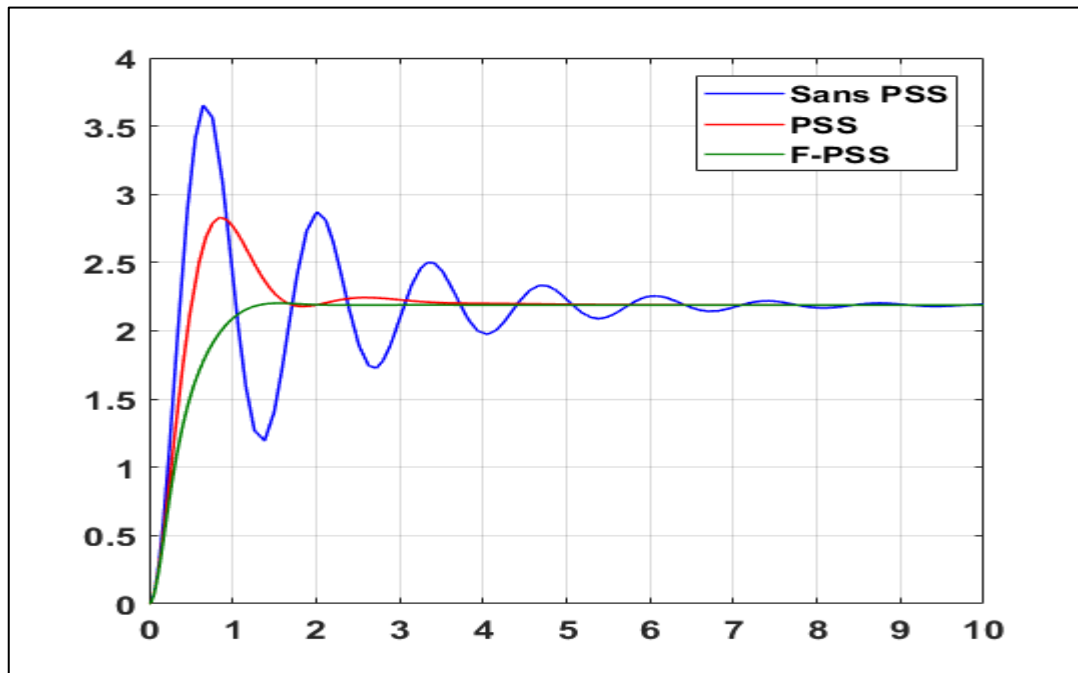


Figure III.20. Présente la variation de la position angulaire.

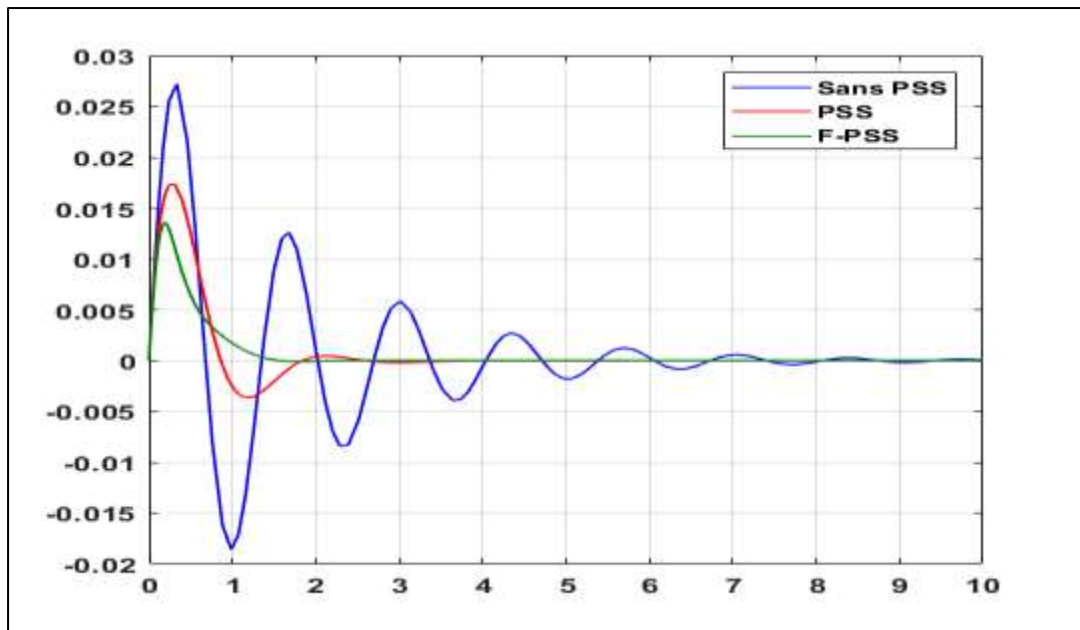


Figure III.21. Présente la variation de la vitesse angulaire.

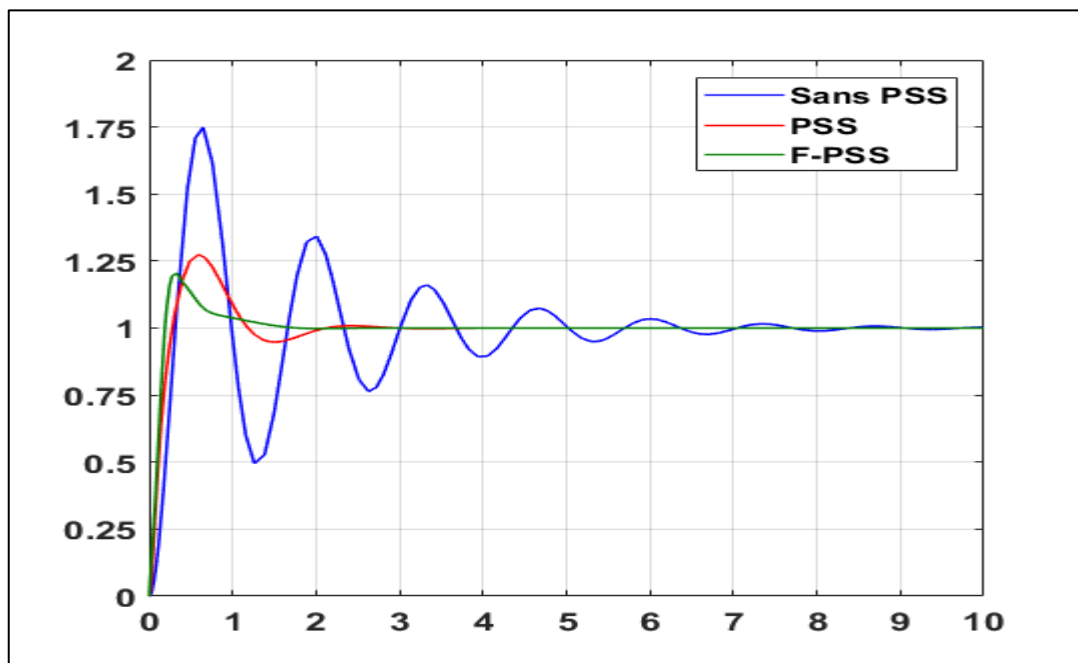


Figure III.22. Présente la variation du couple électrique.

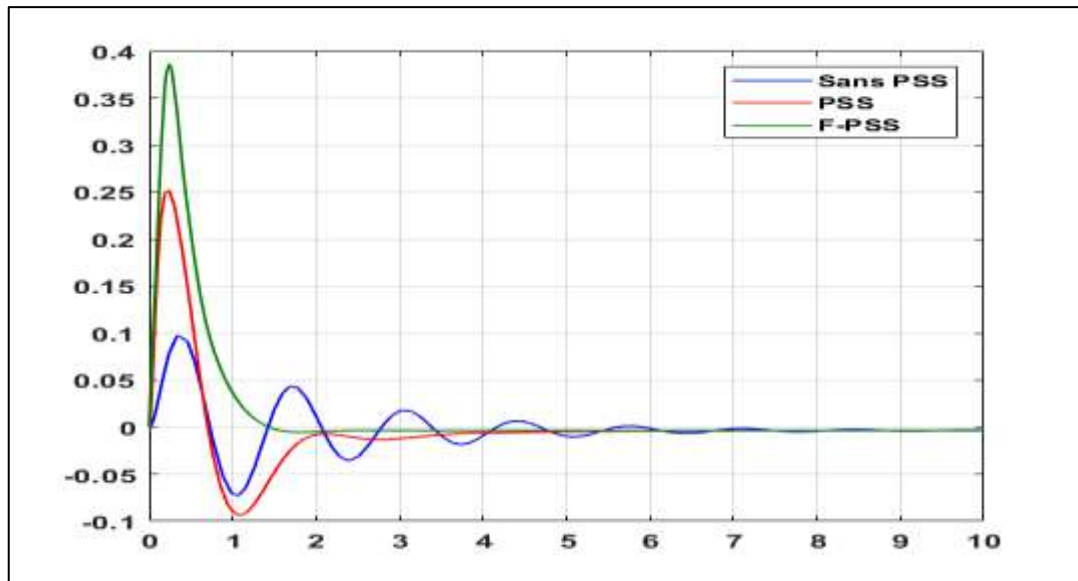


Figure III.23. Présente la variation de la tension terminale

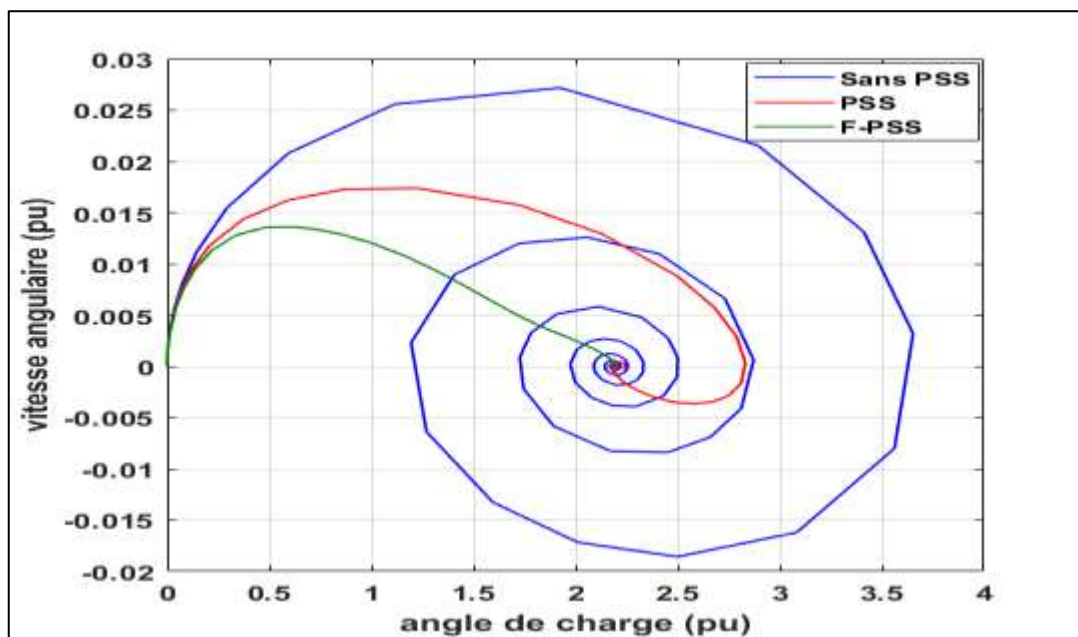


Figure III.24. Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport l'angle.

Les deux tableaux ci-dessous montrent les paramètres des critères, l'un des critères temporels instantanés et l'autre des critères temporels intégraux.

Les cas	Sans PSS			Avec PSS			Avec FUZZY PSS		
Les courbes	δ	ω	T_e	δ	ω	T_e	δ	ω	T_e
D_p	1.419	0.0271	0.743	0.638	0.01833	0.304	0	0.01381	0.223
t_p	0.6734	0.314	0.6331	0.8358	0.2658	0.5604		0.1822	0.3443
$t_r(5\%)$	4.752		4.753	1.385		1.606	1.28		0.8491

Tableau III.5. Comparaison des critères temporels instantanés.

Les cas	Sans PSS	Avec PSS	Avec FUZZY PSS
IAE	0.1495	0.1169	0.09975
ISE	0.007102	0.007336	0.008198
ITAE	0.3273	0.2232	0.1715

Tableau III.6. Comparaison des critères temporels intégraux.

Lors nous déplaçons le *FLPSS* au système, ce dernier va à la stabilité tôt (1.28s pour l'angle de charge). Par contre, les courbe d'angle pour les cas sans *PSS* et avec *PSS* conventionnel sont stable au (4.752s et 385s) respectivement.

Du tableau (III.6) on peut vérifier que le système avec *FLPSS* mieux réglé, parce que l'intégrale de l'erreur absolue est minimale par rapport les autres cas ($IAE_{\text{minimal}} = IAE_{\text{avecFLPSS}} = 0.09975$), aussi l'intégrale de l'erreur absolue pondérée par le temps est minimale $IAE_{\text{minimal}} = IAE_{\text{avecPSS}} = 0.1715$).

Le régulateur floue est utilisé pour pouvoir ajuster le système rapidement (temps de réponse très court) par rapport au régulateur classique et de maintenir la tension V_t proche de sa référence $V_{\text{réf}}$ avec un minimum de dépassement.

III.9.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les principaux concepts théoriques de la logique floue et le principe de contrôleur floue, puis après avoir décrit une structure d'une commande base La logique floue permet de modéliser un système complexe, en modélisant seulement le comportement de l'opérateur humain face au système.

Ainsi nous avons comparés entre la mise en oeuvre du système :

- sans régulation PSS.
- avec régulation PSS conventionnel.
- avec régulation PSS basé de la logique floue.

Comme résultat on peut dire que la performance de la *FPSS* proposé est beaucoup mieux et les oscillations sont amorties beaucoup plus rapide.

Donc la logique floue permet de modéliser puis de remplacer l'expertise de conduite de processus, en provenance du concepteur ou de l'utilisateur, grâce a cette pouvoir il est classé parmi les techniques de l'intelligence artificielle.

CHAPITRE IV

Résultat et validation

IV.1.Introduction:

Dans ce travail nous allons valider par simulation l'efficacité du stabilisateur indirect Fuzzy-PSS proposé sur deux systèmes de puissance de Kundur, un système d'une machine reliée à un jeu de barres infini (SMIB) pour différents points de fonctionnement et un réseau test multi-machines permettant l'étude de plusieurs modes d'oscillations tels que les modes locaux et les modes interzones. On doit s'assurer que le stabilisateur est capable d'amortir les oscillations locales et d'interzones et de montrer des performances satisfaisantes en présence de perturbations diverses. Ces dernières consisteront en une série de trois tests, à savoir un court-circuit triphasé, un court-circuit monophasé à la terre et un changement de la tension de référence.

IV.2.Application au système mono machine SMIB:

IV.2.1.Description du système de puissance:

Un modèle non linéaire d'un système de puissance constitué d'une machine synchrone reliée à un jeu de barres infini est choisi pour la simulation. Une représentation schématique de diagramme du système de puissance est montrée dans figure (IV.1). Un système d'excitation simplifié de (Type IEEE-ST1A excitation system model) standard a été employé.

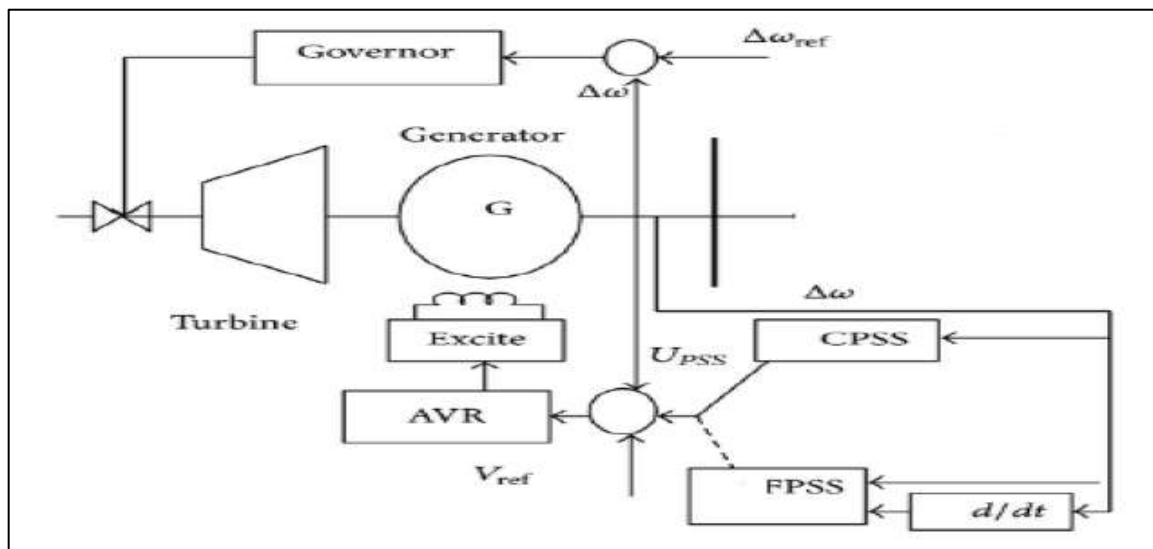


Figure IV.1. Schéma simplifié d'une machine synchrone connectée à un jeu de barres infini.

IV.2.2. Résultats de simulation:

L'importance d'un contrôleur conçu pour une commande d'un élément du réseau électrique est qu'il soit fonctionnel non seulement autour du point de fonctionnement à partir duquel les paramètres et données nécessaires pour la conception ont été extraits mais il doit être aussi efficace pour tout autre point de fonctionnement que ce soit en un régime de fonctionnement léger ou critique. Dans ce qui suit, on montrera la performance et l'efficacité du stabilisateur proposé Fuzzy-PSS dans l'amélioration de la stabilité transitoire du système de puissance.

Les résultats de simulation des performances du système de puissance sans stabilisateur et avec stabilisateur conventionnel (CPSS) et un stabilisateur flou (FPSS) pour différents points de fonctionnement seront comparés comme représenté sur la scénario 1 et scénario 2.

- **Scénario 1 : MANO-MACHINE (défaut triphasé)**

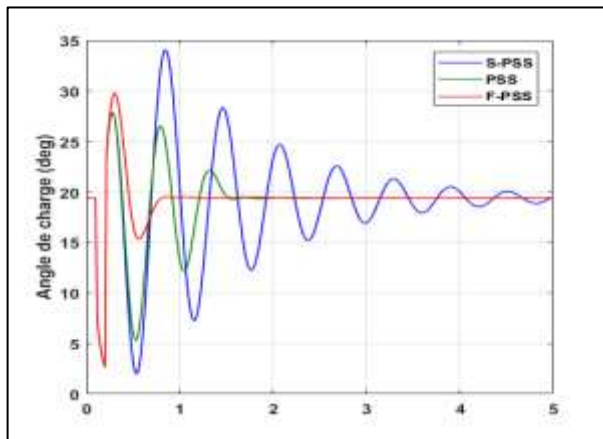


Figure IV.2. Variations de la position angulaire.

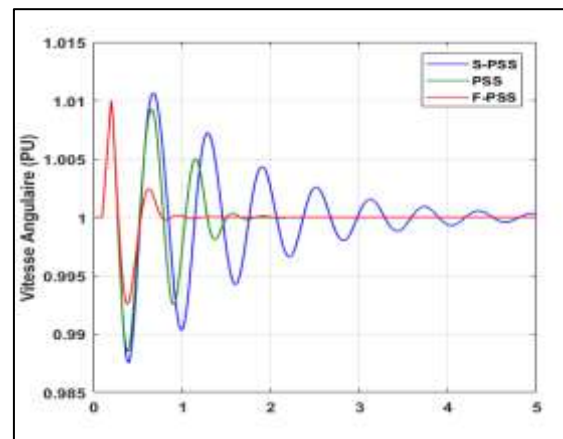


Figure IV.3. Variations de la vitesse angulaire.

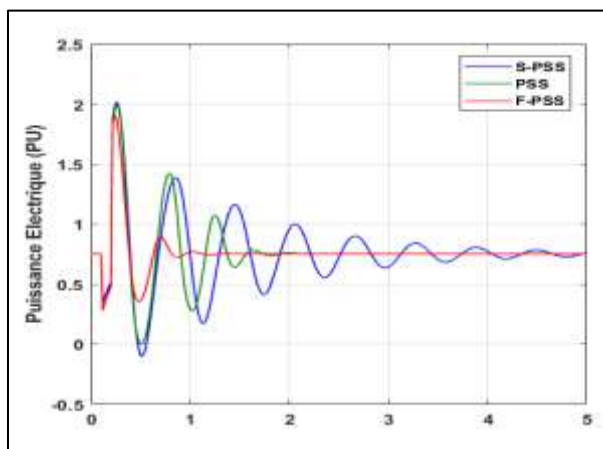


Figure IV.4. Variations de la puissance électrique.

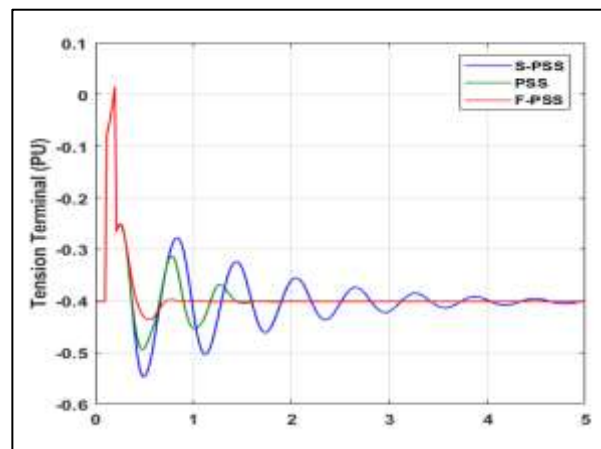


Figure IV.5. Variations de tension terminale.

- Scénario 2 : MANO-MACHINE (défaut monophasé)

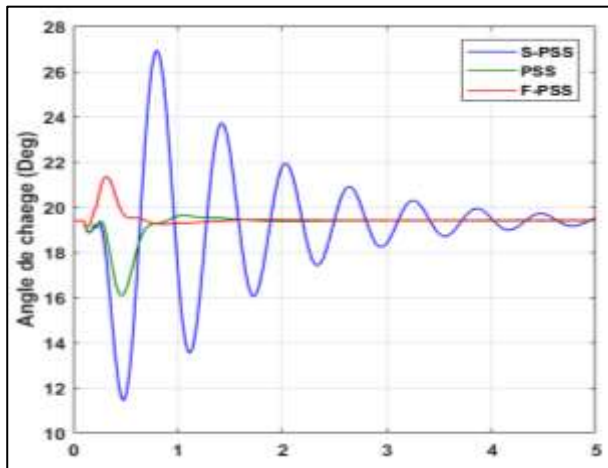


Figure IV.6. Variations de la position angulaire.

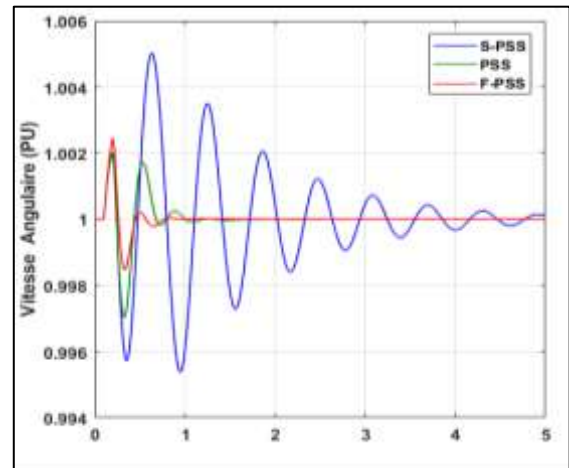


Figure IV.7. Variations de la vitesse angulaire

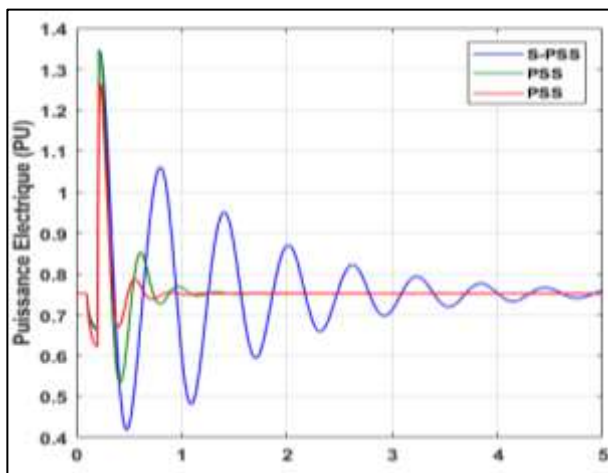


Figure IV.8. Variations de la puissance électrique.

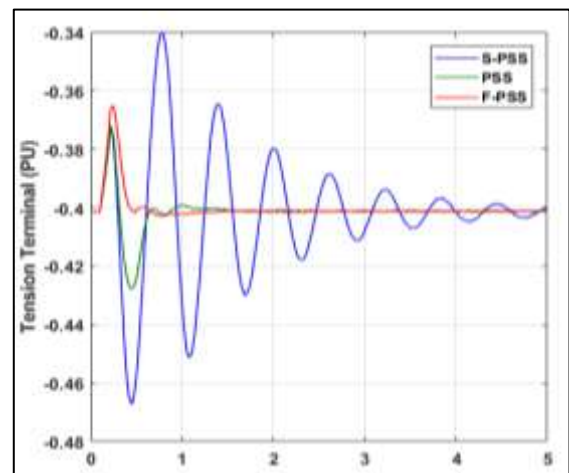


Figure IV.9. Variations de tension terminale.

Nous pouvons bien voir à travers les résultats de simulation pour différents point de fonctionnement que le stabilisateur proposé Fuzzy-PSS assure une meilleure stabilité et Confirme sa supériorité en améliorant l'amortissement des oscillations comparativement au stabilisateur conventionnel CPSS, et sans stabilisateur.

IV.3.Application à un système multi-machines:

Le générateur connecté à un jeu de barres infini représente un des rare cas d'exploitation des réseaux de puissance électriques. Les générateurs sont en général groupés et reliés avec d'autres formants ainsi des systèmes multi-machines. Les phénomènes d'oscillation de puissance sont rencontrés en grande partie entre de grandes régions interconnectées. Dans le cadre de ce travail le réseau test multi-machines qui a été retenu est celui de Kundur et une simulation basée sur le stabilisateur proposé Fuzzy-PSS conduite. Les performances du stabilisateur Fuzzy-PSS en termes d'amortissement des oscillations locales et interrégionales sont évaluées dans les sections suivantes.

IV.3.1.Description du réseau étudié:

Le réseau test se compose de deux zones totalement symétriques reliées entre-elles par deux lignes en parallèle de 220 km de longueur avec une tension nominale de 230 kV. Il a été spécifiquement conçu [6] pour étudier les oscillations électromécaniques de basse fréquence dans les grands systèmes électriques interconnectés. Malgré sa petite taille, il imite très bien le comportement des systèmes typiques en fonctionnement réel. Chaque zone est équipée de deux générateurs identiques de 20 kV/900 MVA. Les machines synchrones ont des paramètres identiques sauf pour les inerties qui sont $H = 6.5$ s dans la zone 1 et $H = 6.175$ s dans la zone 2. La charge est représentée par une impédance constante partagée entre les zones de telle manière que la zone 1 exporte 400 MW vers la zone 2. Vu que la charge maximale d'une seule ligne est d'environ 140 MW, le système est un peu stressé, même dans l'état statique. Le jeu de barres auquel est connecté le générateur $G1$ est considéré comme le jeu de barres de référence. Des batteries de condensateur sont installées dans chaque zone afin d'améliorer le profil de tension pour qu'elle soit proche de l'unité relative dans les deux zones.

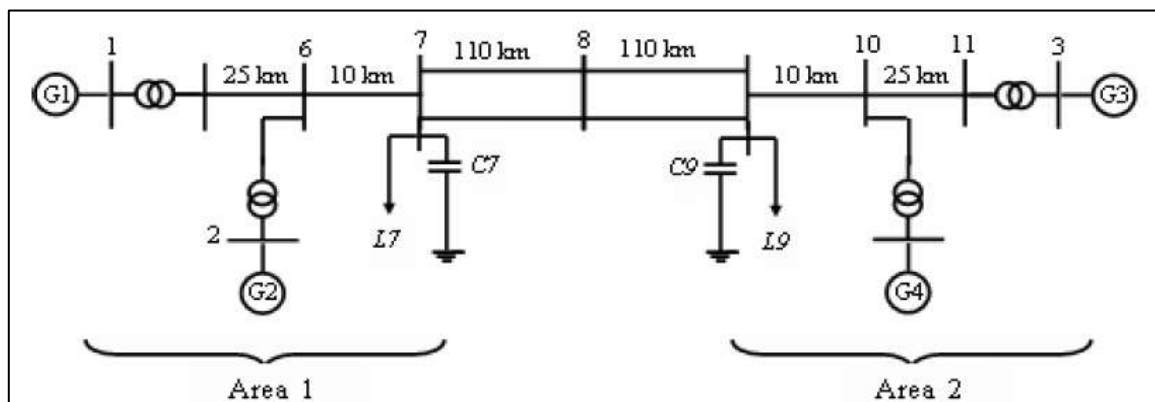


Figure IV.10. Représentation schématique des deux régions du système étudié.

IV.3.2. Amortissement des oscillatoires inter-régions:

Les échanges croissants d'énergie font apparaître des oscillations de puissance, nommées «Oscillation inter-régions ». Ces oscillations électromécaniques sont visibles par l'oscillation de la vitesse ou l'angle des arbres des générateurs d'au moins deux régions mais aussi par l'oscillation de la puissance transmise sur les lignes du réseau [46]. Les oscillations inter régions limitent la production d'énergie par les machines ainsi que le transport d'énergie, entre autre à cause de l'écart des oscillations qui dépasse la capacité de production des générateurs, et augmentent les risques d'instabilité.

Pour mieux représenter ce phénomène d'oscillations inter-régions, on prend souvent un exemple mécanique analogue figure (IV.11): celui de deux chariots reliés par un ressort, oscillants en opposition de phases, chaque chariot représentant un groupe de machines cohérentes (c'est-à-dire avec des angles internes *id* «en phases ») et le ressort représentant les lignes[50].

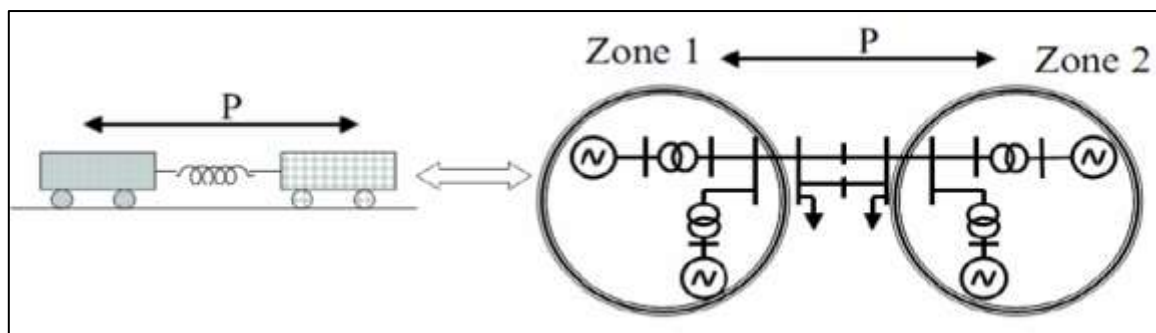


Figure IV.11. Exemple mécanique analogue aux oscillations inter-régions.

Rappelons que sur un réseau électrique il existe trois principaux types de mode d'oscillation:

- les modes dits sous-synchrones où les oscillations se font à une fréquence relativement élevée, sujet non traité dans notre étude ($\geq 1,5$ Hz) ;
- les modes dits locaux où une machine oscille seule contre une autre machine du même site ou contre le reste du réseau ($\geq 1,0$ Hz) ;
- Les modes dits inter-régions (ou interzones) où un groupe de machines cohérentes oscille contre un autre groupe (de 0,1 à 1 Hz).

L'amortissement des oscillations inter-régions peut se faire de trois façons principales:

- soit par des lignes THT (Très Hautes Tensions) en ajoutant des lignes supplémentaires, c'est la solution la plus coûteuse;

- soit par des dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System), placés sur les lignes les plus contraintes, ce sont des injecteurs de puissance réactive[48] ; nous ne nous intéresserons pas à ce type d'amortissement dans cette thèse.
- soit par des PSS (Power System stabilizer) [49] couplés à des AVR (Automatic Voltage Regulator) qui agissent sur la tension d'excitation de la machine synchrone : c'est la solution conventionnelle.

Nous pouvons également amortir les oscillations inter-régions par les correcteurs non linéaires c'est cette solution que nous testons ici.

IV.3.3.Intérêt de l'amortissement des oscillations inter-régions:

Dans les réseaux électriques, les marges de transmission de la puissance (la différence entre la limite thermique et l'utilisation « normale ») sont amenées à être de plus en plus réduites, la Consommation augmentant, et les structures de production et de transport se développant peu, pour des raisons de rentabilité économiques mais aussi écologiques. On perçoit dès lors l'intérêt de nouvelles technologies permettant de se rapprocher des limites thermiques des réseaux déjà en places.

L'augmentation de la stabilité des réseaux électriques par l'amortissement des oscillations interrégions, permet tout en gardant une marge de sécurité équivalente, de réduire les marges de transmission de puissance.

IV.3.4.Résultats de simulation:

Le modèle de système de puissance de quatre machines montré dans la figure (IV.10) a été choisi pour évaluer la performance et l'efficacité du stabilisateur proposé pour l'amortissement des oscillations locales et interzones. La performance obtenue avec le stabilisateur proposé FPSS est comparée à celles obtenues en utilisant un stabilisateur conventionnel (CPSS) [50], en utilisant un stabilisateur flou (FPSS) sous différentes contingences. Une représentation schématique du diagramme d'un générateur est montrée dans la figure (IV.12).

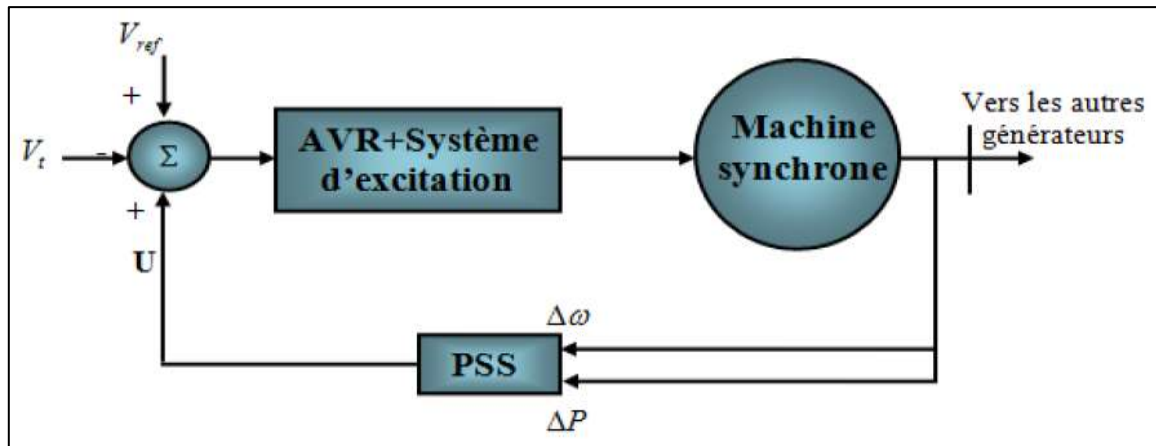


Figure IV.12. Configuration d'un générateur équipé supplémentaire stabilisateur.

La représentation du système multi-machines été faite en utilisant l'environnement MATLAB/Simulink version 8.1.0(R2013a), comme figure(IV.13) suite.

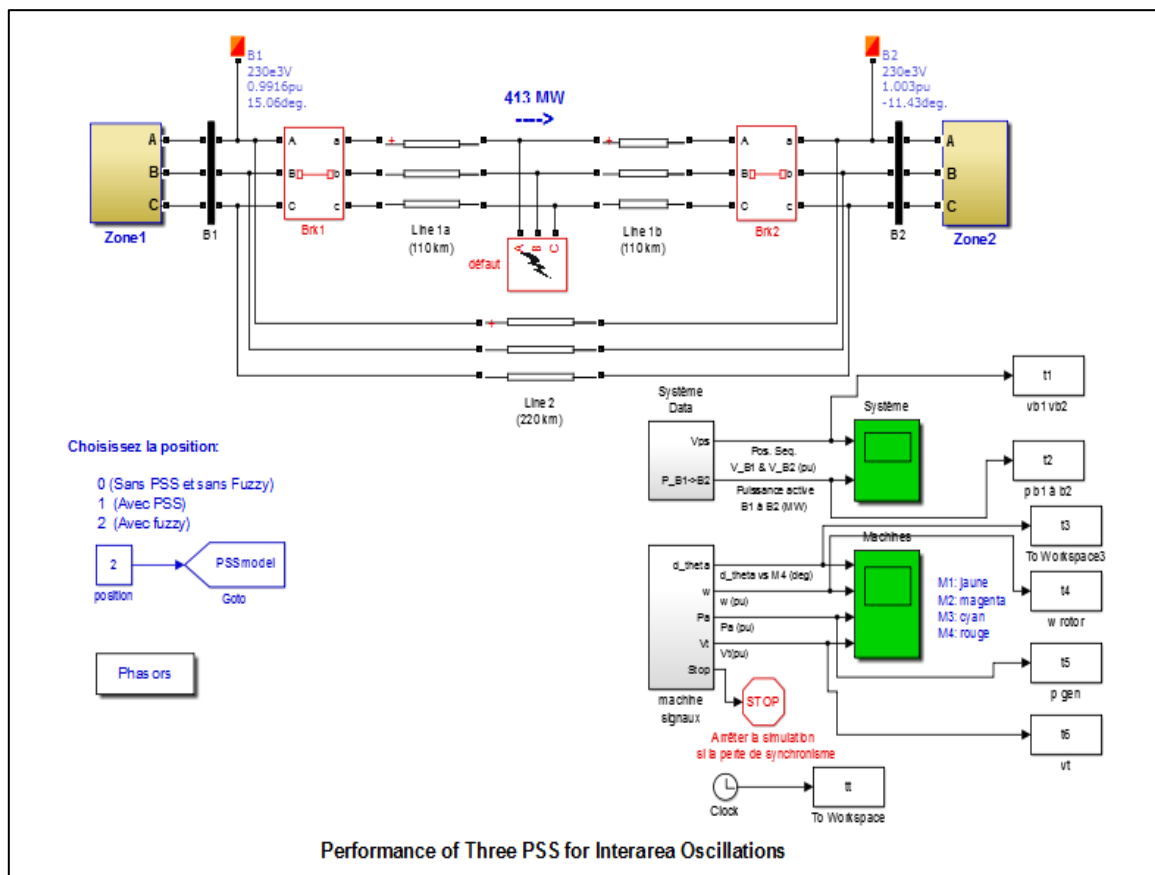


Figure IV.13. Représentation du réseau test sur MATLAB/Simulink.

IV.3.4.1. Système sans stabilisateur:

Nous étudions en premier lieu le fonctionnement du système sans PSS. La perte de stabilité du système aux grandes perturbations conduit évidemment à la présence de modes d'oscillations électromécaniques fortement instables. Nous appliquons un défaut triphasé sur la ligne 7-8 suivi par une élimination du défaut. les tensions des bus(1 et 2) , puissances

électriques, les réponses des angles de rotor, la variation de vitesse des générateurs et les tensions terminale des générateurs suite au défaut choisi sont montrées dans les figures suivant.

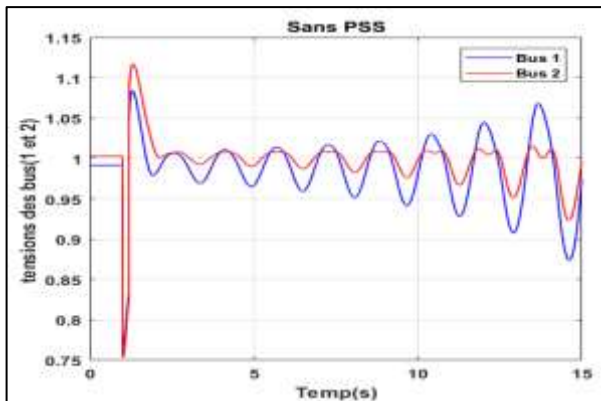


Figure IV.14. Présente la variation des tensions des bus (1 et 2)

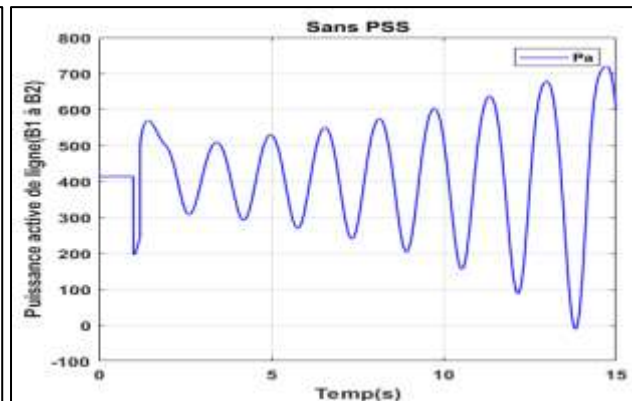


Figure IV.15. Présente la variation de Puissance active de ligne(B1 à B2).

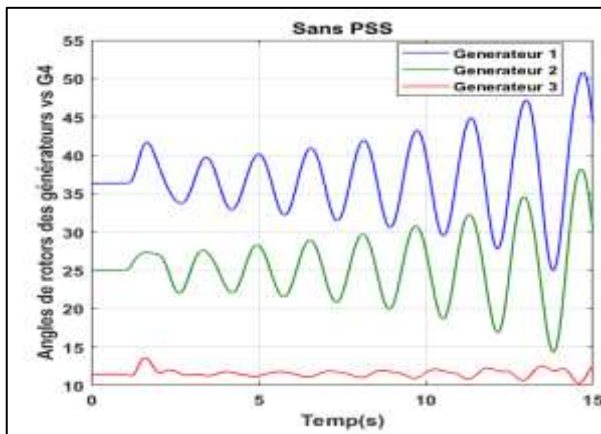


Figure IV.16. Présente la variation des angles de rotors des générateurs vs G4.

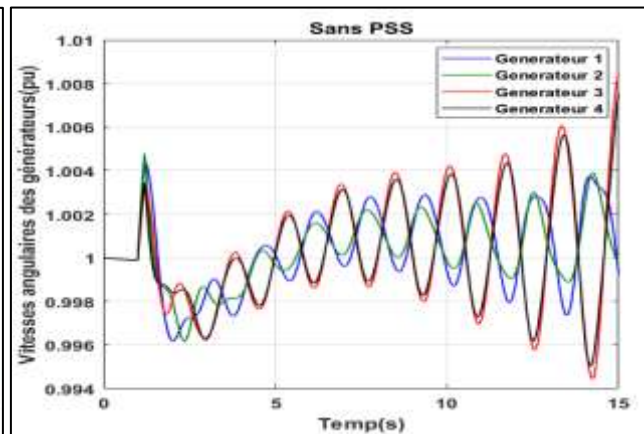


Figure IV.17. Présente la variation de Vitesses angulaires des générateurs.

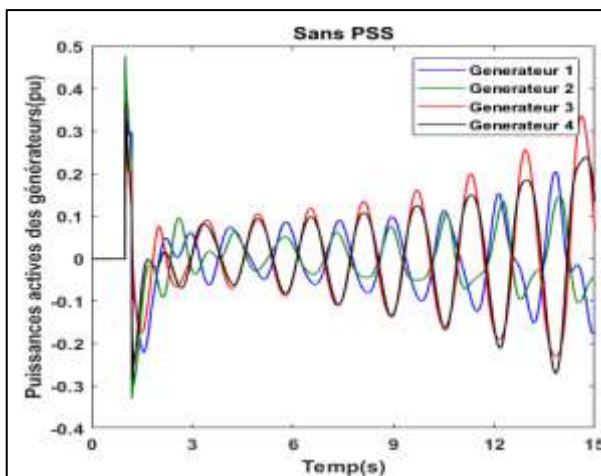


Figure IV.18. Présente la variation des Puissances actives des générateurs.

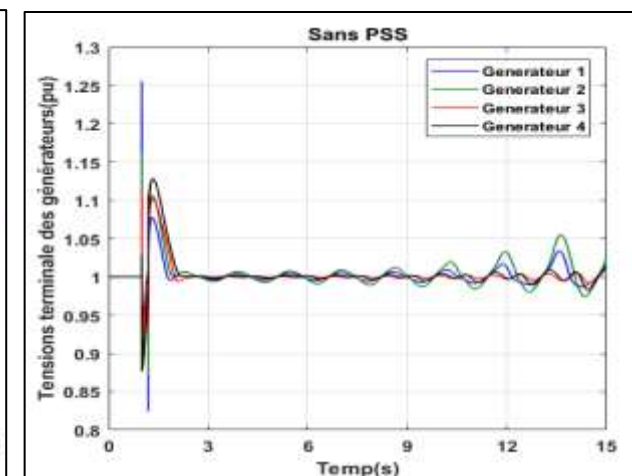


Figure IV.19. Présente la variation des Tensions terminale des générateurs.

La figure (IV.14) montre bien que les modes instables mènent à un écart croissant des angles de rotor et par conséquent à la perte de la stabilité du système. Pour rétablir la stabilité du système et améliorer l'amortissement des modes électromécaniques, les stabilisateurs (sans PSS, CPSS, FPSS) sont maintenant ajoutés aux générateurs.

IV.3.4.2. Evaluation de performance et comparaison:

A partir des simulations effectuées dans l'environnement MATLAB/Simulink on juge la performance des différents stabilisateurs, basant sur le modèle non linéaire pour ces différents scénarios avec la présence d'une grande perturbation transitoire.

Scénario 1: en appliquant un défaut triphasé de 6 périodes du réseau (0.1 s) au milieu d'une ligne de double ligne de transmission 7-8.

Cette perturbation de grande amplitude est sensée provoquer une oscillation inter zone.

En effet ce court-circuit interrompt temporairement et rétablit le transfert de puissance entre les deux zones du réseau. Le régime transitoire affecté par la perturbation engendre une fluctuation dans la même direction du transfert de puissance.

La figure (IV.20) représente les réponses temporelles, les écarts entre les angles des générateurs 2 et 1 le mode local, les écarts entre les angles des générateurs 4 et 2 et entre les angles des générateurs 3 et 1 ce qui illustre le mode d'oscillations inter-régions pour le défaut proposé. Les oscillations entre les régions se montrent clairement sur l'écart angulaire des générateurs appartenant à des régions différentes, ils oscillent en opposition de phase comme l'illustre les premières oscillations. La réponse dynamique des écarts de variation des vitesses des générateurs est montrée par la figure (IV.21). Il est clair que le stabilisateur Floue-PSS proposé assure une bonne performance acceptable.

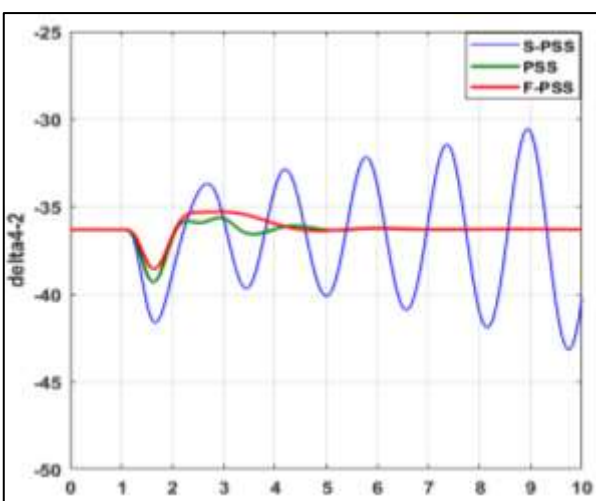
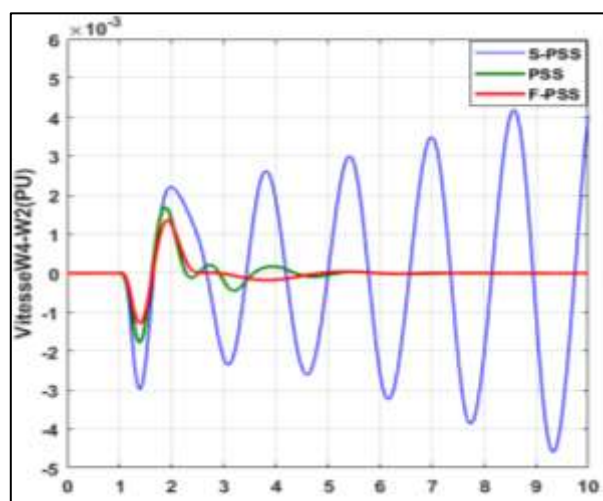
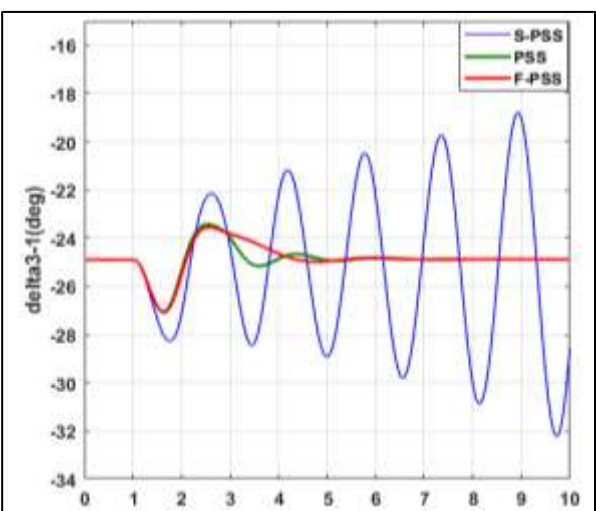
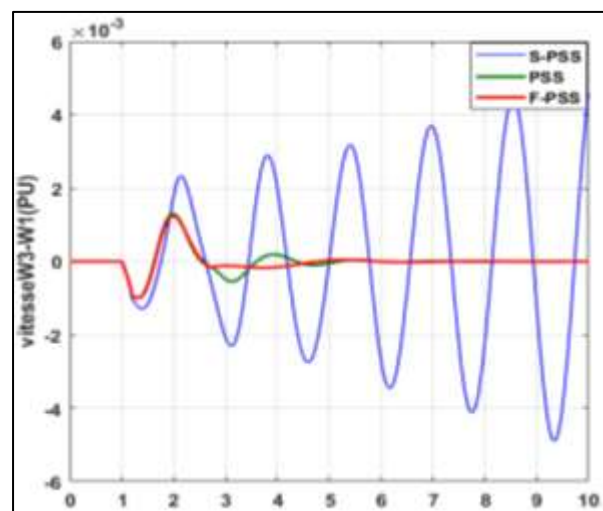
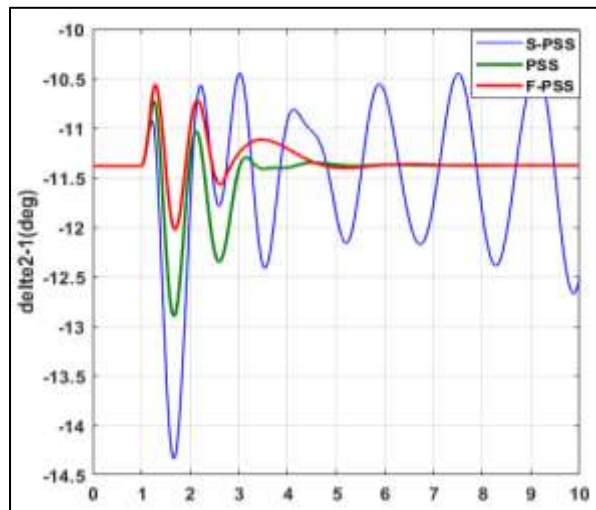
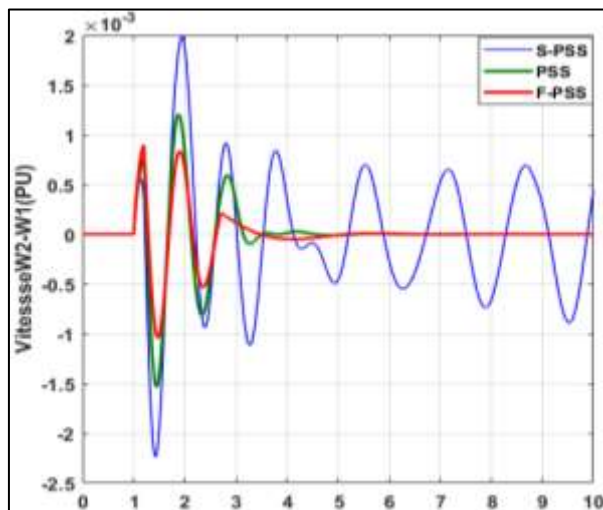


Figure IV.20. Ecart des vitesses des générateurs

Figure IV.21. Ecart des angles des générateurs

Les variations des angles des rotors influencent fortement les puissances électriques des générateurs du système ainsi que les tensions terminales. La figure (IV.22) illustre la réponse dynamique des puissances électriques des quatre générateurs et la réponse dynamique des tensions terminales représentées par la figure (IV.23). On a représenté les signaux des stabilisateurs dans la figure (IV.24).

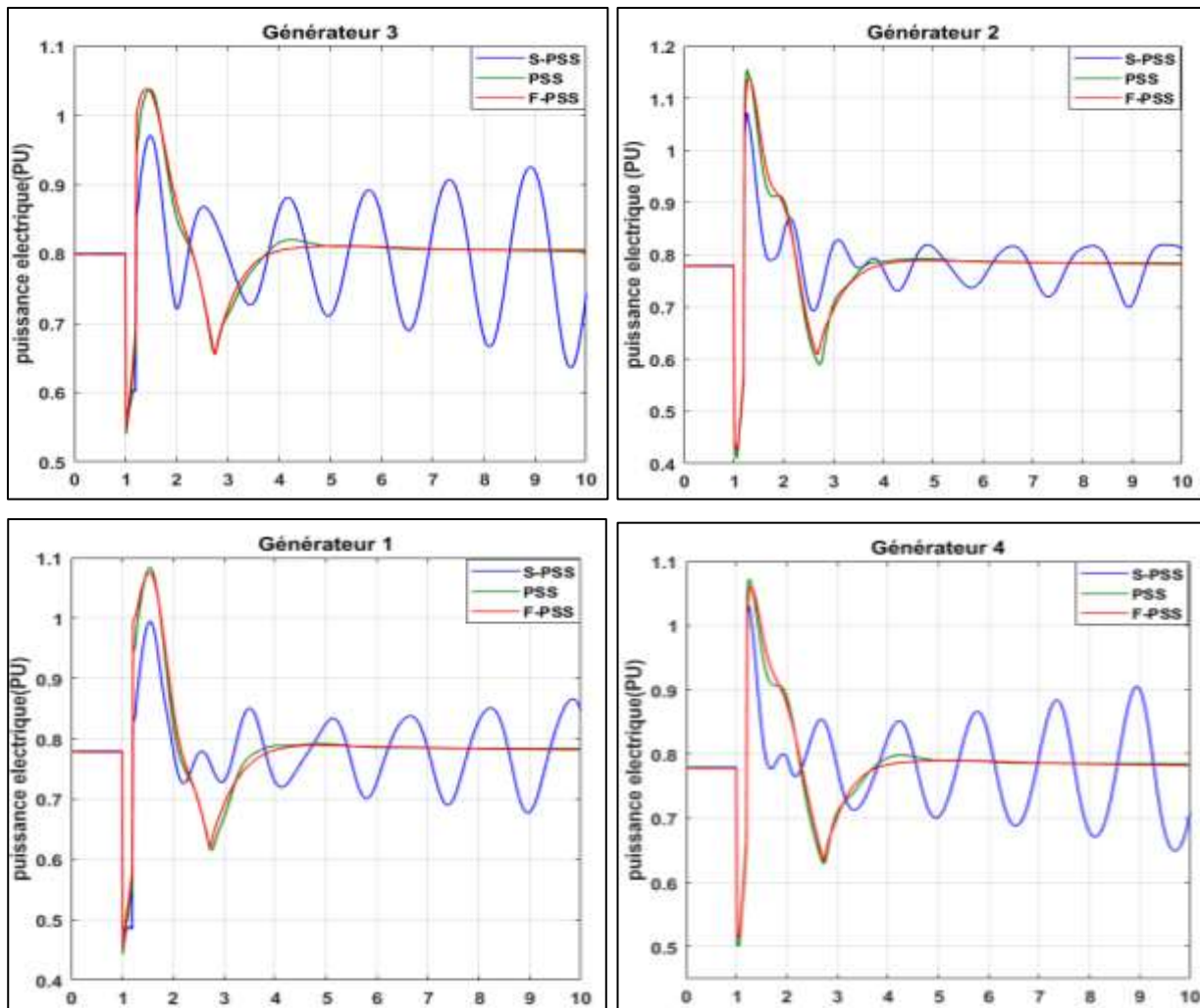
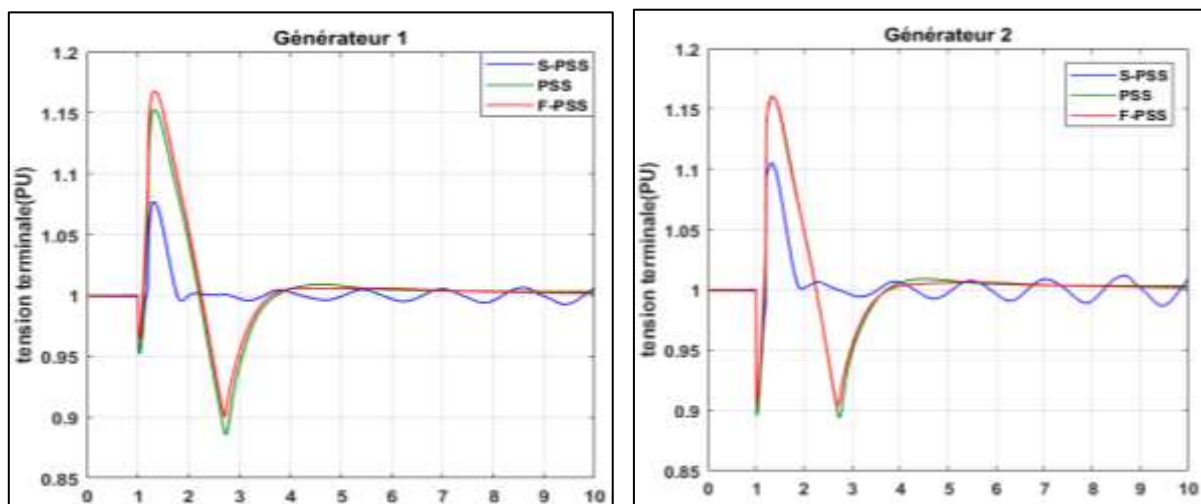


Figure IV.22. Puissance électrique des générateurs (1^{er} scénario).



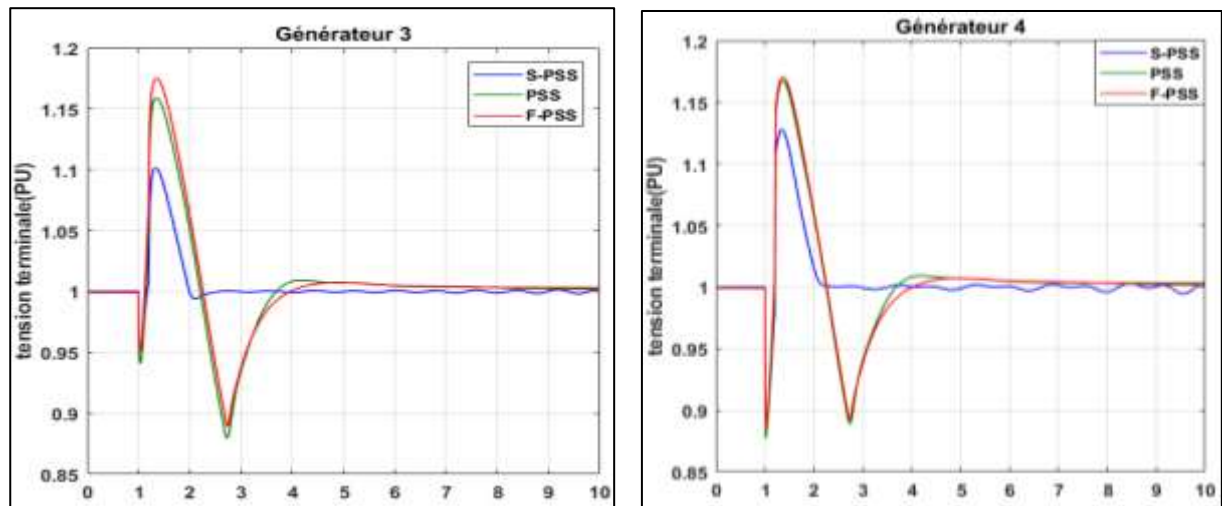


Figure IV.23. Variation de la tension terminale des générateurs (1^{er} scénario).

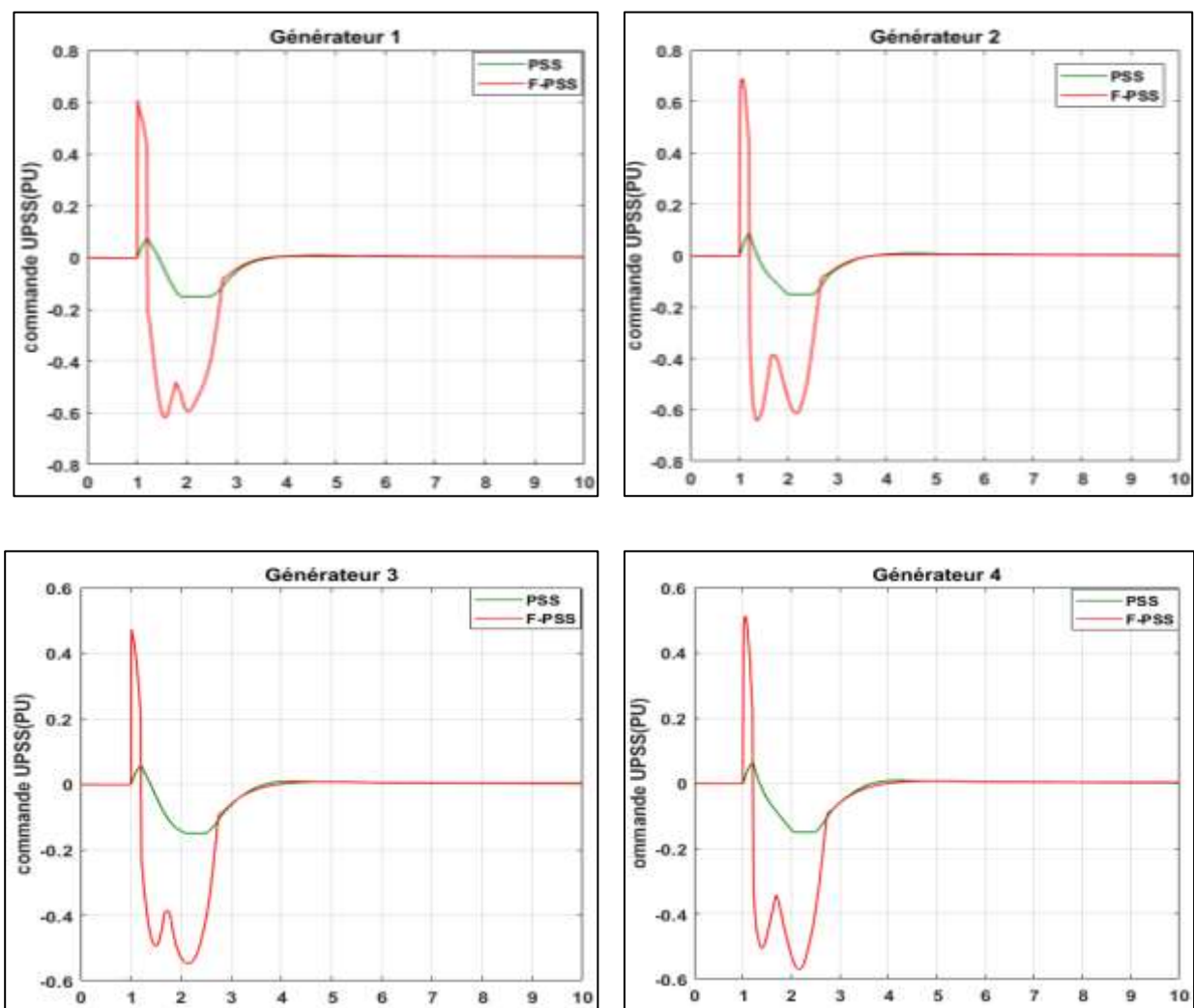


Figure IV.24. Variation de la commande des générateurs (1^{er} scénario).

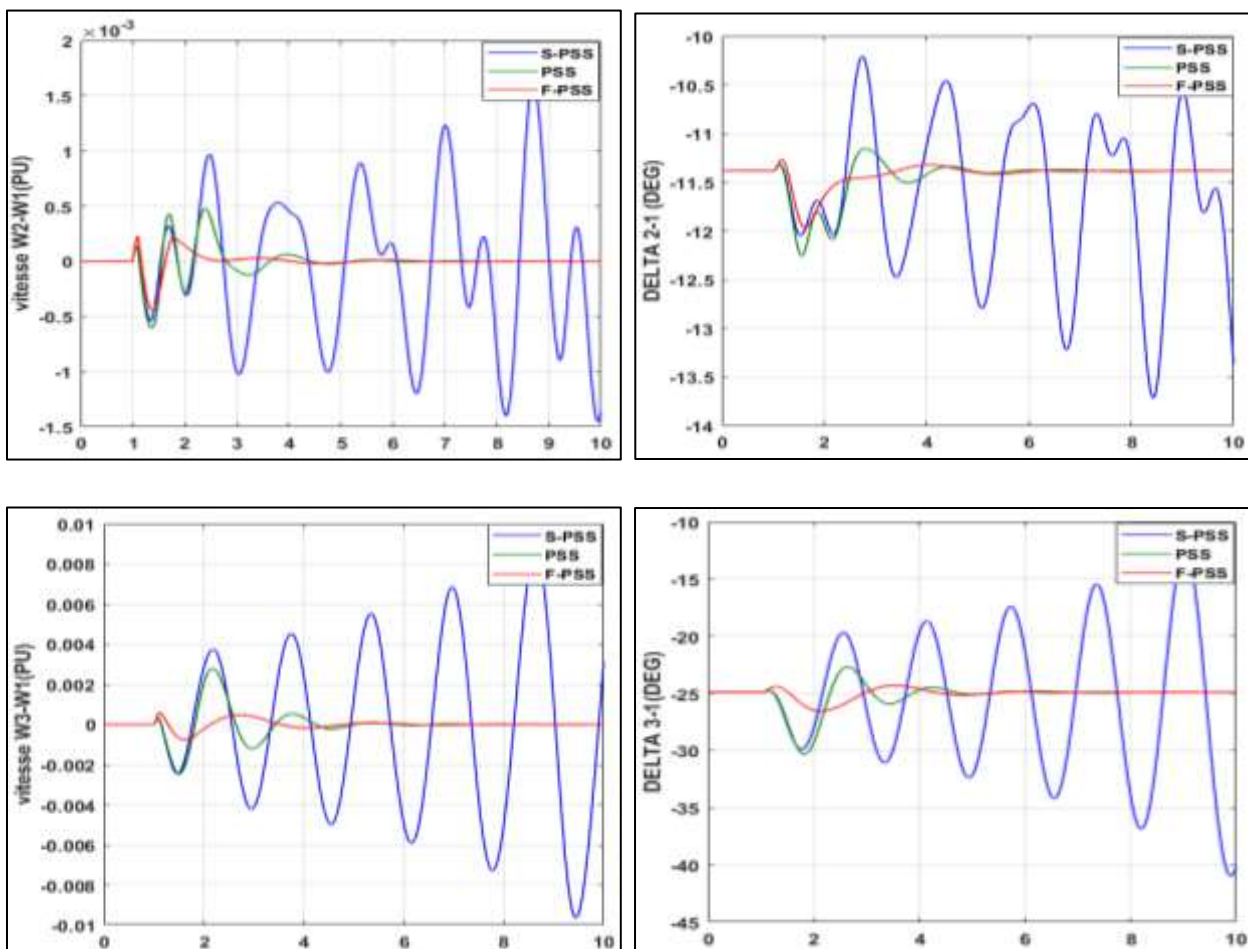
IV.3.4.3. Test de robustesse:

La robustesse garantit une stabilité du réseau (et donc l'amortissement des modes d'oscillations critiques) dans une large plage de points de fonctionnement. On considère deux perturbations possédant des vastes variations dans une utilisation normale d'un réseau: les valeurs des changements dans les tensions de référence et les impédances des lignes. Nous allons assurer du bon fonctionnement des stabilisateurs et de leurs performances pour deux différents points de fonctionnement.

Pour tester la robustesse de stabilisateurs proposés, on applique les perturbations suivantes et la performance du système évaluée.

Scénario 2: Les réponses du système suite à une contingence étroite d'une grande amplitude tel qu'un défaut monophasé à la terre dans la région 2 sur la ligne 9-10 est appliqué à la proximité du jeu de barre 9 pendant 6 périodes du réseau (0.1 s).

Les réponses dynamiques des écarts des angles de rotors et de variation des vitesses entre les générateurs donnés dans les figures (IV.25) et (IV.26) respectivement, indiquent bien la restauration rapide de la stabilité suite à cette contingence et l'atténuation des oscillations locales obtenu avec le stabilisateur flou PSS dans la zone 1 est le plus efficace.



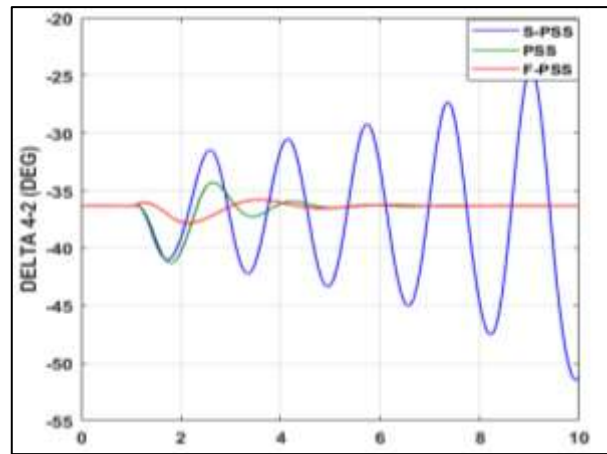
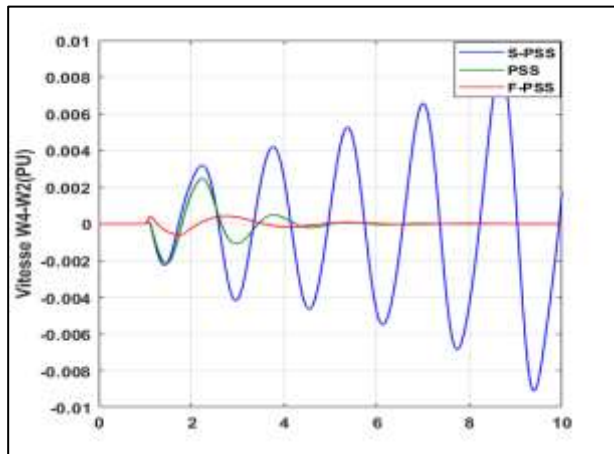
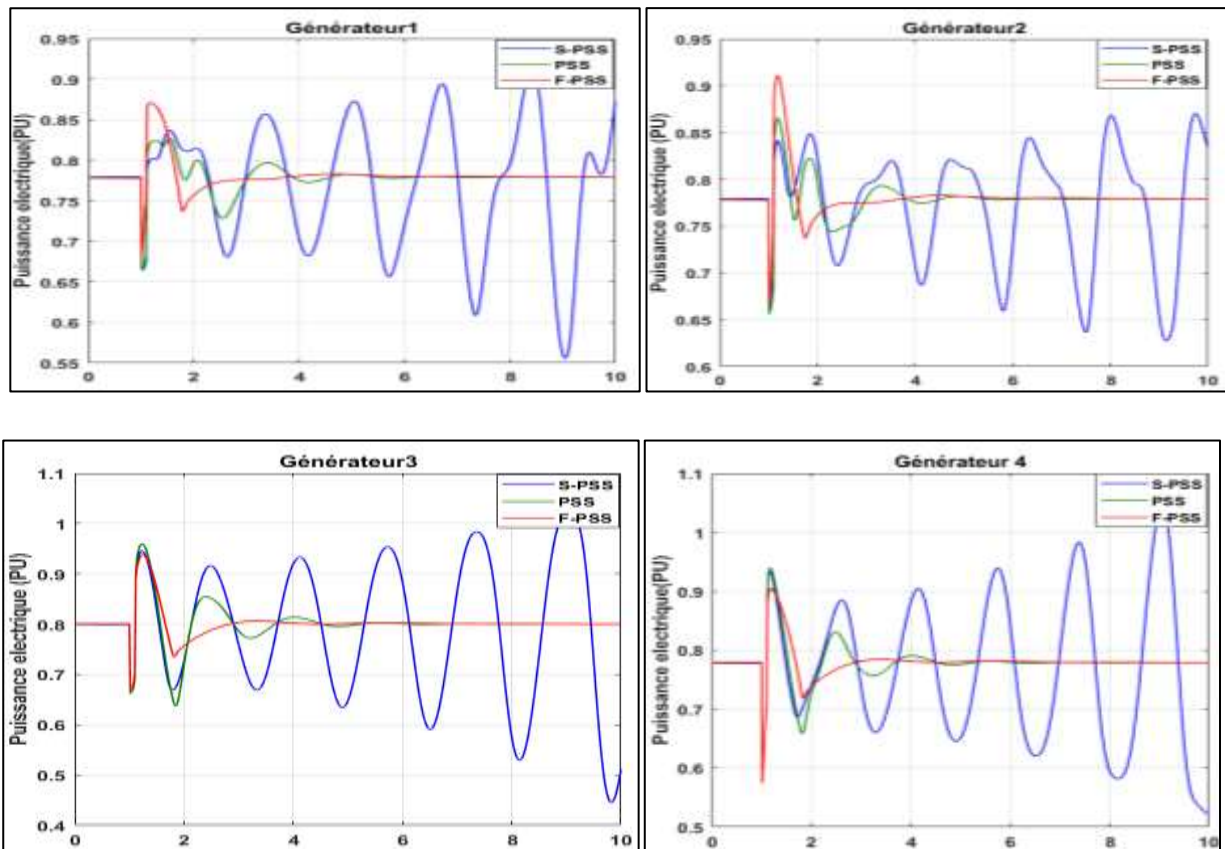


Figure IV.25. Ecart des vitesses des générateurs

Figure IV.26. Ecart des angles des générateurs

La réponse dynamique des puissances électriques des quatre générateurs, la réponse dynamique des tensions terminales et les signaux stabilisateurs sont présentées respectivement dans les figures (IV.27.28.29).

Figure IV.27. Puissance électrique des générateurs (2^{ème} scénario)

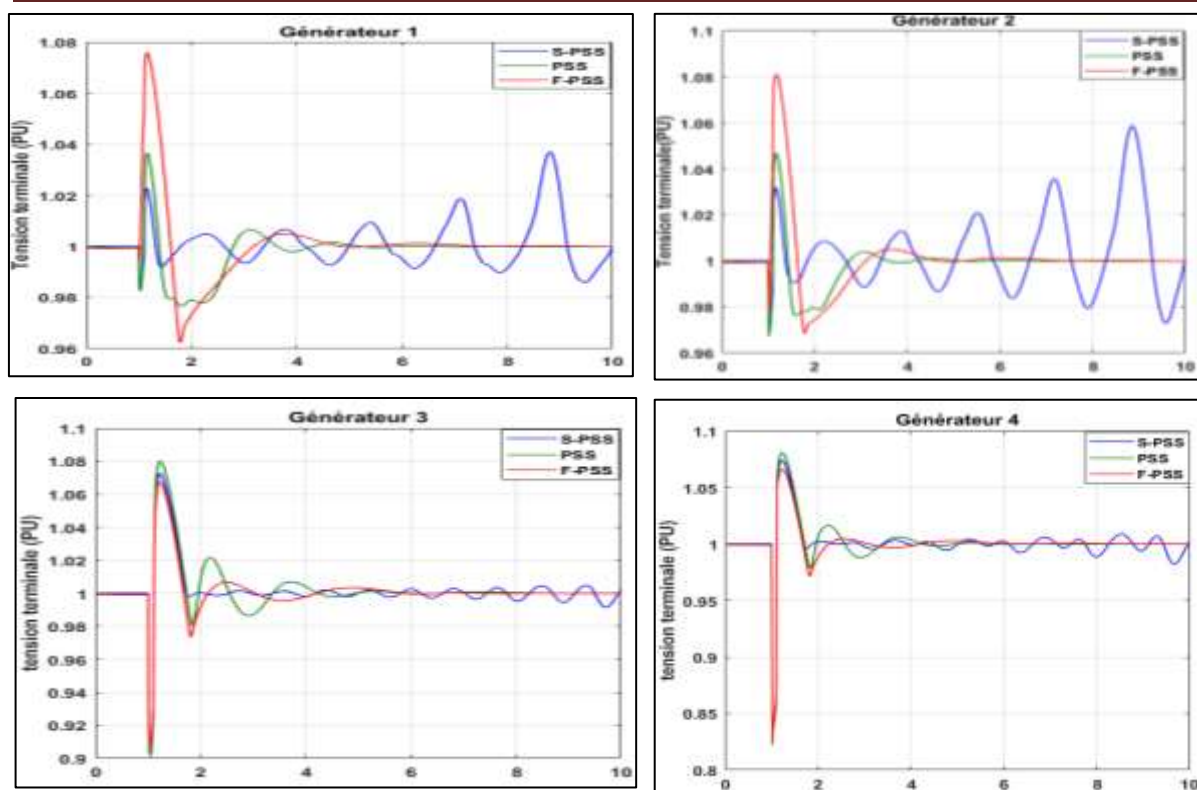


Figure IV.28. Variation de la tension terminale des générateurs (2^{ème} scénario).

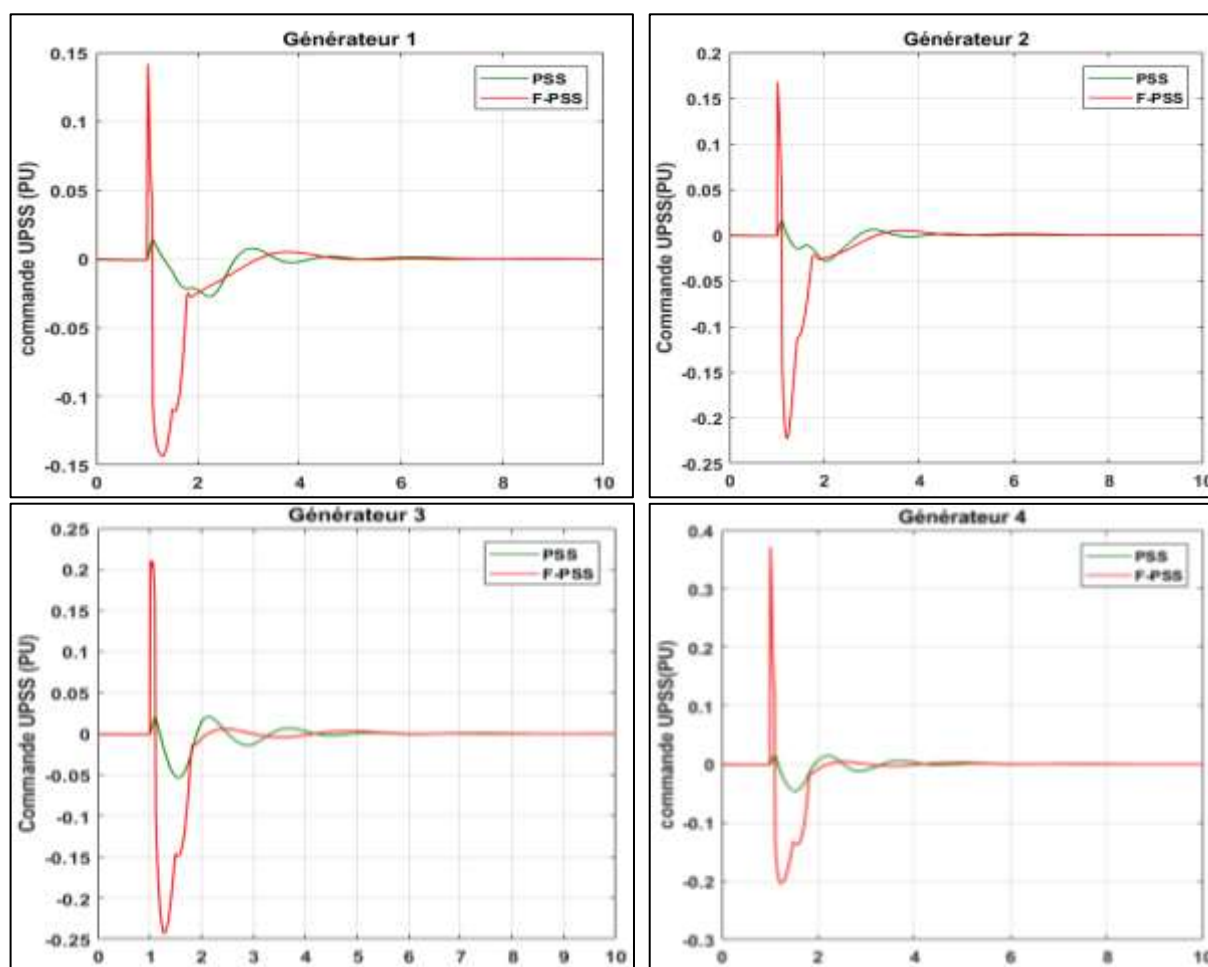


Figure IV.29. Variation de la commande des générateurs (2^{ème} scénario).

IV.4. Conclusion:

Dans ce chapitre, une approche non linéaire est appliquée pour la conception d'un stabilisateur du système de puissance pour l'atténuation des oscillations électromécaniques de faible fréquence basée sur la combinaison entre la commande par PSS et commande par logique floue. Le modèle mathématique du système de puissance est obtenu par l'incorporation des règles floues qui décrivent le comportement dynamique de ce système.

Les résultats de simulations ont montré que le régulateur FLPSS permet d'améliorer d'une manière efficace l'amortissement et assurer la stabilité de système pour plusieurs points de fonctionnement, une amélioration d'amortissement est obtenue pour des modes locaux et le mode interzone dans le système multi-machine si on les compare avec les deux stabilisateurs (sans PSS et CPSS) pour différents types des contingences.



Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

On a présenté dans cette thèse la conception d'un stabilisateur intelligent capable d'amortir

efficacement et rapidement les oscillations locales et d'interzones dans les systèmes d'énergies électriques soumis à des perturbations sévères diverses.

La stabilité est renforcée grâce au stabilisateur par logique floue proposé pour les systèmes multi-machines.

La modélisation du système à commander est une étape primordiale dans la conception de toute technique de contrôle. Les systèmes de puissance sont des systèmes fortement non-linéaires avec des paramètres variant avec le temps et leurs comportements sont pratiquement peu prédictibles. Leurs dynamiques complexes rendant leurs descriptions par un modèle mathématique exact difficile, voire utopique. Afin de contourner cette difficulté nous avons proposé un contrôleur intelligent, en l'occurrence un stabilisateur par logique floue qui n'exige pas un modèle mathématique exact du système de puissance. En outre il permet d'assurer la stabilité et l'amortissement des oscillations indépendamment des points de fonctionnement et ce même en présence des variations paramétriques du système. De plus, il permet de maintenir de bonnes performances de poursuite en présence de perturbations externes sévères.

Les systèmes flous qui sont des approximateurs universels sont utilisés pour approximer le comportement dynamique non linéaire inconnu du système de puissance en utilisant les variables d'états mesurées directement comme des entrées.

Afin d'évaluer les performances du stabilisateur proposé face aux différents contingents

Couramment rencontrés dans le réseau, deux systèmes de puissance de Kundur, un réseau mono machine reliée à un jeu de barre infini (SMIB) et un le réseau test multi-machines comportant quatre machines et deux régions on fait l'objet de simulation pour différents points de fonctionnement.

Les résultats obtenus après élimination de défaut montrent que le stabilisateur proposé FUZZY-PSS assure une bonne tenue en stabilité et permet l'amortissement rapide et efficacité des oscillations locales et interzones. Les résultats obtenus sont comparés à ceux des stabilisateurs sans PSS (AVR-Gouverneur), et d'un stabilisateur de puissance conventionnel CPSS. Pour conclure, compte tenu des résultats obtenus, nous pouvons dire que le

stabilisateur par logique floue assure la robustesse tant en stabilité qu'en performance pour nombre de sévères conditions d'opérations.

Bibliographies

Bibliographie

[1] (Kamel SAOUDI,2014)

«Stabilisateurs intelligents des systèmes électro-énergétiques» Doctorat en Science de université Ferhat Abbas — Setif UFAS (ALGERIE).

[2](IEEE/CIGRE, 2004)

IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, « Definition and Classification of Power System Stability », IEEE Trans. On Power Systems, vol. 19, n°. 2, pp.1387-1401, May 2004.

[3] (Hasan ALKHATIB, 2008)

«Etude de la stabilité aux petites perturbation dans la grands réseaux électriques : optimisation de la régulation par une méthode metaheuristique,» Doctorat de l'université paul-Cézanne D'aix Marseille.

[4] (Djamel Eddine GHOURAF and Abdellatif NACERI, 2013).

Commande par PSS pour améliorer la stabilité du système électro-énergétique, Acta electrotechnica , Volume 54, Number 1, 2013.

[5] (Abdelwahab Smatti, 2012)

«Analyse de l'influence du PSS sur la stabilité du réseau électrique sous Matlab simulink» Mémoire de master de université Mohamed Kheider Biskra.

[6] (Kundur, 1994)

Kundur P., Power System Stability and Control. The EPRI Power System Engineering Series,McGraw-Hill. Inc.1994.

[7] (Custem, 2002, II)

Custem T.V., Systèmes électriques de Puissance II. Cours ELEC 047, Département d'Electricité, Electronique et Informatique : Institut Montefiore, Université de Liège, 2002.

[8] (Basler et al., 2005)

Basler M.J. and Schaefer, R.C., « Understanding power system stability », Proceedings of the58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 46-67, April 2005.

[9] (Anderson et al., 2003)

Anderson P.M. and Fouad A.A., Power System Control and Stability, IEEE. Press. 2003.

[10] (Gholipour Shahraki, 2003)

« Gholipour Shahraki E., Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques » Thèse de doctorat, Faculté des Sciences & Techniques, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2003.

[11] (CIGRE, 1999)

CIGRE Task Force 38.02.17, 1999, Advanced Angle Stability Controls, A Technical Brochure
for International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE),
December 1999.

[12] (Rabah BENABID, 2007)

« Optimisation Multi-objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Département Génie Electrique, Université Amar Telidji – Laghouat,.

[13] (M. Karim Sebaa, 2008).

«Commande intelligente pour l'amélioration de la stabilité dynamique des réseaux d'énergie électrique». Doctorat de Université des Sciences & des Technologies Houari Boumediene(USTH) ALGER.

[14] (Pal et al., 2005)

Pal B. and Chaudhuri B., Robust Control in Power Systems, Springer Science + Business Media, Inc, 2005.

[15] (Aström et al., 1995)

Aström K. and Hägglund T., PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, Instrument Society of America, 1995.

[16] (Allenbach, 2005, I)

Allenbach J.M., Systèmes Asservis, Volume 1, Asservissements linéaires classiques, Ecole d'Ingénieurs de Genève, 2005.

[17] (Yee et al, 2004)

Yee S.K. and Milanović J.V., « Comparison of the optimisation and linear sequential method for tuning of multiple PSSs ». IEEE Power Engineering Society, General Meeting Denver, CO, June. 2004.

[18] (DeMello et al., 1969)

DeMello F.P. and Concordia C, « Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control », IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-88, pp. 316–329, 1969.

[19] (IEEE, 2003)

IEEE Task Force on Power System Stabilizers, « Overview of Power System Stability Concepts», IEEE Trans. On Power Systems, pp. 1762-1768, 2003.

[20] (Anderson, 2006)

Anderson G., Modeling and analysis of Electric Power Systems, Lectures 227-526, EEH PowerSystems Laboratory, ETH, Zurich, March 2006.

[21] (Sauer et al., 1998)

Sauer P. and Pai M., Power System Dynamics and Stability, Upper. Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.

[22] (Farmer, 2006)

Farmer R.G., Power System Dynamics and Stability, The Electric Power Engineering Handbook, 2nd edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

[23] (IEEE, 2005)

IEEE, IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. USA, Std.421.5, 2005.

[24] (Neeraj gupta, 2008)

«fuzzy logic based power system stabilizer» Thesis submitted in partial fulfillment of the drivesuniversity patiala-14704.

[25] (Rogers, 2000)

Rogers G., Power System Oscillations. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts 2000.

[26] (Kundur et al., 1989)

Kundur P., Klein M., Rogers G.J. and Zywno M.S., « Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability », IEEE Transaction on Power System, vol. 4, n°.2, pp. 614-626. May, 1989.

[27] (Larsen et al., 1981, I)

Larsen E.V. and Swann D.A., « Applying power system stabilizers part-I: General concepts », IEEE Trans. Power App. Sys., vol.100, n°. 6, pp. 3017-3024, Jun. 1981.

[28] (Fleming et al., 1981).

Fleming R.J., Mohan M.A. and Parvatisam K., « Selection of parameters of stabilizers in multimachine power systems », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp. 2329-2333, 1981.

[29] (Yu, 1983)

Yu Yao-Nan, Electric Power System Dynamics, Academic Press 1983.

[30] (Yu, 1983)

Yu Yao-Nan, Electric Power System Dynamics, Academic Press 1983.

[31] ((Aboul-Ela et al., 1996).

Aboul-Ela M.E., Salam A.A., McCalley J.D. and Fouad A.A., « Damping Controller Design for Power System Oscillations Using Global Signals », IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, n°. 2, pp. 767-773, May 1996.

[32] (Sadicovic et al., 2006).

Sadicovic R., Anderson G. and Korba P., « Method for Location of FACTS for Multiple Control Objectives », X SEPOPE Conference, Brazil, May.

[33] (Larsen et al., 1981, I)

Larsen E.V. and Swann D.A., « Applying power system stabilizers part-I: General concepts», IEEE Trans. Power App. Sys., vol.100, n°. 6, pp. 3017-3024, Jun. 1981.

[34] (Fleming et al., 1981).

Fleming R.J., Mohan M.A. and Parvatisam K., « Selection of parameters of stabilizers in multimachine power systems », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp. 2329-2333, 1981

[35] (Pérez-Arriaga et al., 1982)

Pérez-Arriaga I.J., Verghese G.C. and Schweppe F.C., « Selective Modal Analysis with Applications to Electric Power Systems, Part I: Heuristic Introduction », IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 101, pp. 3117-3125, Sept. 1982.

[36] (Tse et al., 1988)

Tse C.T. and Tso S.K., « Design optimization of power system stabilizers based on model and eigenvalue-sensitivity analysis », IEE Proc. C. Gen. Trans. & Distrib., 135, (5), pp. 406-415, 1988.

[37] (Ostojic, 1988)

Ostojic D.R., « Identification of optimum site for power system stabiliser applications ». IEE Proc, Pt. C, vol. 135, n°. 5, pp. 416–419, September 1988.

[38] (Pagola et al, 1989)

Pagola F.L., Pérez-Arriaga I.J. and Verghese G.C., « On sensitivities, residues and participations: Applications to oscillatory stability and control », IEEE Trans. Power Sys., vol. 4, n°. 1, pp. 278–285, Feb. 1989.

[39] (Jin Lu et al., 1990)

Jin Lu, Hsiao-Dong Chiang and James S. Thorp, « Identification of optimum site for power system stabilizer applications », IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, n°. 4, pp. 1302-1308, November 1990.

[40] (Feliachi, 1990)

Feliachi A., « Optimal Siting of Power System Stabilizers », IEE Proceedings, Pt. C, vol. 137,n°.2, pp. 101-106, March 1990.

[41] (F.Ghevri, et F.Guély, 1998)

Cahier technique Schneider n° 191.«La logique floue».

[42] F. Chevrie, F. Guély

"La Logique Floue", Cahier technique N° 191, Collection Technique, Groupe Schneider.

[43] (Slimane Touil, 2010)

«Apport de PSS à la amélioration de la stabilité transitoire d'un système électro énergétique par différentes techniques avancées» Mémoire de magister, Centre universitaire d' eloued.

[44] (N.G. Hingorani,1993)

Flexible AC Transmission, IEEE spectrum, vol. 30, pp. 40-45, 1993.

[45] (Oualid Haga, Lazhari Chekima, 2012)

«L'effet de l'intelligence artificielle sur le système de puissance par rapport au conventionnel» Mémoire de Master ,Université El'oued.

[46] (Lamine Mili)

Opportunity study on the use of phasor measurement in an interconnected Power system,1997.

[47] (Olaf Samuelsson)

Power System Damping : Structural aspects of controlling active power, these à Lund, 1997

[48] (N.G. Hingorani)

Flexible AC Transmission, IEEE spectrum, vol. 30, pp. 40-45, 1993

[49] (J. Carpentier)

"Contribution à l'étude du Dispatching Economique", Bulletin Société Française Electriciens, Vol. 3, August 1962.

[50] (H. Shayeghi, A. Safari, et H.A).

Shayanfar, PSS and TCSC damping controller coordinated design using PSO in multi-machine power system, Energy Conv. Manage., vol. 51, pp. 2930– 2937, 2010.

[51](N.G. Hingorani,1993)

Flexible AC Transmission, IEEE spectrum, vol. 30, pp. 40-45, 1993.