

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



**Université Echahid Hamma Lakhdar-
El-Oued**
Faculté des Sciences et de Technologies



Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

**Étude de la stabilité d'un système
électro-énergétique par différentes
techniques avancées**

Diriger par :
Mr.Touil Slimane

Réaliser par :
Ben Abdelhamid Oualid
Daoudi Lakhdar

Année universitaire :

2014/2015

Remerciement

Nous remercions particulièrement notre promoteur **Mr. Touil Slimane**, pour son dévouement exceptionnel, sa précieuse directive et son suivi constant.

Nos sincères et chaleureux remerciement à **Haga Oualid** pour son aide, son appuis moral, et ses qualités humaines.

Nous remercions également **Lappi Moussab** pour son aide.

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

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

Dr et Mr : **Meada idris ,Lappi yacine,Kechida Reda,Zelouma laid,Mesbahi nedhir,Merrazga azeddine,Bekakra youcef,Allag abdelkrim,Guia housame,Ben Atous djelani,Gasmi.**

Dédicace

Nous consacrons ce modeste travail a:

Nos chers parents

Nos sœurs et nos frères

A toute la famille :Ben abdelhamid

A toute la famille :Daoudi

Tous nos amis

A tous mes camarades de la promotion 2013/2015
pour les bons moments passés ensemble.

Tous les enseignants qui m'ont aidé
de proche ou de loin.

Liste des figures

Figure. I.1. Système standard IEEE type SMIB avec commande d'excitation 20	20
du générateur synchrone puissant..... 20	20
Figure I.2. Classification des différents types de la stabilité de système électro-énergétique..... 22	22
Figure I.3. Variation d'angle de rotor..... 24	24
Cas 1 : instabilité de première oscillation. Cas 2 : instabilité de multi-oscillations..... 24	24
Figure 1.4. Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini..... 25	25
Figure I.5. Relation puissance- angle de rotor. 25	25
Figure I.6. Variation d'angle de rotor..... 26	26
Figure I.7. Courbes (a : puissance-angle) et (b : variation d'angle de rotor) du générateur suite à un défaut de transmission. 28	28
Figure I.8. Zone de la stabilité D..... 34	34
Figure I.9. Caractéristiques de la réponse indicielle d'un système. 36	36
Figure II.1. Circuit équivalent de la machine synchrone connectée a un jeu de barre infini..... 42	42
Figure II.2.Modèle classique de générateur..... 43	43
Figure II.3. La relation (puissance-angle) du générateur et le coefficient..... 44	44
de couple synchronisant..... 44	44
Figure II.4. Couple mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur. 45	45
Figure II.5. Schéma bloc du système (mono machine-jeu de barre infini) avec le..... 47	47
Modèle classique. 47	47
Figure II.6. Circuits équivalents relatifs de l'enchaînement du flux de la machine et courant. 48	48
Figure II.7. Représentation de schéma fonctionnel avec la constante E_{fd} 52	52
Figure II.8. Structure générale d'un système de force motrice-générateur..... 54	54
Figure II.9. Structure d'un système d'excitation statique avec son AVR..... 56	56
Figure II.10. système d'équitation statique (thyristor) avec AVR..... 57	57
Figure II.11. Représentation du schéma bloc avec l'excitateur et AVR..... 59	59
Figure II.12. Représentation du schéma bloc avec AVR et PSS. 60	60
Figure II.13. Système d'excitation statique avec AVR et PSS..... 61	61
Figure III.1. Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système. 67	67
Figure III.2. Modèle d'un PSS avance/retard..... 67	67
Figure III.3. Modèle de Heffron-Philips d'un système (mono-machine-jeu de barre infini) 69	69
Figure III.4. Déplacement de valeur propre par la rotation du résidu associé. 71	71
Figure III.5. L'ensemble (système-PSS) en boucle fermée. 73	73

Figure III.6. Représentation du réseau SMIB+PSS sur MATLAB/Simulink.....	75
Figure III.7. Présente la variation du position angulaire.	76
Figure III.8. Présente la variation de la vitesse angulaire.....	76
Figure III.9. Présente la variation du couple électrique.....	76
Figure III.10. Présente la variation de la tension terminale.	77
Figure III.11. Représentation du réseau SMIB+AVR sur MATLAB/Simulink.	77
Figure III.12. Présente la variation du position angulaire.....	78
Figure III.13. Présente la variation de la vitesse angulaire.....	78
Figure III.14. Présente la variation du couple électrique.....	78
Figure III.15. Présente la variation de la tension terminale.	79
Figure III.16. Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport la variation d'angle.	79
Figure IV.1. Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.....	85
Figure IV.2. Fonction caractéristique.	85
Figure IV.3. Fonction d'appartenance.....	86
Figure IV.4. Fonction d'appartenance, variable et terme linguistique.....	86
Figure IV.5. Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux	87
Figure IV.6. Fonction d'appartenance singleton.....	88
Figure IV.7. Fuzzification.....	88
Figure IV.8. Traitement flou.....	91
Figure IV.9. Implication.	93
Figure IV.10. Fuzzification.....	93
Figure IV.11. Activation.....	94
Figure IV.12. Implication.	94
Figure IV.13. Agrégation des règles.....	95
Figure IV.14. Défuzzification par centre de gravité.....	96
Figure IV.15. Structure de base d'un contrôleur flou.	97
Figure VI.16. Fonctions d'appartenance pour l'accélération.....	100
Figure VI.17. Fonctions d'appartenance pour la variation de vitesse.....	100
Figure VI.18. Fonctions d'appartenance pour la tension.....	100
Figure IV.19. Exécution de contrôleur de logique floue.	102
Figure IV.20. Représentation du réseau SMIB+FuzzyPSS sur MATLAB/Simulink.....	103
Figure IV.21. Présente la variation de la position angulaire1.....	104
Figure IV.22. Présente la variation de la vitesse angulaire.....	104
Figure IV.23. Présente la variation du couple électrique.....	104
Figure IV.24. Présente la variation de la tension terminale.....	105

Figure IV.25. Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport l'angle.	105
Figure IV.26. Présente la variation de la position angulaire.....	106
Figure IV.27. Présente la variation de la vitesse angulaire.....	106
Figure IV.28. Présente la variation du couple électrique.....	106
Figure IV.29. Présente la variation de la tension terminale.....	107
Figure IV.30. Présente la variation de la position angulaire.....	108
Figure IV.31. Présente la variation de la vitesse angulaire.....	108
Figure IV.32. Présente la variation du couple électrique.....	108
Figure IV.33. Présente la variation de la tension terminale.....	109
Figure IV.34. Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport l'angle.	109
Figure V.1. Représentation schématique des deux régions du système étudié.....	114
Figure V.2.Exemple mécanique analogue aux oscillations inter-régions.....	115
Figure V.3. Configuration d'un générateur équipé supplémentaire stabilisateur.....	116
Figure V.4. Représentation du réseau test sur MATLAB/Simulink.	117
Figure V.5. Présente la variation des tensions des bus(1 et 2)	117
Figure V.6. Présente la variation de Puissance active de ligne(B1 à B2).....	118
Figure V.7. Présente la variation des angles de rotors des générateurs vs G4.....	118
Figure V.8. Présente la variation de Vitesses angulaires des générateurs.	118
Figure V.9. Présente la variation des Puissances actives des générateurs.....	119
Figure V.10. Présente la variation des Tensions terminale des générateurs.....	119
Figure V.11. Présente la variation des tensions des bus(1 et 2)	120
Figure V.12. Présente la variation de Puissance active de ligne(B1 à B2).....	121
Figure V.13. Présente la variation des angles de rotors des générateurs vs G4.....	122
Figure V.14. Présente la variation de Vitesses angulaires des générateurs.	123
Figure V.15. Présente la variation des Puissances actives des générateurs.....	124
Figure V.16. Présente la variation des Tensions terminale des générateurs.....	125

Liste des tableaux

Tableau III.1. Comparaison des critères temporels instantanés du système avec et sans PSS.....	79
Tableau III.2. Comparaison des critères temporels intégraux du système avec et sans PSS.....	80
Tableau IV.1. Base de règles floues et base de règles classiques.	91
Tableau IV.2. Implication représentée en tableau.....	96
Tableau IV.3. Variables floues pour la fonction d'appartenance.	99
Tableau IV.4. Base de règles de contrôleur a logique floue.	101
Tableau IV.5. Comparaison des critères temporels intégraux	105
Tableau IV.6. Comparaison des critères temporels instantanés.....	109
Tableau IV.7. Comparaison des critères temporels intégraux.	110

Liste des notations

Acronymes:

SMIB	Single Machine Infinite Bus (machine unique reliée à un noeud infini)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, en français l' Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens.
CFF	Chemins de fer fédéraux suisses
IAE	Critère, Intégrale de l'Erreur Absolue (Intégral of Absolute Error)
ISE	Critère, Intégrale du Carrée de l'Erreur (Intégral of Square Error)
ITAE	Critère, Intégrale de l'Erreur Absolue pondérée par le Temps (Intégral 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
trapmf	Mode trapézoïdale
gaussmf	Mode gaussienne

gauss2mf Mode gaussienne

psigmf Mode sigmoïdes

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 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

Sommaire

Remerciement :.....	i
Dédicace :.....	ii
Liste des figures :.....	iii
Liste des tableaux :.....	vi
Notations :.....	vii
Résumé :.....	viii
Introduction générale :.....	xiv

Chapitre1 : Stabilisation d'un Système Électro-énergétique

I.1.Introduction :.....	18
I.2. Définitions:	19
I.2.1. Système électro-énergétique:	19
I.2.2. Réseau infini:.....	19
I.2.3. Synchronisme:	19
I.2.4. Stabilité d'un système électro-énergétique :	19
I.3.Description générale du système électro-énergétique étudiée :.....	19
I.4.Les causes d'instabilité:	20
I.5. Les différents types de stabilité :	21
I.5.1.La stabilité de l'angle de rotor :	23
I.5.1.1. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire) :	23
I.5.1.2. Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique) :.....	29
I.5.2. La stabilité de tension :.....	30
I.5.3. La stabilité de fréquence :	32
I.6.Introduction aux contrôleurs:	33
I.6.1. Nouveaux types de PSS:	33
I.7. Analyse de la performance et critères de bonne régulation :	33
I.7.1 Critères d'analyse du modèle linéaire :	33
I.7.2. Critères de simulation :	35
I.8. Conclusion :	39

Chapitre2 : Modélisation du Système Électro-énergétique

II.1.Introduction :	41
---------------------------	----

II.2. Modèle du générateur:	42
II.2.1.Équations électriques :	43
II.2.2.Équations mécaniques :	45
II.2.3.l'effet dynamique du circuit de champ :	48
II.3.Régulation du générateur :	53
II.3.1.Régulateur de fréquence et modèle de la turbine :	53
II.3.2.Régulateur de tension et modèle du système d'excitation :	55
II.4.Modèle de power system stabiliser PSS:	59
II.4.1.Modèle du système d'excitation avec PSS:	60
II.5.Conclusion :	63

Chapitre3 : Stabilisateur de puissance (PSS conventionnel)

III.1. Introduction :	65
III.2.Fonctionnement et modèle de PSS:	66
III.3.Réglage des paramètres de PSS:	69
III.3.1.Méthode de compensation de phase :	69
III.3.2.Méthodes du résidu :	71
III.3.3.Méthode de placement des pôles :	73
III.4. Emplacement optimal des PSSs:	74
III.5.Résultat et discussion :	75
III.5.1.Exécution du système étudié avec PSS :	75
III.5.2.Etude comparative entre la mise en œuvre du système étudié avec, et sans PSS :	77
III.6. Conclusion :	81

Chapitre4 : PSS a basé sur la logique floue

IV.1.Introduction :	83
IV.2.Apparition de la logique floue :	84
IV.3.Utilisation de la logique floue pour le contrôle :	84
IV.4.La théorie des ensemble floue :	84
IV.4.1.Notion d'appartenance partielle :	84
IV.4.2.Fonction d'appartenance (FA) :	85
IV.4.2.1.Fuzzification "Degré d'appartenance" :	88
IV.4.3.Opérateurs logiques flous :	88
IV.4.3.1.Choix des opérateurs :	89
IV.4.4.Règles floues :	90

IV.4.4.1.La logique floue et l'intelligence artificielle :	90
IV.4.4.2.Mécanisme d'inférence de Mamdani :	92
IV.4.4.3.Défuzzification :	95
IV.4.4.4.Règles « libres » et « en tableau » :	96
IV.5.Contrôleur flou :	97
IV.5.1.Les différentes étapes de la commande floue :	97
IV. 6.PSS basés sur la logique floue :	98
IV.6.1. Sélection de variables d'entrée et de sortie :	98
IV.6.2.Fonction d'appartenance :	99
IV.6.3. La base de règles floues :	100
IV.6.4.Défuzzification :	101
IV.6.5.la mise en œuvre de la logique floue :	102
IV.7.Résultat et discision :	103
IV.7.1.Exécution du système avec les différents fonctions d'appartenances :	103
IV.7.2.Étude comparative entre la mise en œuvre du système aux différentes cas :	107
IV 8.Conclusion :	111

Chapitre5 : Stabilisation d'un Système multi-machines

V.1.Introduction :	113
V.2. Description du réseau étudié :	114
V.3. Amortissement des oscillatoires inter-régions:	114
V.4.. Intérêt de l'amortissement des oscillations inter-régions:	116
V.5. Résultats de simulation et discision :	116
V.5.1. Système sans stabilisateur :	117
V.5.2. Evaluation de performance et comparaison :	119
V.5.2.1. Résultats de simulation:	120
V.6.Conclusion :	127
Conclusion générale :	128
Bibliographie:	130

Résumé :

Un système électro énergétique consisté d'une machine synchrone lié par une ligne de transmission à un jeu de barre infini est une source d'énergie électrique souvent soumis à de petites perturbations lors de variations brusques de la charge ou lors de l'occurrence de défauts sur le réseau. Le problème de stabilité des systèmes électro- énergétique sont principalement ceux des machines synchrones fournissant la quasi-totalité de cette énergie

Le régulateur automatique de tension *AVR* et le régulateur de vitesse ou Gouverneur sont les deux compensations conventionnelles des réseaux électriques. Ceux deux régulateurs sont conçus Séparément pour différent plages de fréquences. Ils fonctionnent donc de façon non coordonnées. La sortie du régulateur de tension dépend uniquement de la tension terminale et agit sur l'excitation du générateur tandis que celle du Gouverneur est fonction uniquement de la vitesse de rotor et actionne indirectement l'ouverture du vannage de la turbine. Il est désormais indésirable que cette structure est incapable d'assurer de façon efficace la stabilité de réseau. Elle ne pas amortir les oscillations interzones.

Le *AVR* et Gouverneur ne peuvent donc pas garantir à eux seuls le bon fonctionnement des réseaux électriques sans l'aide d'un stabilisateur. Ce dernier appelé stabilisateur de puissance *PSS* ajoute un amortissement supplémentaire à traverse l'excitations. Cette nouvelle structure a une meilleure performance et amortit relativement bien les oscillations locales et interzones.

La techniques de détermination de paramètres de *PSS* et le caractère linéaire de ce dernier ne garantissent pas une bonne performance sur toute la plage de fonctionnement du réseau.

Plusieurs travaux ont alors été proposés en vue d'accroître la performance de l'ensemble *AVR*, Gouverneur et *PSS*. Ils consistent à l'amélioration de la conception du *PSS* par l'application des techniques modernes.

L'objectif de ce travail est de proposer des méthodes robustes pour améliorer la stabilité d'un système électro-énergétique à l'aide des :

- Stabilisateurs de puissance conventionnel « *PSS* ».
- Logique floue « *FUZZY* ».

Introduction générale :

Depuis une vingtaine d'années, les systèmes électro-énergétiques doivent faire face à des défis très importants. La libération du marché de l'électricité crée des scénarios de fonctionnement beaucoup plus complexes que par le passé. L'augmentation permanente de la dépendance électrique de la société moderne implique un fonctionnement des systèmes électro-énergétiques à 100% de leur capacité et une sûreté maximale. En outre, la qualité de la puissance électrique est devenue actuellement un grand souci pour les consommateurs et les fournisseurs. Par conséquent, des critères rigoureux de développement et de fonctionnement sont de plus en plus exigés.

Dans ces conditions, la stabilité des systèmes électro-énergétiques devient une des préoccupations majeures pour les fournisseurs d'électricité. Ces systèmes doivent rester stables pour toutes les petites variations au voisinage des points de fonctionnement ainsi que pour des conditions sévères. Les nouvelles méthodes et les nouvelles technologies permettant d'améliorer la stabilité des systèmes font par conséquent l'objet de travaux de recherche extrêmement important.

Plusieurs des méthodes modernes ont déjà fait l'objet d'applications industrielles dans des domaines de pointe tels que l'aéronautique et la robotique. On est alors en droit de s'interroger sur leur efficacité quant au problème de 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 sont caractérisées par un échange faiblement amorti de puissance électrique entre deux ou plusieurs zones du réseau.

Le AVR et le Gouverneur ne peuvent donc pas garantir à eux seuls le bon fonctionnement des réseaux électriques sans l'aide d'un stabilisateur. Ce dernier communément appelé Stabilisateur de Réseaux Électriques (*PSS*) ajoute un amortissement supplémentaire à travers l'excitation du générateur à partir de l'erreur de vitesse ou de la variation de la puissance électrique. Il ajoute donc une boucle indépendante supplémentaire.

Cette nouvelle structure a une meilleure performance et amortit relativement bien les oscillations locales et inter zones. Cependant, Le *PSS* et le AVR agissent simultanément, de façon indépendante et non coordonnée sur l'excitation du générateur. Un compromis est donc effectué afin d'assurer le bon fonctionnement de l'ensemble. Ainsi, Avec l'ajout du *PSS*, on note généralement une certaine détérioration de la qualité de la régulation de tension.

Une autre méthode de *PSS* basé sur la logique floue. Ceci est due à la possibilité d'introduire des connaissances exprimées sous forme de règle d'inférence pour déterminer les fonctions d'appartenances, on se basent sur l'expérience humaine dans le domaine. En particulier, l'application de théorie des ensembles flous dans la commande des processus. Par simulation, nous allons visualiser et comparer le temps d'atténuation des oscillations liées aux systèmes électrique (machine synchrone reliées à un réseau infini) quand ils sont soumis à une perturbation, donc voir l'effet de l'intelligence artificielle sur le système par rapport au conventionnel, c'est-à-dire l'amélioration davantage de la stabilité du système de puissance.

Le *PSS* et logique floue sont toujours considérés comme un moyen efficace pour l'amortissement des modes électromécaniques locaux, mais en même temps son rôle dans l'amortissement des modes interrégionaux reste toujours considéré comme faible. L'objectif de notre travail est ainsi d'assurer un amortissement maximum des modes interrégionaux aussi bien que des modes locaux. Pour atteindre cet objectif, nous proposons un réglage optimal des *PSS* et logique floue « *FUZZY* ». Ceci permet d'assurer un amortissement satisfaisant des oscillations rotoriques et de garantir la stabilité globale du système pour différents points de fonctionnement[1].

Notre thème est composé de cinq chapitres :

- Le premier chapitre donne, au début, les différentes définitions de base puis l'étude d'un système électro-énergétique constitué d'une machine synchrone liée par ligne de transmission à un jeu de barres infini, les différents types de stabilité et introduction aux contrôleurs *PSS*, et leurs nouveaux types, dans la fin du chapitre on a analysé de la performance et critères de bonne régulation.
- Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation du système électro-énergétique et modèle de *PSS*(Power System Stabilizer) pour les études de la stabilité angulaire.
- Le troisième chapitre concerne une présentation théorique et la fonctionnement du stabilisateur *PSS*, En outre, Le réglage de paramètres des *PSSs* et leurs emplacements sont des facteurs critiques pour pouvoir assurer convenablement le bon fonctionnement des *PSSs*.
- Le quatrième chapitre concerne une présentation théorique de la logique floue qui est une méthode basé sous forme de règles d'inférence pour assurer une bonne amélioration de la stabilité de système électro-énergétique.

- Enfin, le cinquième chapitre, nous abordâmes à problème de la stabilité transitoire dans les systèmes multi-machines par méthodes *PSS* et logique floue « *FUZZY* », et on conclure qui le *FUZZY* est meilleur méthode pour assurer une bonne amélioration de la stabilité de système multi-machines.

Chapitre 1

Stabilisation d'un Système Électro-énergétique

I.1.Introduction :

Les systèmes électriques ont connu ces dernières décennies des développements considérables. Leur fonctionnement et leur exploitation sont devenus de plus en plus complexes. La stabilité d'un système électro-énergétique est un facteur essentiel pour préserver le matériel et assurer la continuité du service. Le régime de fonctionnement doit rester stable en marche normale ainsi que pendant les périodes troubles dues aux modifications aléatoires dans la topologie du système. Ces modifications peuvent être des charges, des défauts, ...etc.

Les perturbations peuvent entraîner la rupture de synchronisme entre une machine et le réseau , ou des oscillations entre machine. Les perturbations sont à l'origine de l'apparition d'une différence entre la puissance mécanique (la production) et la puissance électrique (la consommation) .

L'écart en termes de puissance va se traduire par une modification de la vitesse de rotation de l'alternateur ou en d'autres termes par des variations de sa vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Dans ce cas, nous pouvons faire intervenir les stabilisateurs après l'élimination de la perturbation et le réseau sera stabilisé. Nous pouvons définir trois types de stabilité : la stabilité dynamique, la stabilité statique et la stabilité transitoire[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. Définitions:

I.2.1. Système électro-énergétique:

On appelle un système électro-énergétique un ensemble d'installations électriques destinées à produire, transporter et à la fois distribuer l'énergie électrique aux consommateurs.

I.2.2. Réseau infini:

Un réseau est dit infini ou de grande puissance lorsque sa tension et sa fréquence sont fixes et une perturbation sur une machine n'affecte pas le réseau.

I.2.3. Synchronisme:

On dit qu'une machine fonctionne en synchronisme, si sa fréquence est égale à la fréquence de réseau. On dit qu'un système fonctionne en synchronisme, si toutes les machines reliées à ce réseau ont la même fréquence du réseau[1].

I.2.4. Stabilité d'un système électro-énergétique :

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 électro-énergétique étudié :

Un réseau SMIB (Single Machine Infinity 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 Infinity Bus System) avec la commande d'excitation du Générateur Synchrone Puissant (*GSP*) [4].

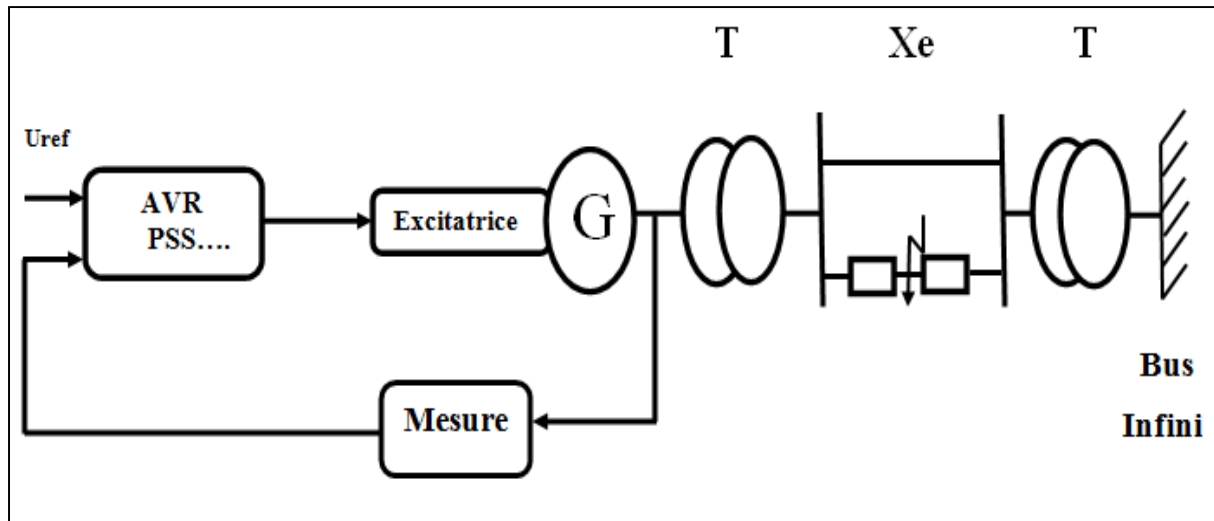


Figure. I.1. Système standard *IEEE* type *SMIB* avec commande d'excitation du générateur synchrone puissant.

1.4. Les 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.

Ces trois causes sont des causes initiales, il y a des autres causes comme la perte d'un générateur, le vieillissement des équipements, l'insuffisance de réserve de puissance réactive, peuvent aussi parfois être causes initiales.

Exemples :

Panne de courant nord américaine de 2003 : Son origine provient essentiellement de l'arrêt de plusieurs centrales électriques les 12 et 13 août, ainsi que la coupure de plusieurs lignes de 345V dans l'Ohio, par négligence de la société First Energy. Par effet de cascade en cette période de forte consommation, la panne s'étend en quelques heures sur 256 centrales électriques.

Panne suisse du 22 juin 2005 sur le réseau ferroviaire : Un court-circuit s'est produit à 17h08 sur une ligne de transport de CFF entre Amsteg et Rotkreuz, ce qui a conduit au décrochement de plusieurs centrales électriques et a provoqué une réaction en chaîne, ont annoncé jeudi 23 juin les CFF.

Blackout en Algérie le 03 février 2003 à 17h04 : Un manque général de tension a touché le réseau interconnecté nord du système électrique algérien, entraînant la coupure de l'alimentation de l'ensemble de la clientèle raccordée au réseau Nord du pays, durant une période comprise entre 12 minutes et 4 heures 30 minutes. Cet incident avait pour causes une succession d'événements avec à l'origine le déclenchement de deux groupes turbines à gaz à 350MW par manque de pression (dysfonctionnement du poste gaz).

L'incident s'est produit au moment de la demande maximale de charge en soirée, moment où le système production-transport fonctionnait à sa limite et sans réserve de production avec des transits maximums sur certaines lignes de transport.

I.5. Les 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].

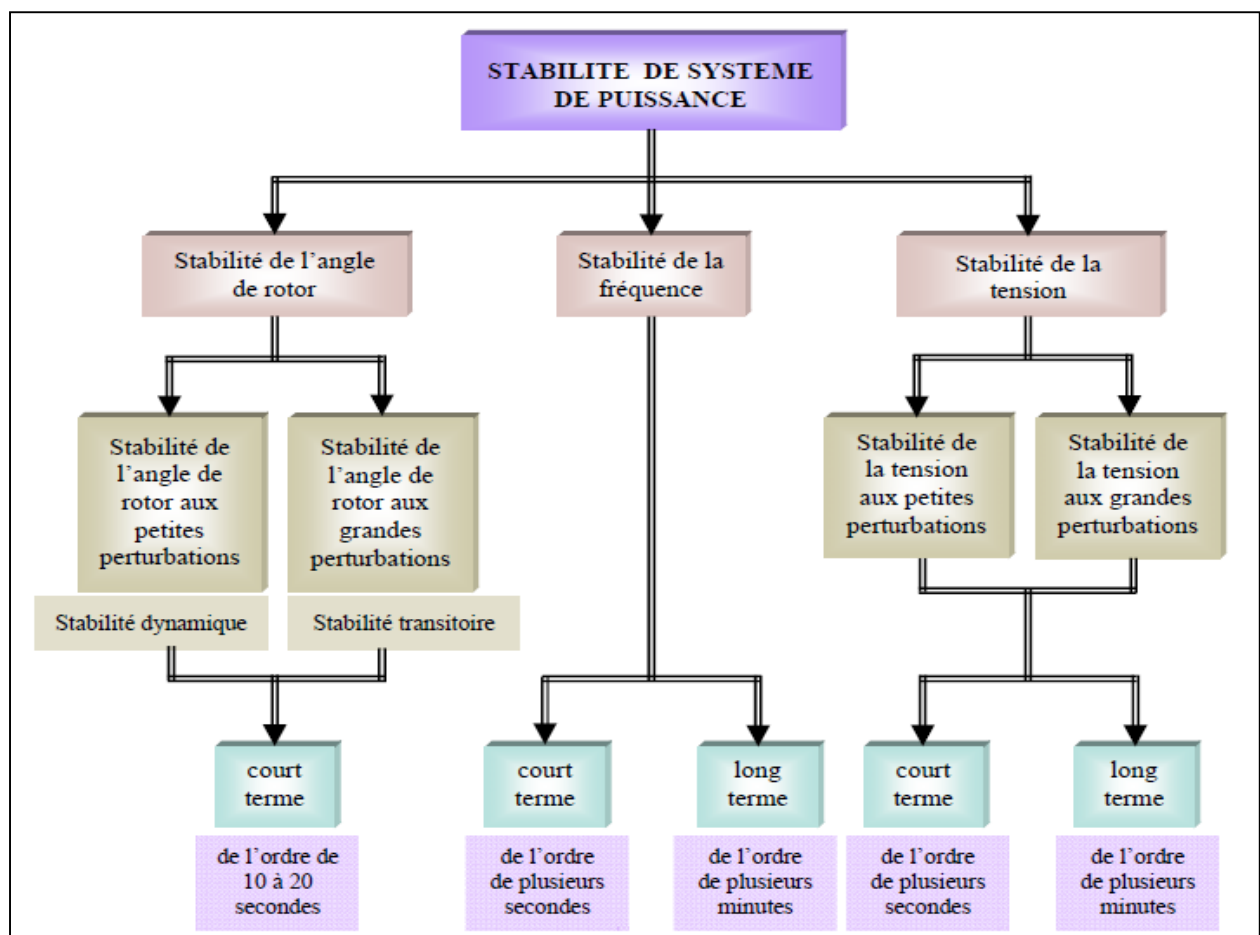


Figure I.2. Classification des différents types de la stabilité de système électro-énergétique.

I.5.1. La 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 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 évoluer 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 grandes perturbations (stabilité transitoire) :

« Elle concerne la capacité du système de puissance de maintenir le synchronisme après avoir subi une perturbation sévère transitoire tel un court-circuit sur une ligne de transmission ou

une perte d'une partie importante de la charge ou de la génération. La réponse du système implique de grandes variations des angles de rotor. Elle dépend de la relation non-linéaire couples- angles ».

La stabilité transitoire dépend non seulement de l'amplitude des perturbations et du point de fonctionnement initial mais elle dépend également des caractéristiques dynamiques du système. Elle se manifeste à court terme sous forme d'un écart croissant de façon aperiodique de certains angles de rotor. Si l'instabilité se manifeste directement suite à la perturbation (plus précisément dans la première seconde qui suit l'élimination du défaut), elle est appelée instabilité de première oscillation (First Swing Instability), (cas 1, figure (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].

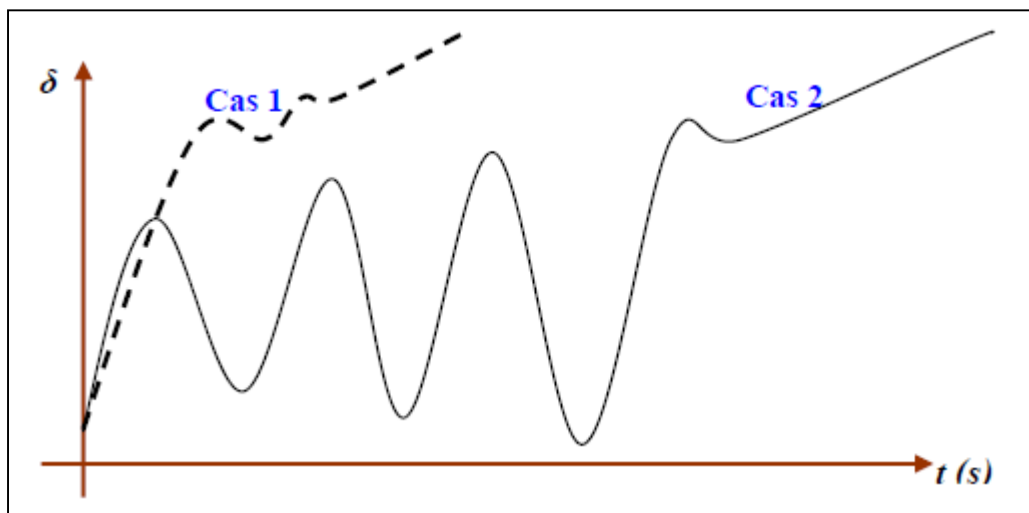


Figure I.3. Variation d'angle de rotor.

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 $(P - \delta)$ 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 .

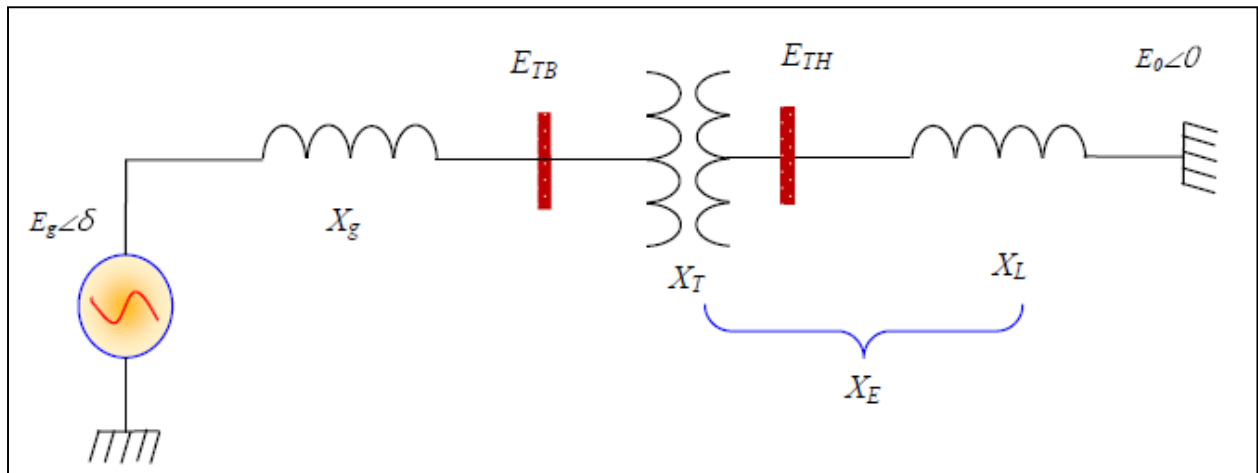


Figure 1.4. Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini.

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).

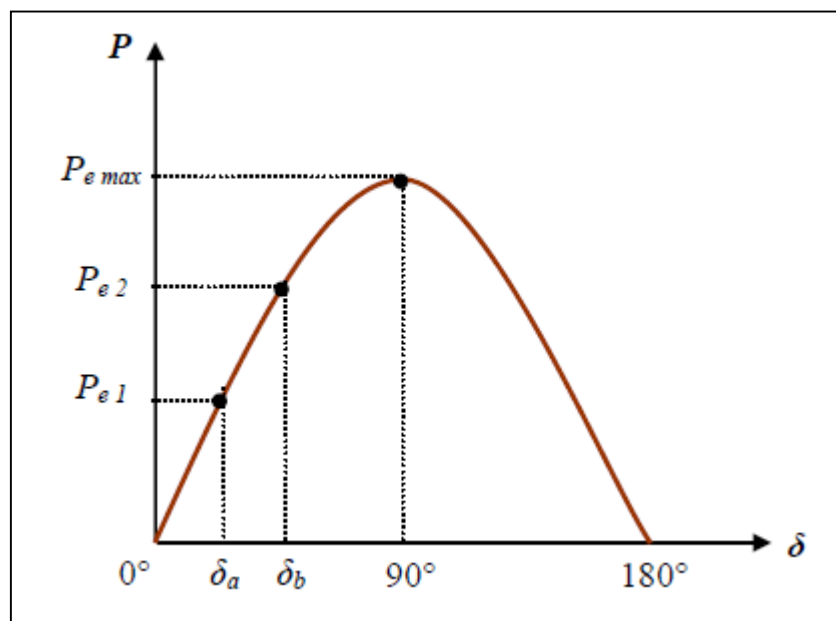


Figure I.5. Relation puissance- angle de rotor.

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].

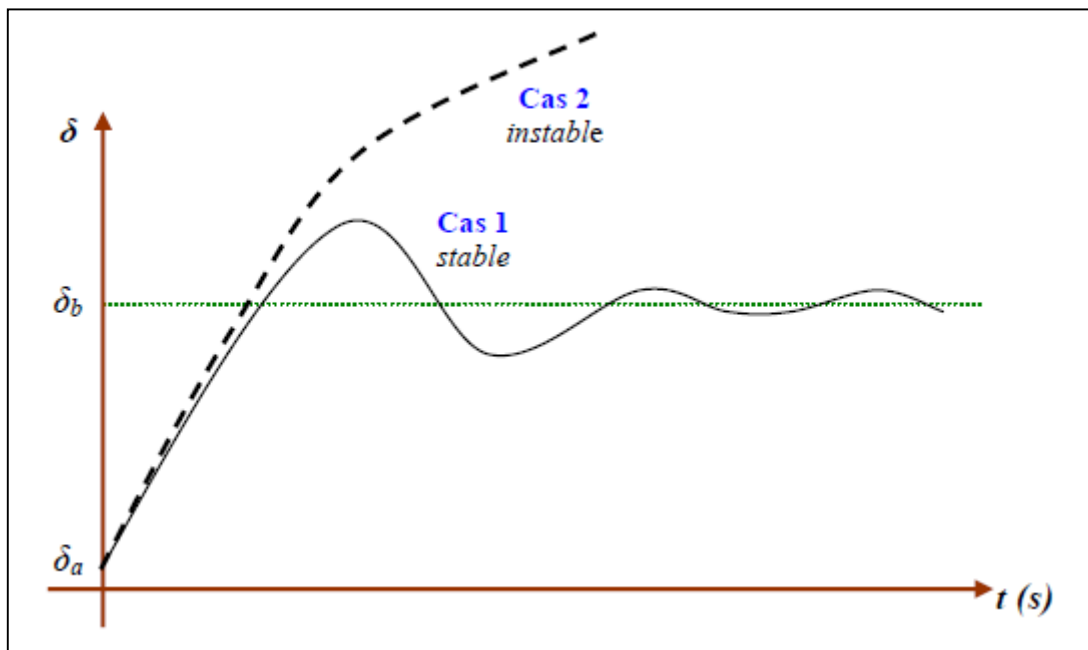


Figure I.6. Variation d'angle de rotor.

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 $(P - \delta)$ 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 :

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

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 :

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

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 $cte = 0$.

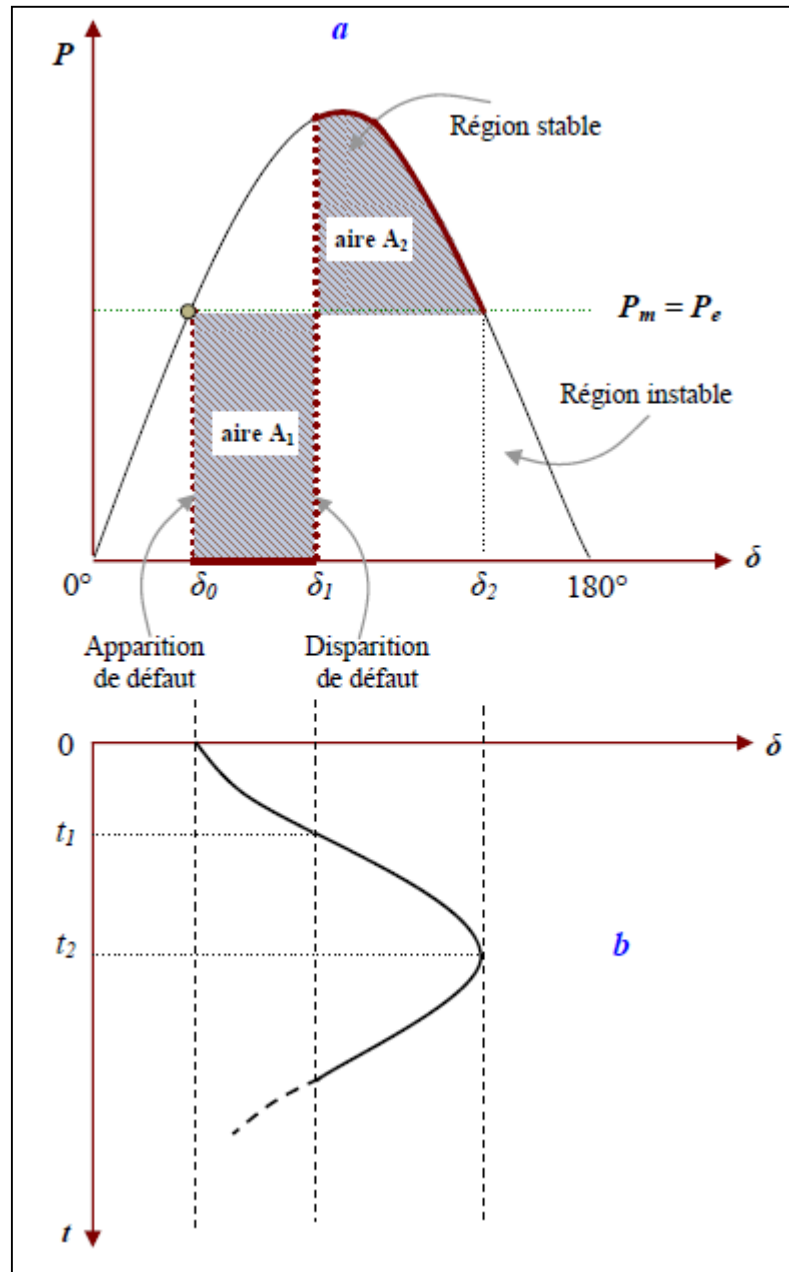


Figure I.7. Courbes (**a** : puissance-angle) et (**b** : variation d'angle de rotor) du générateur suite à un défaut de transmission.

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 (91) s'écrit comme suit :

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

$$\Rightarrow \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (I.5)$$

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

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

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.5.1.2. 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 »

La stabilité aux petites perturbations dépend du point de fonctionnement d'équilibre initial du système ainsi que des caractéristiques dynamiques du système. Contrairement à la stabilité transitoire, elle ne dépend pas de niveaux de perturbations, car celles-ci sont arbitraires et infiniment petites [7].

La relation puissance-angle (I.1) est une relation non-linéaire en sinus. Mais pour des petites perturbations, la variation de puissance reste approximativement proportionnelle à la variation de l'angle δ . Des exemples typiques des petites perturbations peuvent être donnés par des variations de niveau de 10 % de la puissance mécanique appliquée à une machine du système ou sur sa charge,... [9].

La stabilité transitoire, comme nous l'avons vu, est associée à la présence d'un couple synchronisant suffisant, immédiatement après la perturbation. Si le système est transitoirement stable, la stabilité aux petites perturbations sera associée à la présence d'un couple d'amortissement à la suite de la première oscillation. Si ce couple est suffisant, les oscillations s'amortiront (amortissement positif). Par ailleurs, si l'amortissement n'est pas suffisant, les oscillations vont continuer, ou même elles vont augmenter (amortissement négatif c.-à-d. manque de couple d'amortissement).

La perte de synchronisme peut avoir lieu entre une machine et le reste du système (provoquant une instabilité locale), ou bien entre des groupes des machines, dans lesquels chaque groupe peut garder son synchronisme (désignant une instabilité globale).

L'instabilité aux petites perturbations se manifeste à court terme, la gamme de temps associée étant de l'ordre de 10 à 20 secondes.

I.5.2. La 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 ».

Suite à une perturbation, certaines charges ont tendance à restaurer la puissance consommée avant perturbation. C'est le cas des moteurs asynchrones, des charges dont la tension est contrôlée par un régulateur en charge automatique, des chauffages électriques commandé par thermostat, Il existe une puissance maximale transmissible entre les centres de production et ceux de consommation. Cette puissance maximale disponible dépend non seulement des caractéristiques du réseau de transport (distances électriques) mais également de celles des générateurs (possibilité de maintenir la tension grâce à une réserve de puissance réactive suffisante). Par conséquent, si la puissance que les charges tendent à restaurer devient supérieure à la puissance maximale transmissible, le mécanisme de restauration des charges va contraindre le réseau haute tension en augmentant la puissance réactive consommée et en faisant donc baisser progressivement la tension du réseau jusqu'à des valeurs inacceptables . Généralement, l'instabilité de tension se produit lorsqu'une perturbation entraîne une augmentation de puissance

réactive demandée au-delà de la puissance réactive possible. Plusieurs changements dans le système de puissance peuvent contribuer à l'instabilité de tension, ce sont par exemple :

- une augmentation de charge.
- des générateurs, des condensateurs synchrones, ou des SVCs (Static Var Compensator systèmes) qui atteignent les limites de puissance réactive.
- une tentative d'un régulateur automatique en charge ayant échoué de restaurer la tension de charge à son niveau initial avant la perturbation.
- une panne de générateur, une perte d'une charge importante ou un déclenchement de ligne.
- une perte d'une source de puissance réactive (condensateurs, machines synchrones,...).

La plupart de ces changements ont des effets significatifs sur la production, la consommation et la transmission de puissance réactive, ainsi sur la stabilité de tension. Par conséquent, des mesures peuvent être utilisées pour améliorer la stabilité de tension, tels [12]:

- un contrôle automatique des condensateurs shunts.
- un blocage des régulateurs en charge automatique.
- une nouvelle répartition de la génération.
- une replanification du fonctionnement des générateurs et des nœuds de commande.
- une régulation de tension secondaire.
- un plan de délestage.

La gamme de temps de l'instabilité de tension s'étend de quelques secondes à plusieurs minutes. Ainsi, l'instabilité de tension peut être considérée comme un phénomène à court terme (de l'ordre de plusieurs secondes) ou, dans l'autre cas limite, comme un phénomène à long terme (de l'ordre de plusieurs minutes).

Pour l'instabilité de tension à court terme l'effondrement de tension se produit immédiatement après la perturbation. Dans ce type d'instabilité, les charges et les dispositifs, qui ont des caractéristiques spéciales de puissance réactive tels les moteurs asynchrones sont souvent impliqués. Les moteurs asynchrones consomment, juste après la perturbation, beaucoup de puissance réactive pour assurer leur stabilité vis-à-vis leurs charge. D'autres éléments peuvent aussi participer à cette instabilité : les charges commandées électroniquement, les convertisseurs HVDC ,... .

L'instabilité de tension à long terme se développe lors d'un manque graduel de puissance réactive d'un nœud ou une partie du système. Elle implique, quant à elle, des équipements ayant

une action plus lente tels les régulateurs en charge automatique, les charges commandées thermostatiquement,...

Il est aussi important de noter que l'instabilité de tension ne se produit pas toujours toute seule. Souvent, l'instabilité de tension et l'instabilité de l'angle de rotor se produisent ensemble, l'une pouvant entraîner l'autre.

Enfin, la stabilité de tension 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 [13].
- Stabilité de tension aux petites perturbations. Dans ce cas, les caractéristiques de la charge et des dispositifs de commande déterminent la capacité du système à maintenir les tensions équilibrées.

I.5.3. La 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 ».

Le maintien de la fréquence à une valeur nominale dans un système de puissance est lié à l'équilibre global entre les puissances actives produites et consommées (y compris les pertes). Autrement dit, suite à certaines perturbations, l'équilibre global des puissances produite consommée peut être déséquilibré : ce déséquilibre entraîne alors une variation de fréquence.

L'énergie cinétique stockée dans les pièces tournantes des machines synchrones et autres machines électriques tournantes peut éventuellement compenser ce déséquilibre. Si ce dernier n'est pas trop grand, les générateurs participant à la commande de fréquence régleront la puissance active fournie à travers leurs réglages secondaires fréquence-puissance et ramèneront ainsi l'écart de fréquence à des valeurs acceptables. Par ailleurs, si le déséquilibre est trop grand, l'écart de fréquence sera significatif avec des graves conséquences (effondrement complet du système), [14].

Lorsque la fréquence varie, les caractéristiques de temps des processus et des différents dispositifs activés vont varier de quelques secondes à quelques minutes. La stabilité de fréquence peut donc être classifiée en phénomènes à court terme et à long terme.

Dans un grand système de puissance et suite à un incident sévère et, par la suite, à l'action de protections (par exemple, un déclenchement de plusieurs lignes de transmission), l'instabilité de la fréquence est généralement associée à l'îlotage où un scénario typique peut avoir lieu. Un ou plusieurs sous-réseaux se retrouvent isolés du reste du système. Les générateurs de chaque sous-réseau résultant essaient de garder le synchronisme entre eux, mais la réserve tournante est nettement insuffisante pour faire face à la charge connectée au sous-réseau. La fréquence décroît ainsi rapidement et l'instabilité produite est donc à court terme.

L'instabilité de fréquence peut également se manifester à long terme, lorsqu'elle provient d'une mauvaise réponse en puissance des centrales ou d'une mauvaise coordination entre des régulations et protections [7].

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[15].

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[15]:

- 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 essais de particules (swarm intelligence based PSS).
- PSS hybrides.

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

I.7.1 Critères d'analyse du modèle linéaire :

Rappelons que le facteur d'amortissement B d'un mode représente par sa valeur propre complexe C est donne par :

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (I.7)$$

Avec : $\lambda = \sigma \pm j\omega$

- Un facteur d'amortissement B important aboutit à une réponse dynamique bien amortie. Pour cela, toutes les valeurs propres doivent se trouver dans la zone gauche du plan complexe limite par deux demi-droites issues de l'origine. Pour une valeur critique du facteur d'amortissement ξ_{cr} : on impose alors une marge de stabilité relative[16].
- La partie réelle de la valeur propre D détermine la rapidité de décroissance/croissance des exponentielles composant la réponse dynamique du système. Ainsi, σ très négatif aboutit à une réponse dynamique rapide. Pour cela, toutes les valeurs propres doivent se trouver dans la zone gauche du plan complexe limite par une verticale passant par une valeur critique de la partie réelle σ_{cr} : on définit ainsi la marge de stabilité absolue.

Lors du réglage des paramètres des PSSs, il est souhaitable que ces deux critères soient pris en compte pour permettre une bonne régulation. La combinaison entre ces deux critères aboutit à une zone appelée zone de stabilité D [17], figure (I.8). Le déplacement des valeurs propres dans cette zone garantit une performance robuste pour un grand nombre de points de fonctionnement[18].

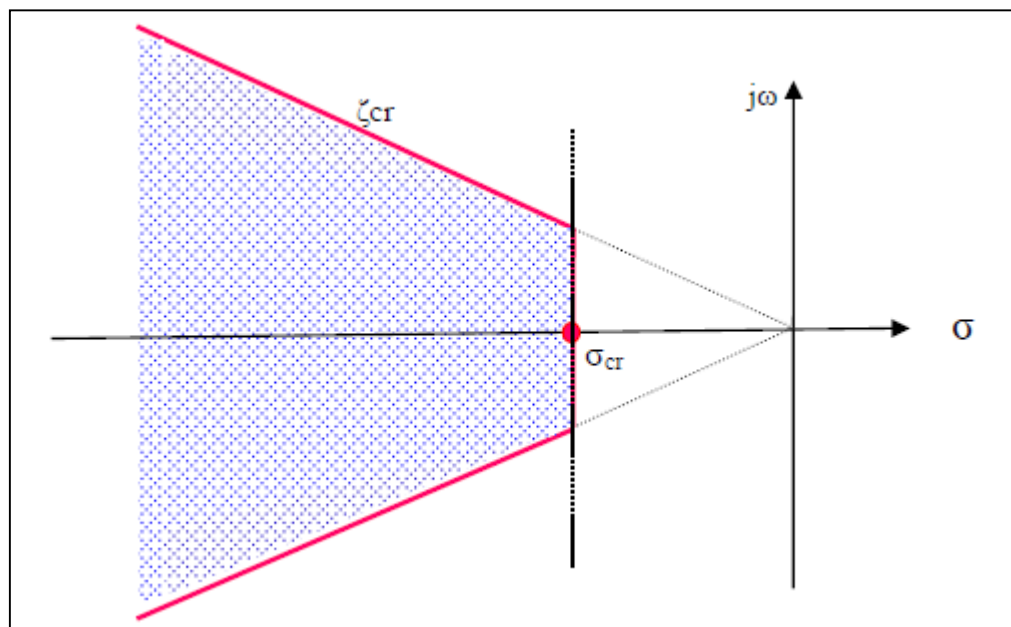


Figure I.8. Zone de la stabilité D .

Considérons par exemple un mode d'une fréquence naturelle de 1HZ , les oscillations associées à ce mode s'amortissent en 13 secondes pour $\xi = 0.05$ et en 6.5 et 3 secondes pour $\xi = 0.1$ et $\xi = 0.2$ respectivement. Quelle est alors la valeur minimale adéquate d'amortissement pour un bon fonctionnement du Système de puissance ?

La littérature ne présente pas de valeurs critiques rigoureuses admises par tous. Généralement, un facteur d'amortissement de 0.05 n'assure qu'une petite marge de sécurité tandis que $\xi = 0.03$ doit être accepté avec réserve. Les valeurs d'amortissement entre 0.05 et 0.15 sont globalement les plus utilisées dans la littérature. Nous avons choisi $\xi_{cr} = 0.1$ comme facteur d'amortissement critique. Ainsi, nous considérons que l'amortissement des oscillations est suffisant si tous les modes du système présentent des facteurs d'amortissement plus grands que ξ_{cr} .

D'une façon similaire, la littérature donne une gamme de variation de la valeur critique de la partie réelle des valeurs propres, comprise entre de -0.5 et -1 . Nous avons choisi $\sigma_{cr} = -1$ comme partie réelle critique à respecter par tous les modes.

Enfin, d'autres spécifications peuvent être utilisées telles les spécifications de la réponse du système dans le domaine temporel (le dépassement maximum, le temps d'établissement, l'erreur statique, ...)[17].

I.7.2. 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[19].

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 $IAE, ISE, ITAE, \dots$) peuvent être utilisés comme indicateurs de performance des boucles de régulation[20].

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.9) [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 :

$$D_p \% = \frac{y_{\max} - y_f}{y_f} \cdot 100 \quad (1.8)$$

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

$$D_p = \frac{\pi \xi}{e \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (1.9)$$

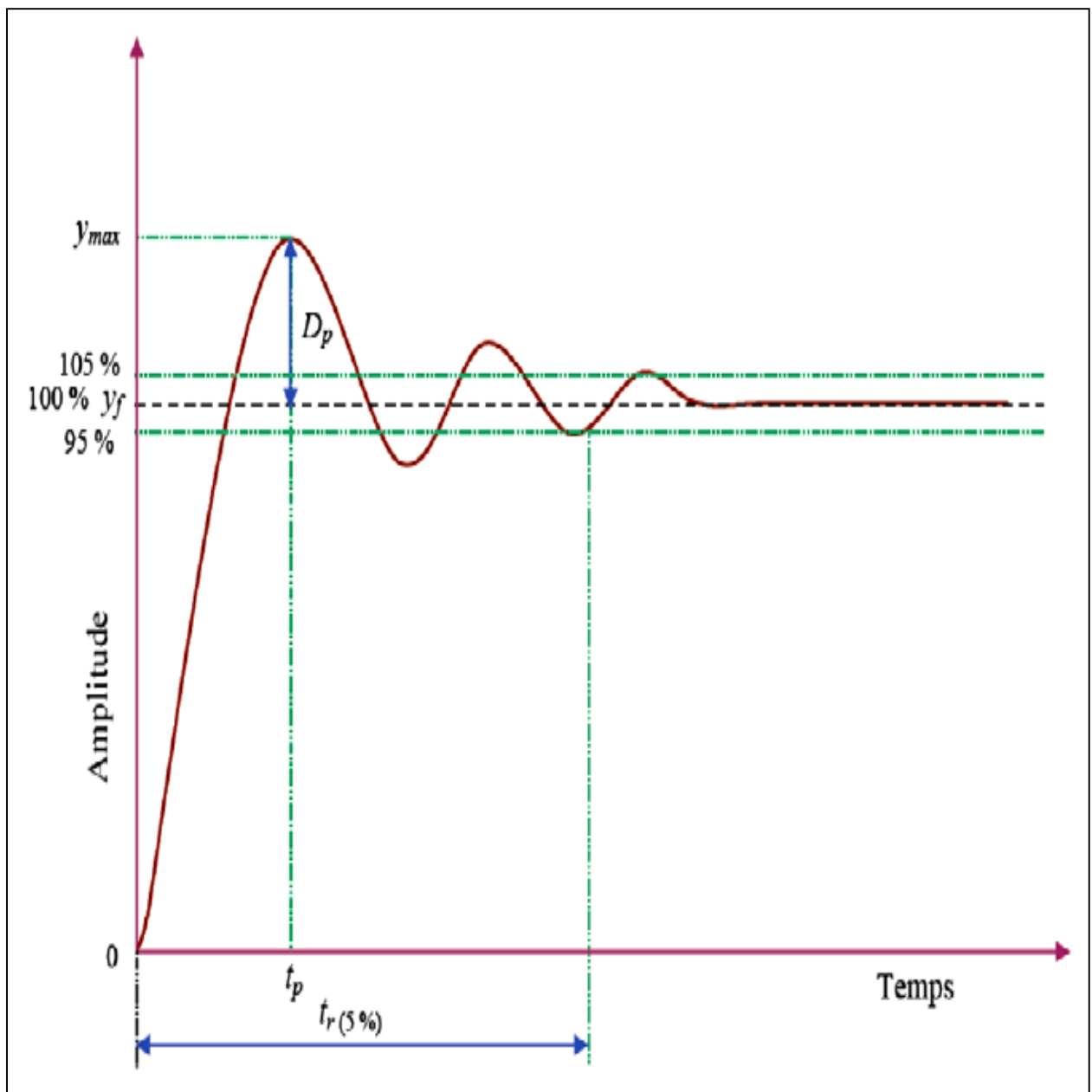


Figure I.9. Caractéristiques de la réponse indicielle d'un système.

➤ **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 :

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

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[19].

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 :

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

Étant donné que ce critère prend en compte tous les éléments de la réponse harmonique, il donc

important lorsque la réponse du système est oscillatoire ; les faibles amortissements ne sont pas ainsi conseillés.

➤ **Critère *ISE*, Intégrale du Carrée de l'Erreur (Integral of Square Error) :**

Le critère de performance est alors le suivant :

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

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 :

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

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 présente les définitions et les caractéristiques des différents types de stabilité d'un système électro-énergétique.

Le concept général de la stabilité peut se synthétiser en trois groupes :

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

L'amélioration de la stabilité angulaire par les régulateurs, en particulier *PSS* est donc devenue un objectif prioritaire : elle sera développée dans les suivants chapitres.

Chapitre 2

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[18].

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 du générateur:

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 f_{em} de courant alternatif est donc induite dans le stator[3].

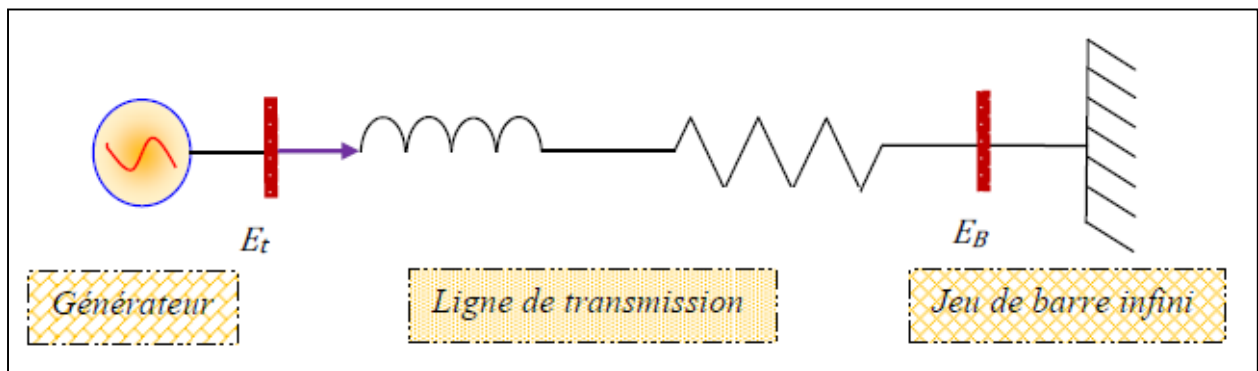


Figure II.1. Circuit équivalent de la machine synchrone connectée à un jeu de barre infini.

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)

E' : f_{em} du générateur induite.

E_B : La tension du jeu de barre infini.

X : Réactance synchrone et réactance transitoire.

δ : 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 $f_{em}(E')$ 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 :

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

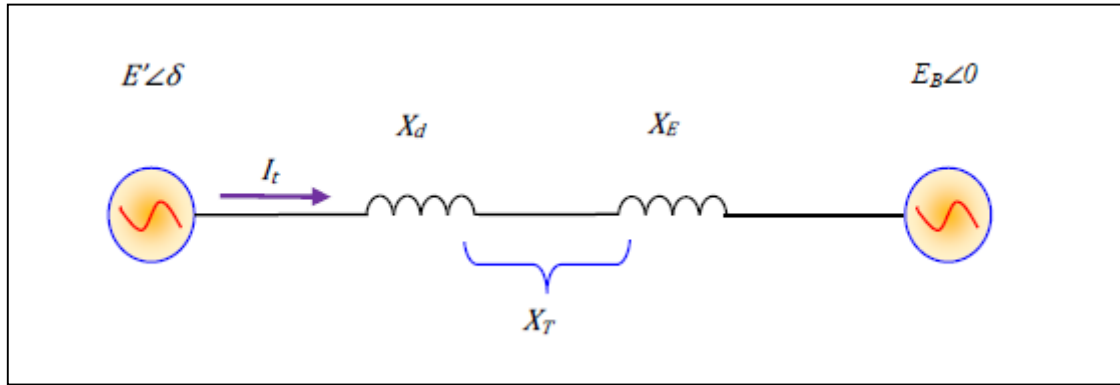


Figure II.2.Modèle classique de générateur.

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), [21] :

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

K_s : Coefficient de couple synchronisant.

K_A : Coefficient de couple d'amortissant.

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[22].

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).

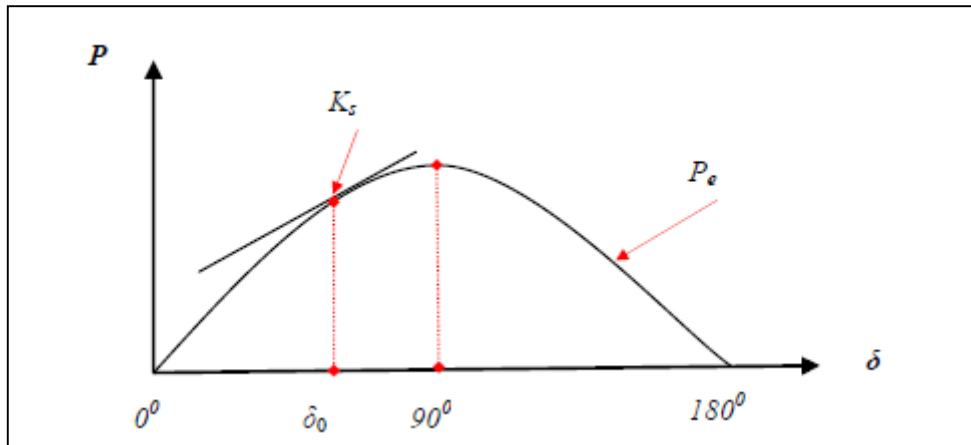


Figure II.3. La relation (puissance-angle) du générateur et le coefficient de couple synchronisant

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 la 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[14]. 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[14]. 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.

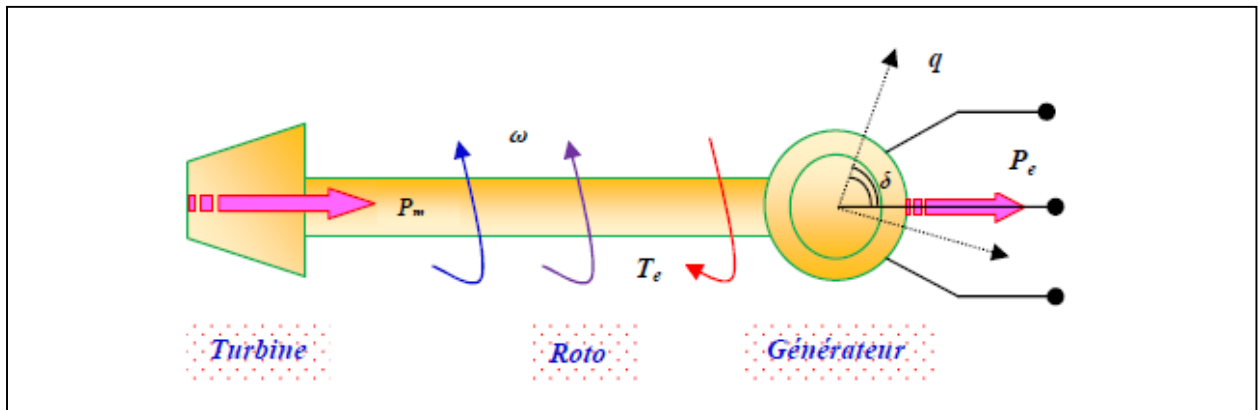


Figure II.4. Couple mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur.

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 :

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

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 [23]. 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 :

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

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

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

Avec :

$\Delta \omega_r$: Déviation de la vitesse angulaire du rotor, en pu .

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

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

On va réécrire l'équation précédente sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_s}{2H} \\ \frac{1}{\omega_0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (\text{II.10})$$

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) décrir le signal de performance est représenté dans le schéma de bloc ci-dessous :

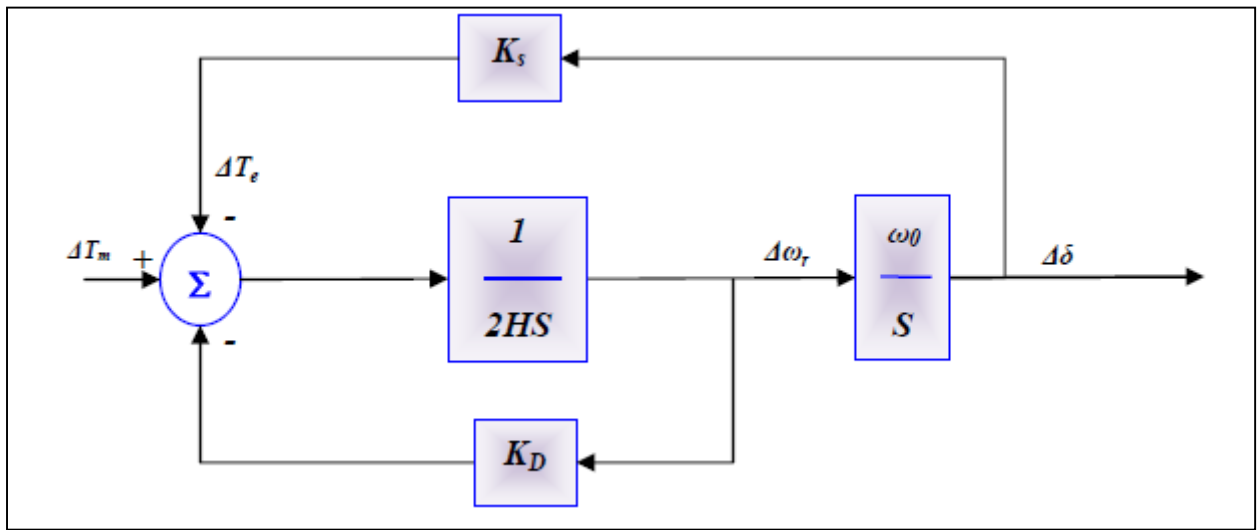


Figure II.5. Schéma bloc du système (mono machine-jeu de barre infini) avec le Modèle classique.

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

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

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.12), 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. l'effet dynamique du circuit de champ :

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

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

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

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

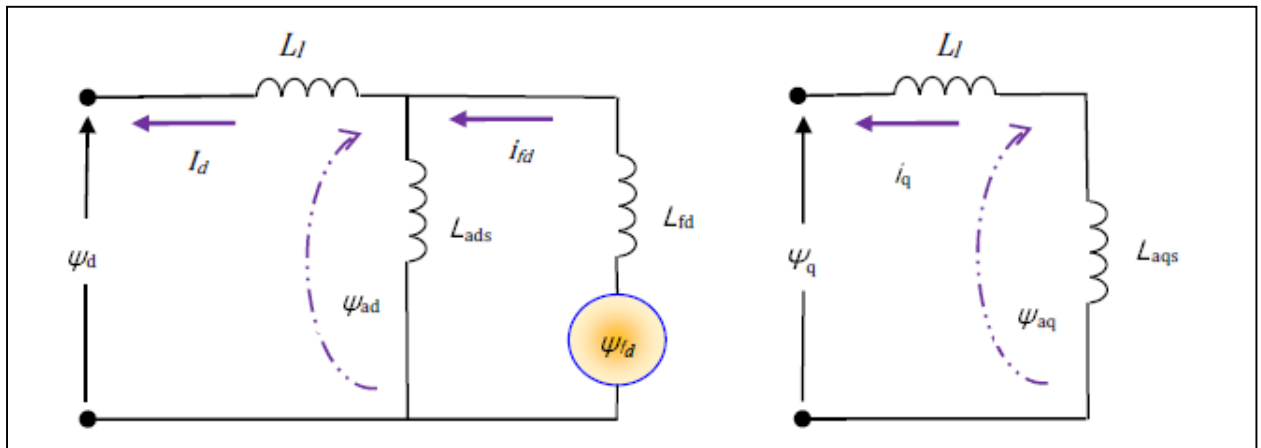


Figure II.6. Circuits équivalents relatifs de l'enchaînement du flux de la machine et courant.

Le flux de stator et de rotor sont donnés 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 :

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

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

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 le 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 :

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

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

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

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

$$\text{Tel que : } \begin{cases} R_T = R_a + R_E \\ X_{Tq} = X_E + (L_{aqs} + L_1) = X_E + X_{qs} \\ X_{Td} = X_E + (L'_{ads} + L_1) = X_E + X_{ds} \\ D = R_T^2 + X_{Td} X_{Tq} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

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 :

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

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 $\Delta i_d, \Delta i_q, \Delta\Psi_{ad}$ et $\Delta\Psi_{aq}$ dans les équations (II.26), (II.28) et (II.29) nous obtenons :

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

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

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:

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

Avec ΔT_m et ΔE_{fd} dépend des commandes de moteur et d'excitation. L'inductance mutuelle L_{ads} , 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.

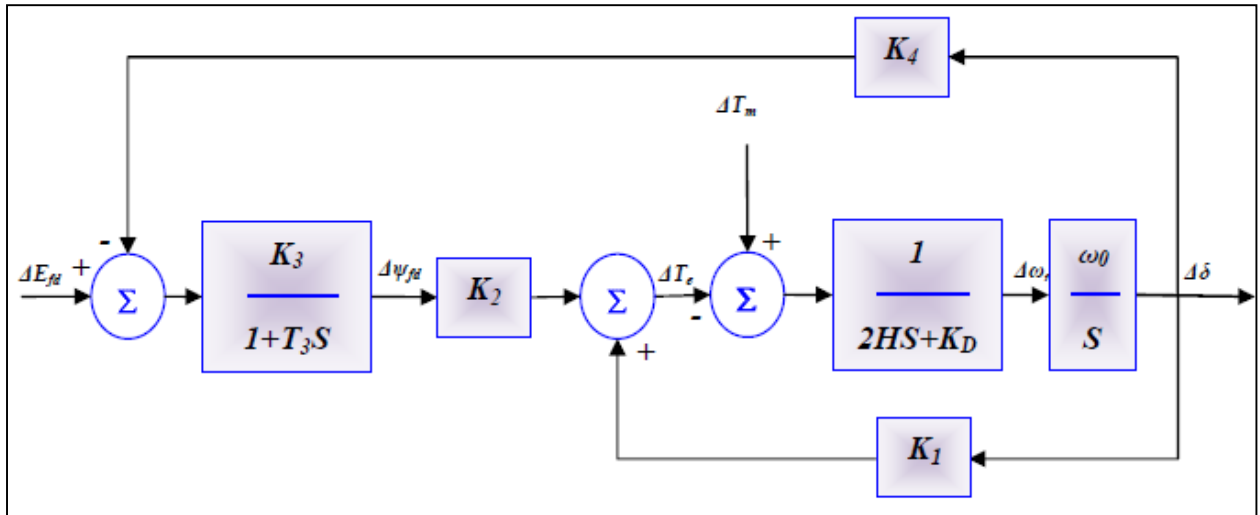


Figure II.7. Représentation de schéma fonctionnel avec la constante E_{fd} .

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

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

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

$$\Delta\Psi_{fd} = \frac{K_3}{1 + T_3 S} (\Delta E_{fd} - K_4 \Delta\delta) \quad (\text{II.37})$$

$$\text{Tel que : } \begin{cases} K_3 = -\frac{b_{32}}{a_{33}} \\ K_4 = -\frac{a_{32}}{b_{32}} \\ T_3 = -\frac{1}{a_{33}} = K_3 T'_{d0} \frac{L_{adu}}{L_{fd}} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

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) [24].

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 électro-énergétique.

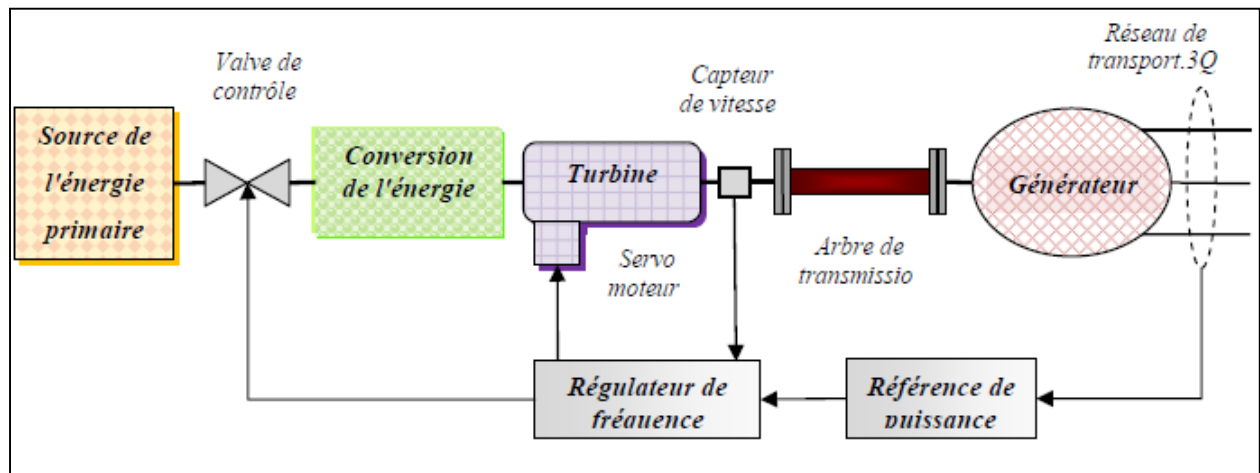


Figure II.8. Structure générale d'un système de force motrice-générateur.

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[25].

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[24].

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[25].

Actuellement, des systèmes d'excitation variés sont employés. Trois principaux types peuvent être identifiés[26].

- 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 importants pour l'équilibre de la puissance réactive qui sera fournie ou 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.

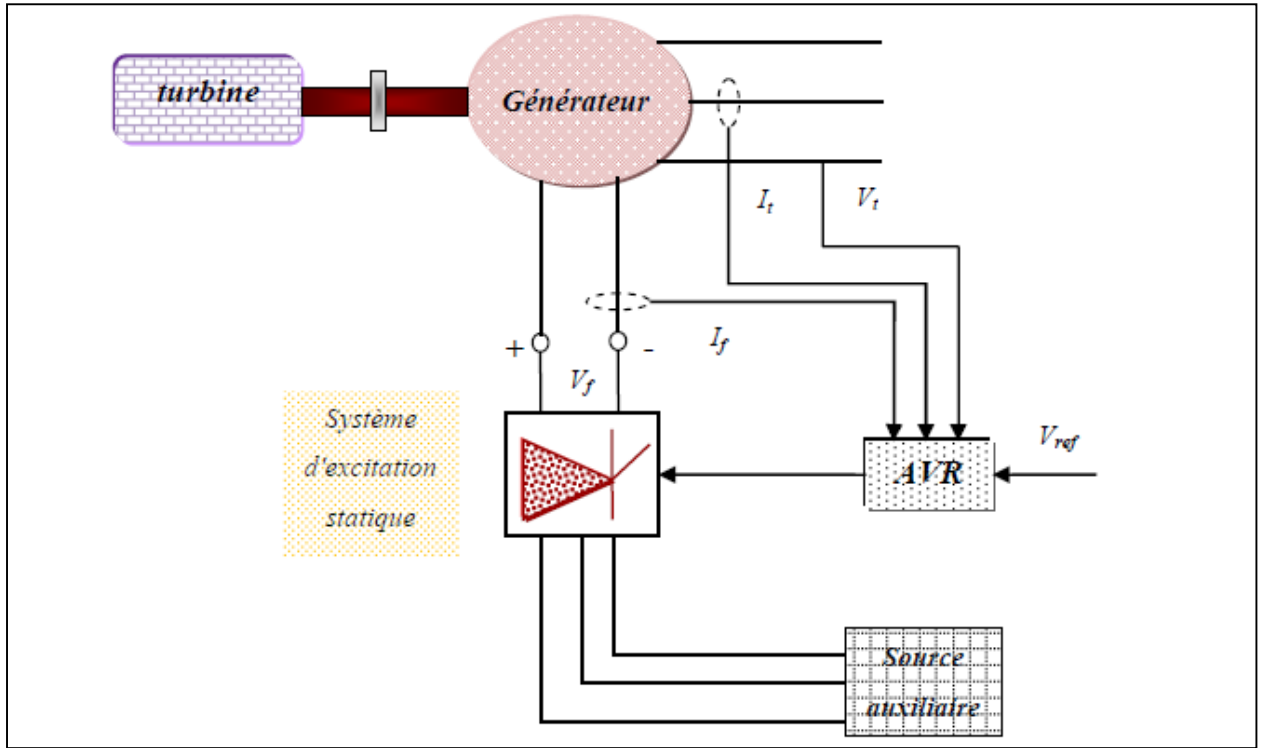


Figure II.9. Structure d'un système d'excitation statique avec son AVR.

Le groupe *IEEE task forces* présente périodiquement des recommandations pour la modélisation des éléments d'un système de puissance dont les systèmes d'excitation. Plusieurs modèles sont suggérés pour chaque type de système d'excitation[26]. 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[22].

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 :

$$\begin{cases} \Delta e_d = -R_a \Delta i_d - (L_1 \Delta i_q - \Delta \Psi_{aq}) \\ \Delta e_q = -R_a \Delta i_q - (L_1 \Delta i_d - \Delta \Psi_{aq}) \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

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.

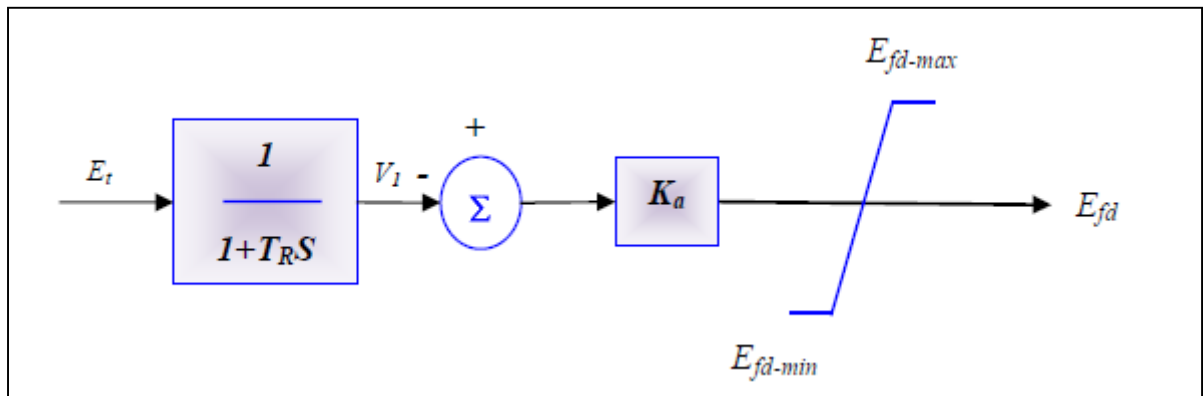


Figure II.10. système d'équitation statique (thyristor) avec AVR.

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

$$\Delta v_1 = \frac{1}{1+T_R S} E_t \quad (\text{II.46})$$

D'où :

$$\Delta v_1 = \frac{1}{T_R} (\Delta E_t - \Delta v_1) \quad (II.47)$$

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

$$S\Delta v_1 = \frac{1}{T_R} (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \Psi_{fd} - \Delta v_1) \quad (II.48)$$

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

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

En termes de valeurs perturbées, nous avons :

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

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

$$S\Psi_{fd} = a_{31} \Delta \omega_r + a_{32} \Delta \delta + a_{33} \Delta \Psi_{fd} + a_{34} \Delta v_1 \quad (II.51)$$

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

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 .

$$\Delta v_1 = a_{41} \Delta \omega_r + a_{42} \Delta \delta + a_{43} \Delta \Psi_{fd} + a_{44} \Delta v_1 \quad (II.53)$$

Avec:

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

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 :

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

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 exciteur. La représentation est applicable à n'importe quel type d'excitateur, avec $G_{ex}(S)$ représentation de la fonction de transfert de 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 : $\Delta E_t = K_5 \Delta\delta + K_6 \Delta\Psi_{fd}$. (II.56)

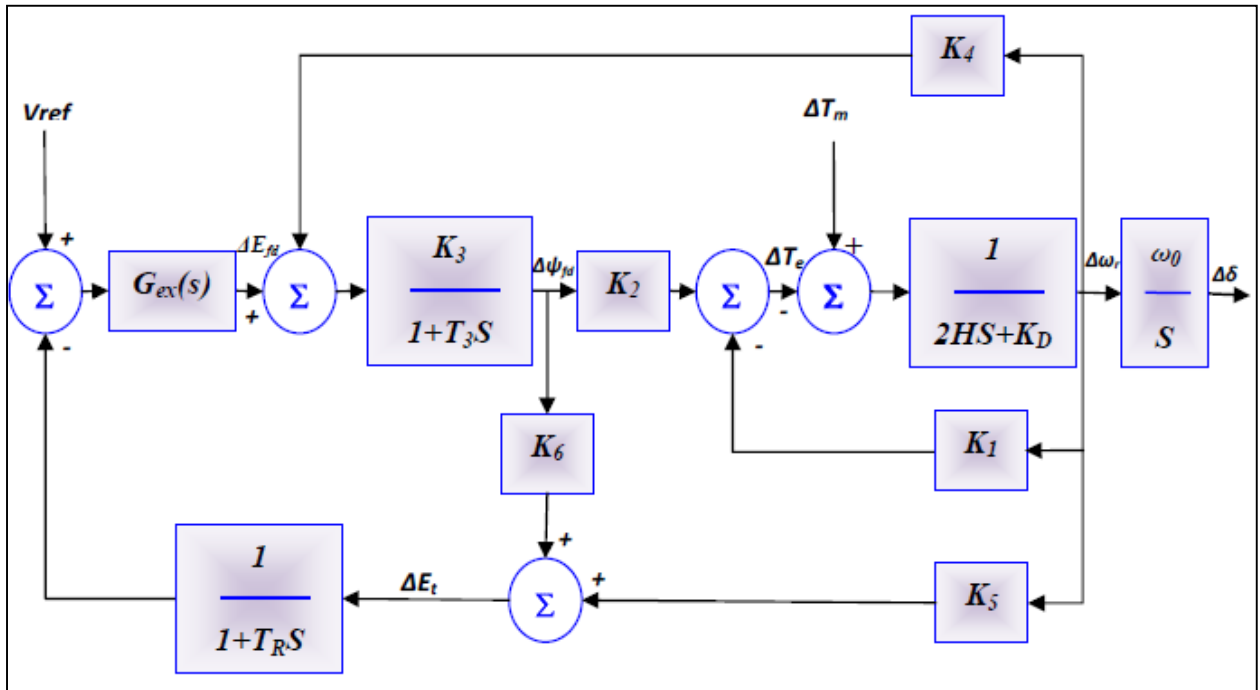


Figure II.11. Représentation du schéma bloc avec l'excitateur et AVR.

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 de AVR sur l'amortissement de l'oscillation de système[27].

II.4.Modèle de power system stabiliser PSS[27] :

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.

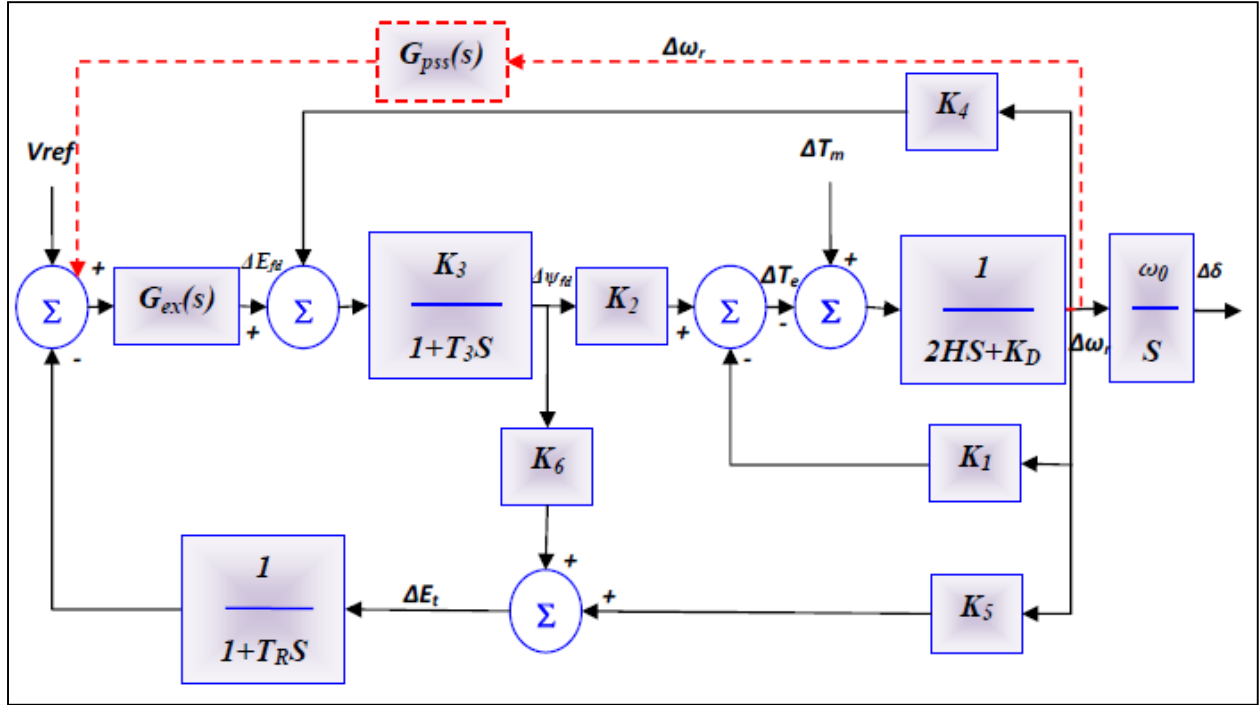


Figure II.12. Représentation du schéma bloc avec AVR et PSS.

II.4.1. Modèle du système d'excitation avec PSS [27]:

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.

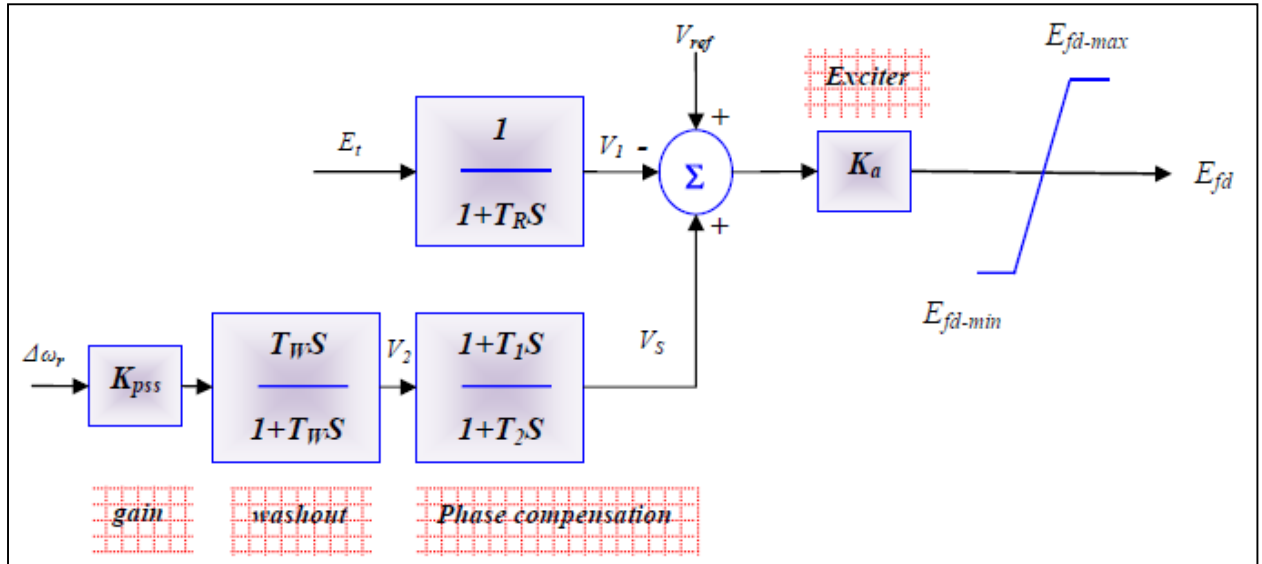


Figure II.13. Système d'excitation statique avec AVR et PSS.

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

$$\Delta v_2 = \frac{ST_w}{1+ST_w} (K_{PSS} \Delta \omega_r) \Rightarrow S\Delta v_2 = K_{PSS} S\Delta \omega_r - \frac{1}{T_w} \Delta v_2 \quad (\text{II.57})$$

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 :

$$S\Delta v_2 = a_{51} \Delta \omega_r + a_{52} \Delta \delta + a_{53} \Delta \Psi_{fd} + a_{54} v_2 + \frac{K_{PSS}}{2H} \Delta T_m \quad (\text{II.58})$$

Avec:

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

Du bloc (5) :

$$\Delta v_s = \Delta v_2 \left(\frac{1+ST_1}{1+ST_2} \right) \Rightarrow S\Delta v_s = \frac{T_1}{T_2} S\Delta v_2 + \frac{1}{T_2} \Delta v_2 - \frac{1}{T_2} \Delta v_s \quad (\text{II.60})$$

L'équation (II.61) est résulte par substitution $S\Delta v_2$ donné par l'équation (II.55).

$$Sv_5 = a_{61}\Delta\omega_r + a_{62}\Delta\delta + a_{63}\Delta\Psi_{fd} + a_{64}v_1 + a_{65}v_2 + a_{66}v_s + \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{PSS}}{2H} \Delta T_m \quad (\text{II.61})$$

Avec :

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

$$\text{Du bloc 2, nous obtenons } \Delta E_{fd} = K_A (\Delta v_s - \Delta v_1). \quad (\text{II.63})$$

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

$$S\Delta\Psi_{fd} = a_{32}\Delta\delta + a_{33}\Delta\Psi_{fd} + a_{34}v_2 + a_{36}v_s, \text{ avec : } a_{36} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A \quad (\text{II.64})$$

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

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\omega} \\ \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta\Psi} \\ \dot{\Delta v_1} \\ \dot{\Delta v_2} \\ \dot{\Delta v_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta\Psi \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.65})$$

II.5.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation du système électro-énergétique pour les études de la stabilité angulaire.

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 $\Delta T_m = 0$.

Après présenté les modèles du système, nous présentons dans le chapitre suivant, le fonctionnement et modèle d'un contrôleur côté générateur PSS.

Chapitre 3

***La stabilisateur de puissance
(PSS conventionnel)***

III.1. Introduction :

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.

III.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 (III. 1). 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 [28,22]. 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[29]:

- 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), [30]. Cette fonction de transfert est dénotée $GEP(s)$, figure (III.1).

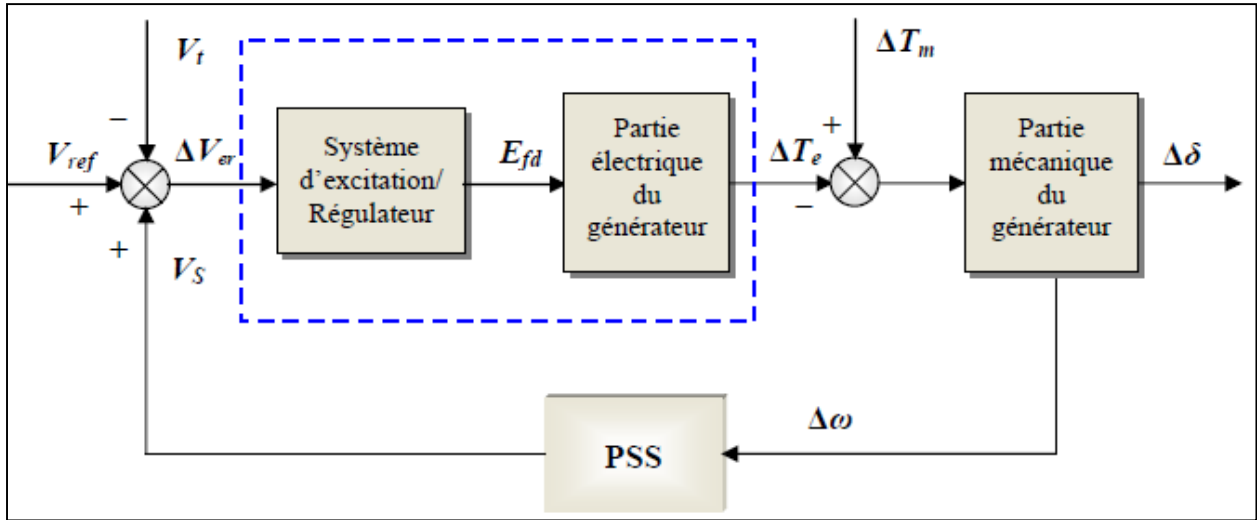


Figure III.1. Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système.

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 (III.2) :

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

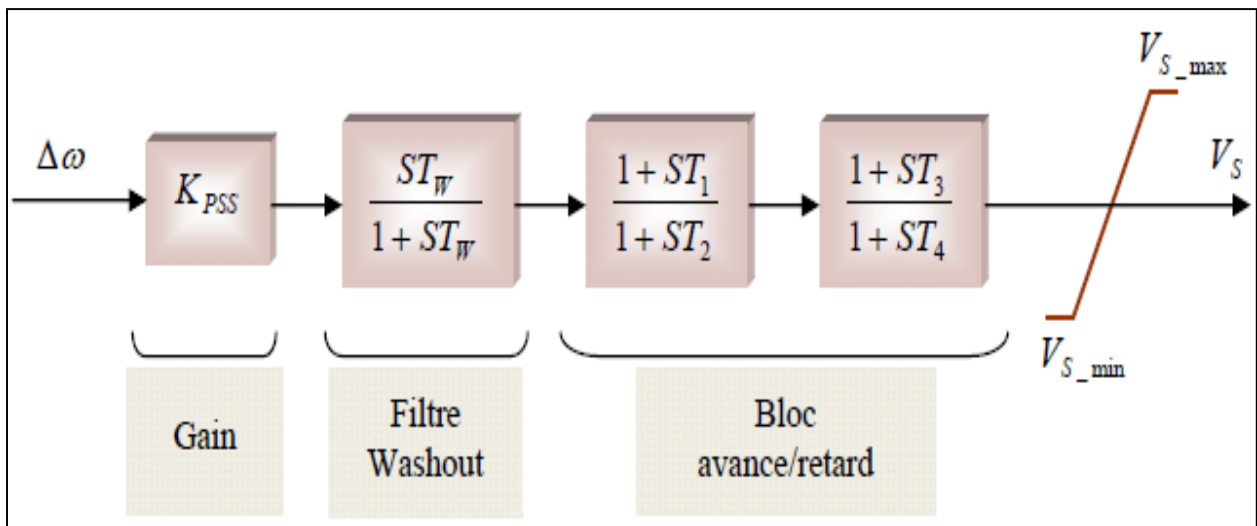


Figure III.2. Modèle d'un PSS avance/retard.

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[29]. 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'ilotage. 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[19] .

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[31] .

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[30]. Les valeurs minimales et maximales du limiteur s'étendent de ± 0.02 à 0.1 per-unit[32] .

III.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 PSS. 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.

III.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 (III.3). Le modèle linéaire de ce système peut être graphiquement illustré par la représentation de Heffron-Philips[19] , comme le montre la figure (III.3).

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

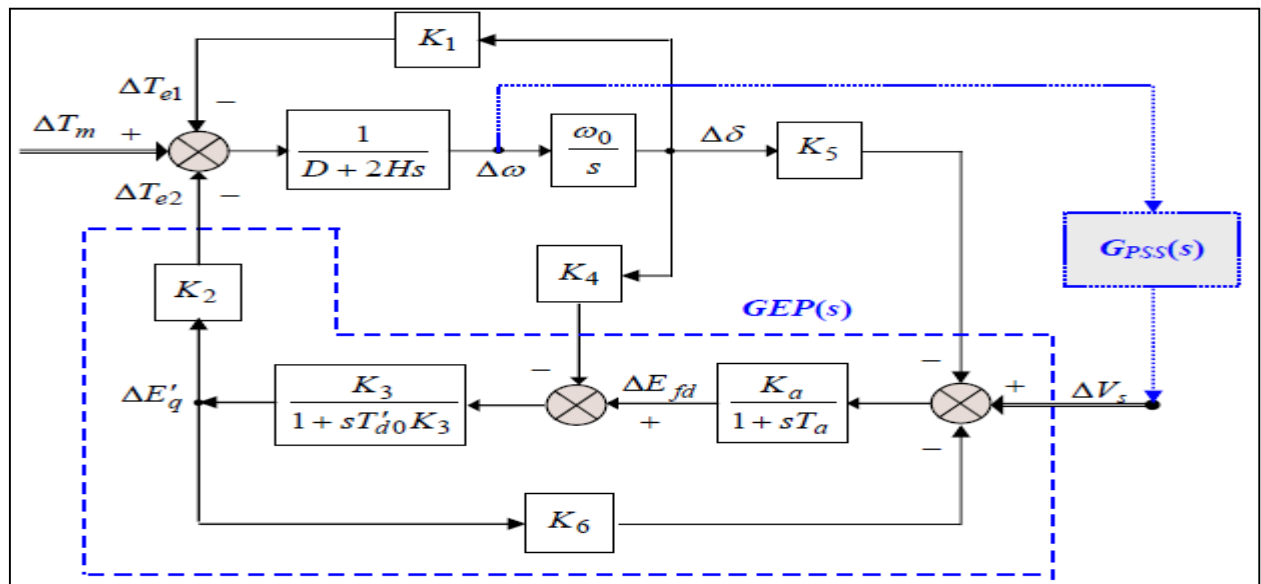


Figure III.3. Modèle de Heffron-Philips d'un système (mono-machine-jeu de barre infini).

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[32].

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

$$Phi_{GEP} = \angle GEP(s) \Big|_{s = \lambda = \sigma = j\omega} \quad (III.2)$$

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 :

$$G_{PSS}(s) = K_{PSS} \frac{sT\omega}{1 + sT\omega} \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^2 = K_{PSS} \times G_f(s) \quad (III.3)$$

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 :

$$T_1 = T_3 = \frac{\tan(\beta)}{\omega - \sigma \times \tan(\beta)} \quad (III.4)$$

Avec :

$$\beta = \frac{1}{2} \left(-Phi_{GEP} - \tan^{-1} \left(\frac{\omega}{\sigma} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\omega T \omega}{1 + \sigma T \omega} \right) + 2 \tan^{-1} \left(\frac{\omega T_2}{1 + \sigma T_2} \right) \right) \quad (III.5)$$

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

$$K_{PSS} = \frac{4\omega_n \xi H}{K_2 |GEP(s)| |G_f(s)|} \Big|_{s = \lambda = \sigma = j\omega} \quad (III.6)$$

Avec:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\omega_0 k_1}{2H}} \quad (\text{III.7})$$

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 (III.1). Elle est définie par l'équation suivante (coefficient d'amortissement K_D négligée).

$$2Hs^2 + \omega_0 = 0, \text{ Avec: } s = \pm j\omega_n \quad (\text{III.8})$$

III.3.2.Méthodes 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[1,33].

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

$$H(s) = K_{PSS} \frac{sT_\omega}{1 + sT_\omega} \left[\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right]^m \quad (\text{III.9})$$

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

La figure (III.4) montre l'effet du résidu sur le déplacement de valeur propre dans la partie gauche du plan complexe.

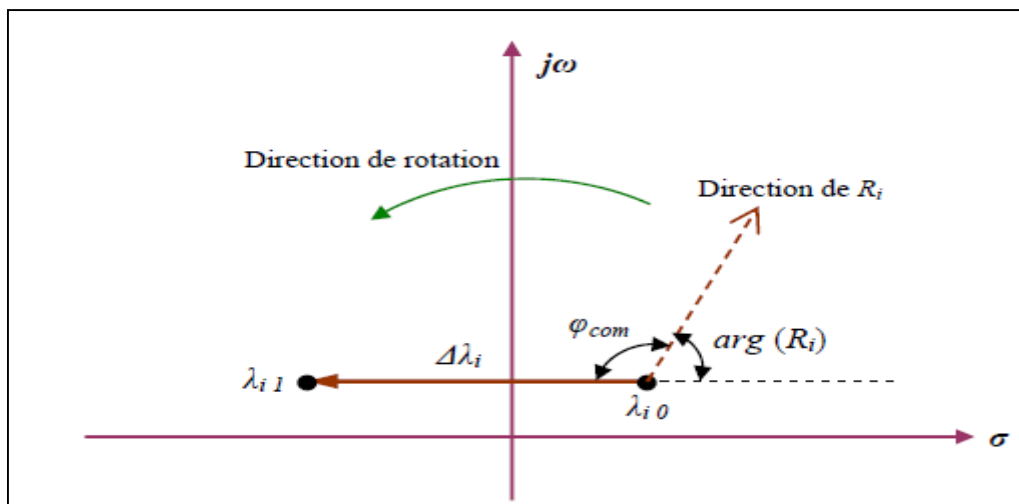


Figure III.4. Déplacement de valeur propre par la rotation du résidu associé.

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 :

$$\varphi_{com} = 180^\circ - \arg(R_i) \quad (III.10)$$

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:

$$T_1 = \alpha T_2, \quad T_2 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}} \quad (III.11)$$

$$\text{Avec : } \alpha = \frac{1 - \sin\left(\frac{\varphi_{com}}{m}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\varphi_{com}}{m}\right)} \quad (III.12)$$

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 :

$$H(s) = K_{PSS} \cdot H_f(s) \quad (III.13)$$

Le déplacement des valeurs propres est donné ci-dessous :

$$\Delta\lambda_i = |\lambda_{i1} - \lambda_{i0}| = R_i H(\lambda_i) \quad (III.14)$$

En remplaçant l'équation (III.13) dans la dernière équation, nous obtenons pour gain K_{PSS} la valeur littérale suivante :

$$K_{PSS} = \left| \frac{\lambda_{i1} - \lambda_{i0}}{R_i \cdot H_f(\lambda_i)} \right| \quad (III.15)$$

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 : $K_{st} = \frac{K_{inst}}{3}$ [34].

III.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 [31,10] figure (III.5).

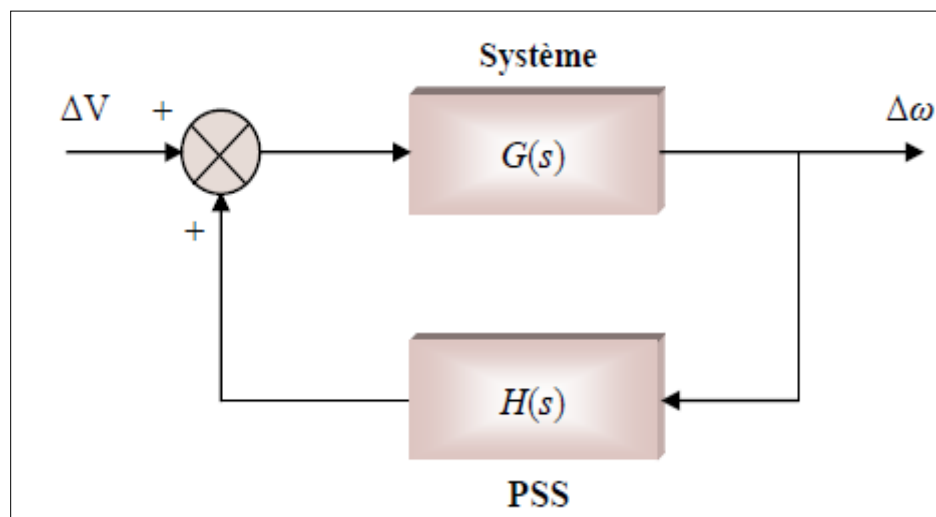


Figure III.5. L'ensemble (système-PSS) en boucle fermée.

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 :

$$1 - G(s)H(s) = 0 \quad (\text{III.16})$$

$$\Rightarrow H(s) = \frac{1}{G(s)} \quad (\text{III.17})$$

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

$$H(\lambda_i) = \frac{1}{G(\lambda_i)} \quad (\text{III.18})$$

$$\frac{1}{G(\lambda_i)} = K_{PSS} \cdot \frac{\lambda_i T_\omega}{1 + \lambda_i T_\omega} \cdot \frac{1 + \lambda_i T_1}{1 + \lambda_i T_2} \cdot \frac{1 + \lambda_i T_3}{1 + \lambda_i T_4} \quad (\text{III.19})$$

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.

III.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 ; 37 ; 38 ; 39 ; 40 ; 41]. 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.

III.5. Résultat et discussion :

III.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

$K1=0.7635$, $K2=0.8643$, $K3(\text{exciter gain})=0.3230$, $K4=1.4188$, $K5 = 0.1462$, $K6=0.4166$.

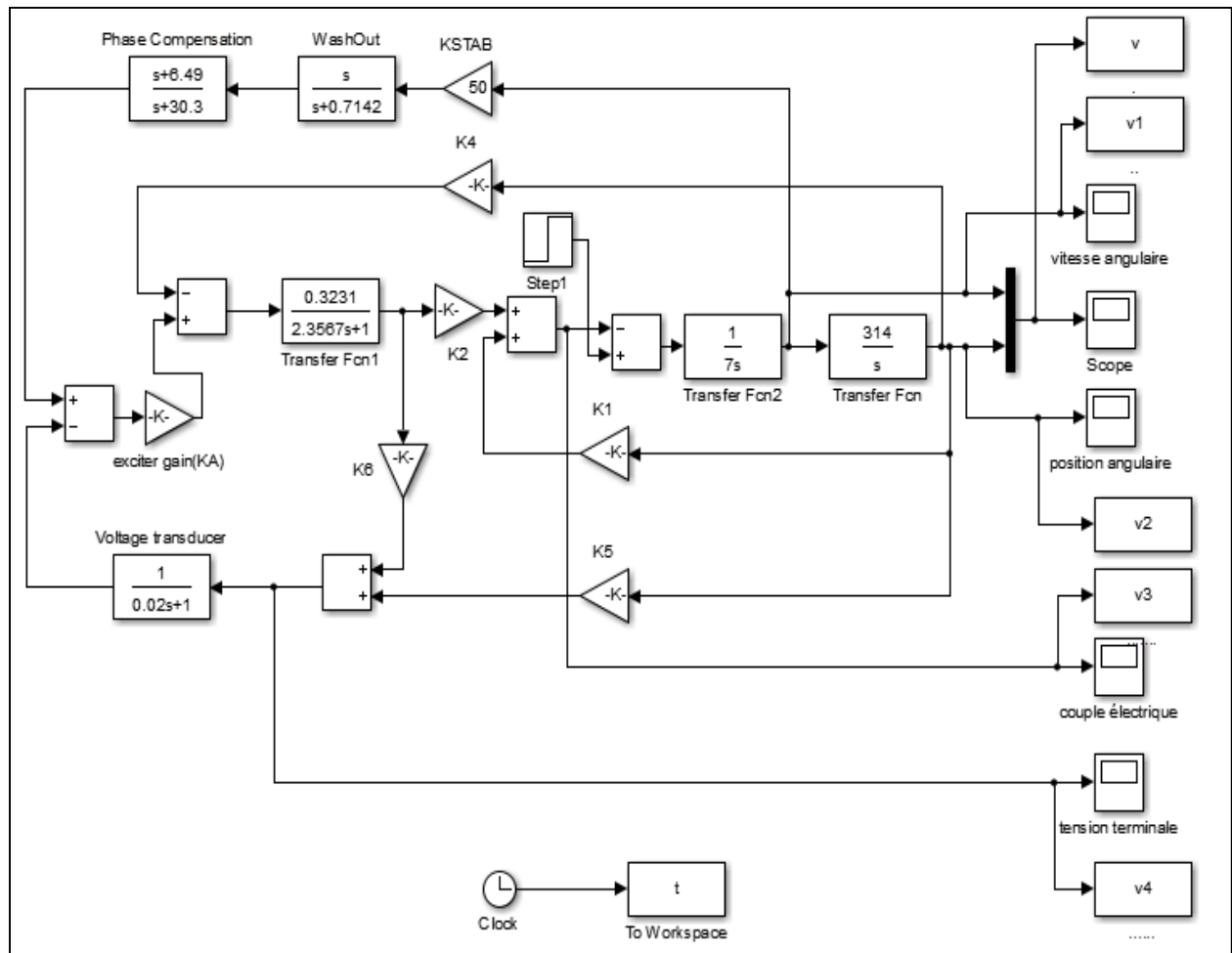


Figure III.6. Représentation du réseau SMIB+PSS sur MATLAB/Simulink.

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.

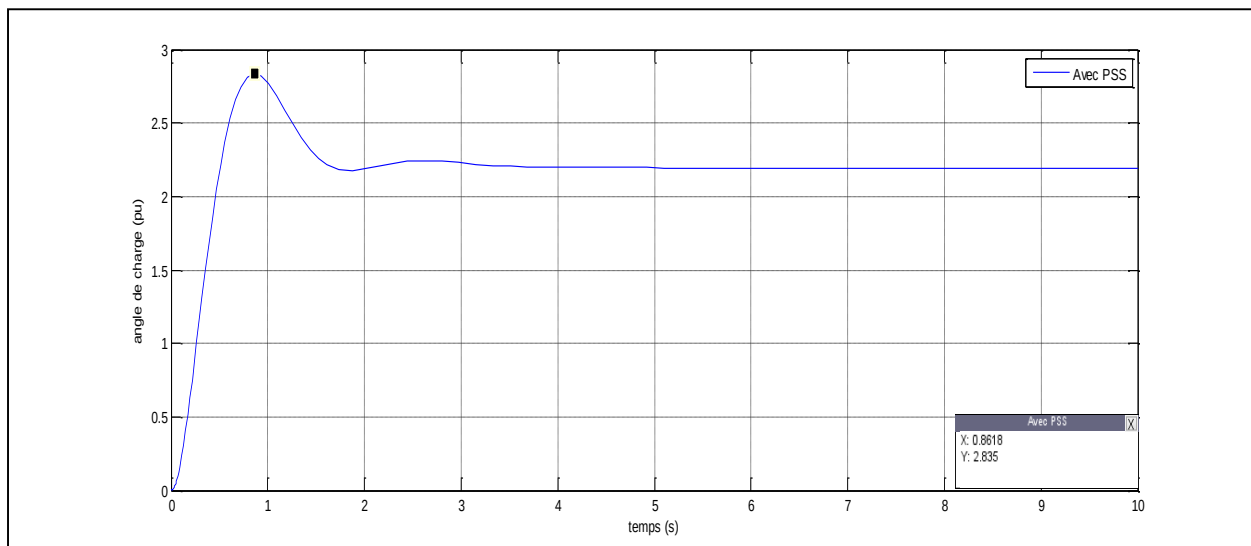


Figure III.7. Présente la variation du position angulaire.

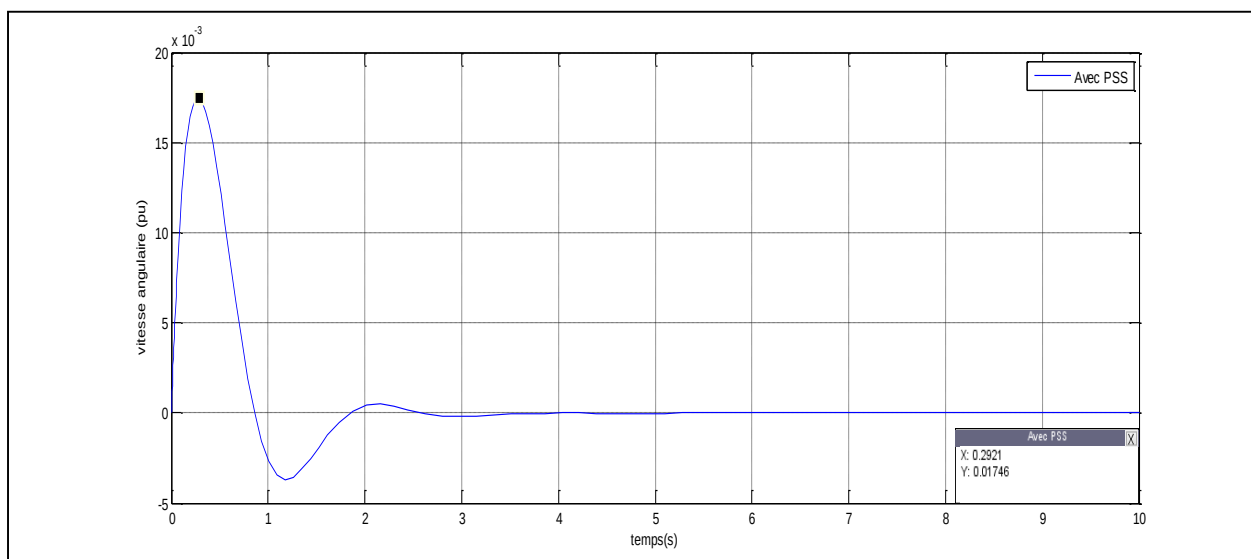


Figure III.8. Présente la variation de la vitesse angulaire.

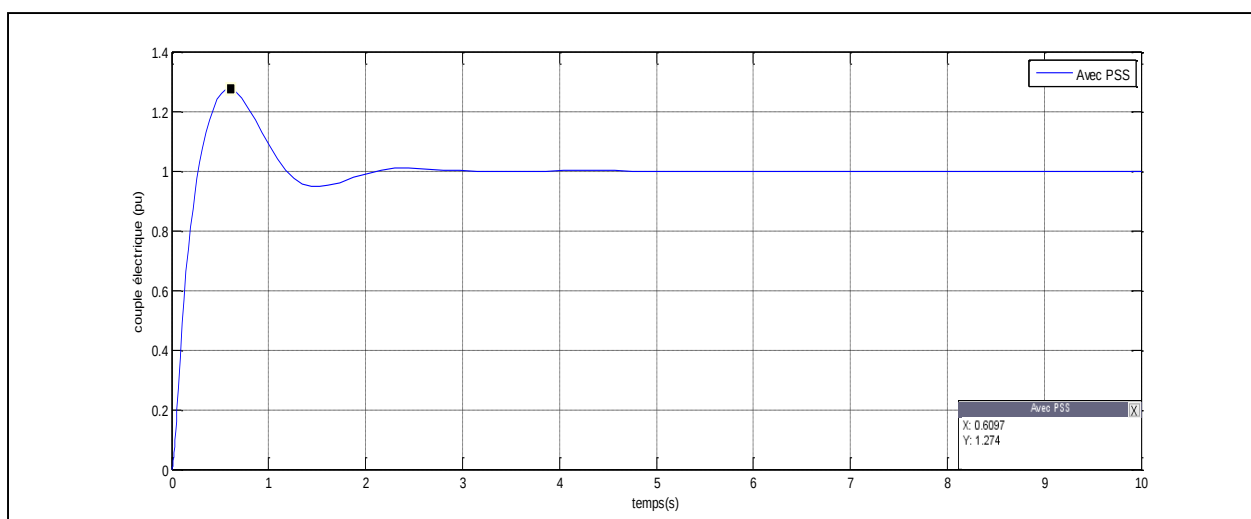


Figure III.9. Présente la variation du couple électrique.

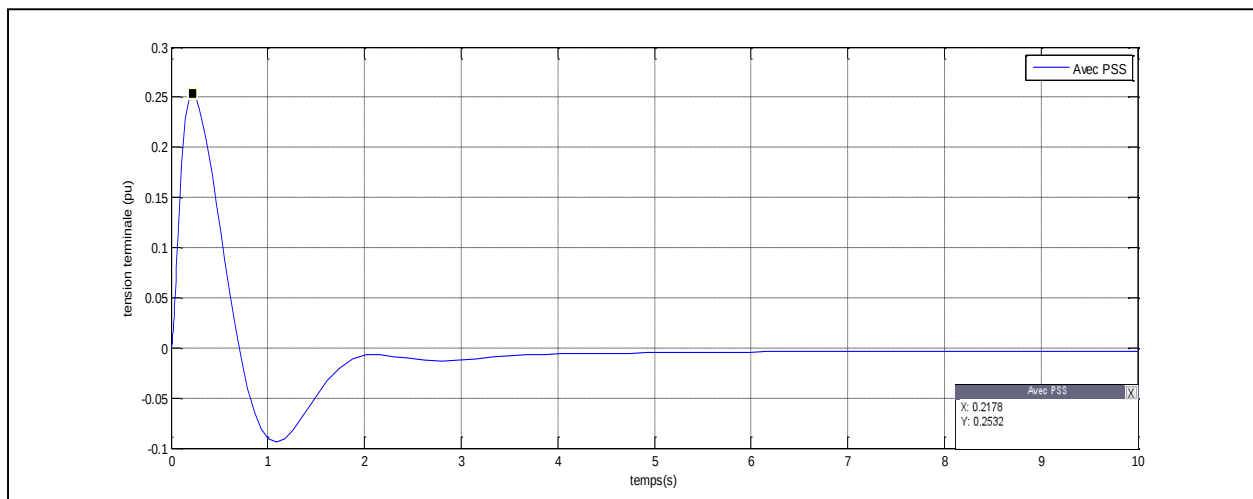


Figure III.10. Présente la variation de la tension terminale.

III.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(III.11).

➤ Paramètre schéma bloc de simulation:

$K1=0.7635$, $K2=0.8643$, $K3(\text{exciter gain})=0.3230$, $K4=1.4188$, $K5 = 0.1462$, $K6=0.4166$.

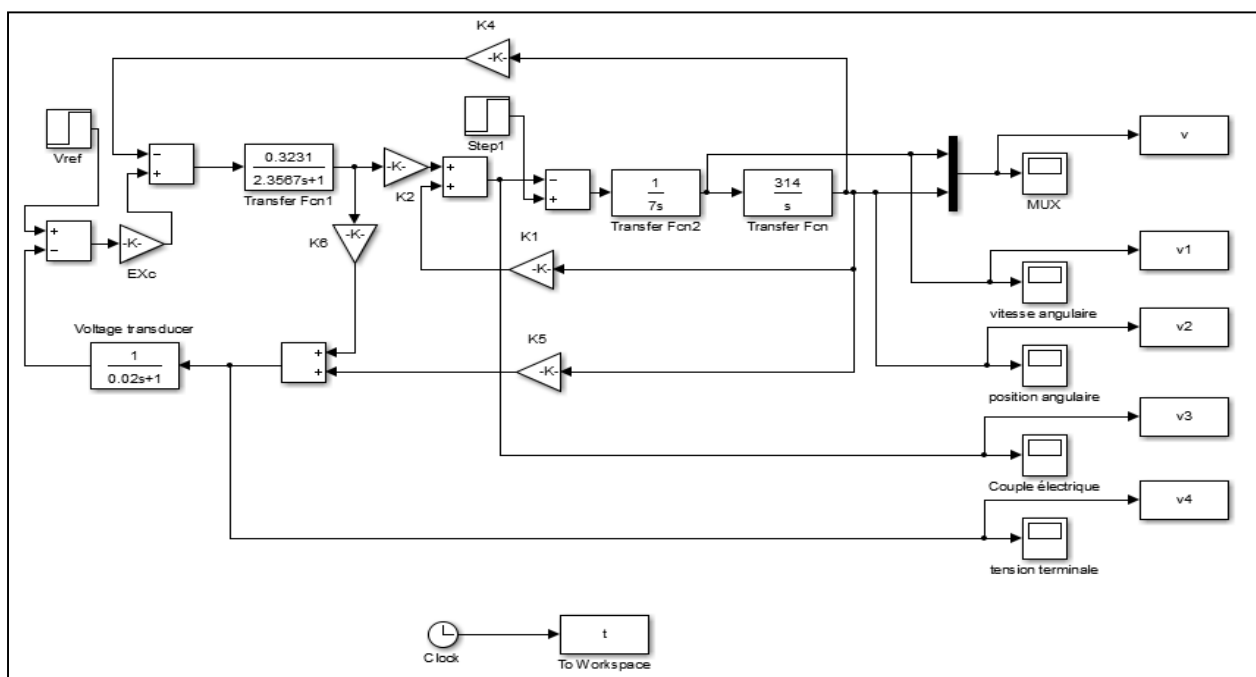


Figure III.11. Représentation du réseau SMIB+AVR sur MATLAB/Simulink.

Les résultats de simulation dans les figures (III.12), (III.13), (III.14), (III.15), et (III.16) 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.

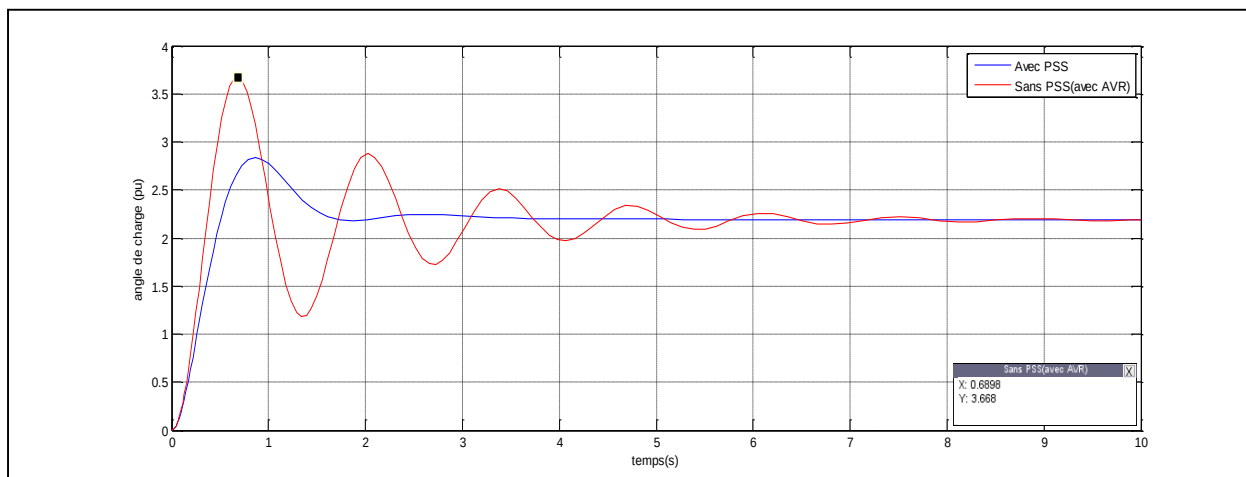


Figure III.12. Présente la variation du position angulaire.

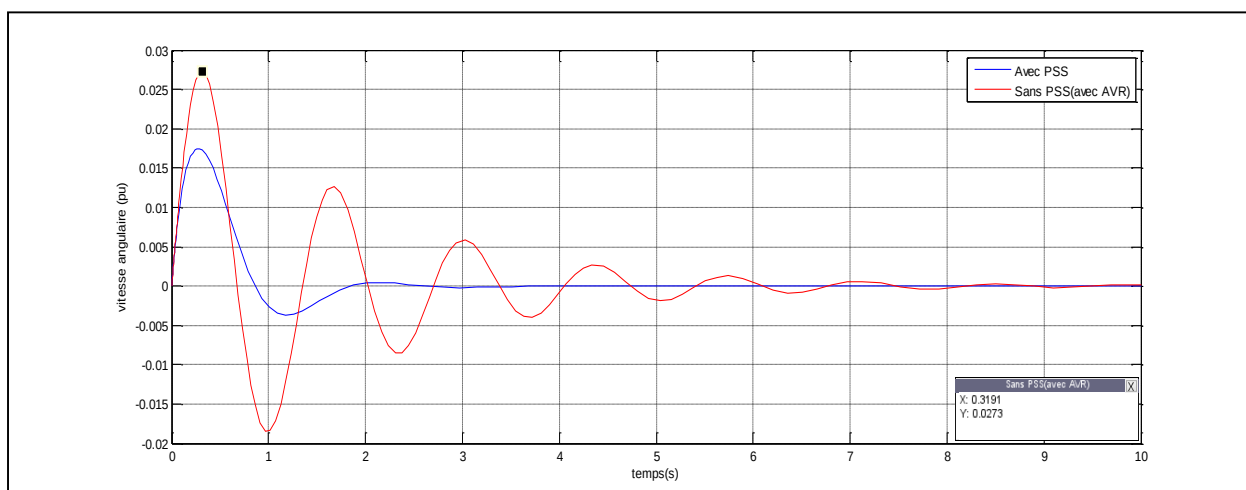


Figure III.13. Présente la variation de la vitesse angulaire.

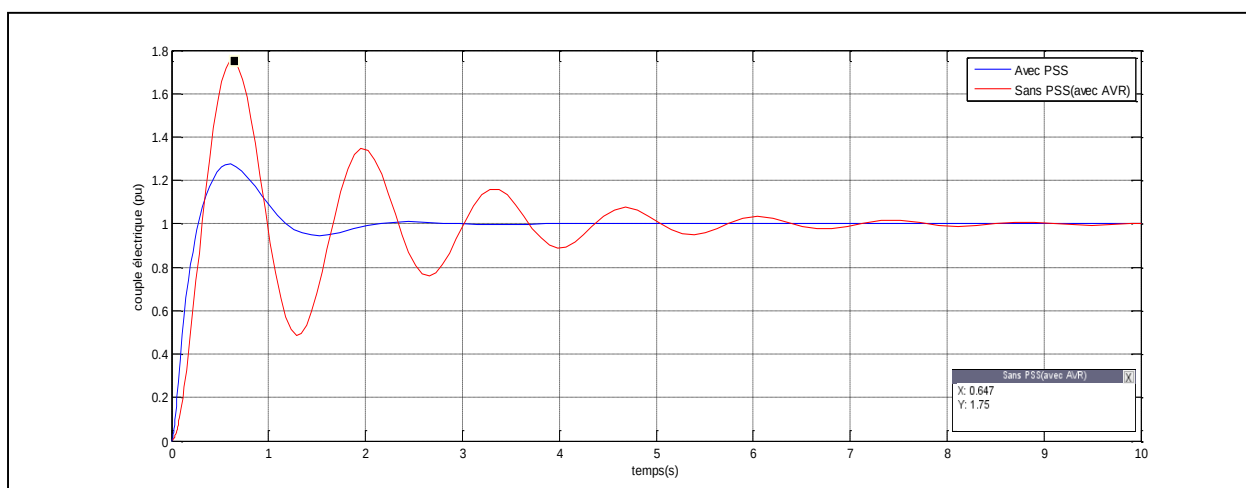


Figure III.14. Présente la variation du couple électrique.

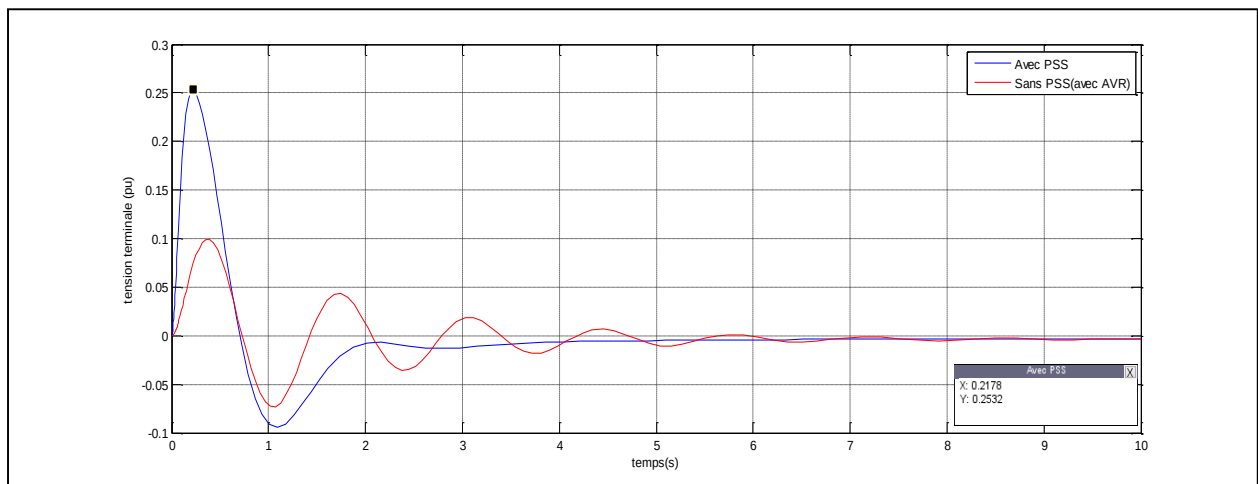


Figure III.15. Présente la variation de la tension terminale.

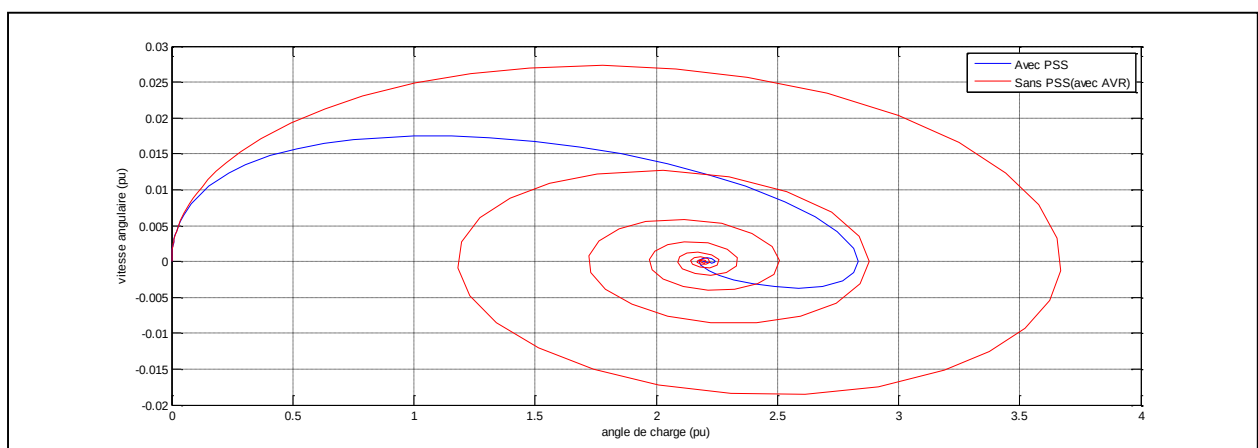


Figure III.16. Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport la variation d'angle.

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 (III.1), pour chacun courbe d'angle de charge, de la vitesse angulaire et du couple électrique :

Les cas	Sans PSS			Avec CONV PSS		
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 III.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 (III.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 III.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 ($IAE_{\text{minimal}} = IAE_{\text{avecCONVPSS}} = 0.1169$), aussi l'intégrale de l'erreur absolue pondérée par le temps est minimale ($ITAE_{\text{minimal}} = ITAE_{\text{avecCONVPSS}} = 0.2232$).

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une façon générale le modèle et la fonctionnement du stabilisateur *PSS*. En outre, Le réglage de paramètres des *PSSs* et leurs emplacements sont des facteurs critiques pour pouvoir assurer convenablement le bon fonctionnement des *PSSs*.

En termes de la simulation, nous exécutons du système étudié sans *PSS* et dans autre cas on ajoute le *PSS* conventionnelle. Ainsi qu'on peut étudier comparative entre la mise en œuvre du système avec, et sans *PSS*.

Enfin, 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 4

***PSS a basé sur la logique floue
(Fuzzy)***

IV.1.Introduction :

Au départ théorie, la logique floue(FUZZY) s'affirme comme une technique opérationnelle. Utilisée à côté d'autres techniques de contrôle avancé, elle fait une entrée discrète mais appréciée dans les automatismes de contrôle industriel. En outre, la logique floue ne remplace pas nécessairement les systèmes de régulation conventionnels. Elle est complémentaire[42].

L'utilisation de la commande floue est particulièrement intéressante lorsqu' on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander ou lorsque ce dernier présente de trop fortes non linéarités ou imprécision.

Dans ce chapitre, nous présenterons quelque aspect théorique de la logique floue, ainsi que les bases de son application pour la commande de processus.

IV.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[42].

IV.3.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[42].

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.

IV.4.La théorie des ensemble floue :

IV.4.1.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 (IV.1) ne sont pas « nets », mais « flous » ou « graduels » [42] .

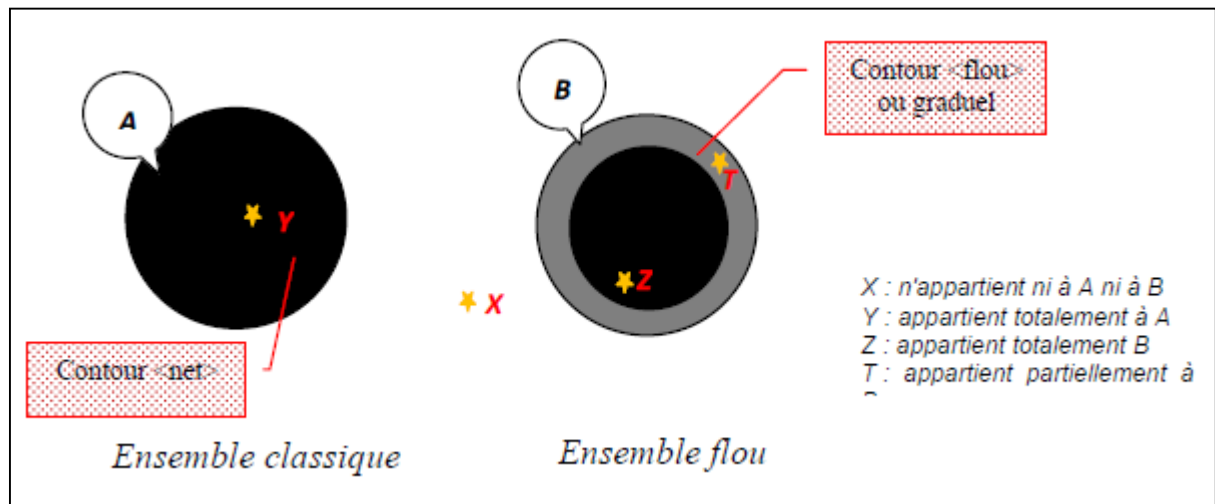


Figure IV.1. Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.

IV.4.2.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 conviendrions 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 (IV.2).

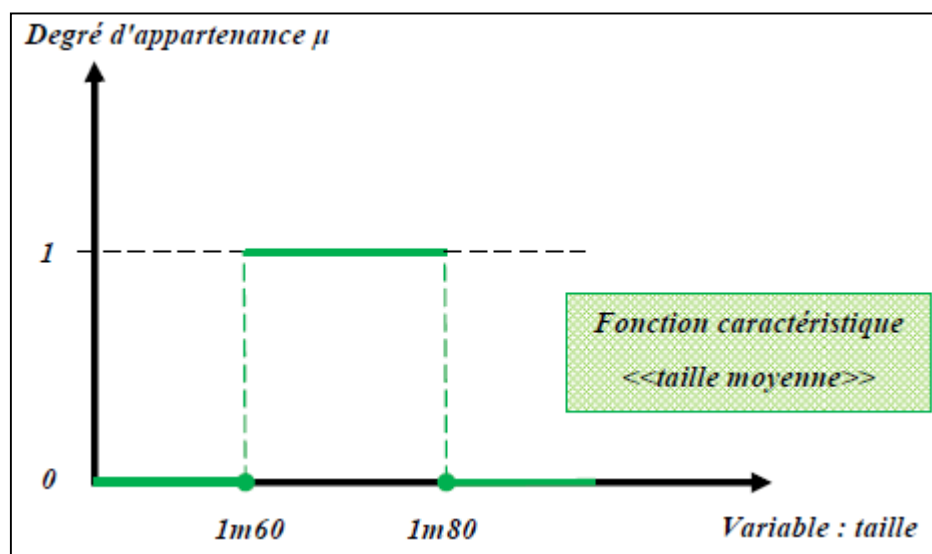


Figure IV.2. Fonction caractéristique.

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 (IV.3), compris entre 0 et 1.

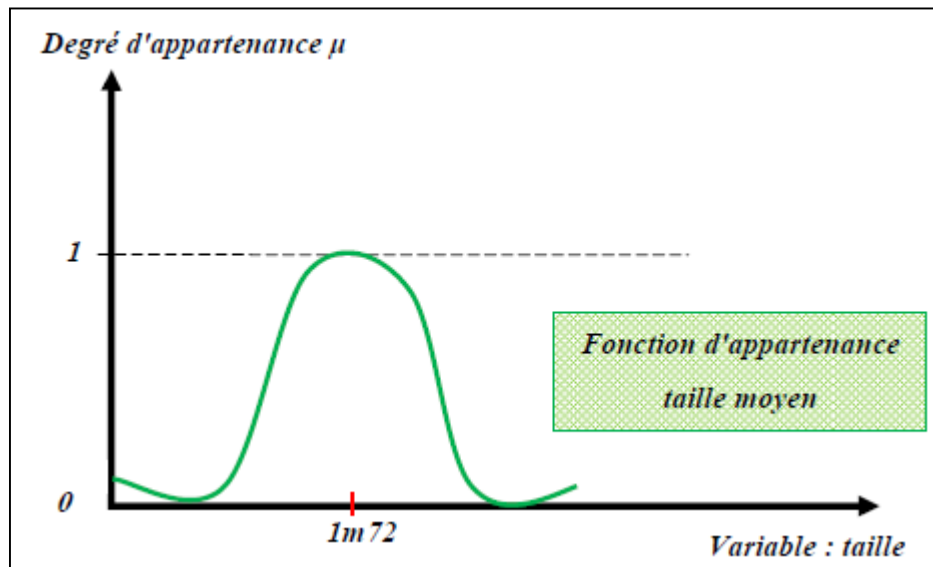


Figure IV.3. Fonction d'appartenance.

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 (IV.4).

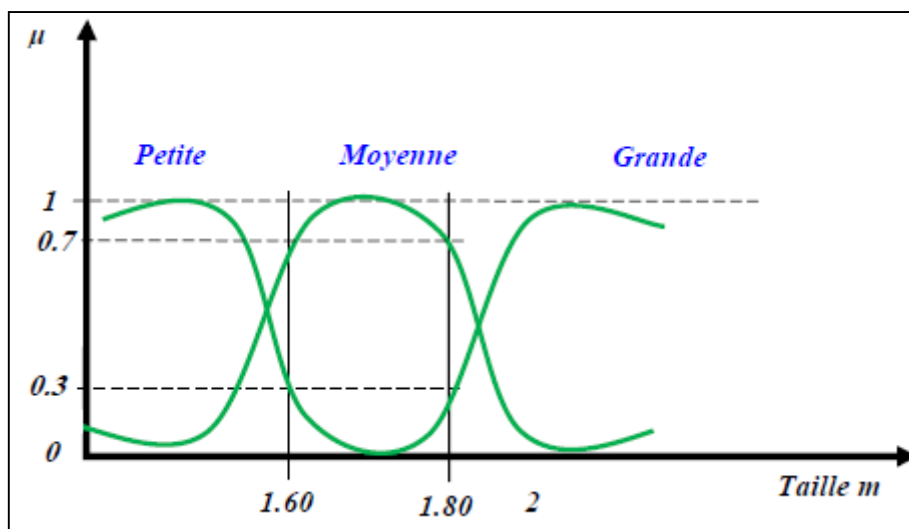


Figure IV.4. Fonction d'appartenance, variable et terme linguistique.

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[42].

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 (IV.5).

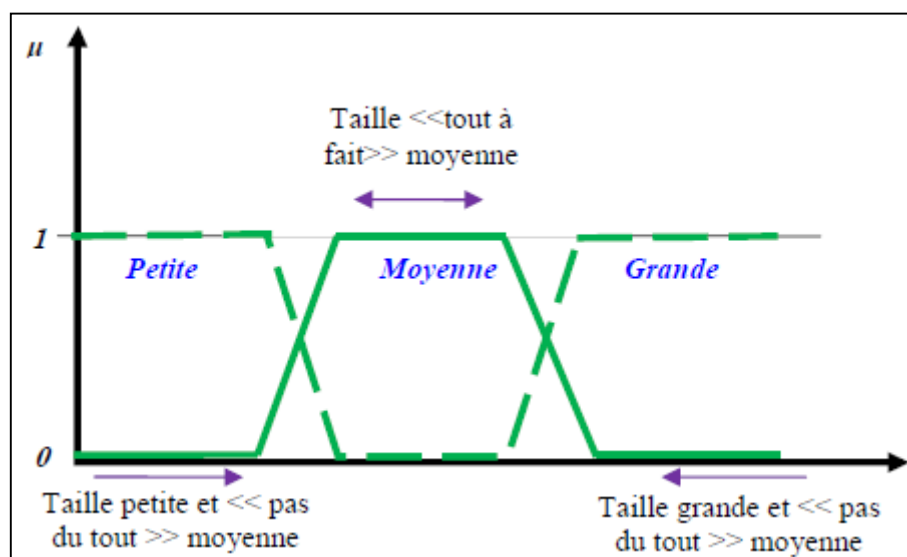


Figure IV.5. Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux.

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 (IV.6) défini sur une variable réelle (taille) est la traduction dans le domaine flou d'une valeur particulière (taille de Paul) de cette variable

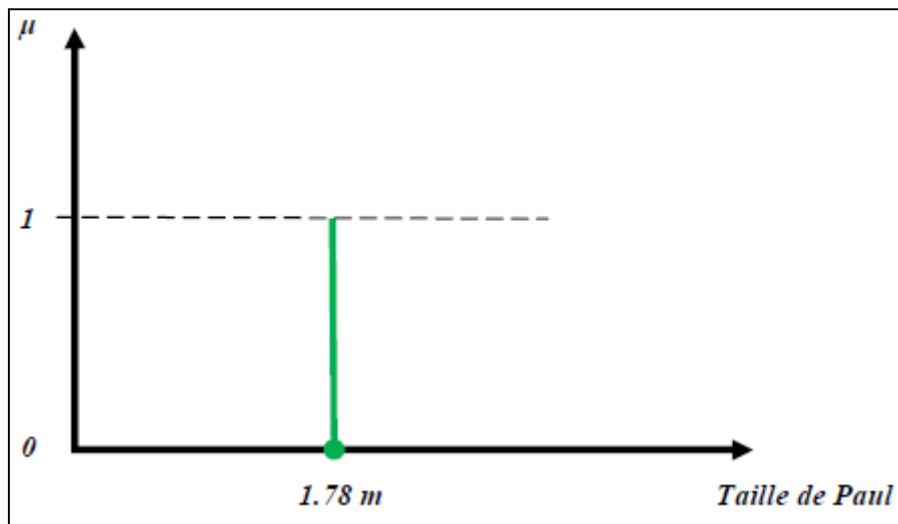


Figure IV.6. Fonction d'appartenance singleton.

IV.4.2.1.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 (IV.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[42] .

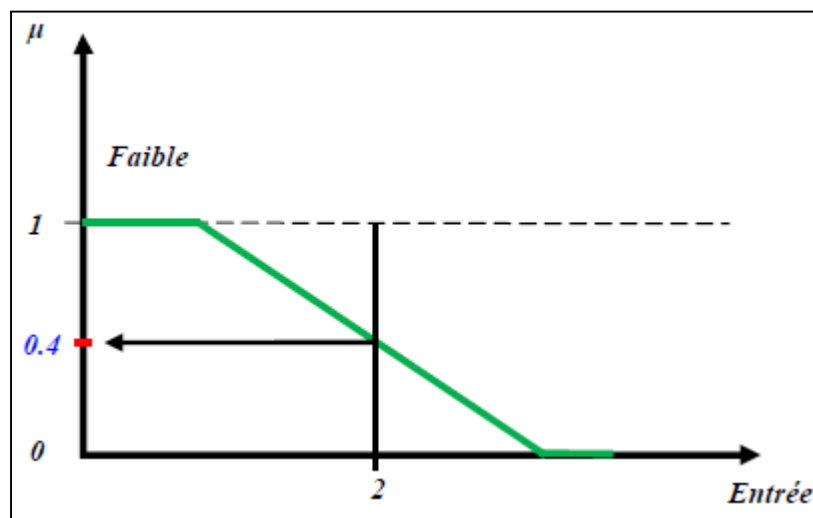


Figure IV.7. Fuzzification.

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.

IV.4.3.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) [42].

Exemple : Appartement Intéressant = Loyer Raisonnable ET Surface Suffisante.

IV.4.3.1.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[42]. 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 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 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 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 OU 1 donne bien 1.

c) Complément :

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

$$\mu(NON \ A) = 1 - \mu(A)$$

Exemple :

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

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

IV.4.4.Règles floues :**IV.4.4.1.La 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[42].

Une règle est du type :

$$SI \text{ « prédicat » } ALORS \text{ « conclusion »}$$

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 (IV.1). Une règle floue comporte trois étapes fonctionnelles résumées dans la Figure (IV.8).

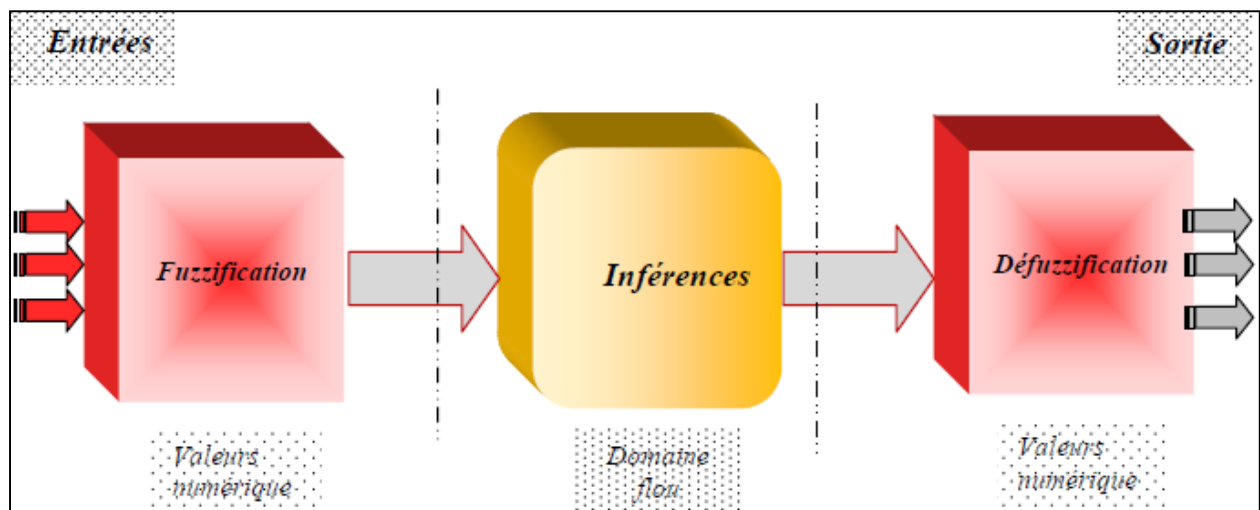


Figure IV.8. Traitement flou.

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 $A \text{ OU } B \Rightarrow C$ $C \Rightarrow D$ $D \text{ ET } A \Rightarrow E$
Règles traitées en parallèle	Règles utilisées une par une, séquentiellement
Interpolation entre règles pouvant se contredire	Pas d'interpolation, pas de contradiction

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

IV.4.4.1.1.Prédicat :

Un prédicat (encore appelé prémisse 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[42].

IV.4.4.1.2.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[42].

IV.4.4.1.3.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[42].

IV.4.4.2.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 (IV.9). Le mécanisme d'inférence comprend les étapes suivantes[42]:

- Fuzzification

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

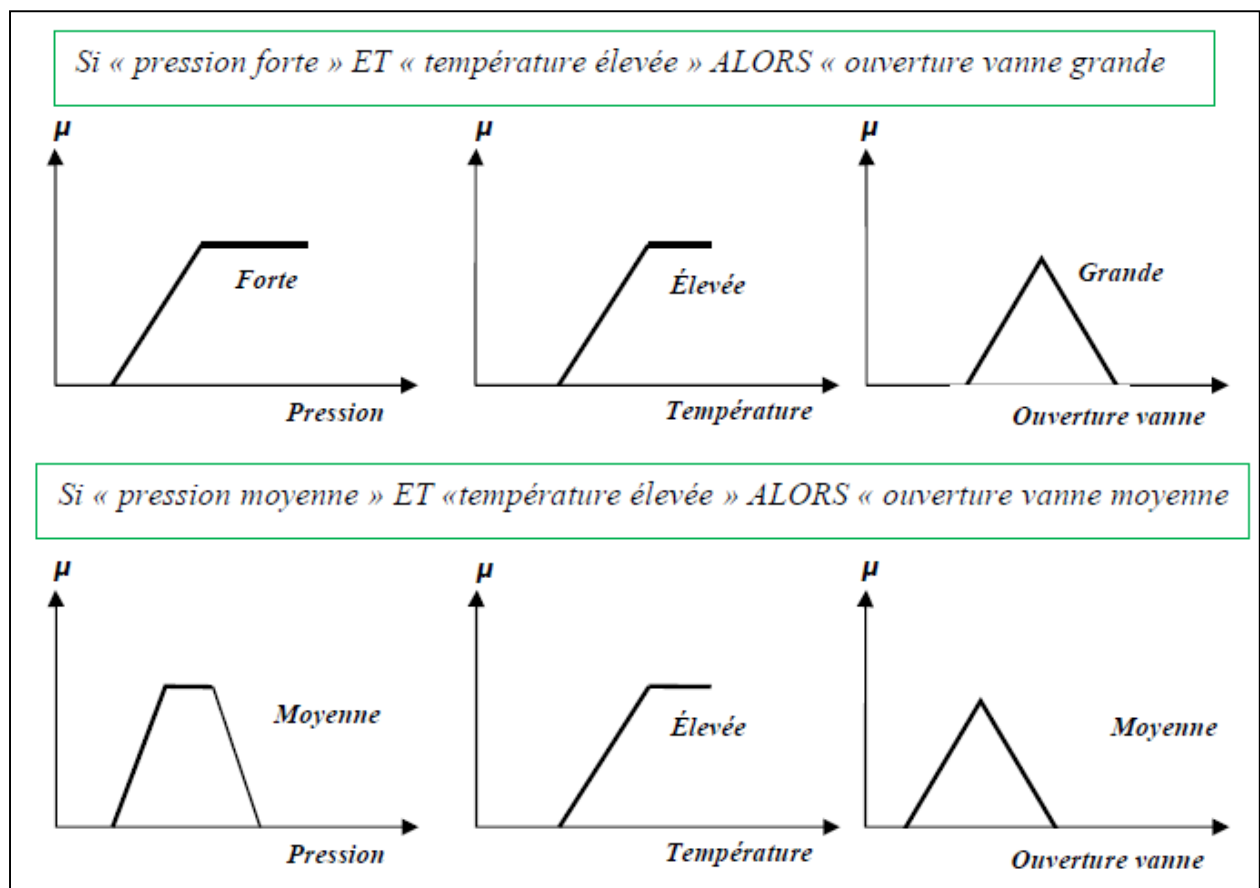


Figure IV.9. Implication.

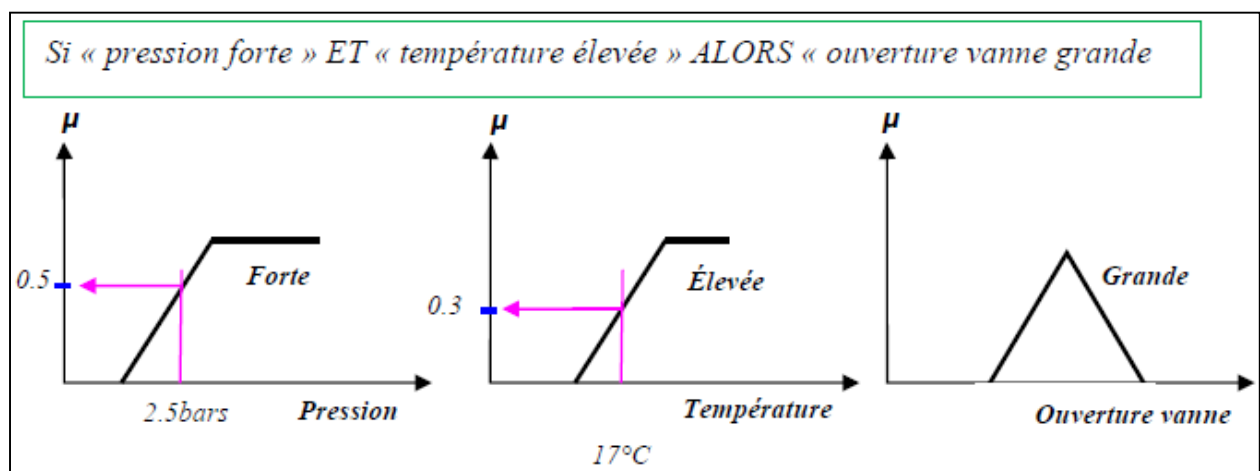


Figure IV.10. Fuzzification.

- 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 (IV.11). Le (ET) est réalisé en effectuant le minimum entre les degrés de vérité des propositions.

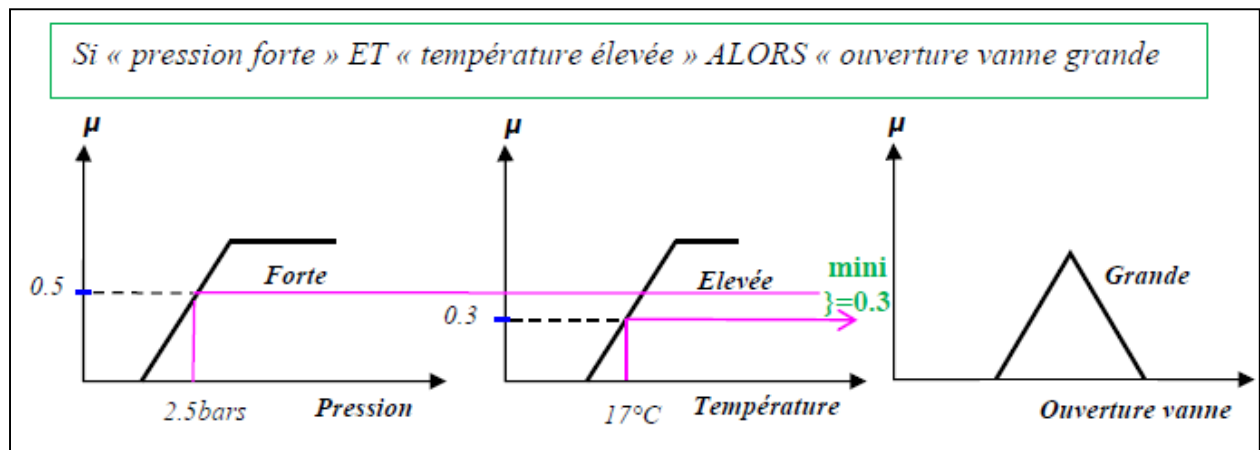


Figure IV.11. Activation.

▪ 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 (IV.12).

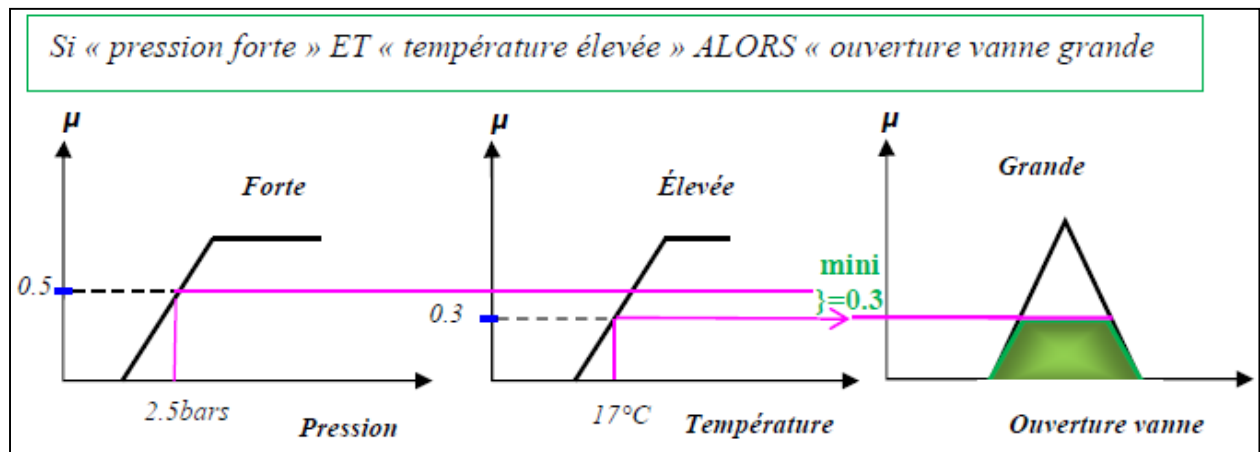


Figure IV.12. Implication.

▪ 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 (IV.13).

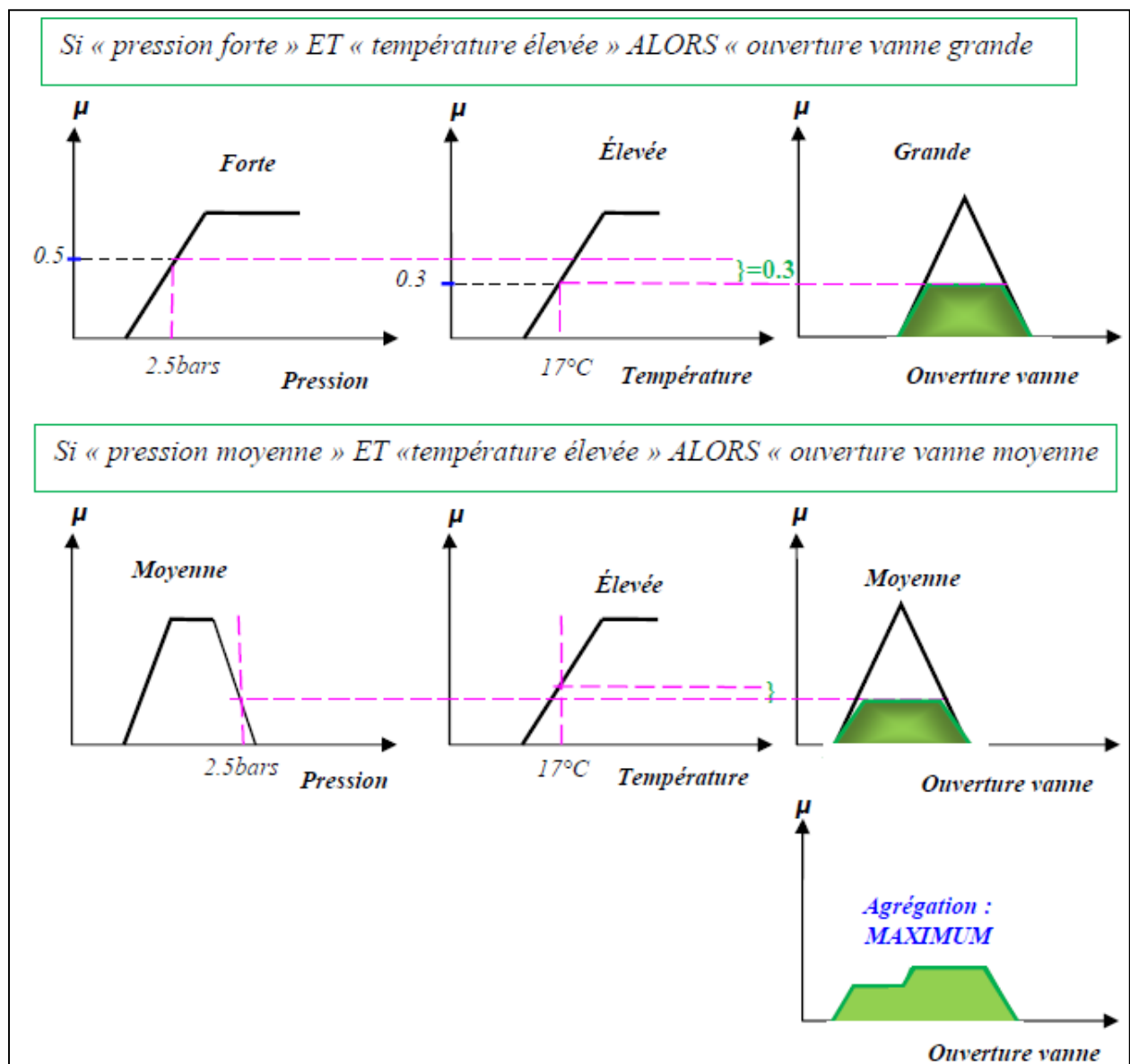


Figure IV.13. Agrégation des règles.

IV.4.4.3. 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 (IV.14) [42] .

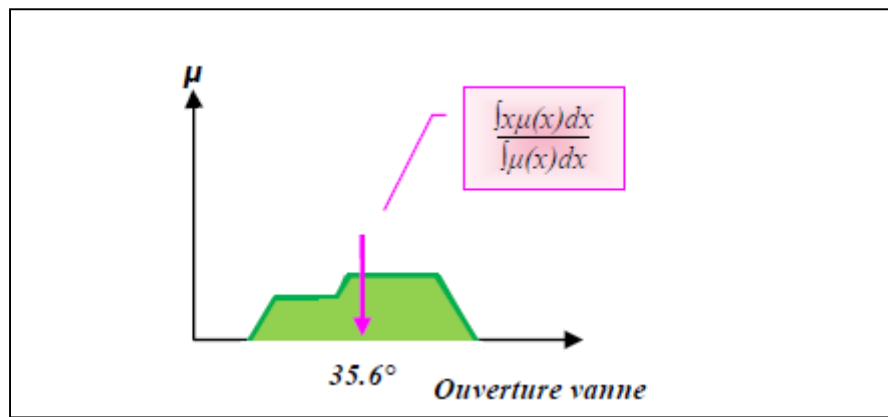


Figure IV.14. Défuzzification par centre de gravité.

IV.4.4.4.Règles « libres » et « en tableau » [42]:

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 (IV.2).

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

Tableau IV.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.

IV.5.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[43,27] .

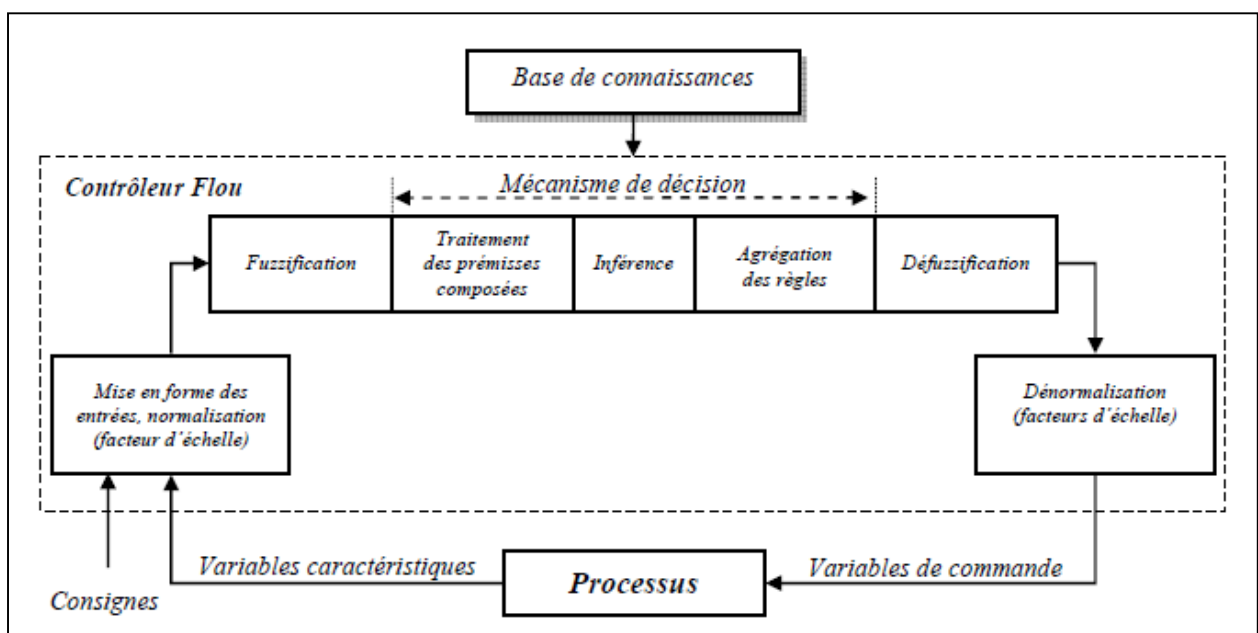


Figure IV.15. Structure de base d'un contrôleur flou.

IV.5.1.Les différentes étapes de la commande floue :

On distingue classiquement les étapes ci-dessous dans la structure d'un contrôleur flou[27]:

- 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.

IV 6.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[27].

IV.6.1. 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[27].

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 :

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

IV.6.2.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[27] .

Un contrôleur flou. Chacune des variables d'entrée et de sortie de flous est affecté sept sous-ensembles 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.

<i>NB</i>	NECATIVE BIG
<i>NM</i>	NECATIVE MEDIUM
<i>NS</i>	NECATIVE SMALL
<i>ZE</i>	ZERO
<i>PS</i>	POSITIVE SMALL
<i>PM</i>	POSITIVE MEDIUM
<i>PB</i>	POSITIVE BIG

Tableau IV.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 [27]. La fonction d'appartenance pour l'accélération, la vitesse et la tension sont indiquées à la figure suivant :

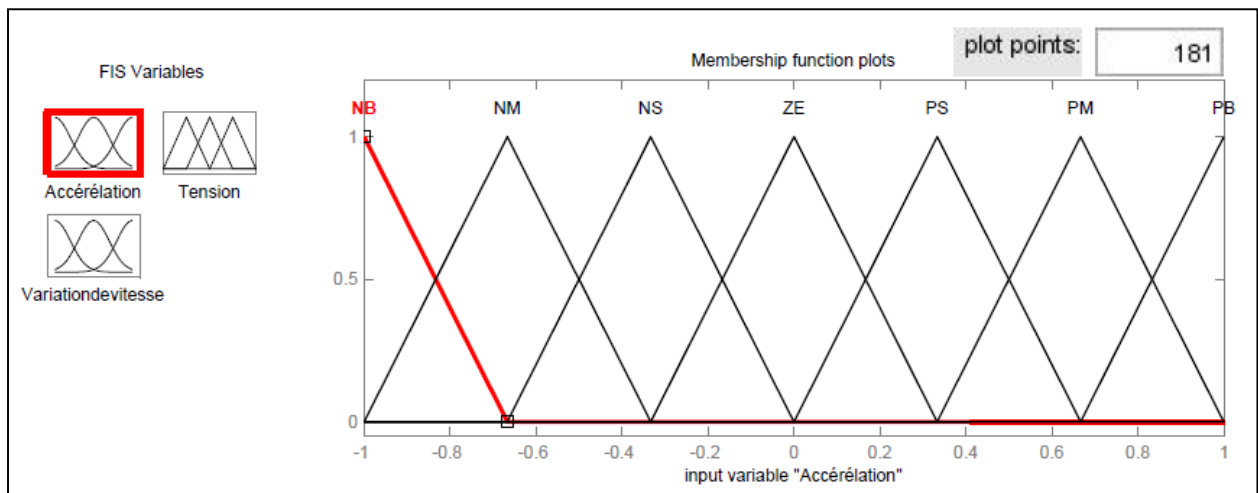


Figure VI.16. Fonctions d'appartenance pour l'accélération.

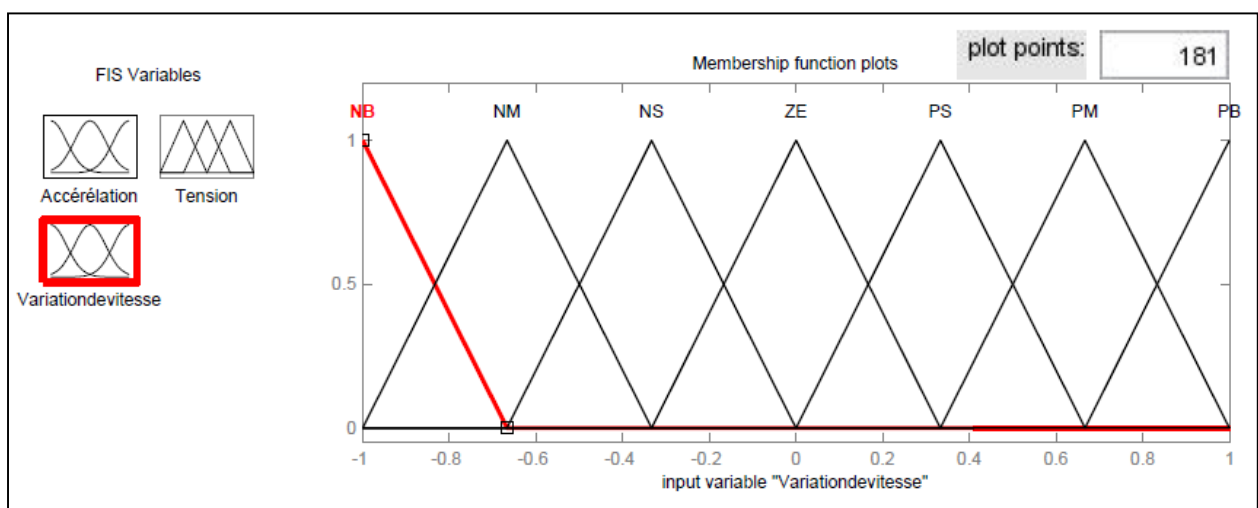


Figure VI.17. Fonctions d'appartenance pour la variation de vitesse.

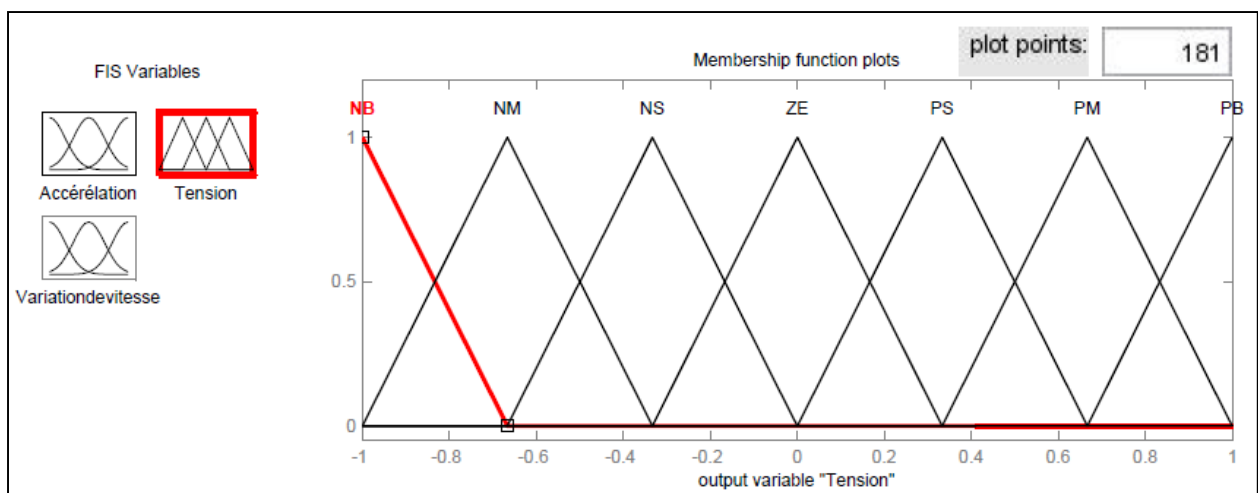


Figure VI.18. Fonctions d'appartenance pour la tension.

IV.6.3. La base de règles floues [48]:

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[27] . 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 (IV.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 IV.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).

IV.6.4.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 :

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

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].

IV.6.5. la mise en œuvre de la logique floue[48]:

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 :

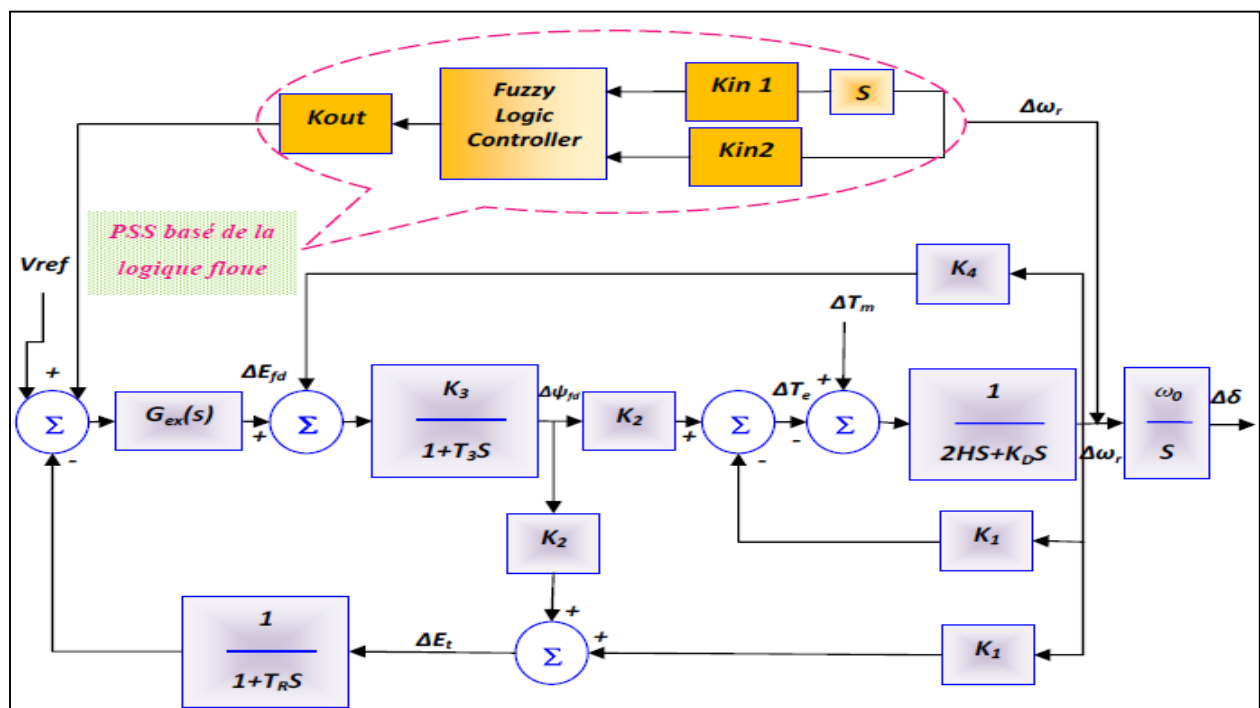


Figure IV.19. Exécution de contrôleur de logique floue.

IV.7.Résultat et discision :

On prend dans cette partie le système (générateur a connecté au réseau infini), pour faire la simulation. Les paramètres du système et des régulateurs existent dans l'annexe.

IV.7.1.Exécution du système avec les différentes fonctions d'appartenances :

A l'aide de programme MATLAB/sumulink, nous exécutons le modèle de la figure (IV.19) pour les différents fonctions d'appartenance.

Les fonctions d'appartenances qui ont été choisis sont les suivants :

- triangulaire (*trimf*).
- trapézoïdale (*trapmf*).
- gaussienne (*gaussmf*).
- gaussienne (*gauss2mf*).
- sigmoïdes (*psigmf*).

Cette représentation du réseau SMIB+FuzzyPSS dans la figure (IV.20).

➤ Paramètre schéma bloc de simulation:

$K_1=0.7635$, $K_2=0.8643$, $K_3(\text{exciter gain})=0.3230$, $K_4=1.4188$, $K_5 = 0.1462$, $K_6=0.4166$,
 $K_{in1}=1.6$, $K_{in2}=29.56$

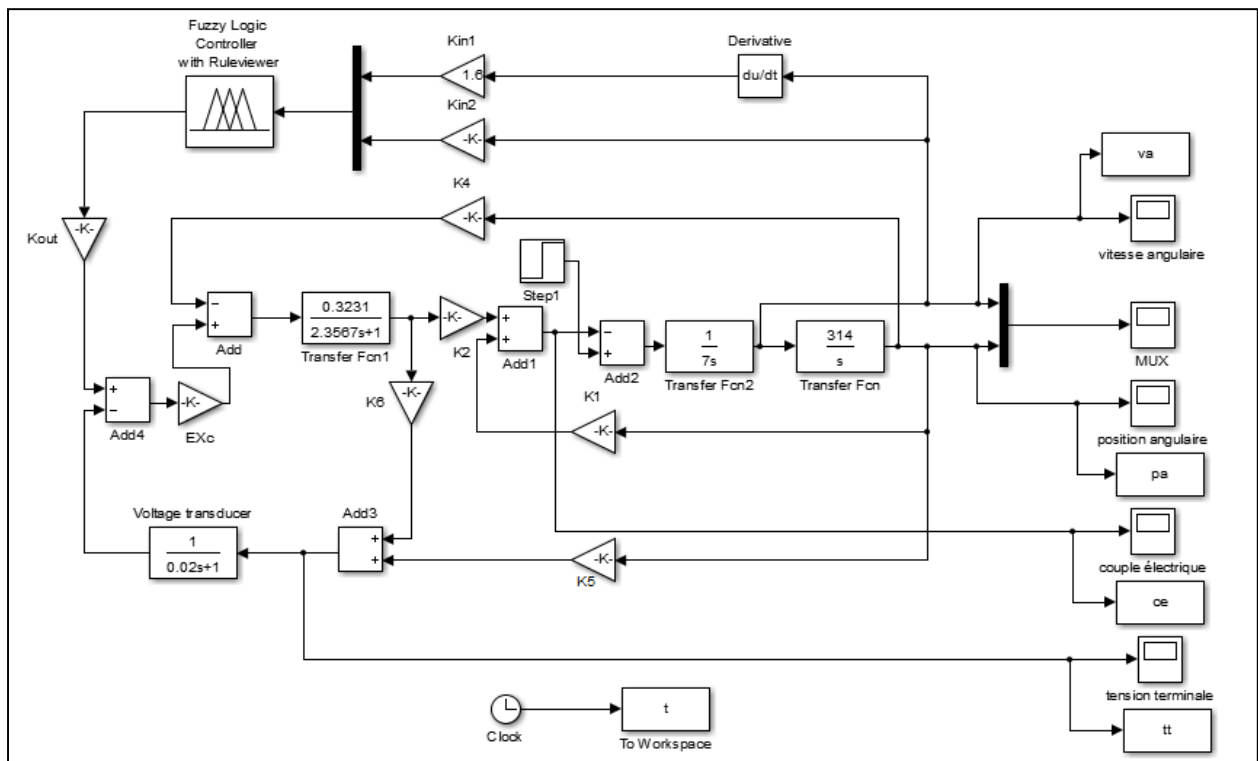


Figure IV.20. Représentation du réseau SMIB+FuzzyPSS sur MATLAB/Simulink.

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.

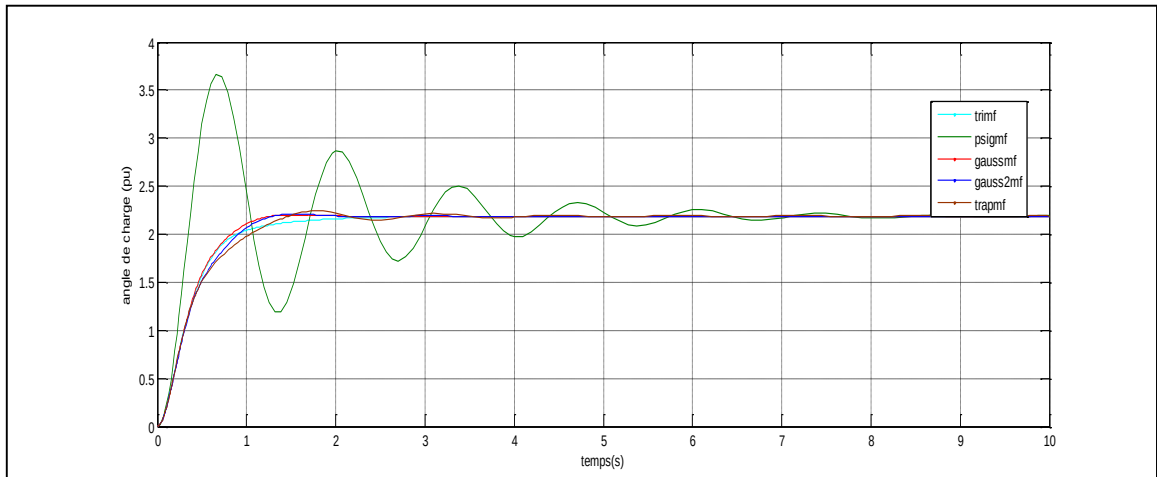


Figure IV.21. Présente la variation de la position angulaire1.

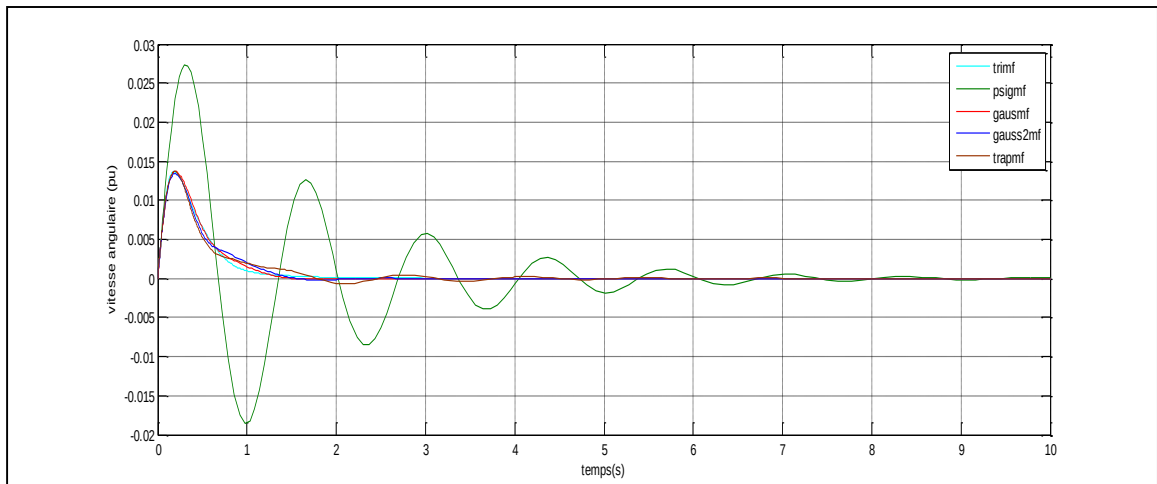


Figure IV.22. Présente la variation de la vitesse angulaire.

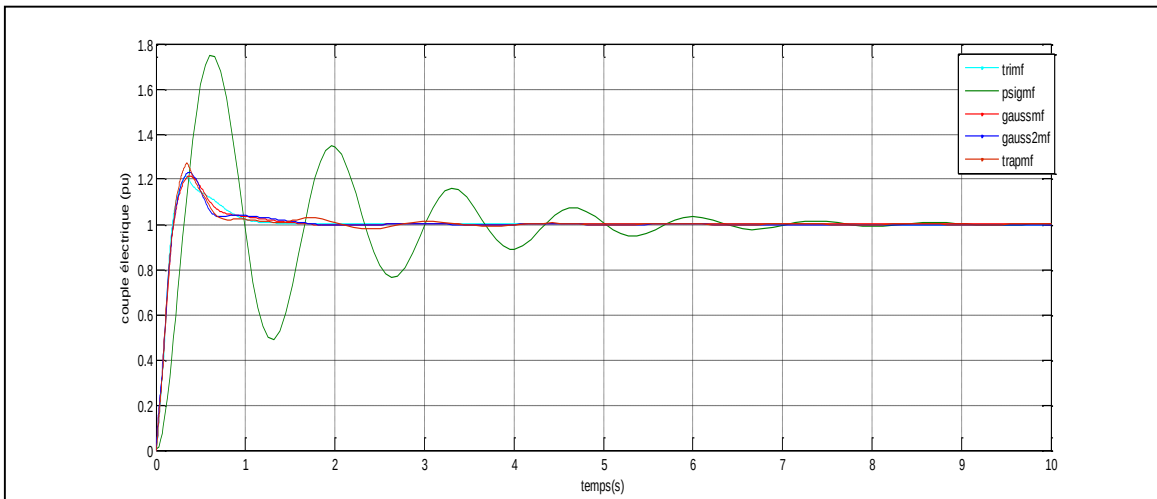


Figure IV.23. Présente la variation du couple électrique.

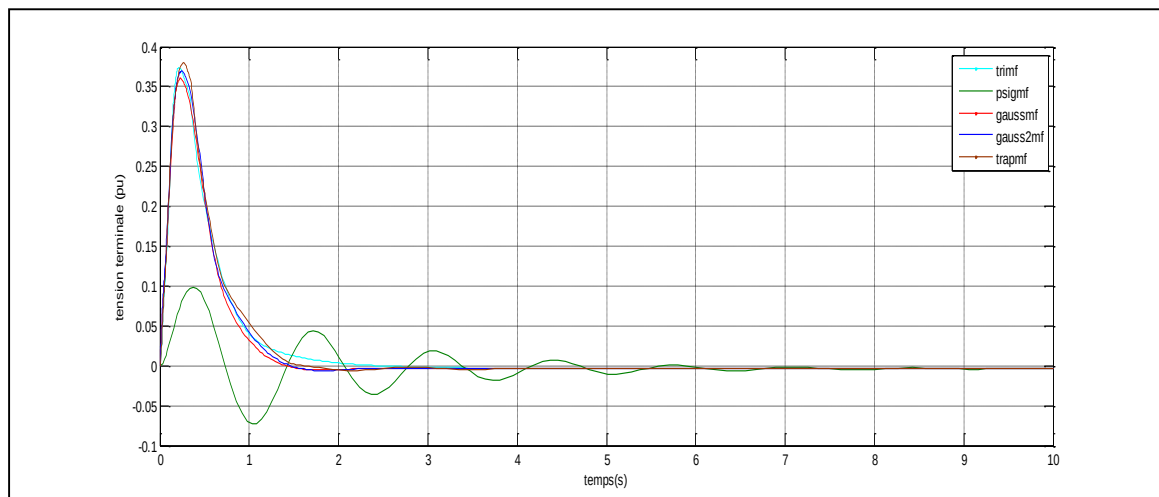


Figure IV.24. Présente la variation de la tension terminale.

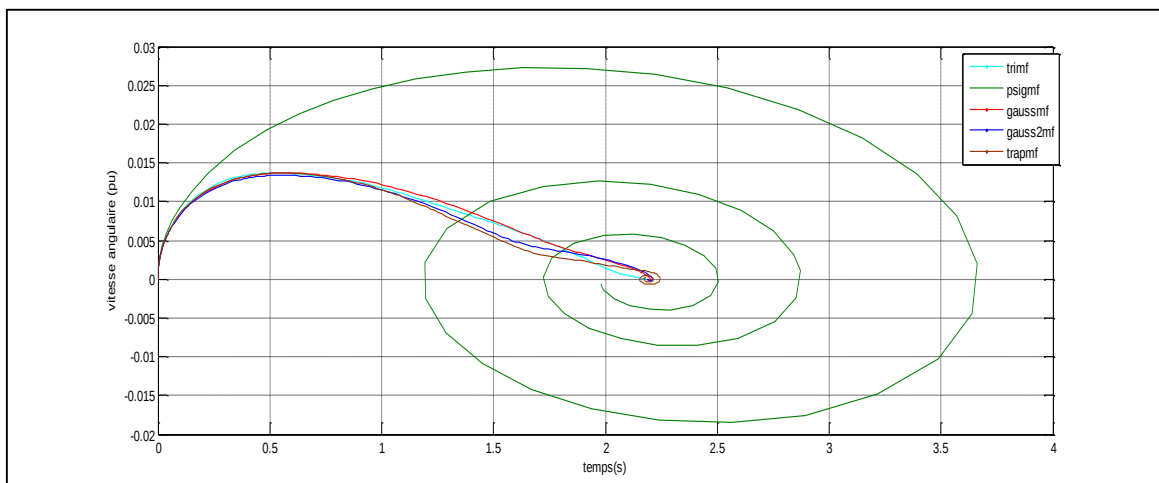


Figure IV.25. Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport l'angle.

La fonction d'appartenance meilleure est déterminée par l'application des critères temporels intégraux.

D'après le tableau (IV.5), on peut dire que la fonction d'appartenance triangulaire (*trimf*) est meilleur des autres, puisque le système est d'autant mieux réglé et le critère intégral est minimal.

Types de FA	<i>trimf</i>	<i>psigmf</i>	<i>gaussmf</i>	<i>gauss2mf</i>	<i>trapmf</i>
<i>IAE</i>	0.09975	0.1495	0.103	0.101	0.1066
<i>ISE</i>	0.008198	0.007102	0.007607	0.007546	0.008411
<i>ITAE</i>	0.1715	0.3273	0.1924	0.1986	0.2054

Tableau IV.5. Comparaison des critères temporels intégraux

Au-dessous, nous représentons les résultats de simulation pour la fonction d'appartenance triangulaire seulement.

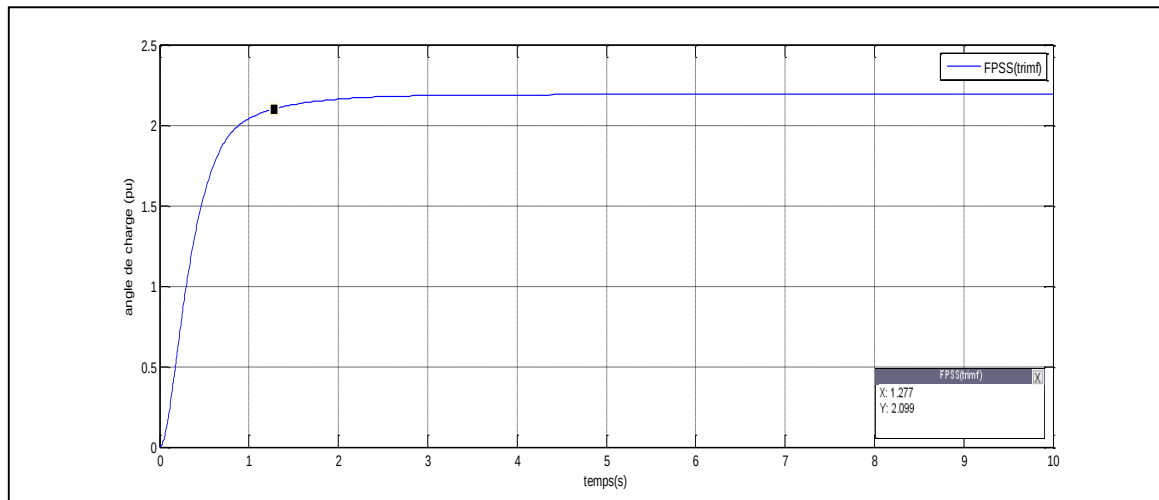


Figure IV.26. Présente la variation de la position angulaire.

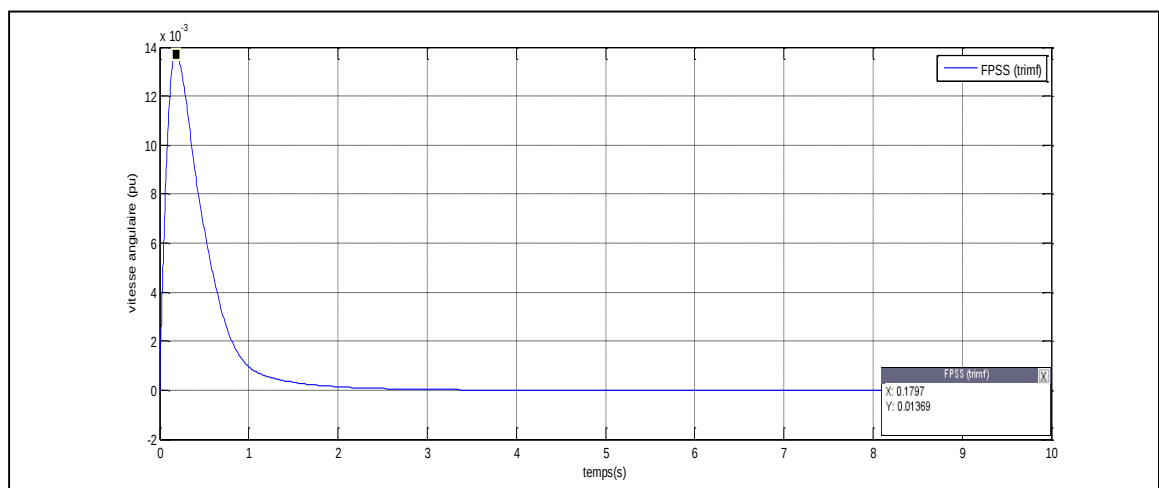


Figure IV.27. Présente la variation de la vitesse angulaire.

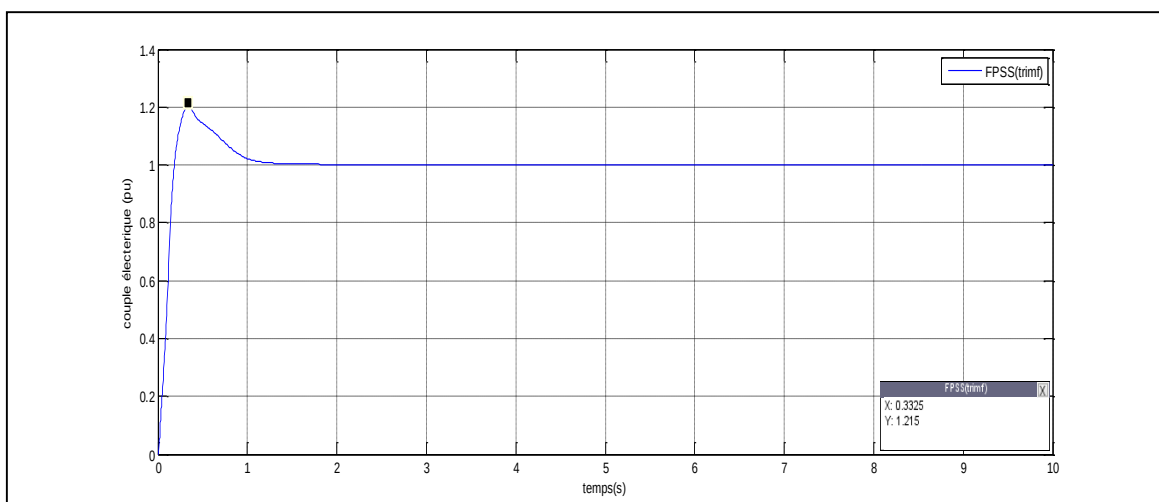


Figure IV.28. Présente la variation du couple électrique.

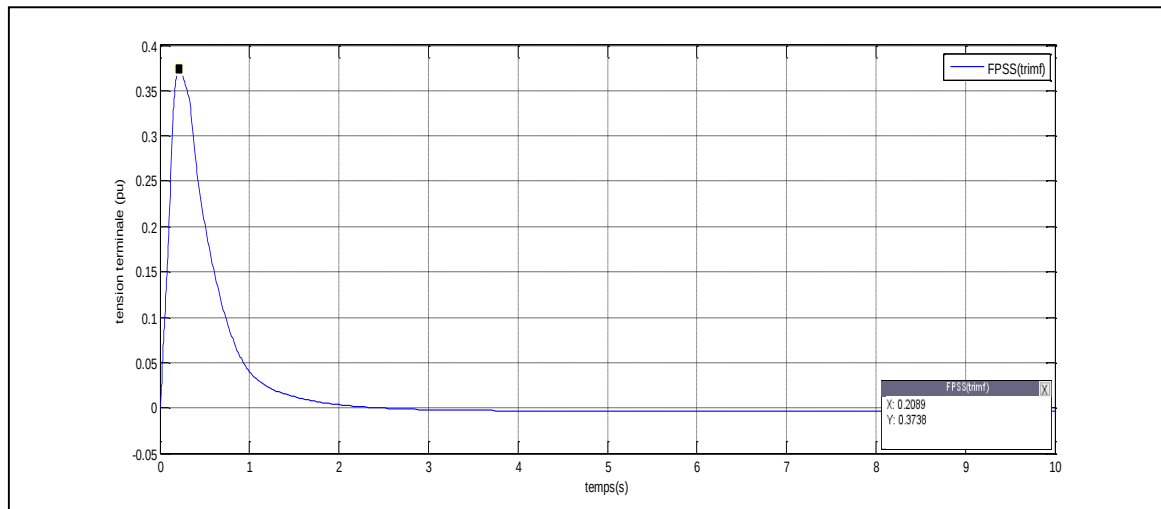


Figure IV.29. Présente la variation de la tension terminale.

IV.7.2.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(IV.19), pour les mêmes paramètres.

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

Les résultats de simulation dans les figures (IV.30), (IV.31), (IV.32), (IV.33) et (IV.34) montré au-dessous, pour chacun d'angle de charge, de la vitesse angulaire, du couple électrique et de la tension terminale.

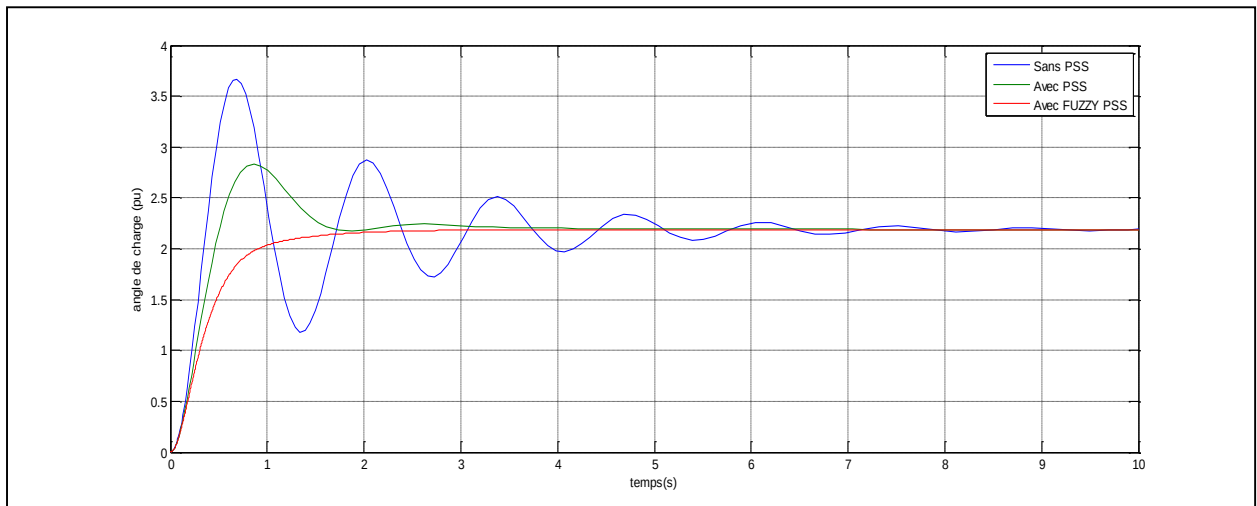


Figure IV.30. Présente la variation de la position angulaire.

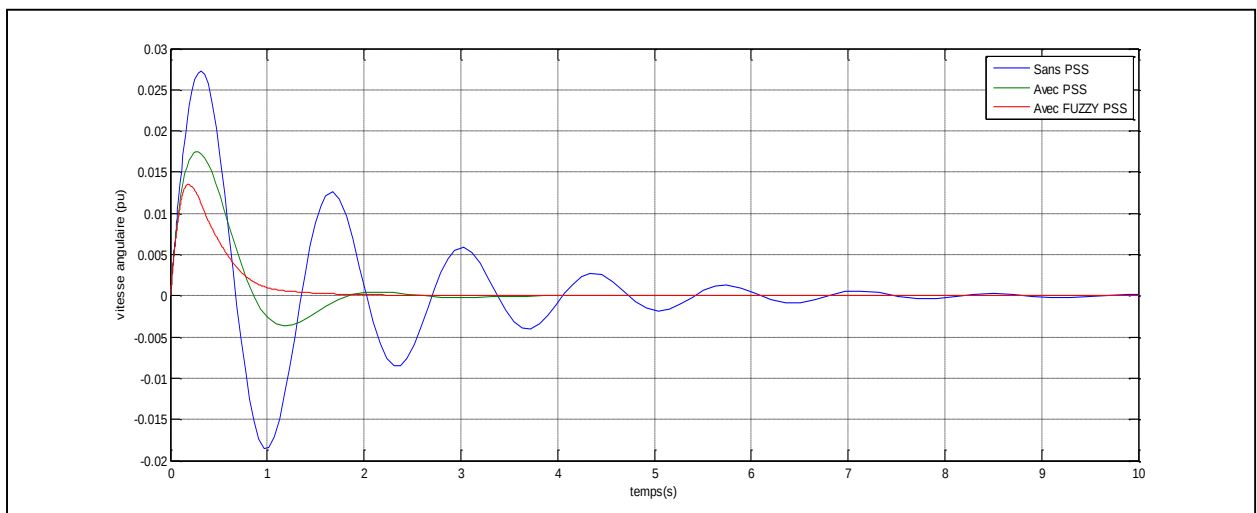


Figure IV.31. Présente la variation de la vitesse angulaire.

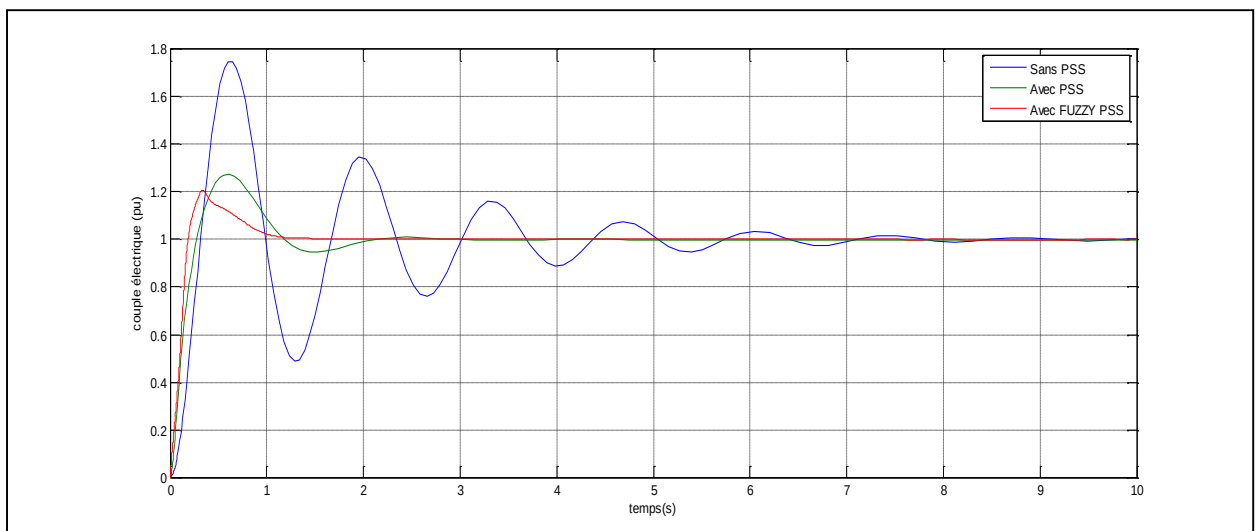


Figure IV.32. Présente la variation du couple électrique.

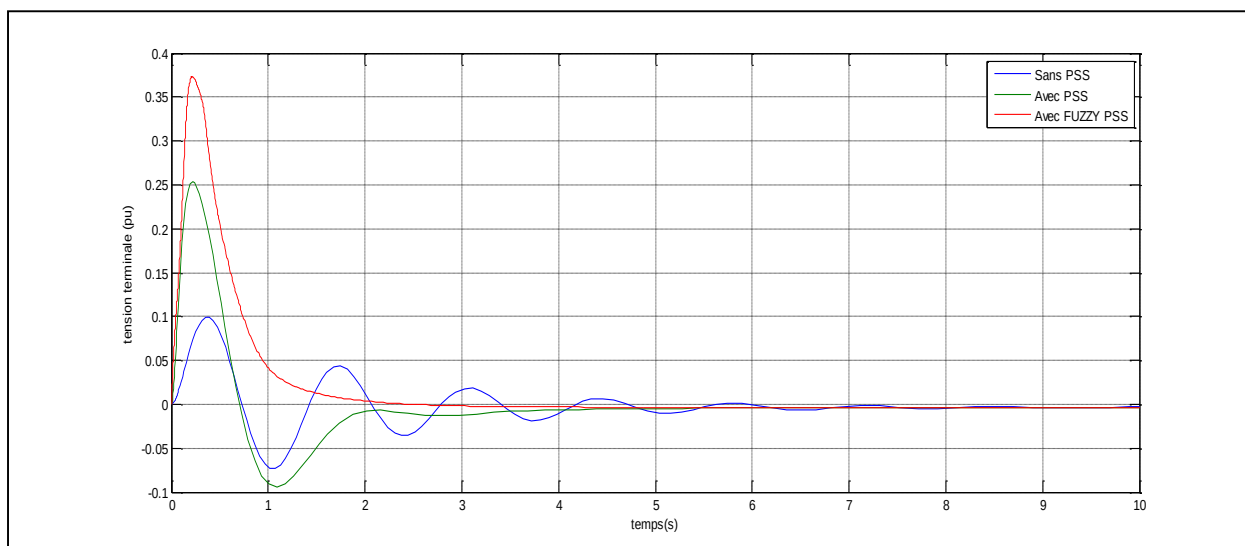


Figure IV.33. Présente la variation de la tension terminale.

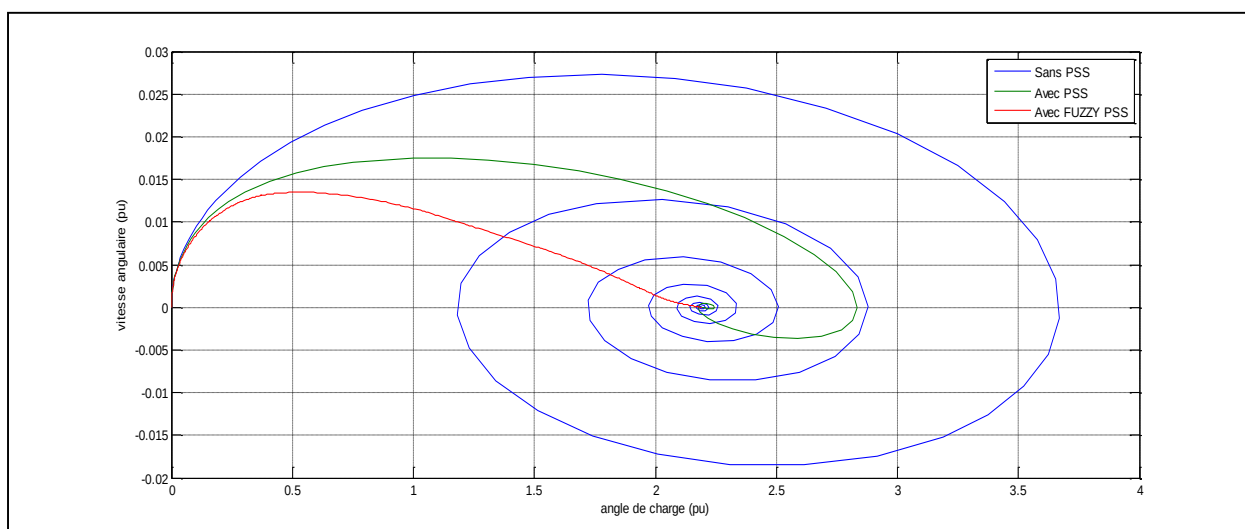


Figure IV.34. Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport l'angle.

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 IV.6. 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 IV.7. 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 (IV.7) 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_i proche de sa référence $V_{\text{réf}}$ avec un minimum de dépassement.

IV 8.Conclusion :

Parmi les techniques de l'intelligence artificielle, la logique floue permet de modéliser puis de remplacer l'expertise de conduite de processus, expertise en provenance du concepteur ou de l'utilisateur.

Dans ce chapitre, nous présentons la théorie des ensembles floue et nous également expliquons le principe du contrôleur flou.

En termes de la simulation, nous exécutons du système avec différents fonctions d'appartenances :

- triangulaire (*trimf*).
- trapézoïdale (*trapmf*).
- gaussienne (*gaussm*).
- gaussienne (*gauss2mf*).
- sigmoïdes (*psigmf*).

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

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

Il peut être conclu que la performance de la FPSS proposé est beaucoup mieux et les oscillations sont amorties beaucoup plus rapide.

Chapitre 5

***Stabilisation d'un Système
multi-machines***

V.1.Introduction :

L'un des problèmes les plus importants, lors de l'étude d'un système électro-énergétique complexe, est celui de sa stabilité. Ceci est dû au développement important des systèmes. L'étude et l'analyse du comportement des systèmes face à de faibles ou importantes perturbations ont été l'objet de nombreuses recherches utilisant différentes méthodes, indirectes ou directes et récemment par l'emploi de nouvelles techniques telles que les logique floue, en l'occurrence les réseaux de neurones artificiels « *RNA* ».

Le but principal de ce chapitre consiste à traiter le problème de la stabilité transitoire dans les systèmes multi-machines par deux méthodes différentes, à savoir la méthode logique floue (*FUZZY*) et celle de *PSS* et comparer avec sans *PSS*.

La validation des 2 méthodes proposées sera effectuée par voie de simulation basée sur le logiciel *MATLAB 13*.

A la fin de ce chapitre nous avons déterminé la meilleur méthode pour obtenir l'amortissement des oscillations.

V.2. 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, figure (V.1). 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.

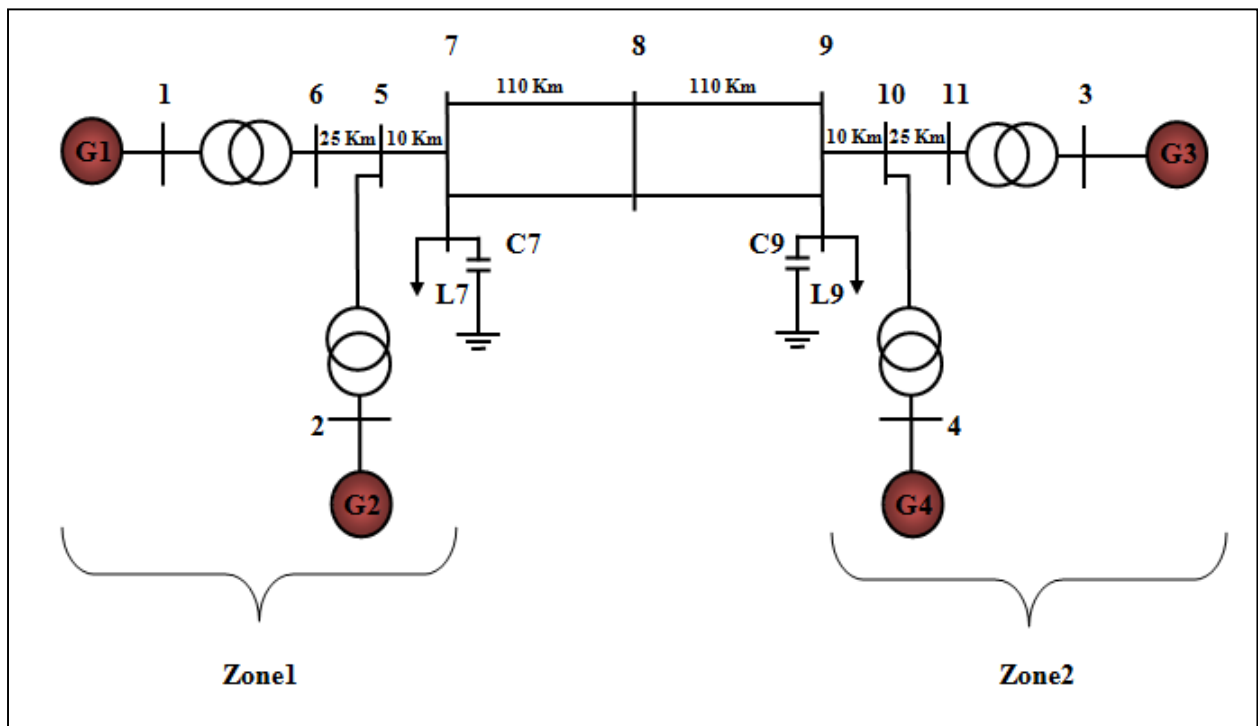


Figure V.1. Représentation schématique des deux régions du système étudié.

V.3. Amortissement des oscillatoires inter-régions[44]:

Les échanges croissants d'énergie font apparaître des oscillations de puissance, nommées « oscillations 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 transitant sur les lignes du réseau [45]. 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 (V.2): 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 δ_i «en phases») et le ressort représentant les lignes [46].

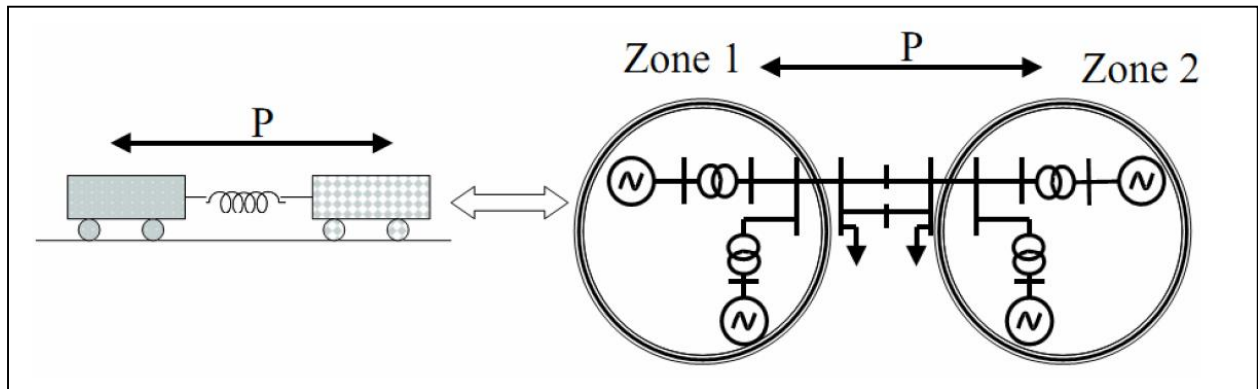


Figure V.2.Exemple mécanique analogue aux oscillations inter-régions.

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 [47]; nous ne nous intéresserons pas à ce type d'amortissement dans cette thèse.
- Soit par des *PSS* (Power System stabilizer) [30] 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.

V.4.. Intérêt de l'amortissement des oscillations inter-régions[44]:

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 inter-régions, permet tout en gardant une marge de sécurité équivalente, de réduire les marges de transmission de puissance.

V.5. Résultats de simulation et discision :

Le modèle de système de puissance de quatre machines montré dans la figure (V.1) a été choisi pour évaluer la performance et l'efficacité du stabilisateur proposé pour l'amortissement des oscillations locales et interzones[44]. La performance obtenue avec le stabilisateur proposé PSS est comparée à celles obtenues en utilisant un logique floue (*FUZZY*), sous différentes contingences. Une représentation schématique du diagramme d'un générateur est montrée dans la figure (V.3).

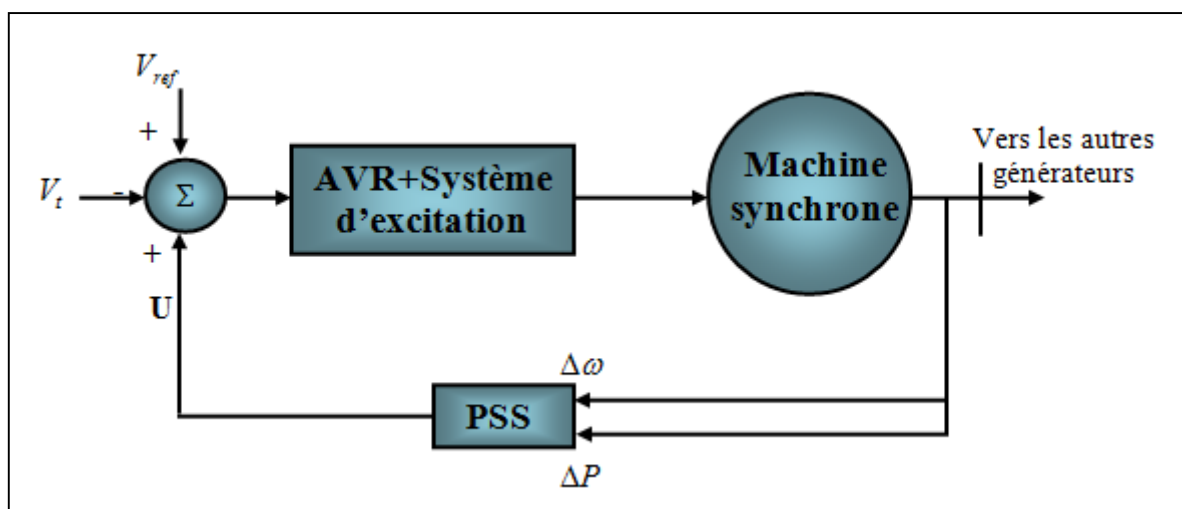


Figure V.3. Configuration d'un générateur équipé supplémentaire stabilisateur.

La représentation du système multi-machines été faite en utilisant l'environnement MATLAB-Simulink version 8.1.0(R2013a), comme figure(V.4) suite .

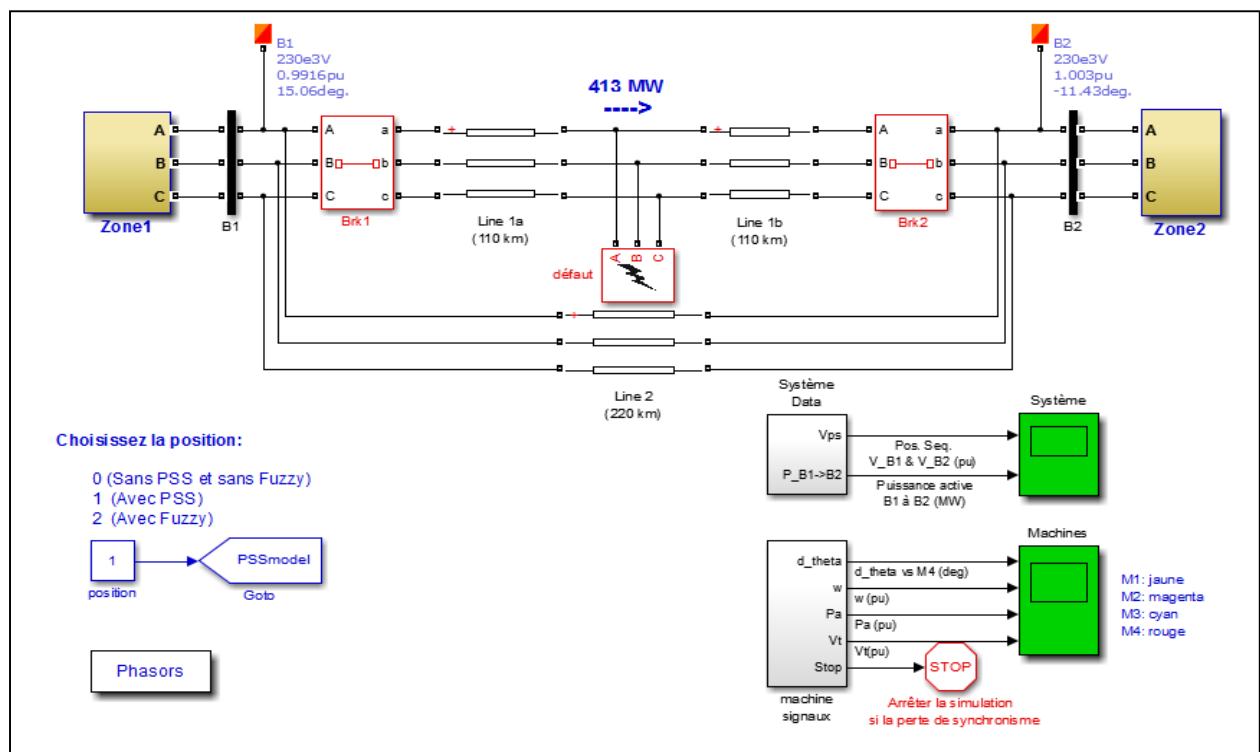


Figure V.4. Représentation du réseau test sur MATLAB/Simulink.

V.5.1. 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 .

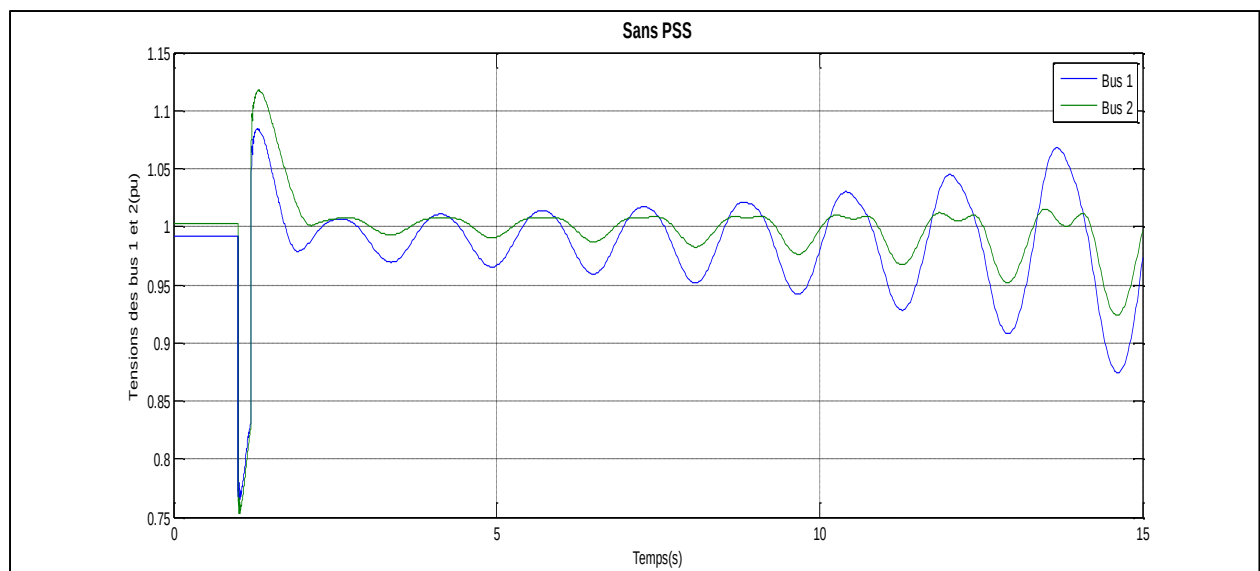


Figure V.5. Présente la variation des tensions des bus(1 et 2) .

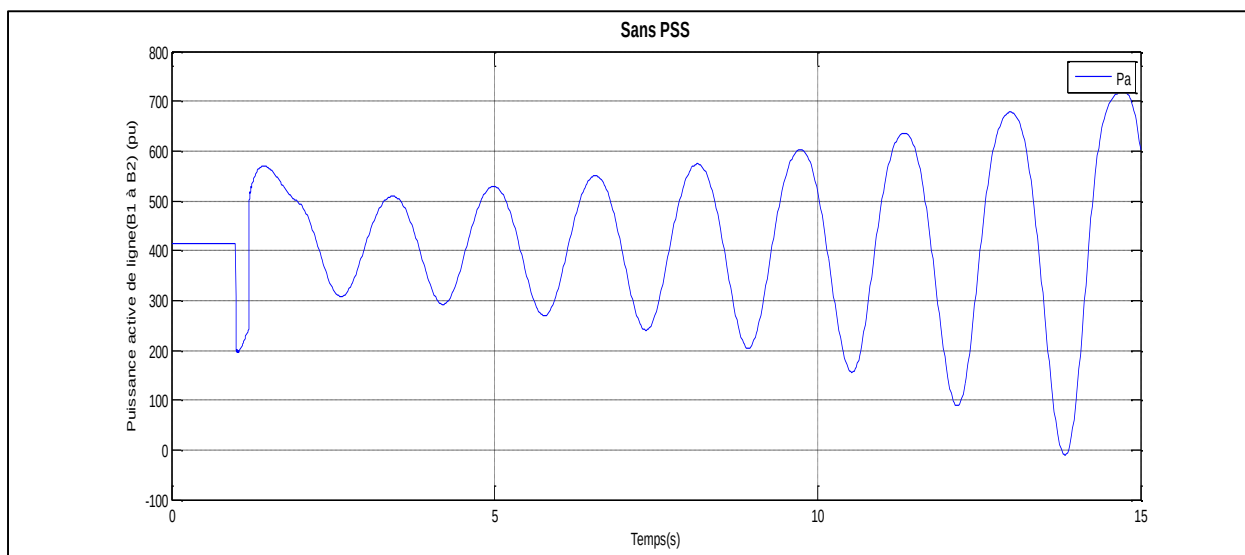


Figure V.6. Présente la variation de Puissance active de ligne(B1 à B2).

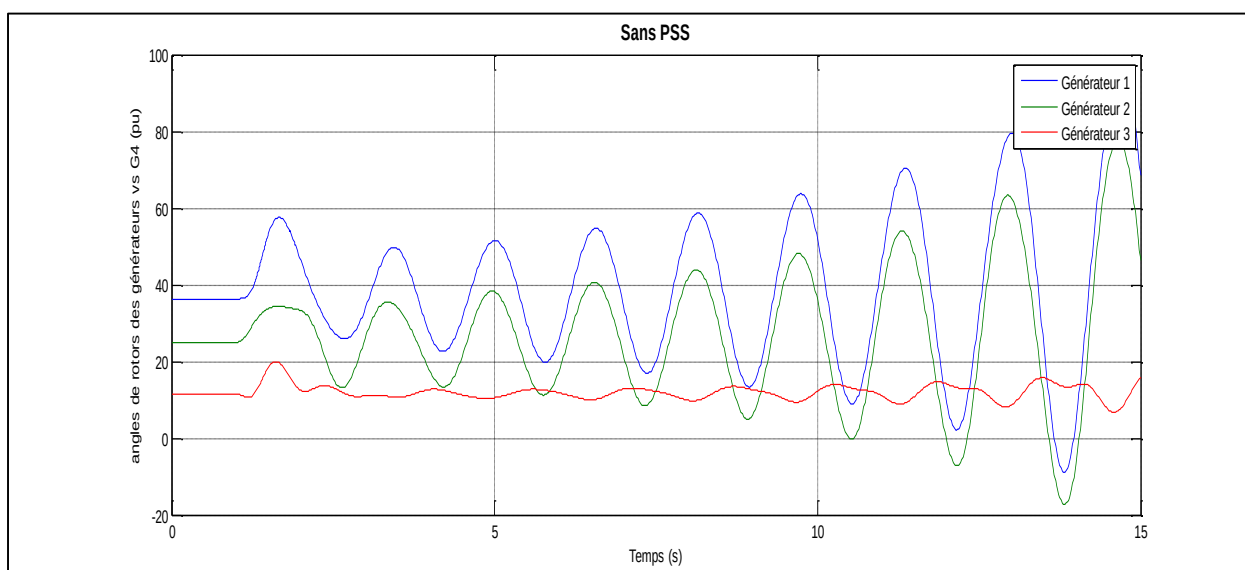


Figure V.7. Présente la variation des angles de rotors des générateurs vs G4.

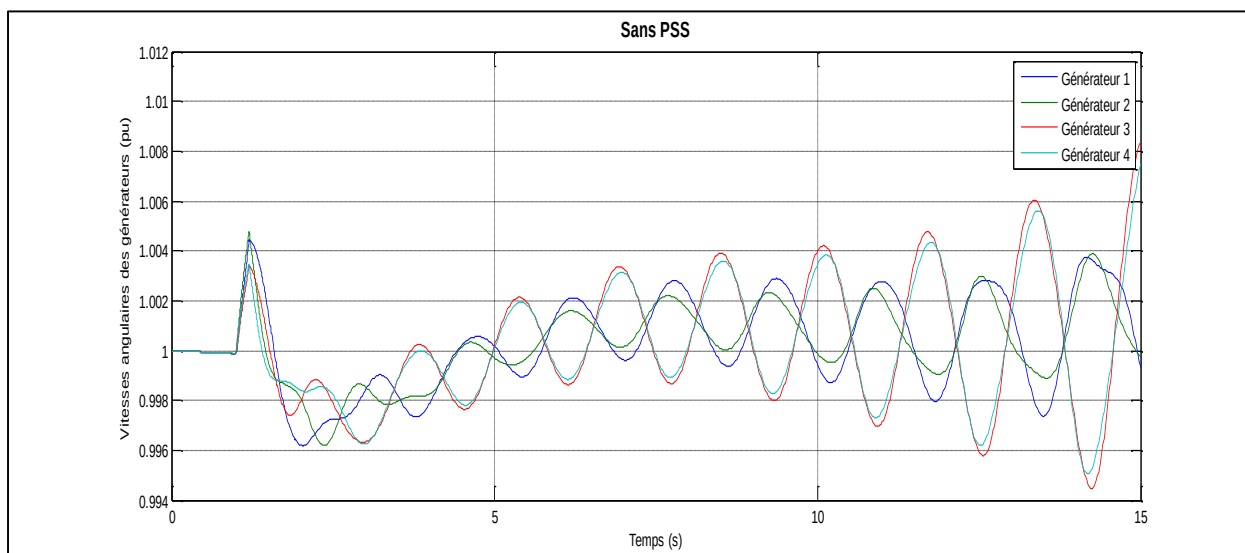


Figure V.8. Présente la variation de Vitesses angulaires des générateurs.

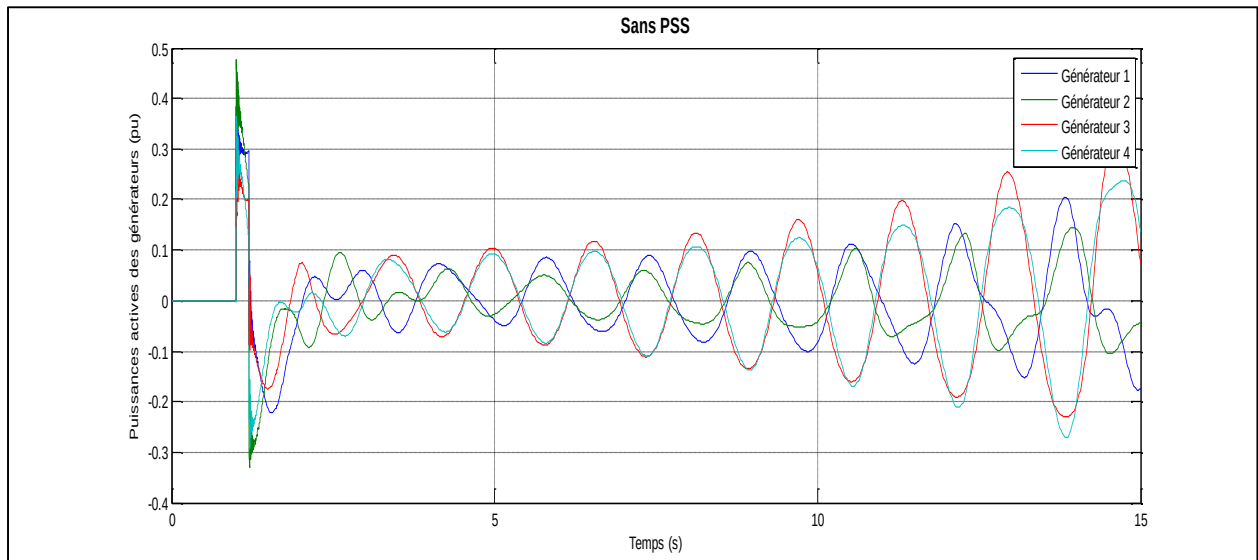


Figure V.9. Présente la variation des Puissances actives des générateurs.

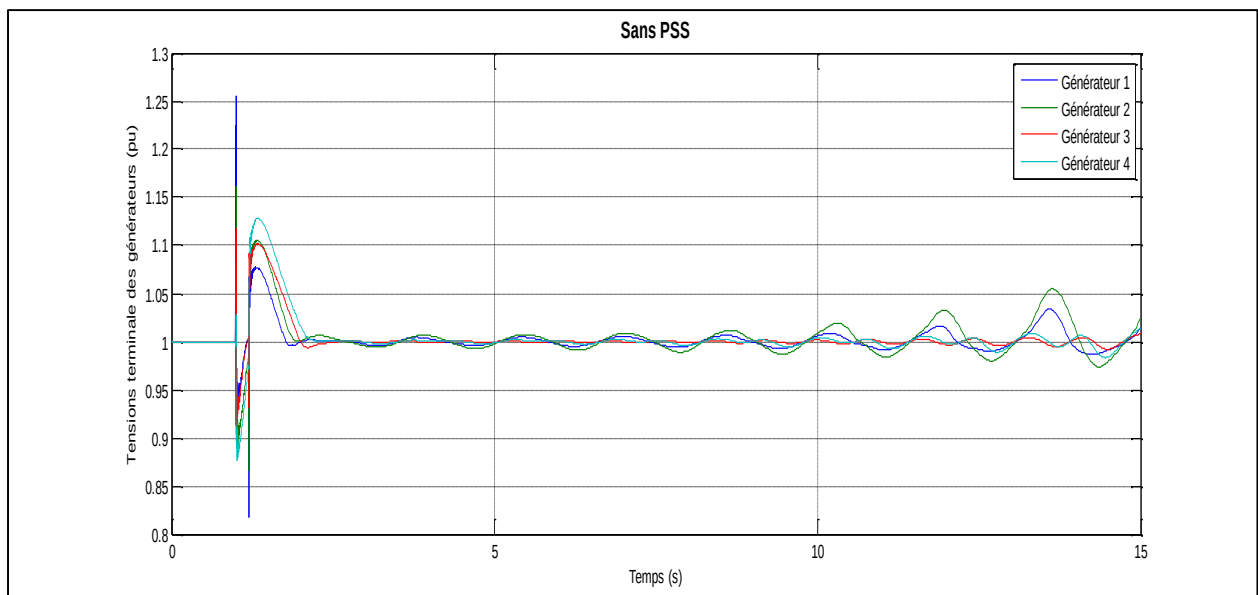


Figure V.10. Présente la variation des Tensions terminale des générateurs.

La figure (V.7) 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 (*PSS* et *FUZZY*) sont maintenant ajoutés aux générateurs.

V.5.2. Evaluation de performance et comparaison :

Pour évaluer la performance des différents stabilisateurs des simulations temporelles du système sont effectuées en considérant le modèle non linéaire pour ces différents méthodes en présence d'une grande perturbation transitoire[44], même travail dans la partie précédente , nous devons dans cette partie en y ajoutant les stabilisateurs *PSS* et *FUZZY* et Il note avec satisfaction que

nous les méthodes sont dus à la stabilité du système sur la situation moins longtemps moindre perturbation.

V.5.2.1. Résultats de simulation:

➤ Les tensions des bus(1 et 2) :

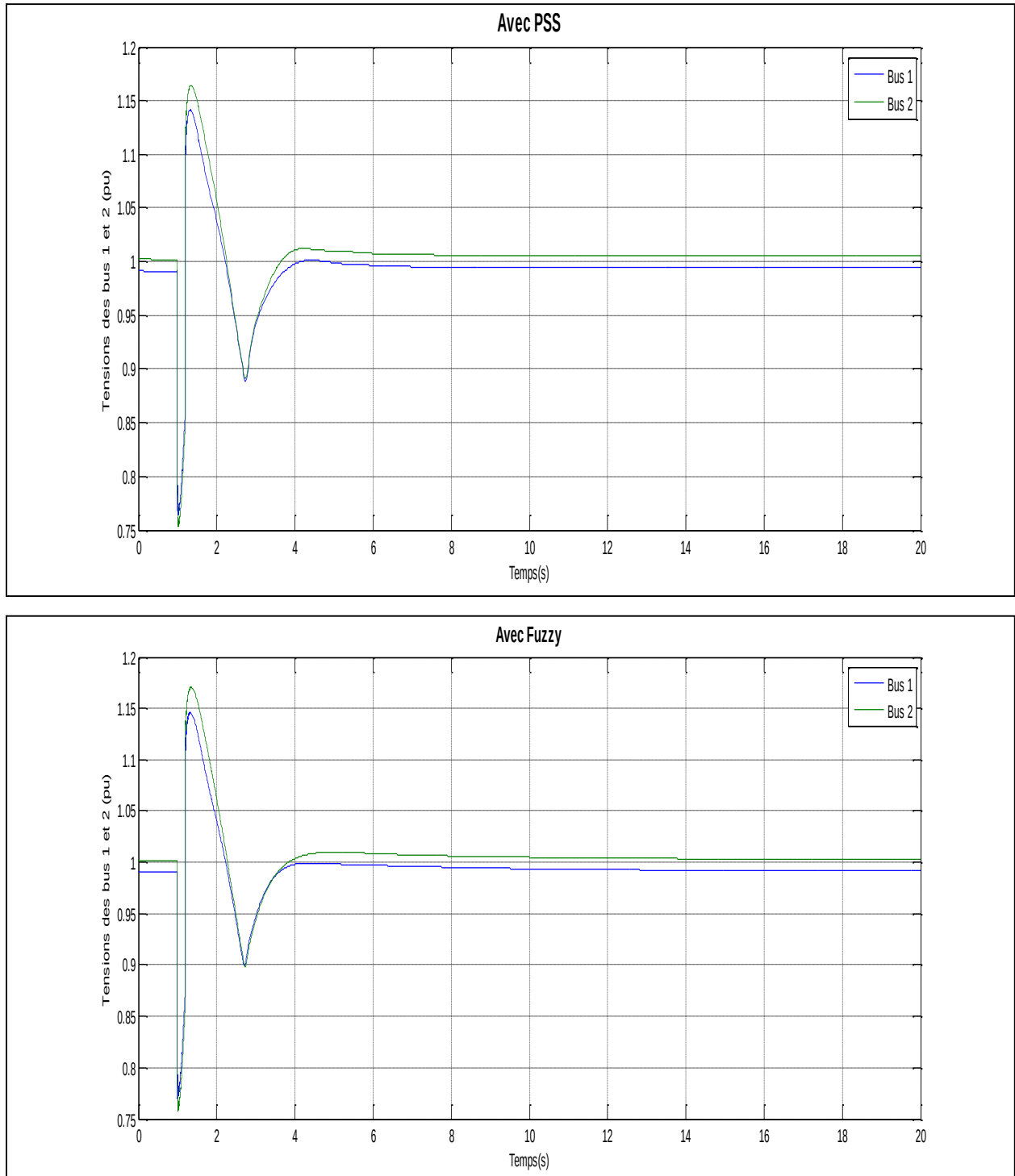


Figure V.11. Présente la variation des tensions des bus(1 et 2) .

➤ Puissance active de ligne(Bus1 à Bus2) :

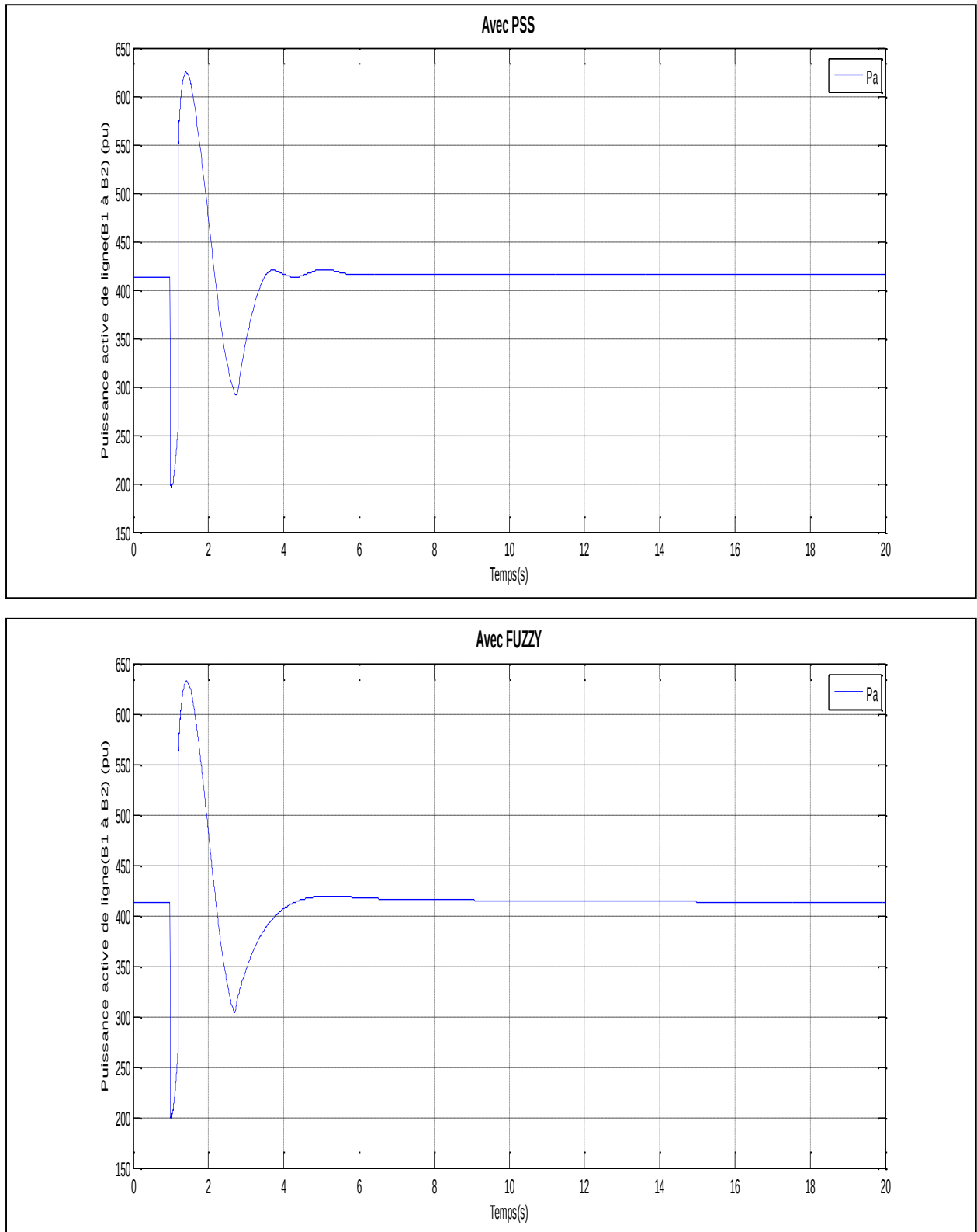


Figure V.12. Présente la variation de Puissance active de ligne(B1 à B2).

➤ Angles de rotors des générateurs vs générateur n°4 :

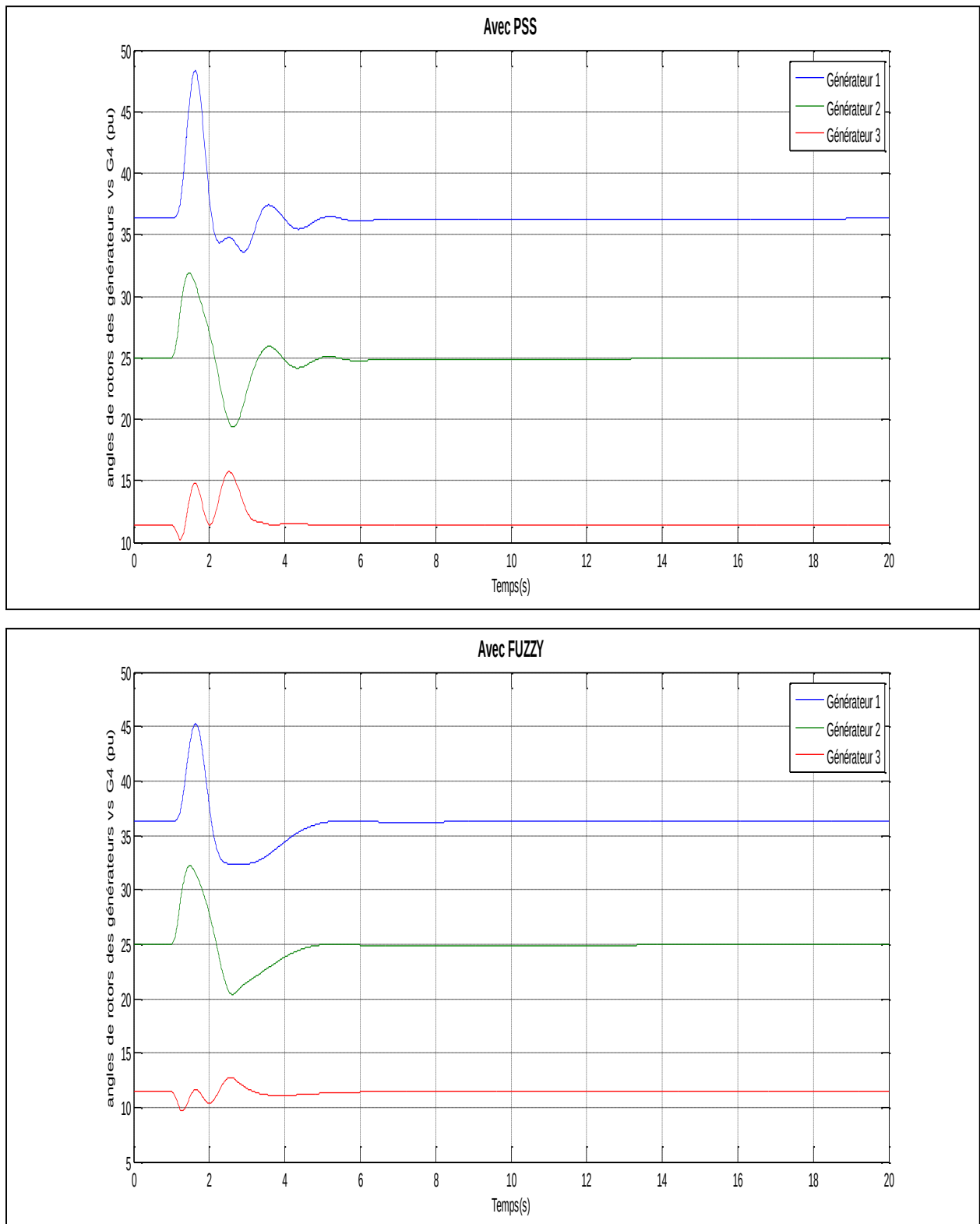


Figure V.13. Présente la variation des angles de rotors des générateurs vs G4.

➤ Vitesses angulaires des générateurs :

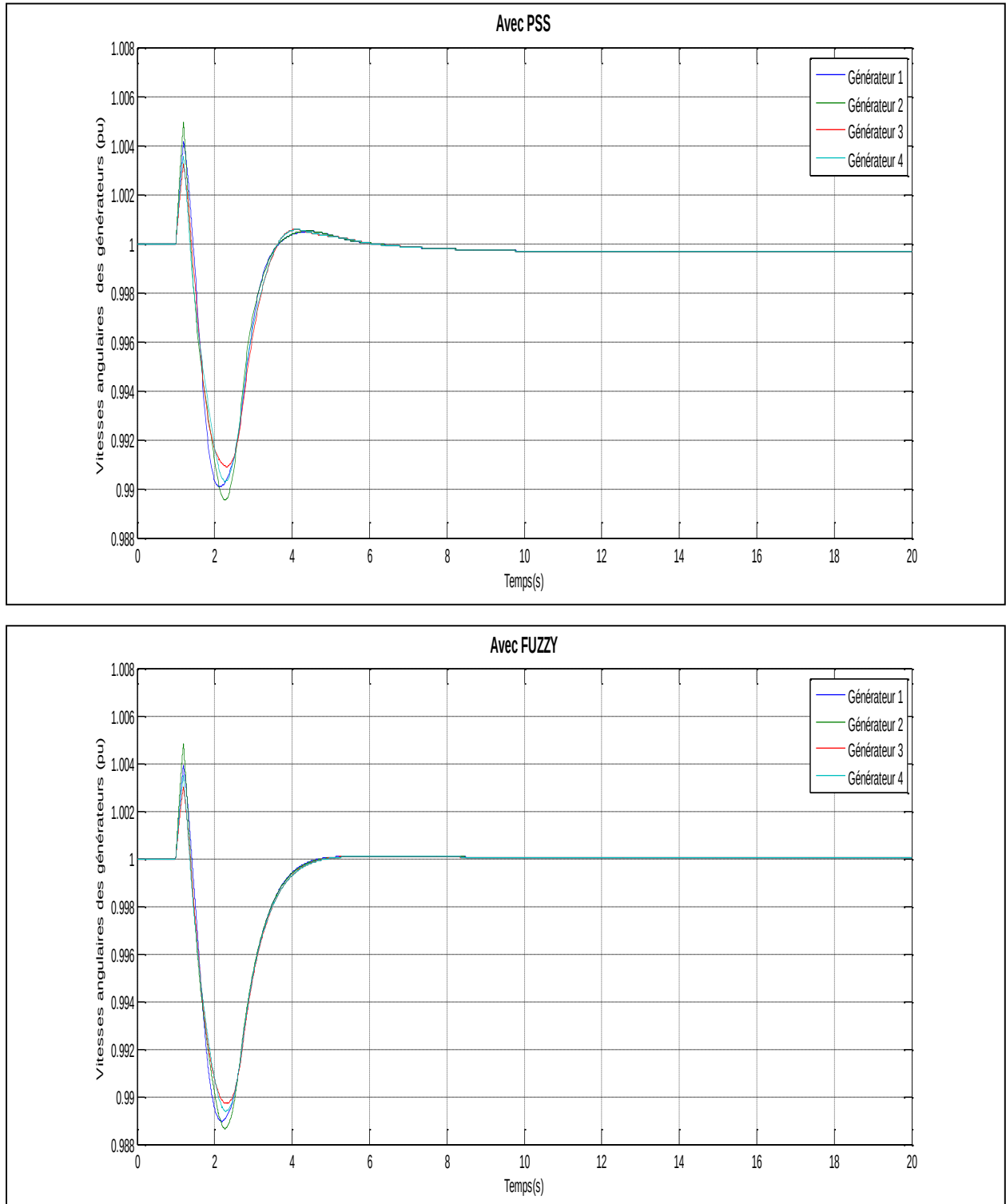


Figure V.14. Présente la variation de Vitesses angulaires des générateurs.

➤ Puissances actives des générateurs :

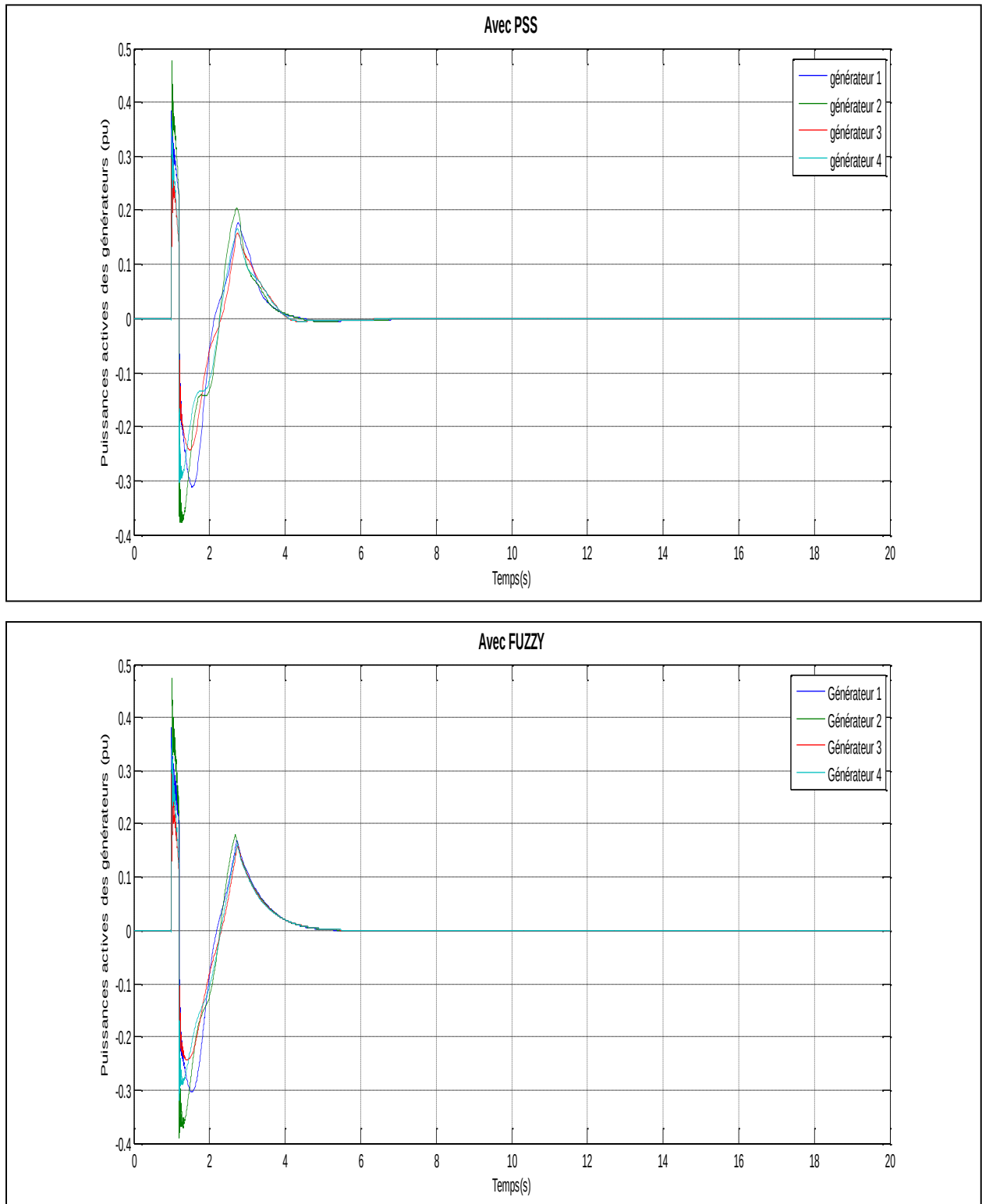


Figure V.15. Présente la variation des Puissances actives des générateurs.

➤ Tensions terminale des générateurs :

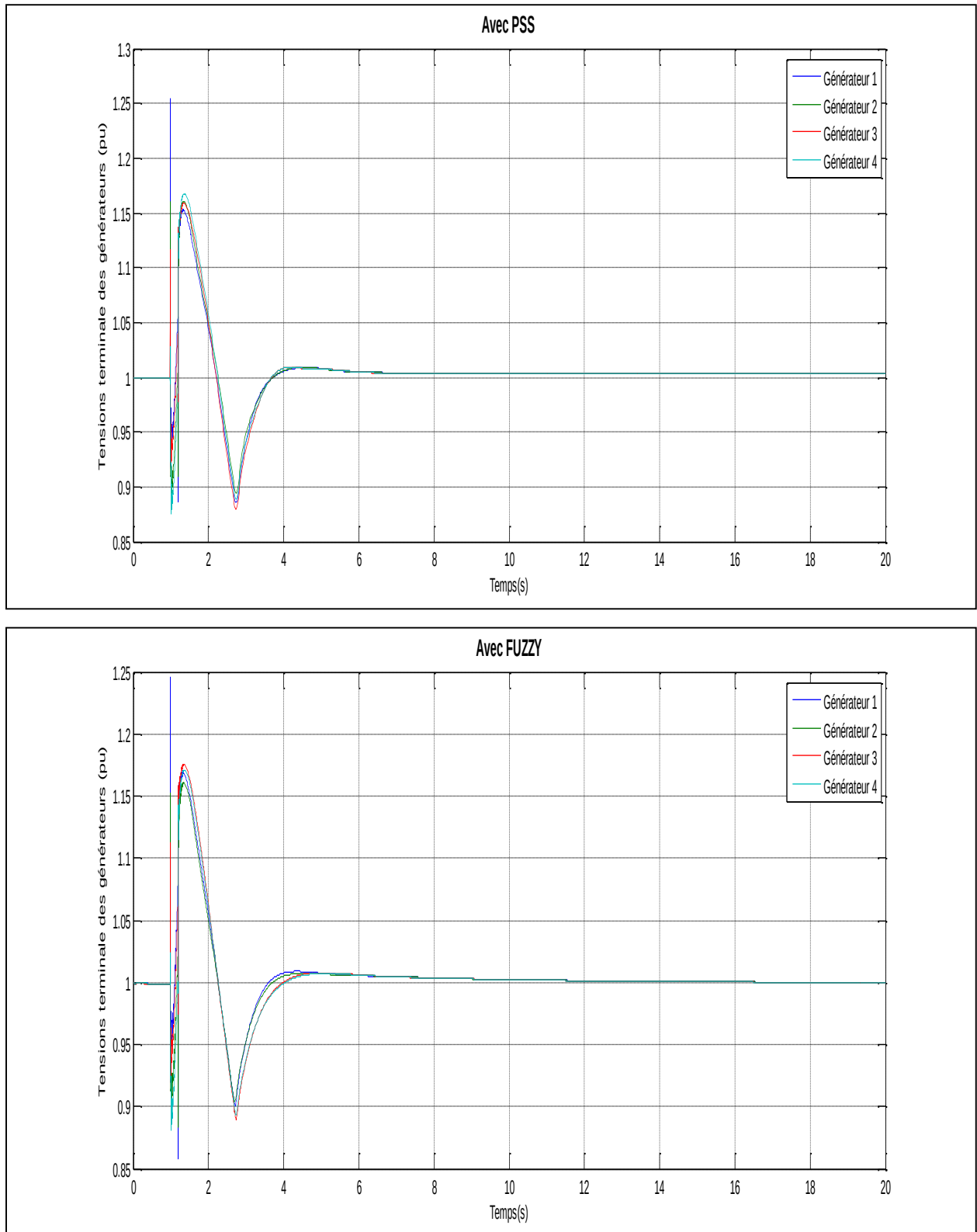


Figure V.16. Présente la variation des Tensions terminale des générateurs.

On constate clairement que le temps critique du réseau étudié avec logique floue « *FUZZY* » est supérieur au temps critique du système étudiée avec *PSS* c'est-à-dire le *FUZZY* augmente le temps critique du réseau avec maintenir du synchronisme des générateurs après une perturbation, on remarque aussi dans les figures(V.11,V.12,V13,V14 ,V.15,V.16),l'amortissement des oscillations dans le cas de réseau étudié avec *FUZZY* par contre le cas du réseau avec *PSS* on remarque des oscillations , durant la première oscillation (pendant le défaut) , le générateur est soumis à une variation considérable de sa puissance électrique et l'accélération (ou décélération) du son rotor.

Le *PSS* et *FUZZY* se produisent un signal supplémentaire qui est la tension de stabilisation , ce signal est un entrée à système d'excitation puissance peut faire varier très rapidement la tension interne du générateur , durant cette. Ceci va augmenter la puissance électrique et le couple synchronisme produits pendant la première oscillation. Par conséquent ,la puissance électromagnétique disponible va entraîner une diminution importante de l'accélération du rotor et de l'angle de rotor bien avant d'atteindre la limite de la stabilité transitoire : la marge de stabilité sera donc augmentée[5].

V.6.Conclusion :

Dans ce chapitre nous abordâmes à problème de la stabilité transitoire dans les systèmes multi-machines par deux méthodes différentes est un :

- Stabilisateurs de puissance conventionnel *PSS*(Power System Stabilizers).
- Logique floue (Fuzzy logic).

après les résultats obtenus , on conclure que le *FUZZY* augmente la stabilité transitoire et réalise l'objectif principal de la stabilité transitoire qui est le maintien synchronisme des générateurs et permet le réseau pour supporter les défauts le plus grand laps de temps possible , cela nous permet la continuité du service.

Conclusion générale :

Les systèmes électro-énergétiques ne cessent de se développer. L'extension des réseaux interconnectés rend les systèmes fortement sensibles aux oscillations interrégionales. Ces oscillations peuvent sérieusement restreindre le transport de l'énergie électrique. Elles peuvent également conduire à des perturbations s'étendant à tout le système électro-énergétique si, par exemple, une cascade de fautes de lignes de transmission se produit. Dans ces nouvelles conditions, les opérateurs des réseaux électriques se trouvent souvent obligés à faire fonctionner les systèmes aux limites de la stabilité. Par conséquent, l'amélioration de la stabilité aux petites perturbations, en particulier l'amortissement des oscillations interrégionales, représente un objectif prioritaire.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de la stabilité d'un système électro-énergétique par méthodes stabilisateur de puissance « *PSS* » et logique floue. Les *PSS* représentent toujours un moyen efficace pour l'amortissement des modes électromécaniques locaux, mais leur rôle dans l'amortissement des modes interrégionaux est toujours considéré comme de faible importance. Dans cette étude nous avons montré que la méthode logique floue satisfait aussi bien l'amortissement des modes interrégionaux et l'amortissement des modes locaux. Ainsi, l'optimisation simultanée de la localisation et des paramètres des *PSS* et *FUZZY* permet installé dans le système de participer, outre l'amortissement du mode local associé à son générateur, à l'amortissement des modes des autres régions.

Notre travail de recherche s'est articulé autour des points suivants :

- la modélisation d'un système de puissance, modélisation adaptée pour l'étude de stabilité aux petites perturbations.
- les méthodes classiques de réglage et d'emplacement des stabilisateurs *PSS* et les méthodes d'analyse de la performance du système.
- L'application de la théorie des ensembles flous pour l'amélioration de la stabilité du système, mini-machines et multi-machines.

Dans la partie modélisation, nous avons présenté les modèles mathématiques non linéaires des éléments du système électro-énergétique. Nous avons également développé le modèle linéaire associé.

Nous avons aussi rappelé la théorie de la stabilité, les problèmes de la stabilité aux petites perturbations d'un système électro-énergétique et le principe du stabilisateur *PSS*.

Les systèmes flous qui sont des approximations universelles 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 électro-énergétique, 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 montre que la logique floue « *FUZZY* » assure une bonne tenue en stabilité et permet l'amortissement rapide et efficacité des oscillations locales et interzones.

Bibliographie

[1] (*Emira NECHADI, 2013*)

«Commande et stabilité d'un Système électro-énergétique» 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» 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 the 58th 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] (*IEEE/PES, 2002*)

IEEE/PES Power systems stability subcommittee special publication, Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools, technical report, sp101pss, Aug. 2002.

[13] (*Passelergue, 1998*)

Passelergue J.C., *Interactions des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques*, Thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, 1998.

[14] (*Andersson, 2006*)

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

[15] (*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.

[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] (Singh, 2004)

Singh R., A Novel Approach for Tuning of Power System Stabilizer Using Genetic Algorithm, Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, July 2004.

[19] (Pal et al., 2005)

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

[20] (Aström et al., 1995)

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

[21] (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.

[22] (IEEE, 2003)

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

[23] (Sauer et al., 1998)

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

[24] (Farmer, 2006)

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

[25] (Custem, 2002, I)

Custem T.V., Systèmes électriques de Puissance I. Cours ELEC 029, Département d'Electricité, Electronique et Informatique : Institut Montefiore, Université de Liège, 2002.

[26] (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.

[27] (Neeraj gupta, 2008)

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

[28] (Rogers, 2000)

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

[29] (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.

[30] (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.

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

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

[32] (Yu, 1983)

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

[33] (Cai, 2004)

Cai L.J., Robust Coordinated Control of FACTS Devices in Large Power Systems, Ph.D. Thesis, University of Duisburg-Essen, February 2004.

[34] (Larsen et al., 1981, III)

Larsen E.V. and Swann D.A., « Applying power system stabilizers part-III: Practical considerations », *IEEE Trans. Power App. Sys.*, vol.100, n°. 6, pp. 3034-3046, Jun. 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] (Hsu et al., 1987)

Hsu Y.Y. and Chen C.L., « Identification of Optimum Location for Stabilizer Applications Using Participation Factors », *IEE Proc., Pt. C*, vol. 134, n°. 3, pp. 238-244, May 1987.

[37] (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.

[38] (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.

[39] (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.

[40] (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.

[41] (Feliachi, 1990)

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

[42] (F.Ghevri, et F.Guély, 1998)

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

[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] (Kamel SAOUDI, 2014)

«Stabilisateurs intelligents des systèmes électro-énergétiques» Doctorat en Science en Electrotechnique de université Ferhat Abbas — Setif 1 UFAS (ALGERIE).

[45] (Lamine Mili,1997)

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

[46] (Olof Samuelsson,1997)

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

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

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

[48] (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.

