

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



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-
Oued Faculté de Technologie**



Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Thème

***Amélioration de la stabilité de Système
mono machine par méthode intelligente***

Réalisé par :

- **Bali abdelhak**
- **Rabani azzedine**
- **Rehouma abdelbaki**

Encadré par :

Dr. TOUIL Slimane

Année Universitaire 2023 /2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿وَابْتَغِ فِيمَا آتَاكَ اللَّهُ الدَّارَ الْآخِرَةَ ۖ وَلَا تَنْسَ نَصِيبَكَ مِنَ

الدُّنْيَا ۖ وَأَحْسِنْ كَمَا أَحْسَنَ اللَّهُ إِلَيْكَ ۖ وَلَا تَبْغِ الْفُسَادَ فِي

الْأَرْضِ ۖ إِنَّ اللَّهَ لَا يُحِبُّ الْمُفْسِدِينَ﴾

القصص [77] :

"صدق الله العظيم"

الإهداء

مرّت قاطرة البحث بكثير من العوائق، ومع ذلك حاولت أن
أخطّأها بثبات بفضل من الله ومنّه.

أهدي هذا البحث المتواضع إلى أبوي وأختي وأصدقائي، فلقد
كانوا بمثابة العنود والسند في سبيل استكمال البحث.

ولا ينبغي أن أنسى أساتذتي ممن كان لهم الدور الأكبر في
مُساندتي

ومدّي بالمعلومات القيّمة...

أهدي لكم بحث تخرّجتي.....

داعياً المولى - عزّ وجلّ - أن يُطيل في أعماركم، ويرزقكم
بالخيرات.

شكر وتقدير

الحمد لله كثيرا حتى يبلغ الحمد منتهاه والصلاة والسلام على أشرف

مخلوق أناره الله بنوره واصطفاه

وانطلاقا من باب من لم يشكر الناس لم يشكر الله أتقدم بخالص

الشكر والتقدير للأستاذ المشرف "طويل سليمان" على إرشاده

وتوجيهاته التي لم يبخل بها علينا يوما، كما أتقدم بجزيل الشكر

والعطاء إلى كل يد رافقتنا في هذا العمل سواء من قريب أو من

بعيد والشكر موصول كذلك إلى أوليائنا الذين سهروا على تقديم لنا

كل الظروف الملائمة لإنجاز هذا العمل

كما لا أنسى أن أشكر جميع الأساتذة والمؤطرين الذين قدموا لنا

يد المساعدة وإلى كل الزملاء والأساتذة الذين تتلمذنا على أيديهم

وأخذنا منهم الكثير.

Résumé



Résumé

La stabilité du système électrique est vitale pour assurer la disponibilité continue et sûre de l'électricité pour tous les utilisateurs. À mesure que la demande d'énergie augmente, les pressions augmentent, ce qui nécessite une meilleure efficacité énergétique. Et développer la capacité de produire et de transporter de l'électricité de manière efficace et fiable.

Pour répondre à cette augmentation de la demande, des travaux sont en cours pour développer et adopter des technologies avancées dans le régulateur de tension automatique VAR et le stabilisateur du système d'alimentation PSS, qui aide à atténuer les fluctuations et à assurer la stabilité du système bien, les résultats de simulation obtenus pour différents points de fonctionnement après suppression de l'erreur ont montré que le stabilisateur de brouillard FPSS proposé assure une bonne stabilité et améliore l'amortissement des oscillations. Les oscillations locales et interrégionales sont ainsi rapidement et efficacement éteintes. Les résultats obtenus sont comparés à ceux des stabilisateurs : sans stabilisateur de puissance (sans PSS), avec stabilisateur PSS (avec PSS) et résultats du stabilisateur PSS obscur (FPSS). J'ai compris, il s'avère que le stabilisateur brumeux PSS offre généralement de meilleures performances par rapport aux stabilisateurs ci-dessus.

Mots-clés : Stabilisateur de système d'alimentation (PSS), Régulateur logique flou (FPSS).

Table Des Matières



Résumé	5
Table Des Matières	7
Liste Des Figures	11
Notations et Symboles	15
Introduction Générale	1
CHAPITRE I : Stabilité du système de puissance	4
<i>I.1. Introduction :</i>	5
<i>I.2. Définition du concept « Stabilité d'un système de puissance » :</i>	5
<i>I.3. Les causes d'instabilité [3] :</i>	6
<i>I.4. Classification de la stabilité :</i>	6
I.4.1. Stabilité de tension :	7
I.4.2. Stabilité de fréquence :	9
I.4.3. La stabilité de l'angle du rotor :	10
I.4.3.1. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire) :	11
a) Relation puissance-angle de rotor :	12
b) Critère d'égalité des aires :	13
I.4.3.2. Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique) :	16
<i>I.5. Stabilisateurs des systèmes de puissance 'PSS :</i>	16
I.5.1. Qu'est-ce que signifie PSS : ?	16
I.5.2. A quoi sert PSS: ?	16
<i>I.6. . Analyse de la performance et critères de bonne régulation :</i>	17
I.6.1. Critères de simulation :	17
I.6.1.1. Critères temporels instantanés :	17
a) Dépassement maximum <i>Dp</i> :	17
b) Temps de pic <i>tP</i> :	18
c) Temps de réponse (temps d'établissement) <i>tr</i> (5%) :	18
I.6.1.2. Critères temporels intégraux :	19
a) Critère IAE, Intégrale de l'Erreur Absolue (Intégral of Absolut Error) :	19
b) Critère ISE, Intégrale du Carrée de l'Erreur (Intégral of Square Error) :	19
c) Critère ITAE, Intégrale de l'Erreur Absolue pondérée par le Temps (Intégral Time multiplie by Absolut Error) :	19
<i>I.7. Conclusion :</i>	20
CHAPITRE II : Modélisation du Système Électro-énergétique	21
<i>II.1. Introduction :</i>	22
<i>II.2. Modèle de la machine synchrone :</i>	22

II.2.1. Équations électriques :	23
II.2.2. Équations mécaniques :	25
II.2.3. L'effet dynamique du circuit de champ :	28
<i>II.3. Régulation du générateur :</i>	32
II.3.1. Régulateur de fréquence et modèle de la turbine :	33
II.3.2. Régulateur de tension et modèle du système d'excitation :	34
<i>II.4. Modèle de power system stabiliser PSS [24] :</i>	38
II.4.1. Modèle du système d'excitation avec PSS [24] :	39
II.4.2. Fonctionnement et modèle de PSS :	41
II.4.3. Réglage des paramètres de PSS :	44
II.4.3.1. Méthode de compensation de phase :	45
II.4.3.2. Méthode du résidu :	47
II.4.3.3. Méthode de placement des pôles :	48
II.4.4. Emplacement optimal des PSSs :	49
<i>II.5. Résultat et discussion :</i>	50
II.5.1. Exécution du système étudié avec PSS :	50
II.5.2. Etude comparative entre la mise en œuvre du système étudié avec, et sans PSS :	53
<i>II.6. Conclusion :</i>	57
CHAPITRE III : Stabilisation par logique floue	58
<i>.III.1 Introduction</i>	59
<i>.III.2 La logique floue :</i>	59
<i>.I.3II Définition du régulateur flou :</i>	59
<i>III.4. La théorie des ensemble floue :</i>	60
.III.4.1 Notion d'appartenance partielle :	60
III.4.2. Fonction d'appartenance (FA) :	60
.III.4.2.1 Fuzzification "Degré d'appartenance" :	63
<i>.III.5 Les différentes parties d'un régulateur flou :</i>	64
III.5.1. Définition de chaque phase de traitement dans un régulateur flou :	65
.III.5.1.1 Phase de traitement 1 :	65
a) Normalisation :	65
b) Fuzzification :	65
III.5.1.2. Phase de transformation 2 :	65
a) Traitement des prémisses composées :	65
b) Inférence :	65
c) Agrégation des règles :	66
III.5.1.3. Phase de transformation 3 :	66
a) Défuzzification :	66

b) Dénormalisation :	66
<i>III.6. PSS basés sur la logique floue :</i>	66
III.6.1. Sélection de variables d'entrée et de sortie :	67
III.6.2. Fonction d'appartenance :	67
III.6.3. La base de règles floues [46] :	69
III.6.4. La mise en œuvre de la logique floue [46] :	70
<i>III.7. Étude comparative entre la mise en œuvre du système aux différents cas :</i>	71
III.7.1. Exécution du système étudié avec régulateur FLPSS (PSS flou) :	74
<i>III.8. Conclusion :</i>	77
CHAPITRE IV : Test d'évaluations	78
<i>IV.1. Introduction :</i>	79
<i>IV.2. Exécution avec le système d'excitation (AVR- Gouverneur) sans PSS :</i>	79
<i>IV.3. Exécution du système d'excitation (AVR- Gouverneur) avec PSS :</i>	82
<i>IV.4. Exécution de PSS basée de la logique floue :</i>	88
<i>IV.5. Étude comparative entre la mise en œuvre du système aux différents cas :</i>	91
<i>IV.6. Test de variation de la tension</i>	94
IV.6.1. Scénario 1 un changement de 20% dans la tension de référence de générateur est appliqué à $t=5s$ pour une durée de 0.2s.	94
IV.6.2. Scénario 2 un changement de sur tension de + 20% dans la tension de référence de générateur est appliqué à $t=4s$ pour une durée de 2s.	96
IV.6.3. Scénario 2 un changement de sous tension de -20% dans la tension de référence de générateur est appliqué à $t=4s$ pour une durée de 2s.	98
<i>IV.7. Conclusion :</i>	100
Conclusion générale	101
BIBLIOGRAPHIE	104

Liste Des Figures



Figure I.1 Classification des différents types de la stabilité de système de puissance.	7
Figure I.2 : Variation d'angle de rotor.	11
Figure I.3: Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini.	12
Figure I.4: Relation puissance- angle de rotor.	12
Figure I.5: Variation d'angle de rotor.	13
Figure I.6: Courbes (a : puissance-angle) et (b : variation d'angle de rotor) du générateur suite à un défaut de	15
Figure I.7 Caractéristiques de la réponse indicielle d'un système.	18
Figure II.1.Circuit équivalent de la machine synchrone connectée à un jeu de barre infini	23
Figure II.2.Modèle classique de générateur	23
Figure II.3.La relation (puissance-angle) du générateur et le coefficient	25
Figure II.4.Couple mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur	26
Figure II.5.Schéma bloc du système (mono machine-jeu de barre infini) avec le	27
Figure II.6.Circuits équivalents relatifs de l'enchaînement du flux de la machine et courant	28
Figure II.7.Représentation de schéma fonctionnel avec la constante E_{fd} .	32
Figure II.8.Structure générale d'un système de force motrice-générateur.	33
Figure II.9.Structure d'un système d'excitation statique avec son AVR.	35
Figure II.10.système d'excitation statique (thyristor) avec AVR	36
Figure II.11. Représentation du schéma bloc avec l'excitateur et AVR	38
Figure II.12.Représentation du schéma bloc avec l'excitateur et AVR	39
Figure II.13.Système d'excitation statique avec AVR et PSS	40
Figure II.14. Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système.	43
Figure II.15.. Modèle d'un PSS avance/retard.	43
Figure II.16: Modèle de Heffron-Philips d'un système (monomachie - jeu de barre infini).	45
Figure II.17 : Déplacement de valeur propre par la rotation du résidu associé.	47
Figure II.18:L'ensemble (système-PSS) en boucle fermée.	49
Figure II.19 : Présente la variation de la position angulaire	51
Figure II.20:Présente la variation de la vitesse angulaire	51
Figure II.21:Présente la variation du couple électrique	52
Figure II.22 : Présente la variation de la tension terminale.	52
Figure II.23:Présente la variation de la position angulaire.	53
Figure II.24:Présente la variation de la vitesse angulaire.	54
Figure II.25:Présente la variation du couple électrique.	54
Figure II.26:Présente la variation de la tension terminale	55
Figure II.27:Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport la variation d'angle.	55

Figure III.1: Traitement flou	60
Figure III.2: Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.	60
Figure III.3: Fonction caractéristique.	61
Figure III.4: Fonction d'appartenance.	61
Figure III.5: Fonction d'appartenance, variable et terme linguistique.	62
Figure III.6: Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux.	62
Figure III.7: Fonction d'appartenance singleton	63
Figure III.8: Fuzzification.	63
Figure III.9: Structure de base d'un contrôleur flou	64
Figure III.10: Fonctions d'appartenance pour l'accélération	68
Figure III.11: Fonctions d'appartenance pour la variation de vitesse	69
Figure III.12: Fonctions d'appartenance pour la tension	69
Figure III.13: Exécution de contrôleur de logique floue	71
Figure III.14: Présente la variation de la position angulaire	72
Figure III.15: Présente la variation de la vitesse angulaire.	72
Figure III.16: Présente la variation du couple électrique	73
Figure III.17: Présente la variation de la tension terminale	73
Figure III.18: Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport l'angle.	74
Figure III.19: Présente la variation de la position angulaire	74
Figure III.20: Présente la variation de la vitesse angulaire	75
Figure III.21: Présente la variation du couple électrique	75
Figure III.22: Présente la variation de la tension terminale	76
Figure IV.1: présente le bloc du système d'excitation (AVR- Gouverneur) sans PSS	79
Figure IV.2 : Présente la variation de la position angulaire.	80
Figure IV.3: Présente la variation de la vitesse angulaire.	80
Figure IV.4: Présente la variation du couple électrique.	81
Figure IV.5: Présente la variation de la tension terminale.	81
Figure IV.6: présente le bloc du système d'excitation (AVR- Gouverneur) avec PSS	82
Figure IV.7: Présente la variation de la position angulaire.	83
Figure IV.8: : Présente la variation de la vitesse angulaire.	83
Figure IV.9: Présente la variation du couple électrique.	84
Figure IV.10: Présente la variation de la tension terminale.	84
Figure IV.11: Présente la variation de la position angulaire.	85
Figure IV.12: Présente la variation de la vitesse angulaire.	86
Figure IV.13: Présente la variation du couple électrique.	86

Figure IV.14: Présente la variation de la tension terminale.	87
Figure IV.15: Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport la variation d'angle.	87
Figure IV.16: présente le bloc de PSS basée de la logique floue	88
Figure IV.17: Présente la variation de la position angulaire.	89
Figure IV.18: Présente la variation de la vitesse angulaire.	89
Figure IV.19: Présente la variation du couple électrique.	90
Figure IV.20: Présente la variation de la tension terminale	90
Figure IV.21: Présente la variation de la position angulaire.	91
Figure IV.22: Présente la variation de la vitesse angulaire.	92
Figure IV.23: Présente la variation du couple électrique.	92
Figure IV.24: Présente la variation de la tension terminale.	93
Figure IV.25: Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport la variation d'angle.	93
Figure IV.26: Variations de la position angulaire.	94
Figure IV.27: Variations de la vitesse angulaire.	94
Figure IV.28: Variations du couple électrique.	95
Figure IV.29: Variations de tension terminale.	95
Figure IV.30: Variations de la position angulaire.	96
Figure IV.31: Variations de la vitesse angulaire.	96
Figure IV.32: Variations du couple électrique.	97
Figure IV.33: Variations de tension terminale.	97
Figure IV.34: Variations de la position angulaire.	98
Figure IV.35: Variations de la vitesse angulaire.	98
Figure IV.36: Variations du couple électrique.	99
Figure IV.37: Variations de tension terminale.	99

Notations et Symboles



Acronymes :

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, en français l'Institut des Ingénieurs électriciens et électroniciens.
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)

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)
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)
K_s	Coefficient de couple synchronisant (pu)
K_A	Coefficient de couple d'amortissent (pu)
K_D	Coefficient d'amortissement du générateur (pu)
K_{PSS}	Le gain de stabilisateur avance retard de phase (pu)
$S\Psi_{fd}$	Flux de circuit de générateur synchrone (pu)
Ψ_d	Flux de stator (pu)
L_{ads}	Inductances propres d'un enroulement du stator (pu)
i_d	Courant du générateur axe direct (pu)
i_q	Courant du générateur axe quadratique (pu)

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

Introduction Générale



INTRODUCTION GENERALE

L'électricité et les systèmes énergétiques ont été confrontés au cours des deux dernières décennies, car les opérations de libre marché de l'électricité créent des scénarios opérationnels plus complexes. Avec la dépendance croissante à l'électricité dans la société moderne, le fonctionnement efficace et sûr des systèmes énergétiques exige que la qualité de l'électricité soit devenue une préoccupation majeure pour les consommateurs et les fournisseurs.

Dans ce contexte, la stabilité des systèmes électriques est devenue l'une des priorités les plus importantes, ce qui nécessite le développement de nouvelles méthodes et technologies pour maintenir la stabilité face aux changements et aux conditions extrêmes.

Le contrôle automatique de la tension (AVR) et le maintien de la vitesse sont des outils essentiels pour contrôler l'échange d'énergie électrique entre différentes régions, mais en l'absence d'un stabilisateur PSS, cela peut entraîner l'incapacité d'assurer le bon fonctionnement des réseaux électriques. Le stabilisateur supplémentaire ajoute une amélioration supplémentaire en stimulant le générateur pour contrer les défauts de vitesse ou les changements d'alimentation électrique.

Cependant, l'ajout du stabilisateur peut entraîner une détérioration de la qualité de la régulation de tension, nécessitant un équilibre pour assurer le bon fonctionnement du système en général. Une autre méthode de fixation basée sur la logique floue est l'une des façons dont la connaissance peut être introduite pour déterminer les fonctions de l'appartenance, qui dépend de l'expérience humaine sur le terrain.

L'AVR et les portefeuilles seuls ne peuvent pas assurer le bon fonctionnement des réseaux électriques sans l'utilisation d'un stabilisateur. Ajoute le stabilisateur, communément appelé stabilisateur de réseau électrique (PSS), En conjonction avec un régulateur de tension (AVR) pour assurer le fonctionnement efficace des réseaux électriques, le PSS fournit des conjectures supplémentaires en modifiant la stimulation du générateur pour corriger les erreurs de vitesse ou les changements de puissance électrique, améliorant ainsi la stabilité du système. Bien que cette configuration permette une meilleure atténuation des vibrations locales et interzones, elle peut entraîner une certaine détérioration de la régulation de la tension.

Une autre méthode (PSS) repose sur la logique floue, qui permet de combiner les connaissances exprimées sous forme de règles d'inférence pour déterminer les fonctions d'appartenance, en se basant sur l'expérience humaine sur le terrain. Elle implique l'utilisation de la théorie des ensembles flous dans le contrôle des procédés, y compris la simulation pour visualiser et comparer quand les systèmes électriques (en particulier les machines synchrones connectées à un réseau infini) sont

atténués lorsqu'ils sont perturbés. L'objectif est de voir comment l'IA affecte le système par rapport à l'approche traditionnelle, par le biais de l'approche traditionnelle.

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

Ce thème est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente d'abord la définition d'un système électrique, puis les causes de l'instabilité. Les différents types de stabilité et les différentes méthodes d'analyse de la stabilité transitoire, l'amélioration de la stabilité par SPS, et leurs nouveaux types, et à la fin du chapitre, nous avons analysé les paramètres de performance et de bonne organisation. Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé la modélisation du système électrique, le PSS (stabilisateur de système d'alimentation) pour les études de stabilité angulaire et la constitution classique du PSS (classique ou avancé/délai). Le troisième chapitre est consacré à une présentation théorique de la logique floue, une méthode qui s'appuie sur les règles d'inférence pour assurer une bonne amélioration de la stabilité des systèmes électriques.

Enfin, le quatrième chapitre vise à simuler et analyser la performance du résultat afin d'en tirer une conclusion globale.

CHAPITRE I :

Stabilité du système de puissance



I.1. Introduction :

Depuis que la révolution industrielle a vu le jour au XVIII^e siècle, la demande en électricité ne fait qu'augmenter et cela afin de subvenir aux besoins des usines. Cependant, l'énergie électrique étant très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence un équilibre entre la production et la consommation. Et malgré l'évolution rapide des dispositifs de régulation et de production, les systèmes électro-énergétiques sont souvent soumis à des perturbations qui peuvent engendrer des dégâts graves.

La fiabilité d'un SEE est définie par ses limites de sécurité d'exploitation ainsi que son comportement face à des défauts tels qu'un coup de foudre, un court-circuit, un faux couplage, un changement brusque de la charge, une rupture des circuits d'excitation, un déclenchement des lignes, une perte des unités de production, etc... Toutes ces perturbations conduisent à des contraintes supplémentaires par rapport à celles du régime permanent (contraintes d'ordre mécaniques, thermiques, électriques).

De nombreuses hypothèses sont généralement faites pour simplifier le problème et se concentrer sur les facteurs influençant le type spécifique de problème de stabilité.

Pour fournir un cadre pour étude, nous définirons d'abord, la stabilité, ensuite, Les causes d'instabilité, Classification de la stabilité, Stabilisateurs des systèmes de puissance 'PSS, Analyse de la performance et critères de bonne régulation.

I.2. Définition du concept « Stabilité d'un système de puissance » :

Un grand réseau électrique encore appelé système de puissance, se compose des éléments variés interconnectés (générateurs, transformateurs, lignes de transport, de distribution et des charges) plus ou moins nombreux, selon la taille du réseau et formant un système complexe. Le système est capable de générer, de transporter et de distribuer l'énergie électrique à travers des étendues géographiques. Cette complexité structurelle implique de plus en plus l'évolution des problèmes de stabilité et des phénomènes dynamiques dans les systèmes de puissance interconnectés [1].

La stabilité des systèmes de puissance peut être définie comme la propriété qui lui permet de rester dans un état d'équilibre de fonctionnement ou de retrouver un autre état, acceptable, dans des conditions normales, après avoir été soumis à une perturbation.

L'instabilité d'un système de puissance peut se produire dans de nombreuses situations différentes, selon la configuration du système et le mode de fonctionnement. Traditionnellement, le problème de stabilité a été de maintenir le fonctionnement synchrone ou le synchronisme, d'autant plus que la génération des systèmes de puissance repose sur le fonctionnement des machines

synchrones. Cet aspect est influencé par la dynamique des angles du rotor et de la relation angle-puissance.

Dans l'évaluation de la stabilité, la préoccupation est le comportement du système de puissance, soumis à des perturbations transitoires. La perturbation peut être faible, sous la forme d'un changement de conditions de charge, ou grande, sous forme de court-circuit sur une ligne de transmission, ou d'autres perturbations importante, telles que la perte d'une grande charge ou d'un générateur, ou la perte d'une ligne de jonction entre deux sous-systèmes. La réponse d'un système à une perturbation implique une grande partie de l'équipement ; Par exemple, un court-circuit sur un élément critique, suivi de son isolement, par des relais de protection, provoquera des variations de transfert de puissance, vitesses de rotor de la machine et tensions de bus; les variations de tension actionneront à la fois les régulateurs de tension du générateur et du système de transmission; les changements de tension et de fréquence affecteront les charges sur le système, à des degrés divers en fonction de leur caractéristiques individuelles [2].

I.3. Les causes d'instabilité [3] :

Les causes sont diverses et variées dans les différents blackouts. Ces causes peuvent provoquer directement le blackout ou aggraver la condition du système qui pourra mener indirectement au blackout.

- ❖ Le court-circuit : un court-circuit provoque un déséquilibre important entre le couple moteur et le couple résistant.
- ❖ La surcharge : à charge nominale, les alternateurs ont un faible couple synchronisant car la valeur de l'angle interne δ se rapproche de 90° . Si l'angle δ dépasse 90° le système devient instable.
- ❖ La défaillance d'une protection.

I.4. Classification de la stabilité :

La figure (I.1) fournit une classification complète de la stabilité du système de puissance. Comme le montre cette figure, il existe trois classes principales de stabilité : la stabilité de l'angle de rotor, la stabilité de la fréquence et la stabilité de la tension.

La stabilité de l'angle de rotor (appelée aussi : stabilité angulaire) a deux sous-classes principales :

- La stabilité aux petites perturbations (dynamique).
- La stabilité aux grandes perturbations (transitoire).

Un système de puissance est considéré comme stable en régime permanent si, après une petite perturbation, il atteint une condition de fonctionnement en régime permanent qui est identique ou proche de la condition de fonctionnement de pré-perturbation. Un système de puissance en régime transitoire de fonctionnement en régime permanent acceptable. Contrairement à la stabilité en régime permanent qui n'est fonction que de la condition de fonctionnement, la stabilité transitoire est plus compliquée car elle est fonction à la fois de la condition de fonctionnement et de la perturbation [4].

La stabilité de tension a également deux sous-classes principales : la stabilité de tension de grandes perturbations et la stabilité de tension de petites perturbations, en fonction de l'origine et de l'ampleur du défaut. Et pour la stabilité de la fréquence cette dernière est divisée en deux classes, à court et long terme, en fonction de la durée de la perturbation est stable pour une grande perturbation ou une séquence de perturbations si, à la suite de cette ou de ces perturbations, il atteint une condition.

I.4.1. 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

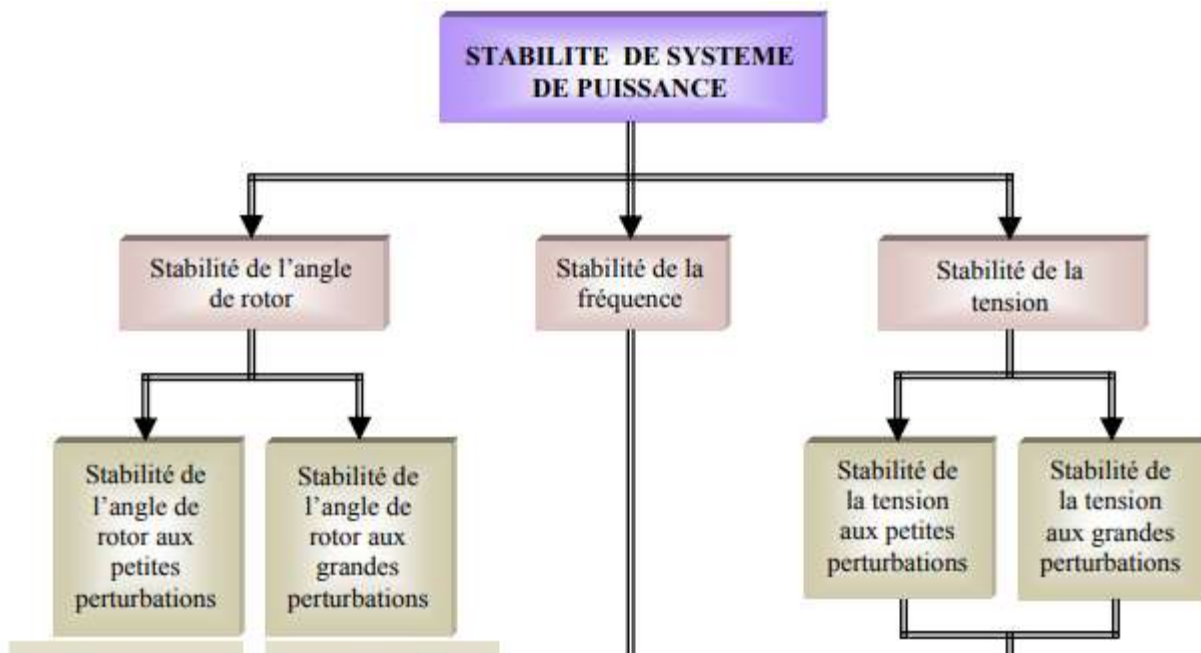
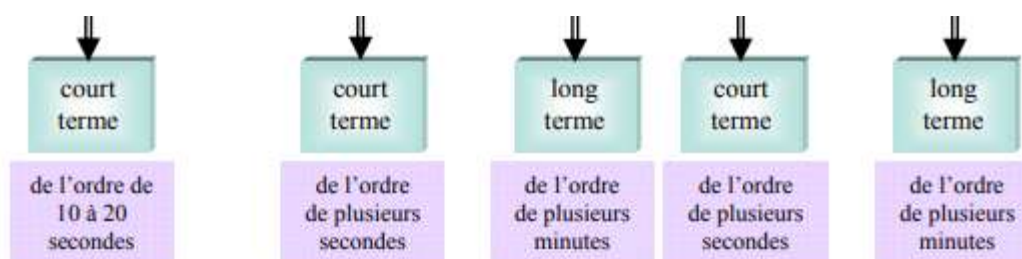


Figure I.1 Classification des différents types de la stabilité de système de puissance.



la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre la demande de la charge et la fourniture de la puissance à la charge. L'instabilité résultante se produit très souvent sous forme de décroissance progressive de tensions à quelques nœuds [2].

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 régleur 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 [5].

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 ; on donne quelques exemples :

Une augmentation de charge :

- Des générateurs, des condensateurs synchrones, ou des SV Cs (Statique Var Compensation systèmes) qui atteignent les limites de puissance réactive.
- Une tentative d'un régleur automatique en charge ayant échouée 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 [6] :

- ❖ 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.

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 charges. 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 [7].
- ❖ 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 [8].

I.4.2. 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 de graves conséquences (effondrement complet du système), [9].

Lorsque la fréquence varie, les caractéristiques de temps d

es 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 [5].

I.4.3. La stabilité de l'angle du rotor :

La stabilité de l'angle de rotor concerne la capacité des machines synchrones d'un système de puissance interconnecté de rester en synchronisme suite à une perturbation. Elle dépend de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre les couples électromagnétique et mécanique agissant sur le rotor de chaque machine synchrone dans le système. L'instabilité qui peut résulter se produit sous forme d'augmentation des oscillations angulaires de certains générateurs pouvant conduire à une perte de synchronisme avec d'autres générateurs [8].

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

I.4.3.1. 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 apériodique de certains angles de rotor. Si l'instabilité se manifeste directement suite à la perturbation (plus précisément dans la première seconde qui suit l'élimination du défaut), elle est appelée instabilité de première oscillation (First S_w Inge Instabilité), (cas 1, figure (I.2)), et elle s'étend sur 3 à 5 secondes.

L'instabilité transitoire peut aussi se manifester autrement. Elle peut résulter de la superposition des effets de plusieurs modes d'oscillation lents excités par la perturbation, provoquant ainsi une variation importante de l'angle de rotor au-delà de la première oscillation (instabilité de multi oscillations), (cas 2, figure (I.2)). La gamme de temps associée va de 10 à 20 secondes [8].

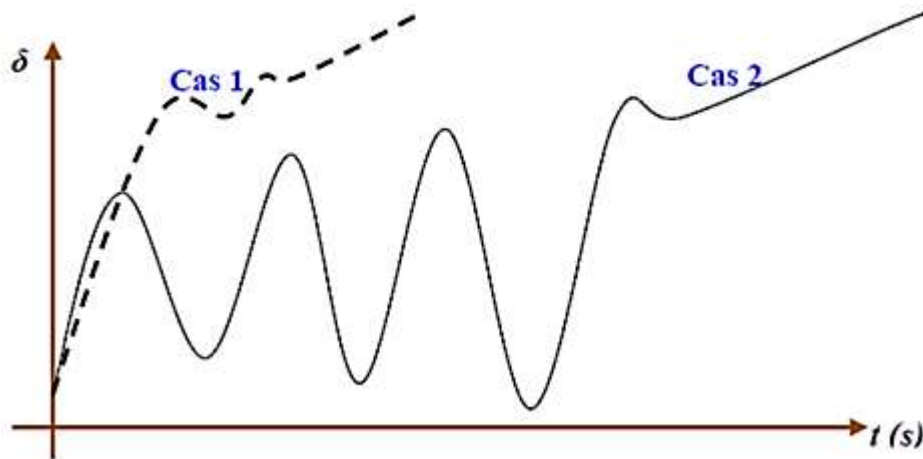
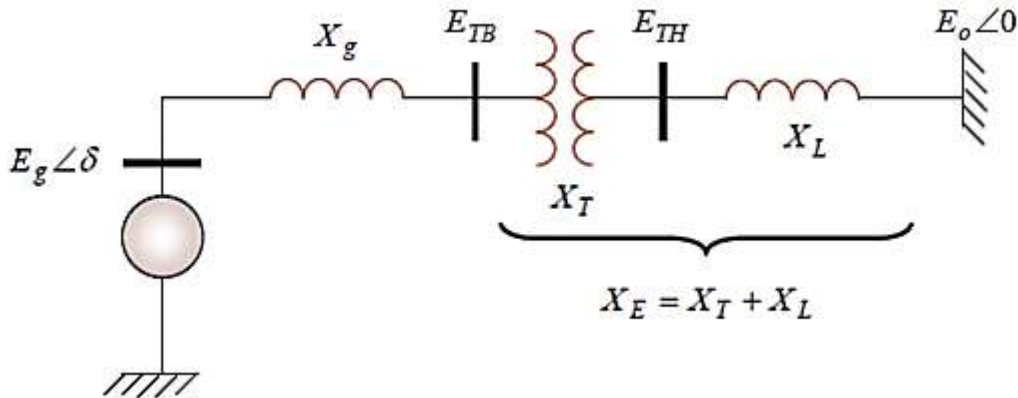


Figure I.2 : Variation d'angle de rotor.

Le concept de stabilité transitoire peut être expliqué par une approche graphique simple, à savoir le critère d'égalité des aires (Norme de surface égale). 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 [10].

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.3) [8].

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 I.3: 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 :

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

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.4).

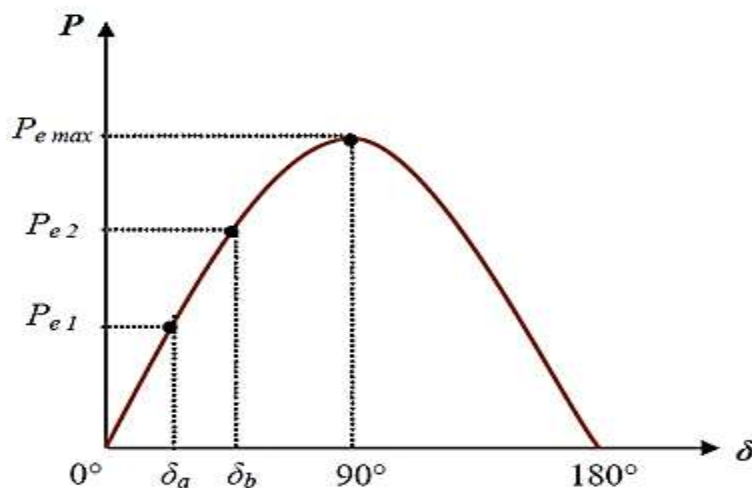
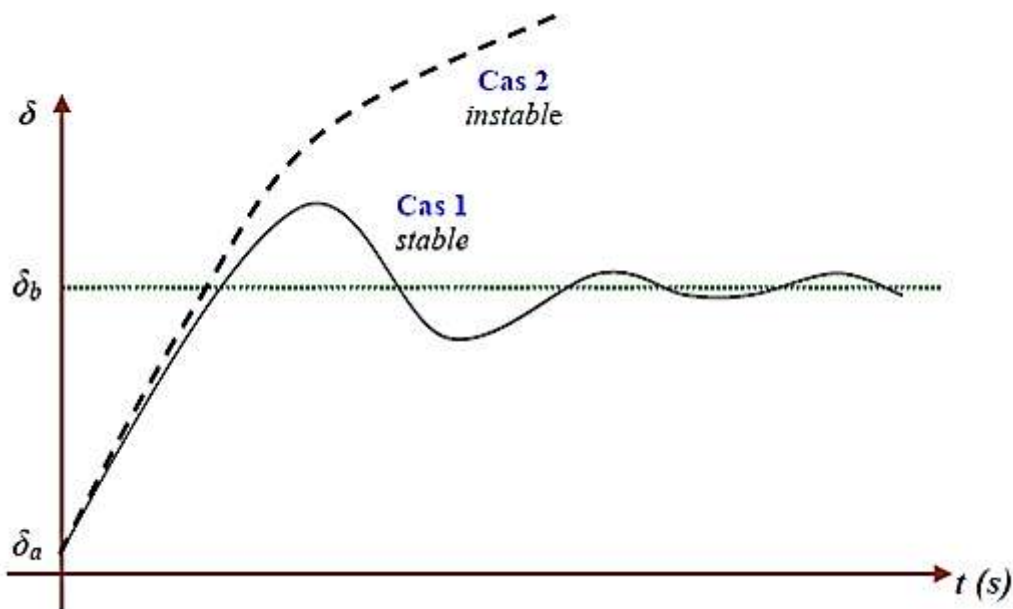


Figure I.4: Relation puissance- angle de rotor.

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.4).

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.5)), ou diverger, et la machine deviendra instable en perdant le synchronisme avec le



système (cas 2, figure (I.5)) [8].

Figure I.5: Variation d'angle de rotor.

b) Critère d'égalité des aires :

Considérons un défaut, tel un défaut sur la ligne de transmission, appliqué au système précédent disparaissant après quelques périodes du système. Ceci va modifier l'écoulement de puissance et, par conséquent, l'angle de rotor δ . Retraçons la courbe (P- δ) en tenant compte de ce défaut, figure (I.6). En dessous de cette courbe, nous pouvons considérer deux zones [11] :

- ❖ 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 :

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

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

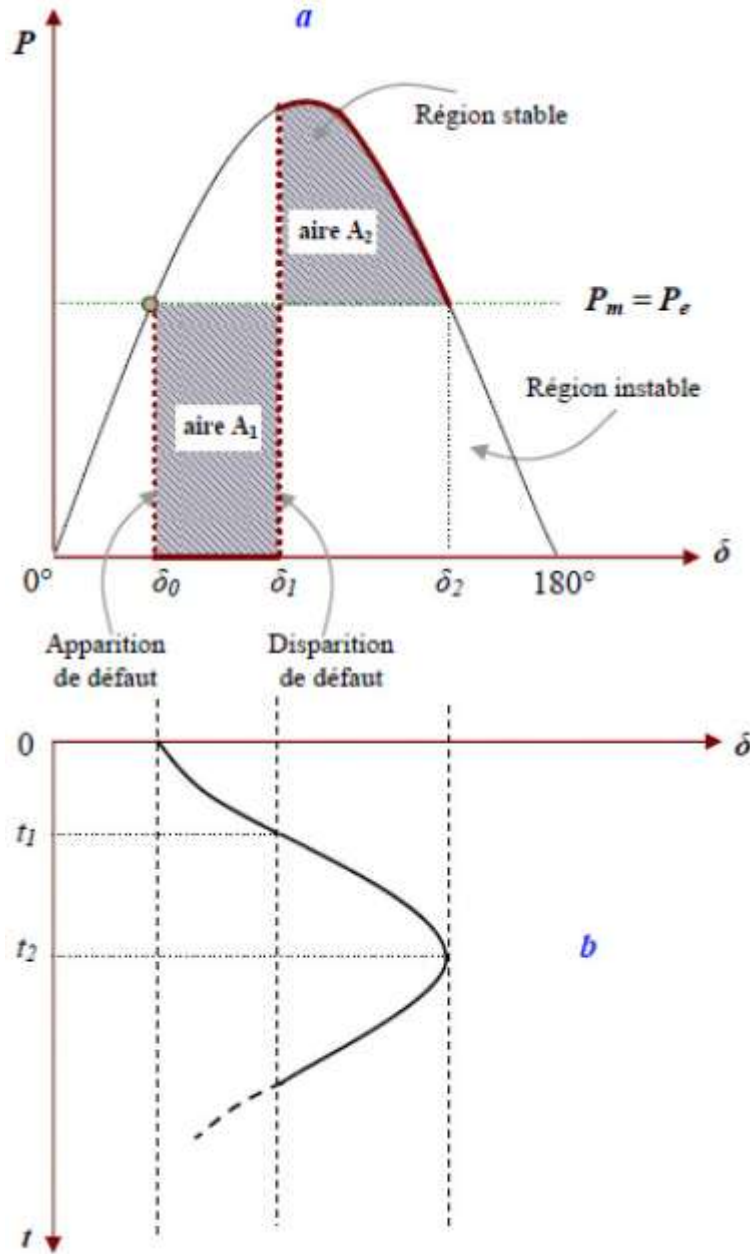


Figure I.6: Courbes (a : puissance-angle) et (b : variation d'angle de rotor) du générateur suite à un défaut de

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

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

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

$$\Rightarrow \int_{\delta_0}^{\delta_1} \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) \cdot d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_2} \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) \cdot d\delta = 0 \quad (I.5)$$

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 [12]. Enfin, une amélioration significative de la stabilité transitoire est obtenue avec des systèmes très rapides de détection des défauts et de disjoncteurs.

I.4.3.2. 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 [8].

Nous reviendrons davantage sur stabilité de l'angle de rotor (angulaire) et ses branches détaillées dans le deuxième chapitre.

I.5. Stabilisateurs des systèmes de puissance 'PSS :

Le stabilisateur de puissance (PSS) utilise des signaux de stabilisation additionnels qui agissent sur le système d'excitation dans le but d'améliorer les performances dynamiques du système électrique global. Généralement les grandeurs utilisées à l'entrée d'un stabilisateur de puissance sont générées par la vitesse de rotation de l'arbre, la fréquence et la puissance [13]. L'utilisation d'un stabilisateur de puissance dans les systèmes d'excitation, est souvent requise, car cet élément permet essentiellement l'amortissement des oscillations de puissance surtout dans le cas de faibles signaux, ce qui assure ainsi une meilleure stabilité.

I.5.1. Qu'est-ce que signifie PSS : ?

Ce sont des signaux de contrôle supplémentaires de stabilisations, reconnus sous le nom <Power System Stabiliser > générés par des réseaux spéciaux.

I.5.2. A quoi sert PSS: ?

Les signaux de PSS ont pour objet l'élimination des oscillations électromécaniques et l'amélioration de facteur d'amortissement du système.

I.6. . Analyse de la performance et critères de bonne régulation :

I.6.1. Critères de simulation :

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

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

I.6.1.1. Critères temporels instantanés :

La réponse indicielle (réponse à un échelon unité) d'un système oscillant du deuxième ordre est donné à la figure (I.7) [16].

Nous définissons les paramètres critiques apparaissant sur cette figure :

a) 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, note($D_p\%$)et calcule par la relation suivante :

$$D_p\% = \frac{y_{max} - y_f}{y_f} \cdot 100 \quad (I.7)$$

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

$$D_p = \frac{\pi\xi}{e^{\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}} \cdot 100 \quad (I.8)$$

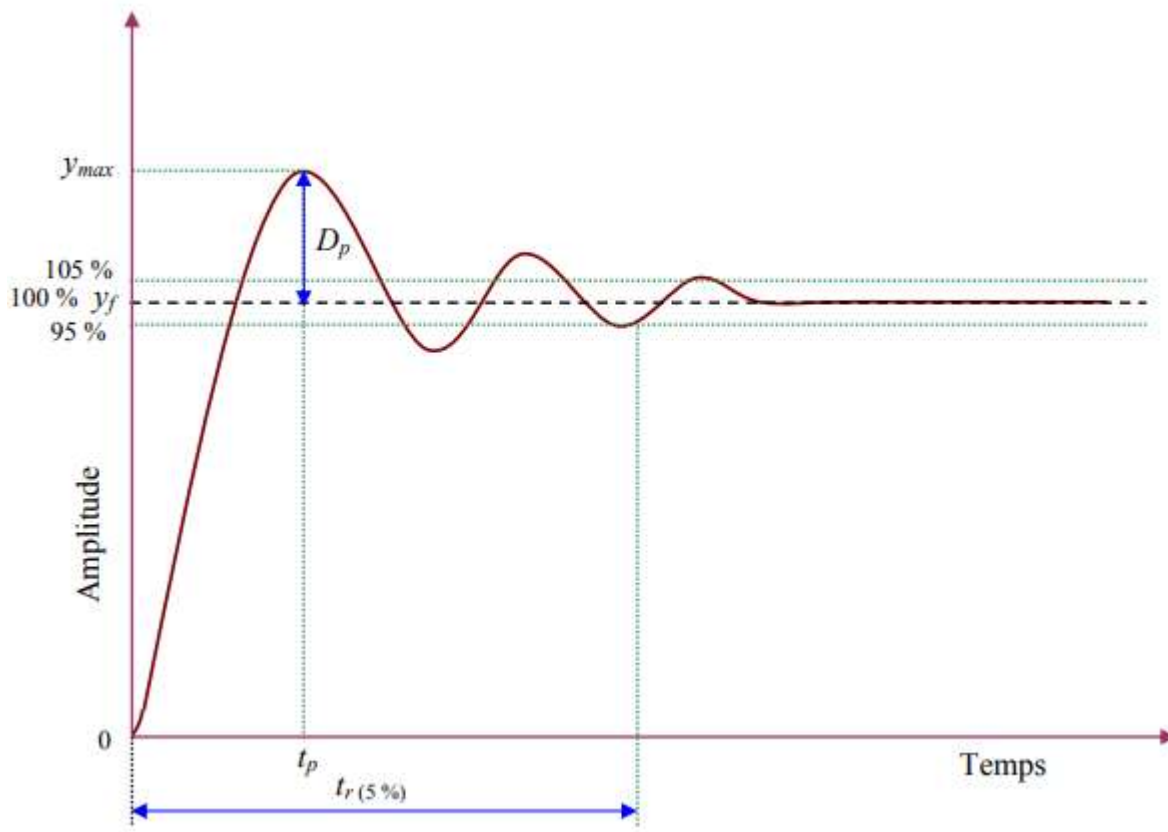


Figure I.7 Caractéristiques de la réponse indicielle d'un système.

b) 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 :

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (\text{I.9})$$

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

Il correspond au temps nécessaire à la réponse indicielle pour atteindre sa valeur finale avec une tolérance de $\pm n\%$ près. La tolérance 5% est la plus communément utilisée. Ce paramètre caractérise la rapidité relative de la réponse du système.

La relation approximative entre le temps de réponse, le facteur d'amortissement et la pulsation naturelle d'oscillation est donnée comme suit :

$$t_p(5\%) \approx \frac{3}{\omega_n \xi} \quad \text{Avec: } 0 < \xi < 1 \quad (\text{I.10})$$

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

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

I.6.1.2. Critères temporels intégraux :

Soit $s(t)$ 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

a) Critère IAE, Intégrale de l'Erreur Absolue (Intégral of Absolut Error) :

Le critère de performance est le suivant :

$$IAE = \int_0^t |\varepsilon(t)| dt \quad (I.11)$$

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

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

Le critère de performance est alors le suivant :

$$ISE = \int_0^t \varepsilon^2(t) dt \quad (I.12)$$

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.

c) Critère ITAE, Intégrale de l'Erreur Absolue pondérée par le Temps (Intégral Time multiplies by Absolut Error) :

Le critère de performance est le suivant :

$$ITAE = \int_0^t t |\varepsilon(t)| dt \quad (I.13)$$

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.

I.7. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu sur définitions et les caractéristiques des différents types de stabilité d'un système de puissance. Les stabilisateurs de puissance (PSS), par leur efficacité et leur coût réduit, sont les est devenu le moyen le plus répandu pour l'amélioration de l'amortissement des oscillations basse fréquence dans les réseaux électriques, nous les développerons dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II :

Modélisation du Système Électro-énergétique



II.1. Introduction :

Étape l'importance, lorsqu'on veut analyser et commander un système d'énergie électrique, consiste à trouver un bon modèle mathématique. Généralement, un modèle, dans l'analyse des systèmes, est un ensemble d'équations ou de relations, qui décrit convenablement les interactions entre les différentes variables étudiées, dans la gamme de temps considérée et avec la précision désirée, pour un élément ou un même système physique, peut donner lieu à des modèles différents. Généralement, pour établir un modèle de réseau électrique pour les études dynamiques, on tient compte uniquement des équipements en activité pendant la plage temporelle du phénomène dynamique considéré. Le résultat est donc le modèle de connaissance complet du système : il se compose d'équations différentielles ordinaires non-linéaires et d'équations algébriques [17].

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 stabilisera).

II.2. Modèle de la machine synchrone :

L'énergie électrique est généralement produite par les machines synchrones. Ces dernières sont caractérisées par une vitesse de rotation de l'arbre de sortie de chaque machine égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, un couple mécanique issu d'une énergie primaire source, comme l'énergie hydraulique, l'énergie nucléaire ou l'énergie chimique, est appliqué à l'axe de la machine synchrone via un lien mécanique intermédiaire, à savoir la turbine. Le champ magnétique rotorique est généré habituellement par un circuit d'excitation alimenté par courant continu. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor : ceci impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. Ainsi, les enroulements du stator sont soumis à des champs magnétiques qui varient périodiquement. Une fem de courant alternatif est donc induite dans le stator [8].

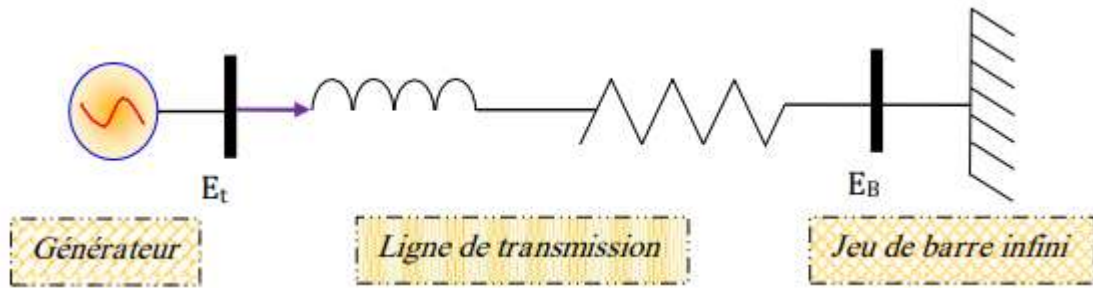


Figure II.1. Circuit équivalent de la machine synchrone connectée à un jeu de barre infini

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 [18].

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

$\langle E' \rangle$: fem du générateur induite.

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

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

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

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

II.2.1. Équations électriques :

Nous allons déterminer les équations algébriques du stator de cette machine. Le courant de la ligne est exprimé par l'expression suivant :

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

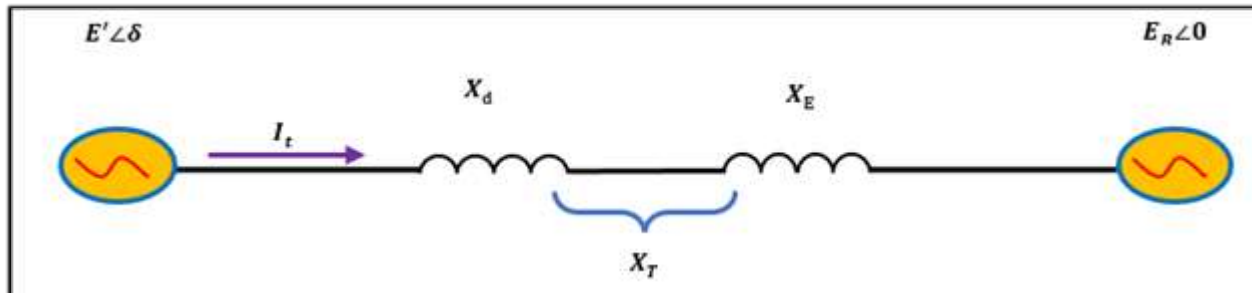


Figure II.2. Modèle classique de générateur

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

$$\mathbf{S} = \mathbf{P}_e + \mathbf{jQ}_e = \frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}_B \sin \delta}{X} + \mathbf{j} \frac{\mathbf{E} \cdot (\mathbf{E}' - \mathbf{E}_B \cos \delta)}{X} \quad (\text{II.2})$$

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 $T_e = P_e$

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

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 [18]

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) [19] :

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

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 [20]

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).

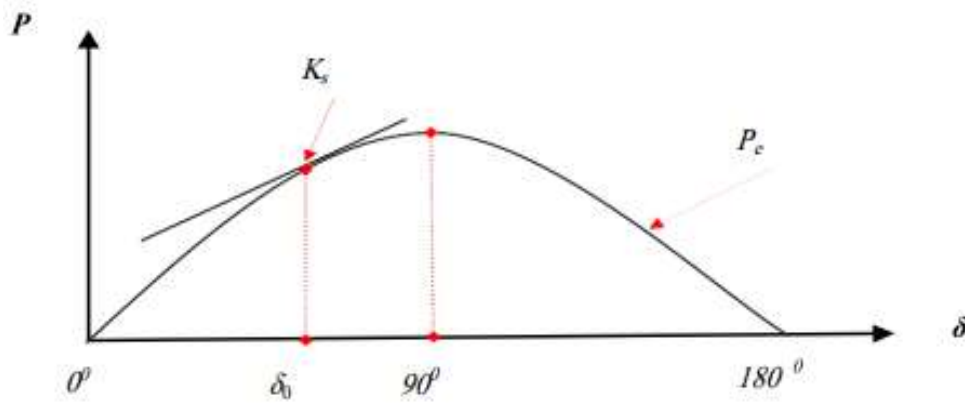


Figure II.3. La relation (puissance-angle) du générateur et le coefficient

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 :

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

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

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

II.2.2. Équations mécaniques :

Les propriétés mécaniques des machines synchrones se modélisent généralement à l'aide de l'équation, du mouvement basé sur le théorème du moment cinétique [9]. 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 [9]. 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 [10], figure (II.4). Lors d'une perturbation, un ou plusieurs générateurs peuvent être accélérés ou ralentis et il y a donc risque de perdre le synchronisme. Ceci peut avoir impact important sur la stabilité du système et les générateurs perdant le synchronisme doivent être débranchés, sinon ils pourraient être sévèrement endommagés.

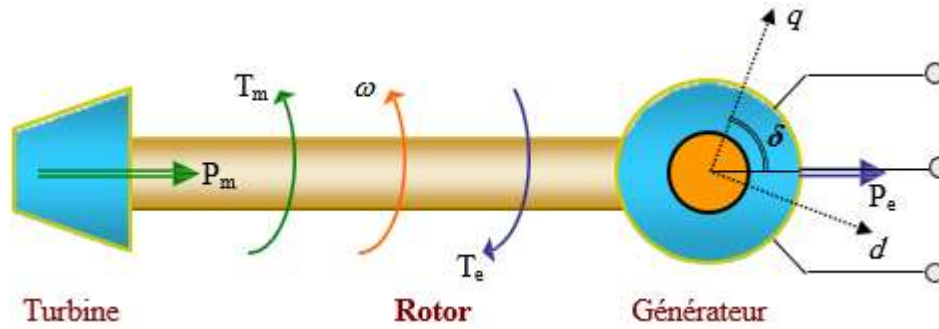


Figure II.4. Couple mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur

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

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

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

Il empêche l'accroissement des oscillations, à moins qu'une source d'amortissement négatif soit introduite (tel le régulateur de tension du système d'excitation). L'équation du mouvement peut être donc réécrite comme suit :

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

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

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

Avec :

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

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

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

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

Cette équation décrire le signal de performance est représenté dans le schéma de bloc ci-dessous :

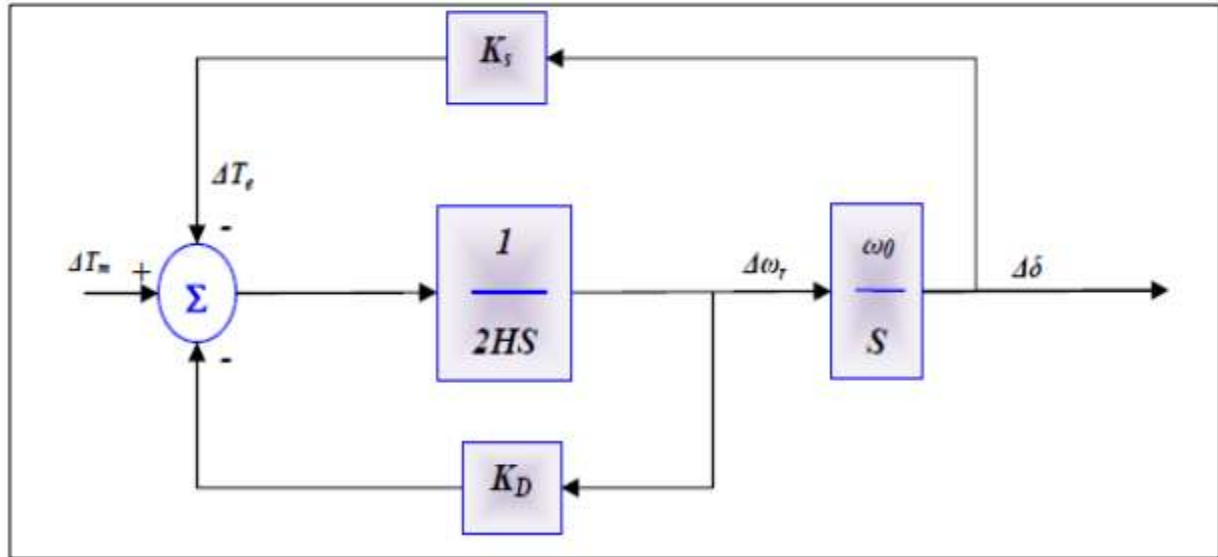


Figure II.5. Schéma bloc du système (mono machine-jeu de barre infini) avec le

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

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

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

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

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

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

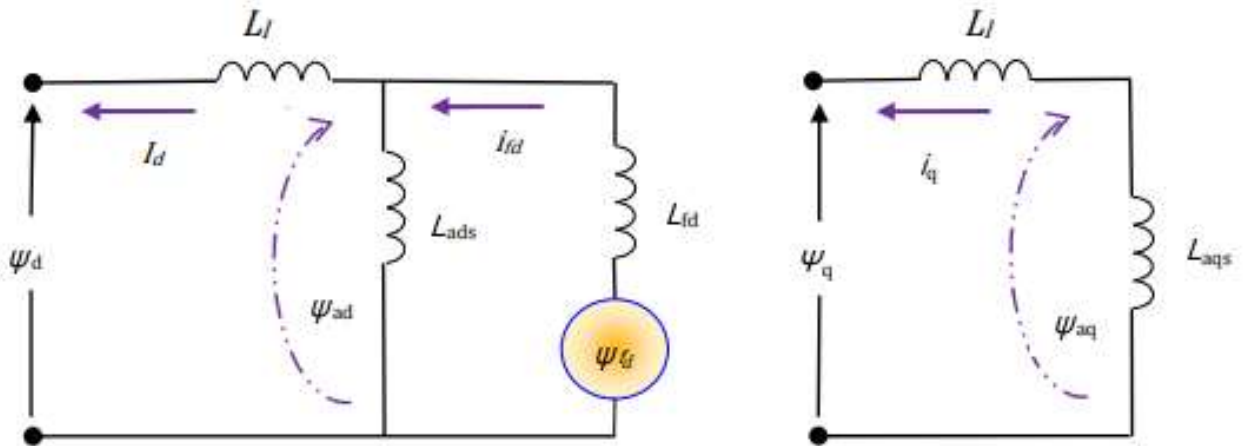
II.2.3. L'effet dynamique du circuit de champ :

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

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

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

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



suisant :

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

Le flux de stator et de rotor sont données par :

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

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 :

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

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

Puisqu'il n'y a pas de circuits rotoriques 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 montrée de la tension de stator avec on néglige le terme $S\Psi_{fd}$ et la variation de vitesse :

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

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

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

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

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

Résolution en composants de d et de q donnés :

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

Où :

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

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

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

Tel que :

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

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

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

Avec :

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

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

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

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

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

La forme linéaire d'équation est :

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

La forme linéaire d'équation est :

$$\Delta T_e = \Delta \Psi_{ad0} \Delta i_q + i_{q0} \Delta \Psi_{ad} - \Delta \Psi_{aq0} \Delta i_d - i_{d0} \Delta \Psi_{aq} \quad (\text{II.31})$$

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

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta \Psi_{fd} \quad (\text{II.32})$$

Tel que :

$$\begin{cases} K_1 = \frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} |_{\Delta \Psi_{fd}=cte} = n_1(\Psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_1(\Psi_{aq0} + L_{aqs} i_{q0}) \\ K_2 = \frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} |_{\Delta \delta=cte} = n_2(\Psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_2(\Psi_{aq0} + L_{aqs} i_{q0}) + \frac{L_{aqs}}{L_{fd}} i_{q0} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

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

$$\begin{cases} S \Delta \omega_r = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - K_1 \Delta \delta - K_2 \Delta \Psi_{fd} - K_D \Delta \omega_r) \\ S \Delta \delta = \omega_0 \Delta \omega_r \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

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 :

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta \Psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$$\begin{cases} a_{11} = -\frac{K_D}{2H} \\ a_{12} = -\frac{K_1}{2H} \\ a_{13} = -\frac{K_2}{2H} \\ a_{21} = \omega_0 = 2\pi f_0 \\ a_{32} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L_{ads} \\ a_{33} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left(1 + \frac{L_{ads}}{L_{fd}} + m_2 L_{ads} \right) \\ b_{11} = \frac{1}{2H} \\ b_{32} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

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

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

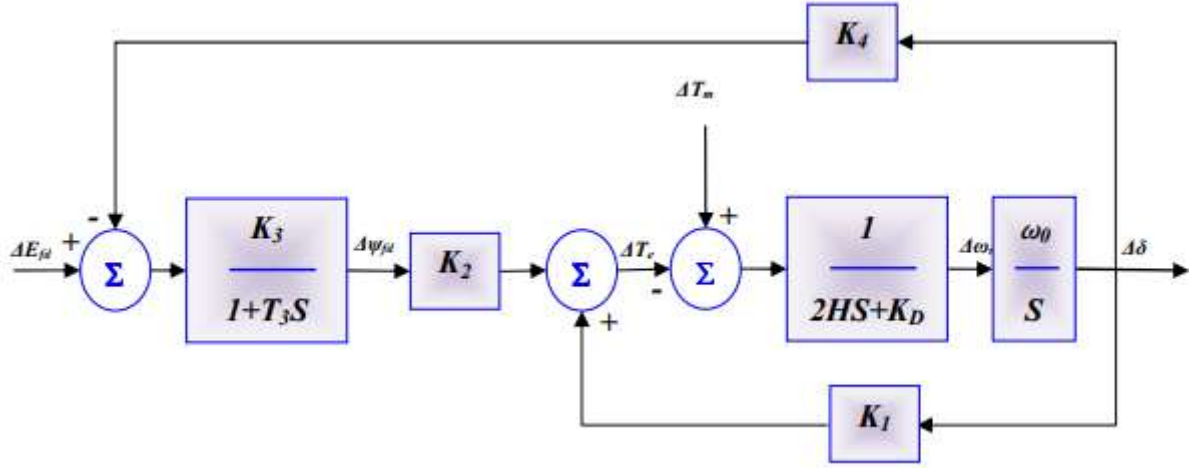


Figure II.7. Représentation de schéma fonctionnel avec la constante E_{fd} .

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

$$S\Delta\Psi_{fd} = a_{32}\Delta\delta + a_{33}\Delta\Psi_{fd} + b_{32}E_{fd} \quad (II.37)$$

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

$$\Delta\Psi_{fd} = \frac{K_3}{1+T_3S} (\Delta E_{fd} - K_4 \Delta\delta) \quad (II.38)$$

Tel que :

$$\begin{cases} K_3 = -\frac{b_{32}}{a_{33}} \\ K_4 = -\frac{a_{32}}{b_{32}} \\ T_3 = -\frac{1}{a_{33}} = K_3 T_{d0} \frac{L_{adu}}{L_{fd}} \end{cases} \quad (II.39)$$

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 [18].

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

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

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

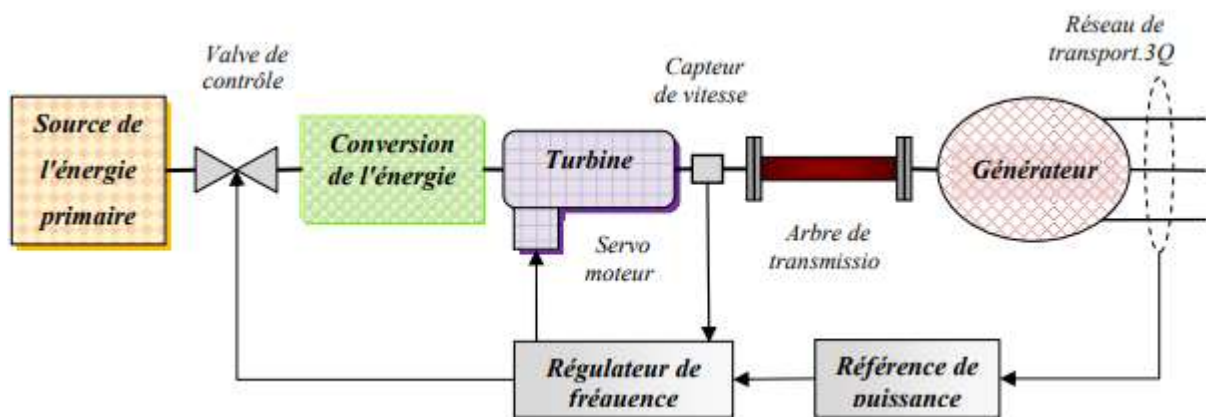


Figure II.8. Structure générale d'un système de force motrice-générateur.

Les turbines à vapeur utilisées dans les centrales thermiques (charbon, gaz, pétrole, nucléaire) sont constituées d'un certain nombre de roues, successivement fixes et mobiles, portant des ailettes le long desquelles la vapeur se déplace. Au fur et à mesure que la vapeur progresse axialement dans la turbine, sa pression diminue et la taille des ailettes augmente. Ces différentes roues sont généralement groupées en plusieurs étages, particulièrement dans les centrales de grande puissance. La division de la turbine en étages permet de réchauffer la vapeur entre les étages en assurant, par conséquent, un meilleur rendement au cycle thermique [5].

Le gouverneur forme une boucle de retour qui surveille la vitesse du rotor à chaque instant. Considérons par exemple une perturbation de l'équilibre des puissances actives. Dans les toutes premières secondes, l'énergie correspondante va être prélevée sur l'énergie cinétique des masses tournantes des unités de production. Ceci va entraîner une perturbation de la vitesse de rotation de

ces unités. Cet écart de vitesse doit être détecté et corrigé automatiquement par les gouverneurs. Ces gouverneurs doivent changer l'admission de fluide (vapeur, gaz ou eau) dans les turbines de manière à ramener les vitesses et donc la fréquence du réseau, autour de leurs valeurs nominales.

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

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

Le système d'excitation est un système auxiliaire qui alimente les enroulements d'excitation de la machine synchrone afin que cette dernière puisse fournir le niveau de puissance demandé. En régime permanent, ce système fournit une tension et un courant continu mais il doit être capable également de faire varier rapidement la tension d'excitation en cas de perturbation sur le réseau [5].

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

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

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

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

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

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

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

Le système d'excitation sont équipés de contrôleurs, appelés habituellement régulateurs de tension (Automatic Voltage Régulateur : 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.

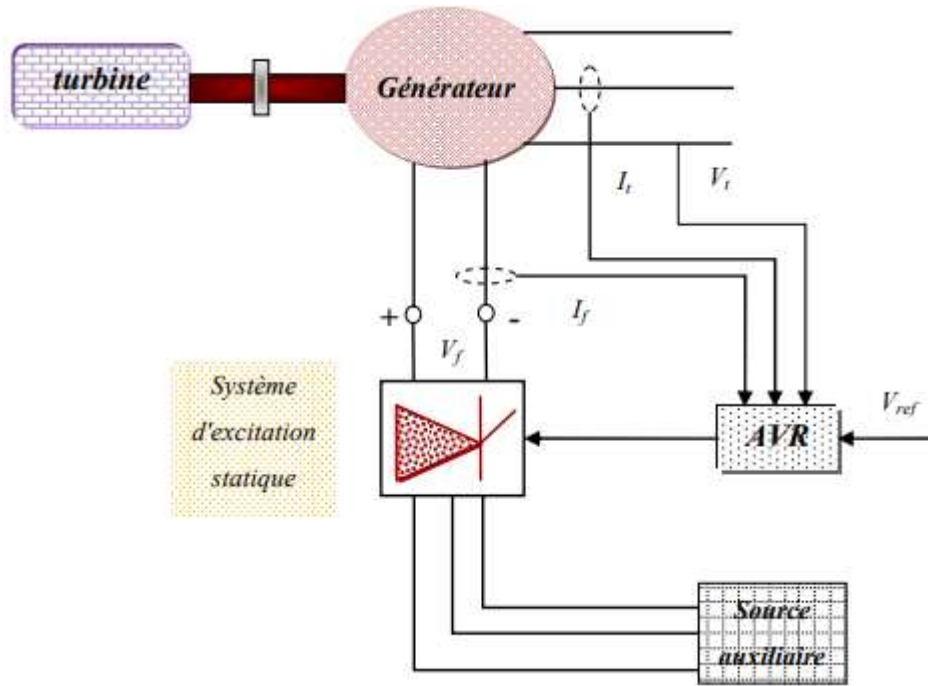


Figure II.9. Structure d'un système d'excitation statique avec son AVR.

Le groupe IEEE tâche forces présente périodiquement des recommandations pour la modélisation des éléments d'un système de puissance dont les systèmes d'excitation [23]. Plusieurs modèles sont suggérés pour chaque type de système d'excitation. Les systèmes d'excitation statiques étant les plus installés actuellement, nous avons donc choisi dans notre étude d'utiliser le modèle du système IEEE-STIA, modèle le plus utilisé dans la littérature. Ce type de système d'excitation se caractérise par sa rapidité et sa sensibilité [20].

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

$$\begin{cases} \bar{E}_t = e_d + j e_q \\ E_t^2 = e_d^2 + e_q^2 \end{cases} \quad (II.40)$$

D'appliquer une petite perturbation, on peut écrire :

$$(E_{t0} + \Delta E_t)^2 = (e_{d0} + \Delta e_d)^2 + (e_{q0} + \Delta e_q)^2 \quad (II.41)$$

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

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

Donc :

$$\Delta E_t = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} \Delta e_q \quad (\text{II.43})$$

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

$$\begin{cases} \Delta e_q = -R_a \Delta i_d - (L_l \Delta i_q - \Delta \Psi_{aq}) \\ \Delta e_q = -R_a \Delta i_q - (L_l \Delta i_d - \Delta \Psi_{ad}) \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

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

$$\Delta E_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \Psi_{fd} \quad (\text{II.45})$$

Où :

$$\begin{cases} K_5 = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} (-R_a m_1 + L_1 n_1 + L_{aqs} n_1) \frac{e_{q0}}{E_{t0}} (-R_a n_1 + L_1 m_1 + L_{ads} m_1) \\ K_6 = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} (-R_a m_2 + L_1 n_2 + L_{aqs} n_2) \frac{e_{q0}}{E_{t0}} \left(-R_a n_2 + L_1 m_2 + L_{ads} \left(\frac{1}{L_{fd}} - m_1 \right) \right) \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

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 représentée près et ce qui est ignoré pour des études de petite perturbation.

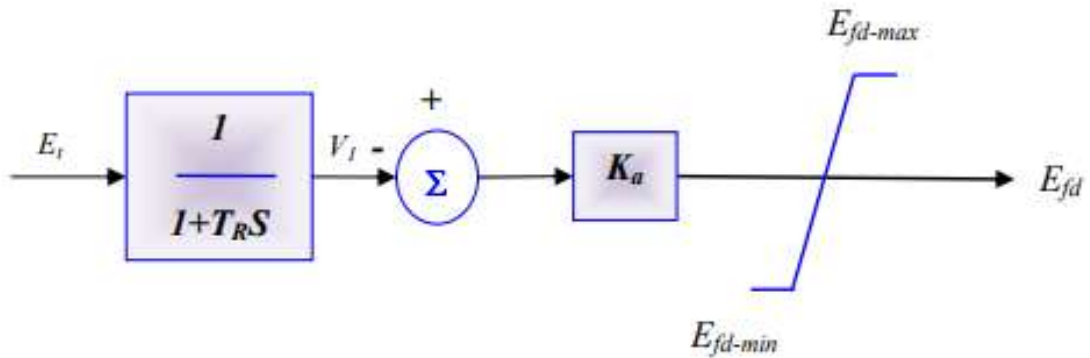


Figure II.10. système d'excitation statique (thyristor) avec AVR

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

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

D'où :

$$\Delta V_1 = \frac{1}{T_R} (\Delta E_t - \Delta V_1) \quad (\text{II.48})$$

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

$$S \Delta V_1 = \frac{1}{T_R} (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \Psi_{fd} - \Delta V_1) \quad (\text{II.49})$$

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

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

En termes de valeurs perturbées, nous avons :

$$\Delta E_{fd} = K_A(-\Delta V_1) \quad (II.51)$$

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

$$S\Psi_{fd} = a_{31}\Delta\omega_r + a_{32}\Delta\delta + a_{33}\Delta\Psi_{fd} + a_{34}\Delta V_1 \quad (II.52)$$

Où :

$$a_{34} = -b_{32}K_A = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}}K_a \quad (II.53)$$

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 .

$$\Delta V_1 = a_{41}\Delta\omega_r + a_{42}\Delta\delta + a_{43}\Delta\Psi_{fd} + a_{44}\Delta V_1 \quad (II.54)$$

Avec :

$$\begin{cases} a_{41} = 0 \\ a_{42} = \frac{K_5}{T_R} \\ a_{43} = \frac{K_6}{T_R} \\ a_{44} = \frac{1}{T_R} \end{cases} \quad (II.55)$$

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

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\Psi}_{fd} \\ \Delta\dot{v}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta\Psi \\ \Delta v_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\Delta T_m] \quad (II.56)$$

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

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

$$\Delta E_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \Psi_{fd} \quad (\text{II.57})$$

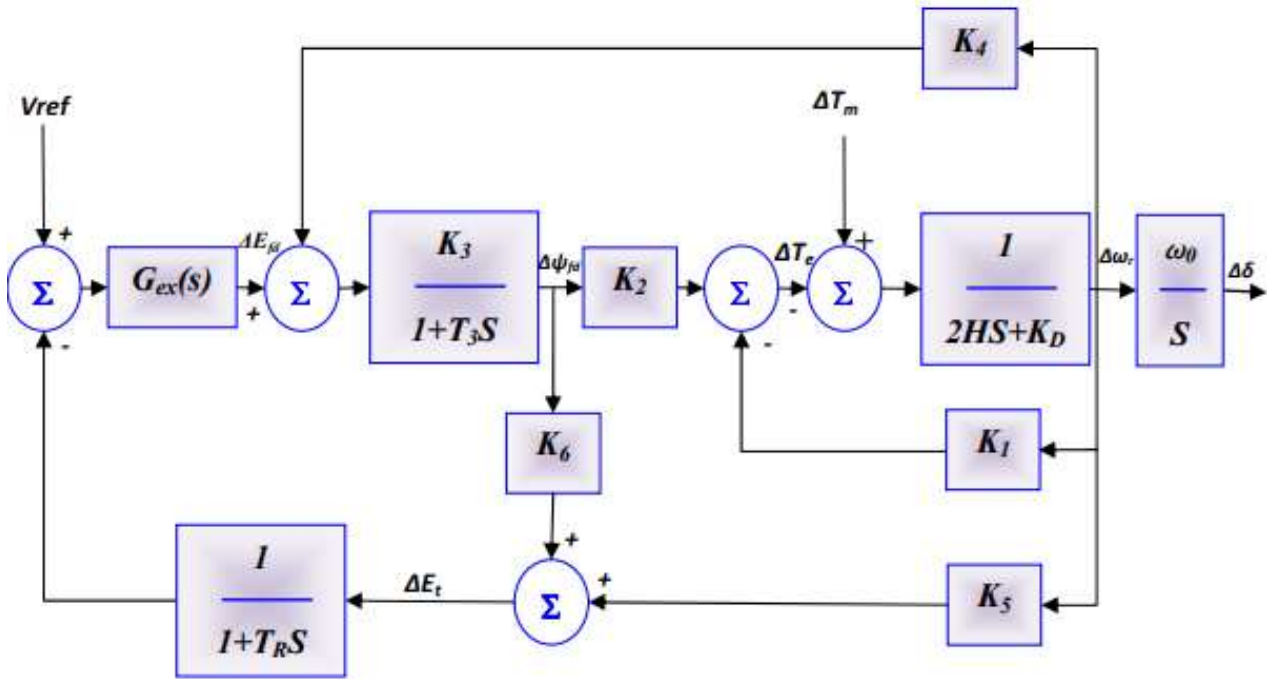


Figure II.11. Représentation du schéma bloc avec l'excitateur et AVR

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

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

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

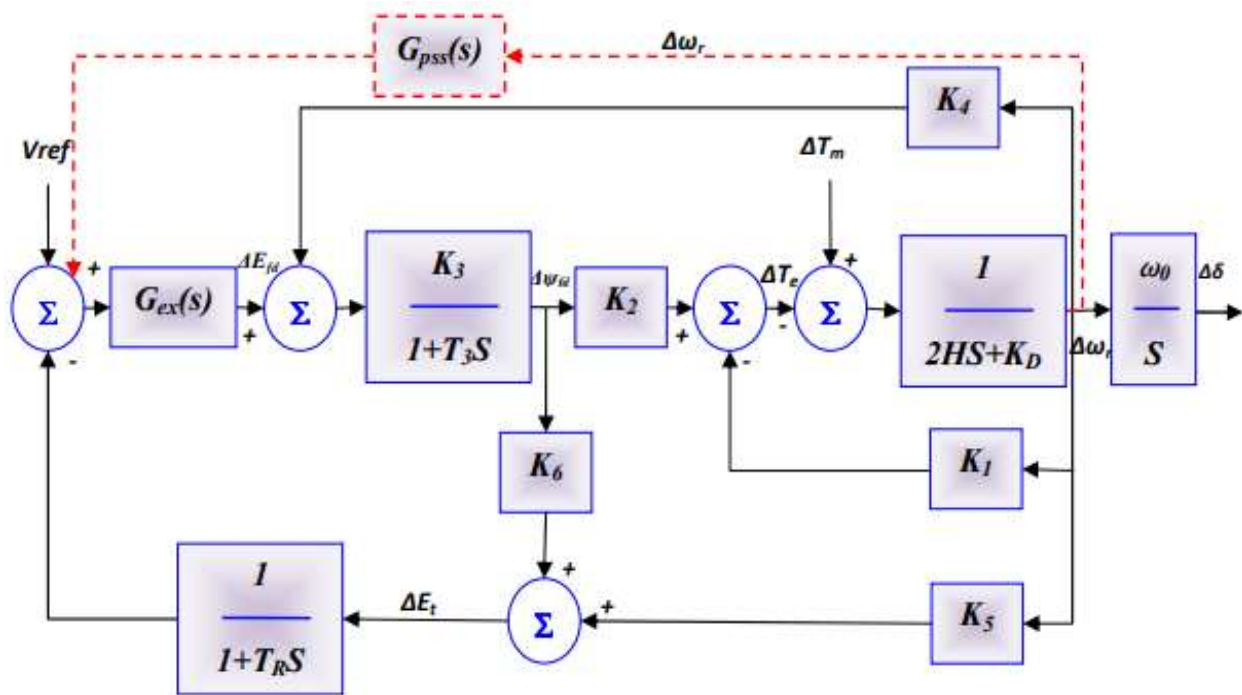


Figure II.12.Représentation du schéma bloc avec l'excitateur et AVR

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

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

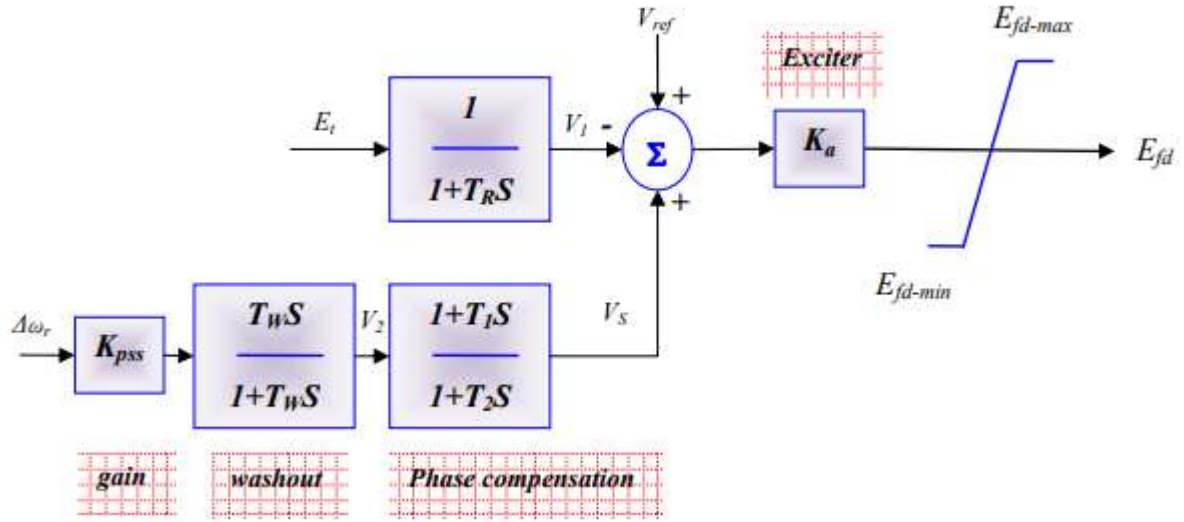


Figure II.13. Système d'excitation statique avec AVR et PSS

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

$$S\Delta V_2 = \frac{ST_W}{1+ST_W} (K_{PPS}\Delta\omega_r) \rightarrow S\Delta V_2 = K_{PPS}S\Delta\omega_r - \frac{1}{T_W}\Delta V_2 \quad (\text{II.58})$$

Remplacer $S\Delta\omega_r$ donné par l'équation (II-34), nous obtenons l'expression suivant pour $S\Delta v_2$ en termes de variables d'état :

$$S\Delta v_2 = a_{51}\Delta\omega_r + a_{52}\Delta\delta + a_{53}\Delta\Psi_{fd} + a_{54}\Delta v_2 + \frac{K_{pps}}{2H}\Delta T_m \quad (\text{II.59})$$

Avec :

$$\begin{cases} a_{51} = K_{pps}a_{11} \\ a_{52} = K_{pps}a_{12} \\ a_{53} = K_{pps}a_{13} \\ a_{54} = \frac{1}{T_W} \end{cases} \quad (\text{II.60})$$

Du bloc (5) :

$$\Delta V_S = \Delta V_2 \left(\frac{1+ST_1}{1+ST_2} \right) \rightarrow \Delta V_S \frac{T_1}{T_2} S\Delta V_2 + \frac{1}{T_2}\Delta V_2 - \frac{1}{T_2}\Delta V_S \quad (\text{II.61})$$

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

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

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

Tel que :

$$\Delta E_{fd} = K_A (\Delta V_S - \Delta V_1) \quad (II.64)$$

$$\Delta E_{fd} = K_A (\Delta V_S - \Delta V_1)$$

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

$$S \Delta \Psi_{fd} = a_{32} \Delta \delta + a_{33} \Delta \Psi_{fd} + a_{34} \Delta V_2 + a_{36} \Delta V_S \quad (II.65)$$

Avec :

$$a_{36} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A \quad (II.66)$$

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

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_r \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\Psi} \\ \Delta \dot{V}_1 \\ \Delta \dot{V}_2 \\ \Delta \dot{V}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \Psi_{fd} \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_S \end{bmatrix} \quad (II.67)$$

II.4.2. Fonctionnement et modèle de PSS :

Un PSS permet d'ajouter un signal de tension proportionnel à la variation de vitesse de rotor dans l'entrée du régulateur de tension (AVR) du générateur, figure (II. 14). Un couple électrique en phase avec la variation de vitesse de rotor est ainsi produit dans le générateur. Par conséquent, avec un système d'excitation rapide et fort, l'avantage présenté par un couple synchronisant important est toujours assuré et le problème de la décroissance du couple d'amortissement est corrigé [25,20]. 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 [13] :

- ❖ 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), [26]. Cette fonction de transfert est dénotée $GEP(s)$, figure (II.14)

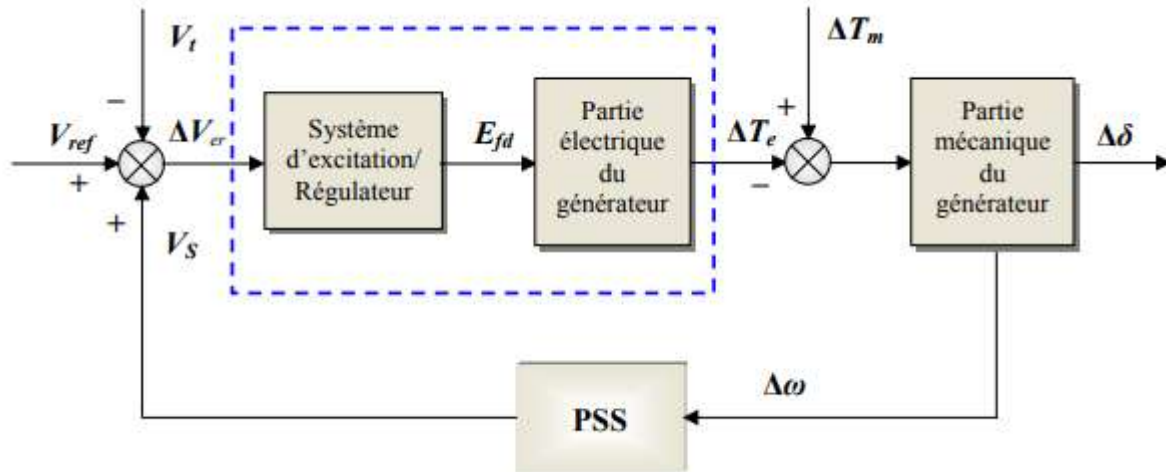


Figure II.14. Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système.

Le type de PSS le plus utilisé est connu sous le nom de PSS conventionnel (ou PSS avance/retard). Ce type a montré sa grande efficacité dans le maintien de la stabilité aux petites perturbations. Ce PSS utilise la variation de vitesse de rotor comme entrée. Il se compose généralement de quatre blocs, figure (II.15) :

- Un bloc d'amplificateur.
- Un bloc de filtre passe-haut "filtre Wash out".
- Un bloc de compensation de phase.
- Un limiteur.

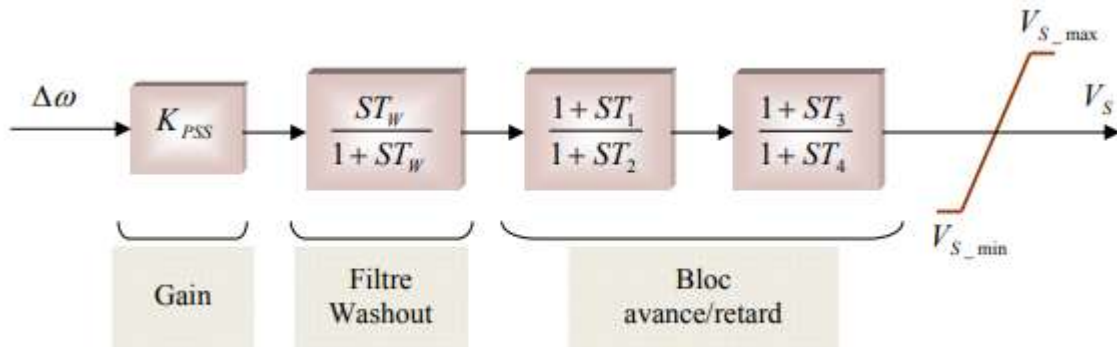


Figure II.15.. Modèle d'un PSS avance/retard.

a) L'amplificateur :

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 [13]. Généralement, K_{PSS} varie généralement de 0.01 à 50[27].

b) Le filtre passe-haut "filtre Wash out" :

Il élimine les oscillations à très basse fréquence (inférieure à 0.2 Hz) présentées dans le signal d'entrée. Il supprime également la composante continue de la vitesse (la composante "DC" correspondant au régime statique) : le PSS ne réagit donc que lorsqu'il y a des variations de vitesse. La constante de temps de ce filtre (T_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 [10-20]. Une amélioration remarquable sur la stabilité de la première oscillation est obtenue avec une valeur T_ω fixée à 10 secondes [14]

c) Le filtre compensation de phase :

L'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.

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 [28]. Les valeurs minimales et maximales du limiteur s'étendent de ± 0.02 à 0.1 per-unit [27].

II.4.3. Réglage des paramètres de PSS :

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

- Augmenter l'amortissement des modes du système.
- Assurer une stabilisation robuste.

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

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

II.4.3.1. Méthode de compensation de phase :

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

Les termes $K_1, \dots, K_6$ sont les constantes de linéarisation.

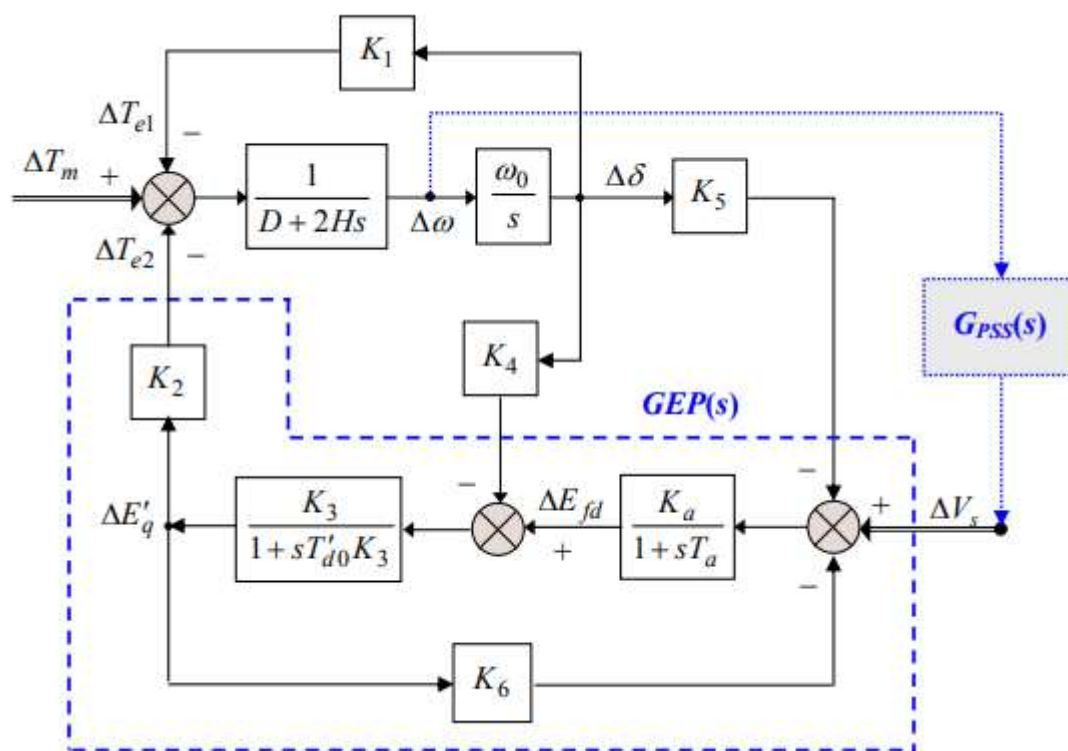


Figure II.16: Modèle de Heffron-Philips d'un système (monomachie - jeu de barre infini).

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 [29].

$$GEP(s) = \frac{K_a K_3 K_2}{(1+sT_a)(1+sT'd_0 K_3)+K_a K_3 K_2} \Big|_{s=\lambda=\sigma=j\omega} \quad (II.68)$$

$$Phi_{GEP} = \angle GEP(s) \Big|_{s=\lambda=\sigma=j\omega} \quad (II.69)$$

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 T_1 et T_3 (avec $T_1 = T_3$), les autres paramètres sont fixés (avec $T_2 = T_4$)

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

$$G_{PSS}(s) = K_{PSS} \frac{sT\omega}{1+sT\omega} \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right)^2 = K_{PSS} \times G_f(s) \quad (II.70)$$

Étant donné que l'avance de phase du PSS (Phi_{GEPSS}) est égale à la phase (Phi_{GEP}) la constante de temps T_1 est donnée, tout calcul fait, par la relation suivante :

$$T_1 = T_3 = \frac{\tan(\beta)}{\omega - \sigma \times \tan(\beta)} \quad (II.71)$$

Avec :

$$\beta = \frac{1}{2} \left(-Phi_{GEP} - \tan^{-1} \left(\frac{\omega}{\sigma} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\omega T\omega}{1+\sigma T\omega} \right) + 2 \tan^{-1} \left(\frac{\omega T_2}{1+\sigma T_2} \right) \right) \quad (II.72)$$

Le gain du PSS, quant à lui, est donné par la relation suivante [29] :

$$K_{PSS} = \frac{4\omega_n \xi H}{K_2 |GEP(s)| |G_f(s)|} \Big|_{s=\lambda=\sigma=j\omega} \quad (II.73)$$

Avec :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\omega_0 K_1}{2H}}$$

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

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

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

$$2Hs^2 + \omega_0 = 0, \text{ Avec : } s = \pm j\omega_n \quad (II.74)$$

II.4.3.2. Méthode du résidu :

Nous avons vu que le filtre avance/retard du PSS est utilisé pour compenser le retard de phase de la fonction de transfert GEP(s). En déterminant la valeur du retard de phase, nous pouvons ainsi calculer les constantes de temps (avance/retard) nécessaires pour assurer la compensation demandée. Pour ce faire, l'angle de phase de résidu peut être utilisé [30].

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

$$H(s) = K_{PSS} \frac{sT_\omega}{1+sT_\omega} \left[\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right]^m \quad (\text{II.75})$$

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

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

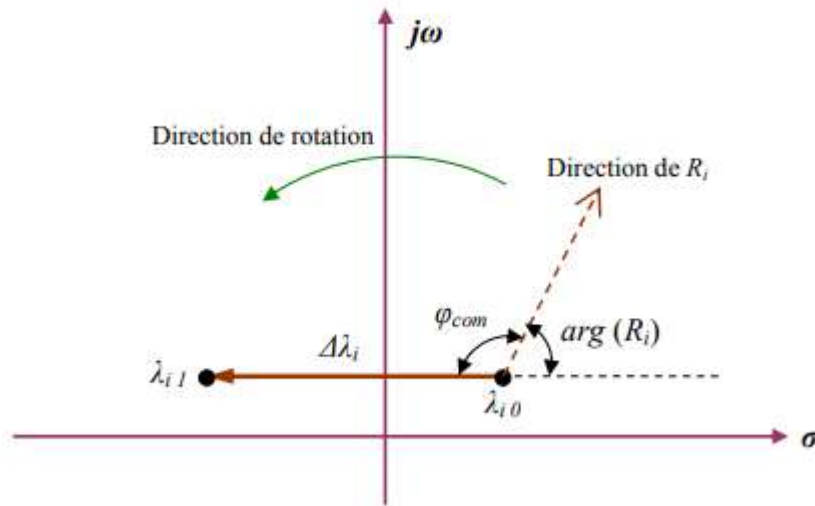


Figure II.17 : Déplacement de valeur propre par la rotation du résidu associé.

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

$$\varphi_{com} = 180^\circ - \arg(R_i) \quad (\text{II.76})$$

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 [30] :

$$T_1 = \alpha T_2, T_2 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}} \quad (\text{II.77})$$

$$\text{Avec : } \alpha = \frac{1 - \sin\left(\frac{\varphi_{com}}{m}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\varphi_{com}}{m}\right)} \quad (\text{II.78})$$

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

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

$$H(s) = K_{PSS} \cdot H_f(s) \quad (\text{II.79})$$

Le déplacement des valeurs propres est donné ci-dessous :

$$\Delta\lambda_i = |\lambda_{i1} - \lambda_{i0}| = R_i H(\lambda_i) \quad (\text{II.80})$$

En remplaçant l'équation dans la dernière équation, nous obtenons pour gain K_{PSS} la valeur littérale suivante [31] :

$$K_{PSS} = \left| \frac{\lambda_{i1} - \lambda_{i0}}{R_i H(\lambda_i)} \right| \quad (\text{II.81})$$

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 : $K_{st} = \frac{K_{inst}}{3}$ [32]

II.4.3.3. Méthode de placement des pôles :

Cette méthode consiste à déterminer les valeurs des paramètres d'un PSS de sorte que tous les pôles du système en boucle fermée se trouvent placés en des positions spécifiées préalablement dans le plan complexe.

Cette méthode peut être mathématiquement décrite en considérant la représentation suivante du système [8-15-33] figure (II.18).

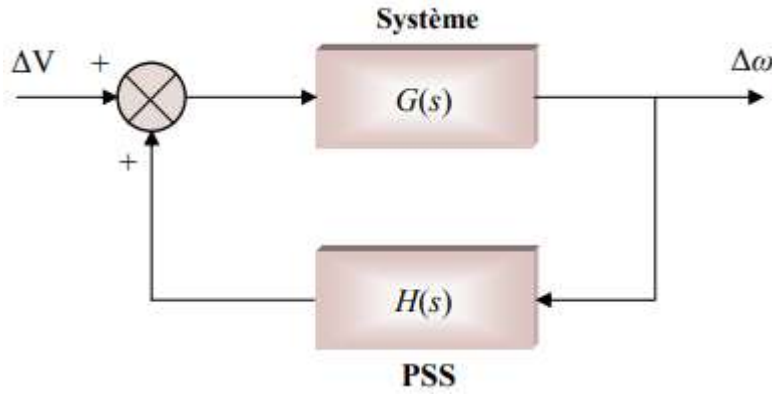


Figure II.18: L'ensemble (système-PSS) en boucle fermée.

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 :

$$1 - G(s)H(s) = 0 \quad (\text{II.82})$$

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

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

$$H(\lambda_i) = \frac{1}{G(\lambda_i)} \quad (\text{II.84})$$

$$\Rightarrow K_{PSS} \cdot \frac{\lambda_i T_\omega}{1 + \lambda_i T_\omega} \cdot \frac{1 + \lambda_i T_1}{1 + \lambda_i T_2} \cdot \frac{1 + \lambda_i T_3}{1 + \lambda_i T_4} = \frac{1}{G(\lambda_i)} \quad (\text{II.85})$$

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

II.4.4. Emplacement optimal des PSSs :

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

Ainsi, la première étape de la mise en œuvre des PSSs, est de trouver les emplacements optimaux des PSSs nécessaires et de déterminer leur nombre. Ce problème a fait l'objet, depuis une

dizaine d'années, d'un grand nombre de recherche [34-35-36-37-38-39]. Les approches les plus efficaces proposées sont basées sur l'analyse modale du système linéarisé :

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

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

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

II.5. Résultat et discussion :

II.5.1. Exécution du système étudié avec PSS :

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

➤ Paramètre schéma bloc de simulation

$K1=0.7635$, $K2=0.8643$, $K3=0.3230$, $K4=1.4188$, $K5 = 0.1462$, $K6=0.4166$, $K_{exc} = 200$.

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

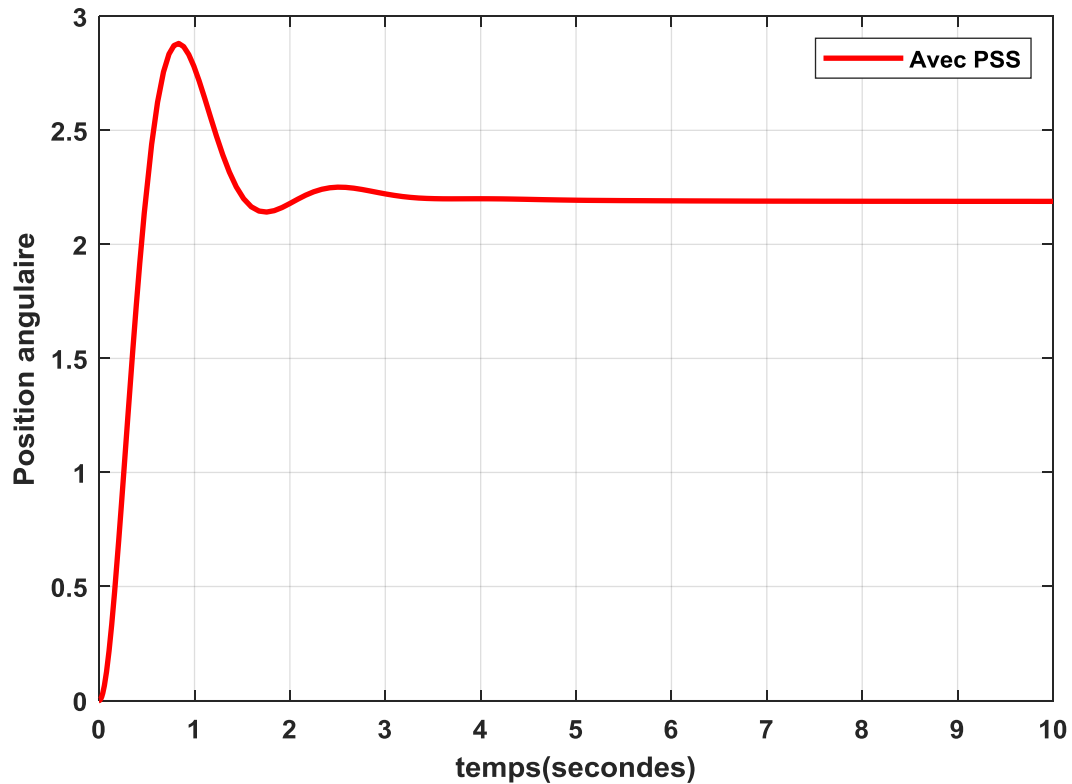


Figure II.19 : Présente la variation de la position angulaire

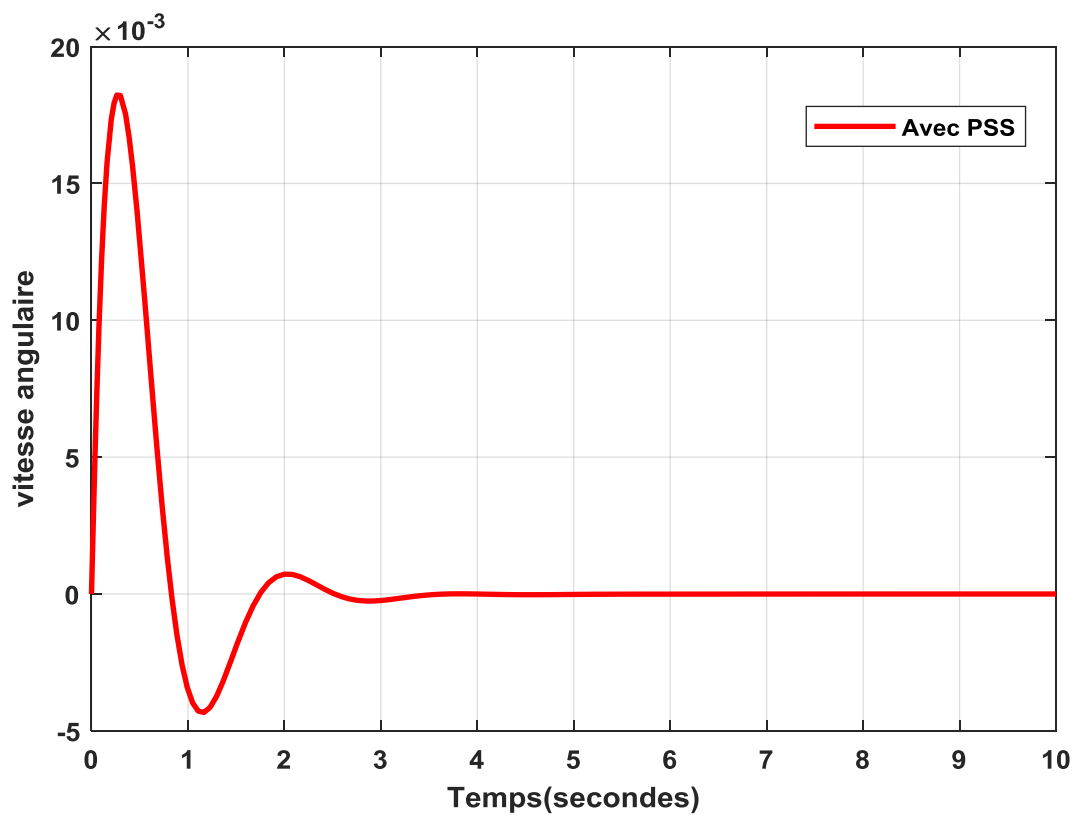


Figure II.20: Présente la variation de la vitesse angulaire

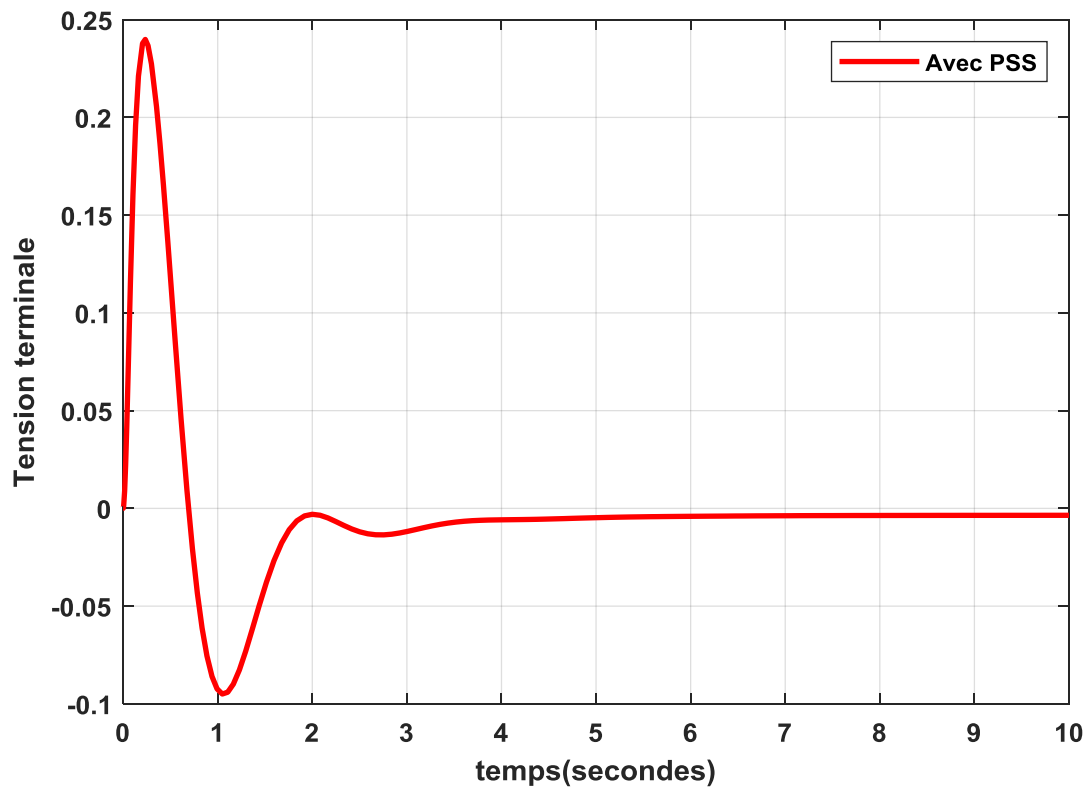
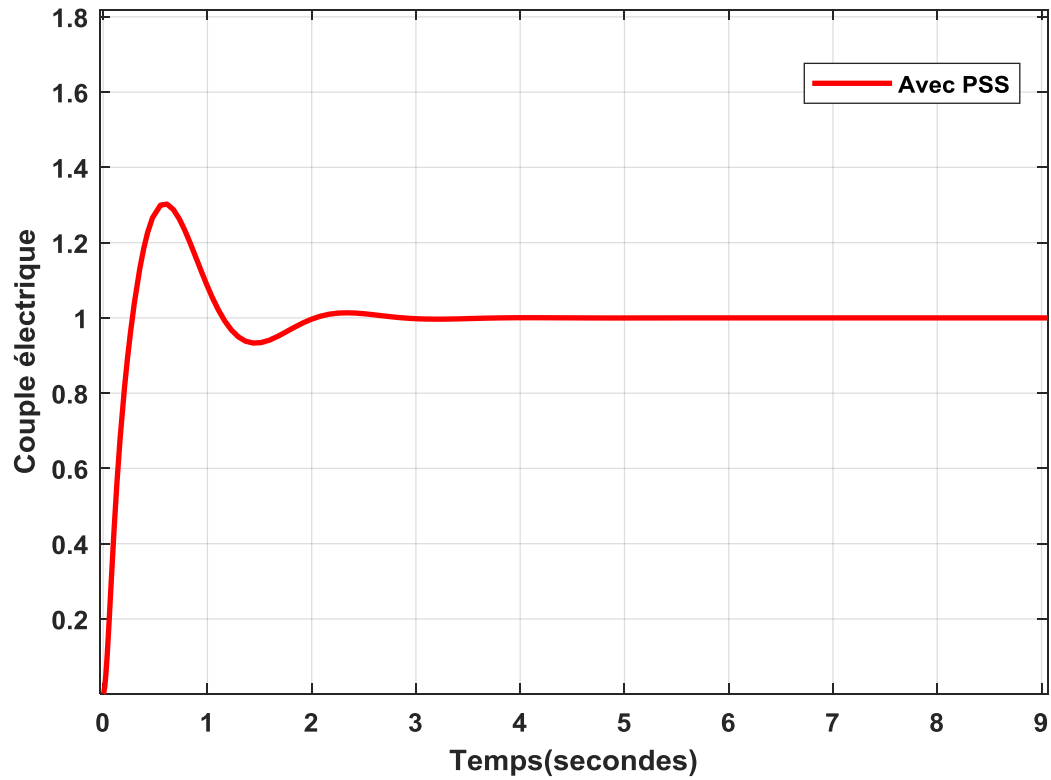


Figure II.21: Présente la variation du couple électrique

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

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

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

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

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

➤ Paramètre schéma bloc de simulation:

$K1=0.7635$, $K2=0.8643$, $K3=0.3230$, $K4=1.4188$, $K5 = 0.1462$, $K6=0.4166$, $K_{exc} = 200$.

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

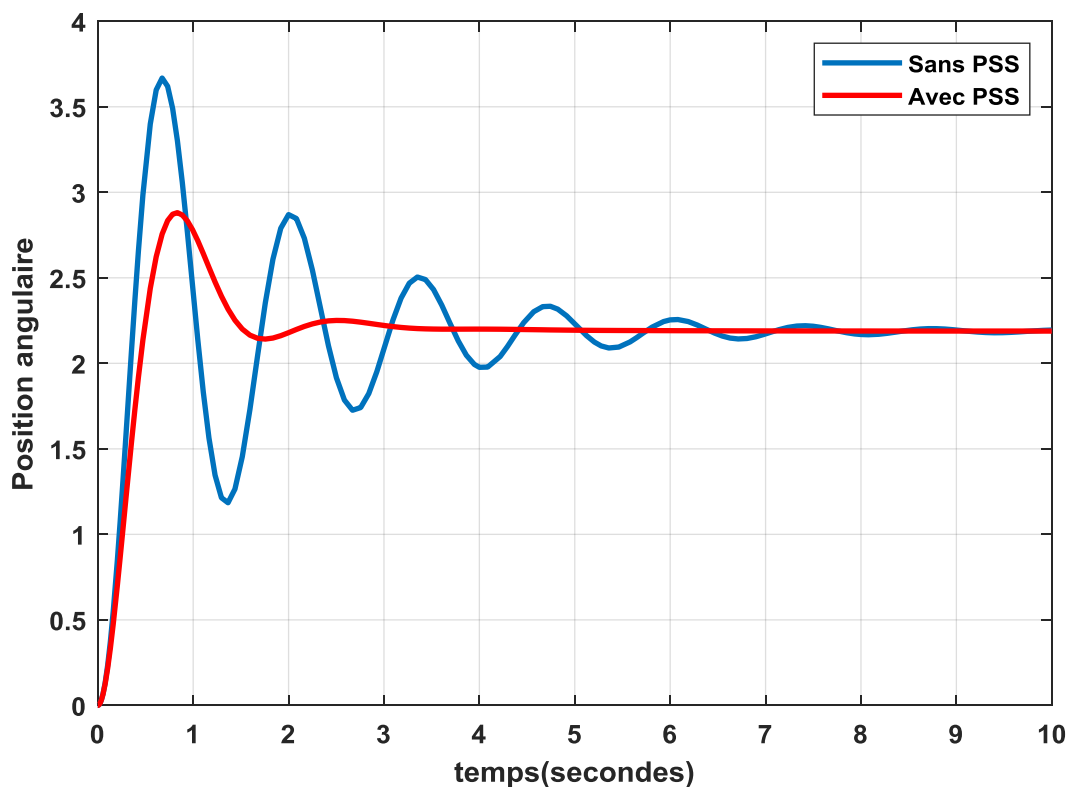


Figure II.23: Présente la variation de la position angulaire.

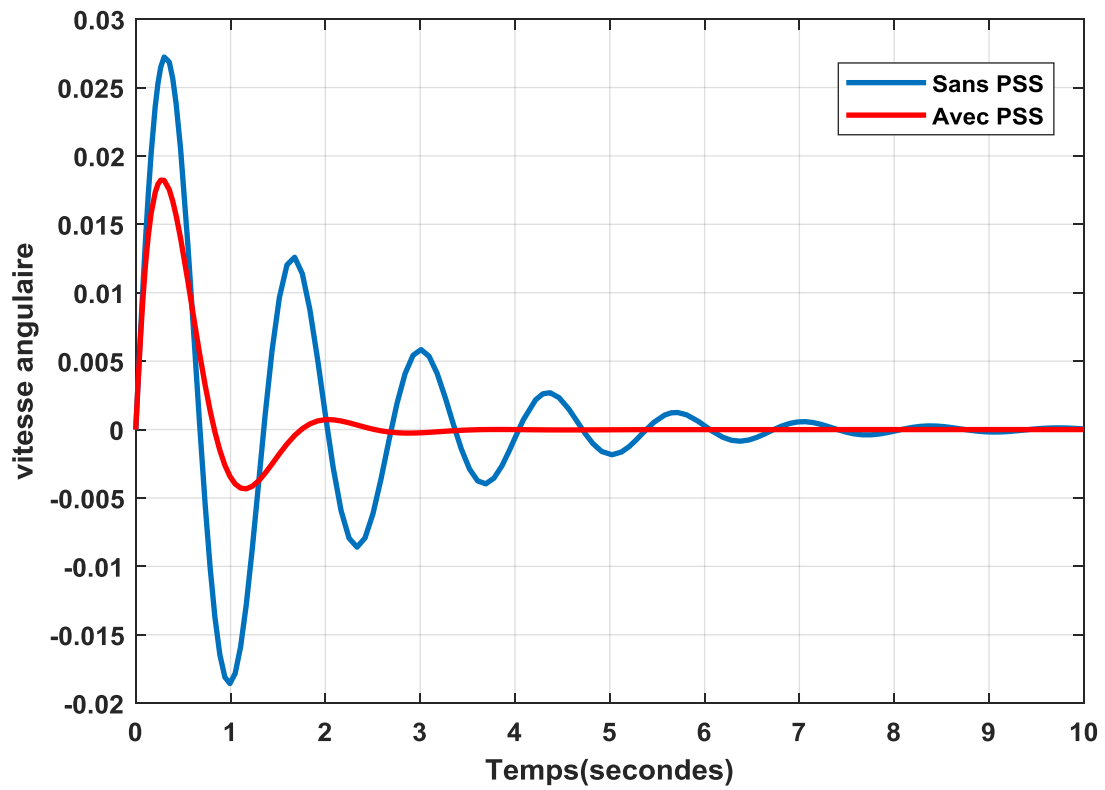


Figure II.24: Présente la variation de la vitesse angulaire.

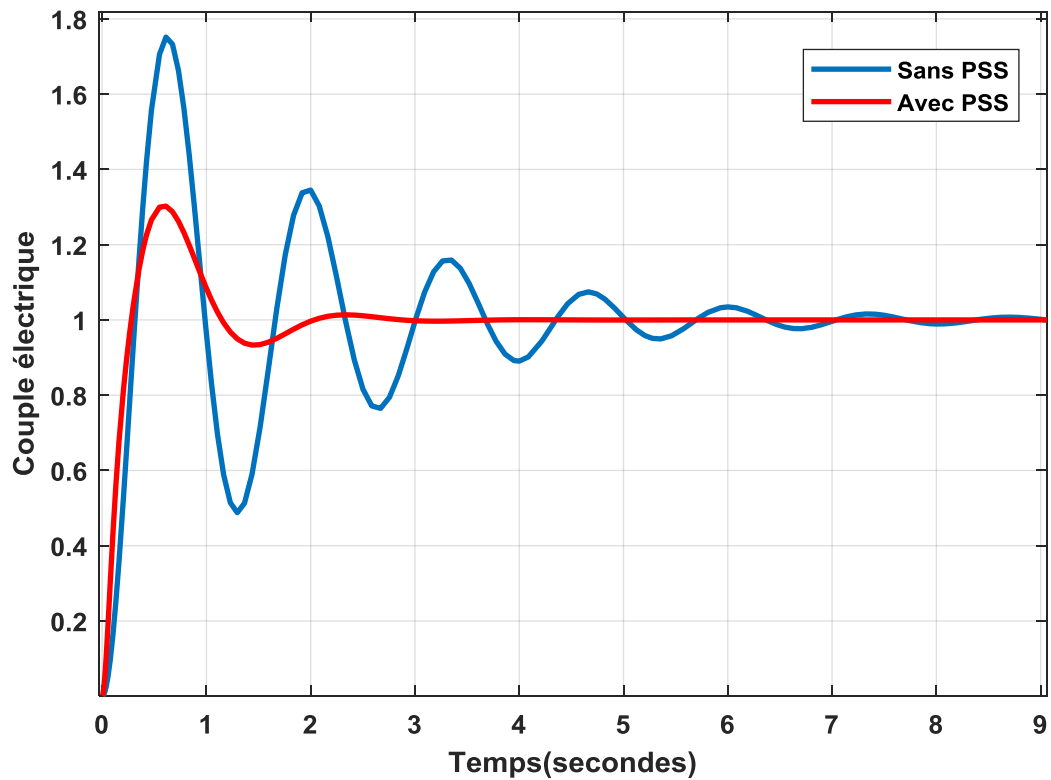


Figure II.25: Présente la variation du couple électrique.

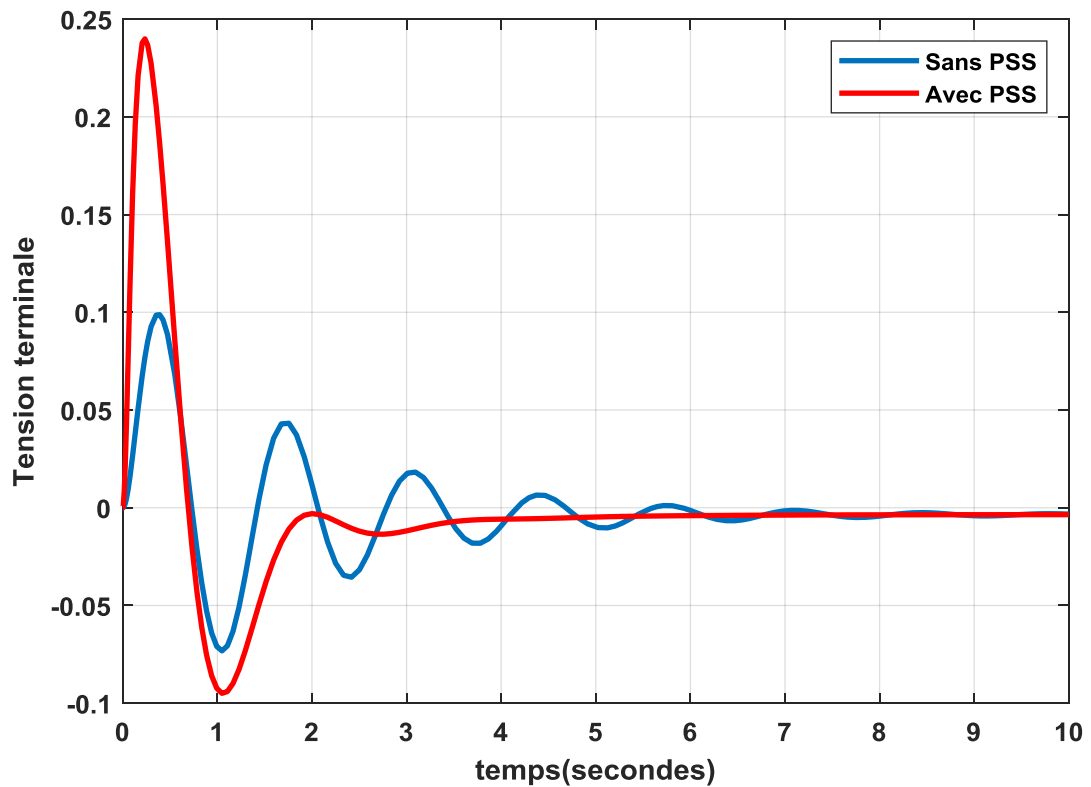


Figure II.26: Présente la variation de la tension terminale

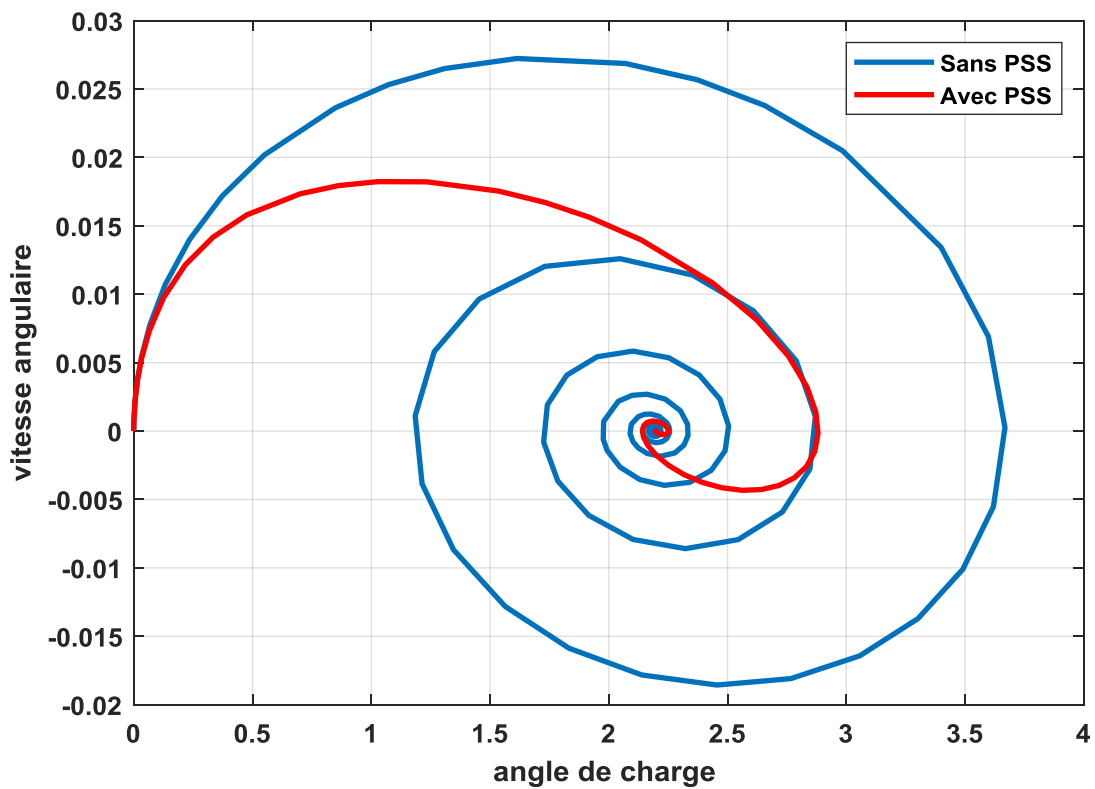


Figure II.27: Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport la variation d'angle.

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

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

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] Intégral of Absolut Error, [ISE] Intégral of Square Error, et aussi [ITAE] Intégral Time multiplie by Absolut Error), on peut montrer sur le tableau (II.2).

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

Les cas	Sans PSS	Avec CONV PSS
IAE	0.1495	0.1169
ISE	0.007102	0.007336
ITAE	0.3273	0.2232

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

Nous avons connu d'après les chapitres précédents, le système sera d'autant mieux réglé lors le

Les cas	Sans PSS			Avec CONV PSS			crit ère inté gral cho isi sera min
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	

imal.

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

$IAE_{avecCONVPSS} = 0.1169$), aussi l'intégrale de l'erreur absolue pondérée par le temps est minimale ($IAE_{minimal} = IAE_{avecCONVPSS} = 0.2232$)

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation du système de puissance pour les études de la stabilité angulaire. En outre, présenté d'une façon générale le modèle et le fonctionnement du stabilisateur PSS

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

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

Pour faire fonctionner le stabilisateur PSS, et dans le cadre de la simulation, nous exploitons le système en question en utilisant le stabilisateur du système d'alimentation PSS et sans PSS. Nous avons analysé l'étude, où nous avons remarqué que les stabilisateurs de puissance PSS, en raison de leur efficacité et de leur faible coût, réduisent les oscillations électromécaniques du système.

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

CHAPITRE III :
***Stabilisation par logique
floue***



III.1. Introduction

La logique floue est une forme de logique à valeurs multiples dans laquelle les valeurs de vérité des variables peuvent être tout nombre réel compris entre 0 et 1 inclus. Il est utilisé pour gérer le concept de vérité partielle, où la valeur de la vérité peut varier entre complètement vrai et complètement faux. En revanche, dans la logique booléenne, les valeurs de vérité des variables ne peuvent être que les valeurs entières 0 ou 1. La logique floue est basée sur l'observation que les gens prennent des décisions basées sur des informations imprécises et non numériques.

Les ensembles flous ou modèles sont des méthodes mathématiques utilisées pour représenter des informations vagues et imprécises (d'où le mot flou). Ces modèles peuvent détecter, représenter, manipuler, interpréter et utiliser des données et des informations floues et peu fiables. De nombreux domaines ont été utilisés pour appliquer la logique floue, allant de la théorie du contrôle à l'intelligence artificielle. Dans ce chapitre, nous aborderons certains aspects théoriques de la logique floue, ainsi que les fondements de son utilisation pour la gestion de processus.

III.2. 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 » (Fuzzysets). 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.Smidt réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est là la première véritable application industrielle de la logique floue [40]

III.3. Définition du régulateur flou :

Le contrôle flou tire son nom des applications de contrôle ou de commande en automatique, mais maintenant ce cadre déborde par ses multiples applications, partout où une modélisation mathématique est difficile. Le principe de cet algorithme de contrôle est très simple, il consiste à réaliser une « interpolation » entre un petit nombre de situations connues données par un expert sous la forme de règles floues du genre «si x est petit et y est modéré, alors z doit être très grand ».

La mise au point des prédicats évoqués par ces règles se fait généralement de façon empirique, mais de plus en plus, différentes méthodes d'apprentissage ont été appliquées dans le but d'avoir des

systèmes de contrôle auto-adaptatif. Trois phases de traitement ont lieu dans un régulateur flou



(figure (1.1)) : Fuzzification, Inférence et Défuzzification.

Figure III.1: Traitement flou

III.4. La théorie des ensemble floue :

III.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 (III.1) ne sont pas « nets », mais « flous » ou « graduels » [40].

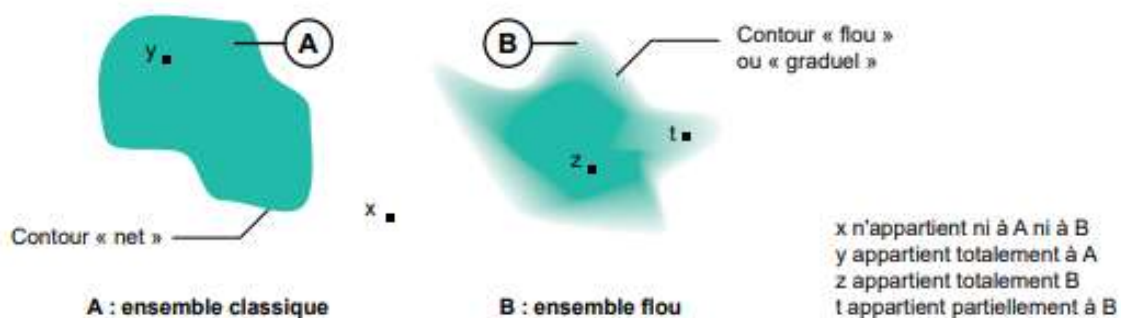


Figure III.2: Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.

III.4.2. Fonction d'appartenance (FA) :

La « fonction d'appartenance » d'un ensemble flou est la fonction caractéristique de la logique classique. Prenons l'exemple de l'ensemble des individus de « taille moyenne ». Selon la logique

traditionnelle, nous considérerons par exemple que les individus de taille moyenne sont ceux dont la taille se situe entre 1,60m et 1,80m. Caractéristiques de la fonction de l'ensemble Figure (III.2) [40].

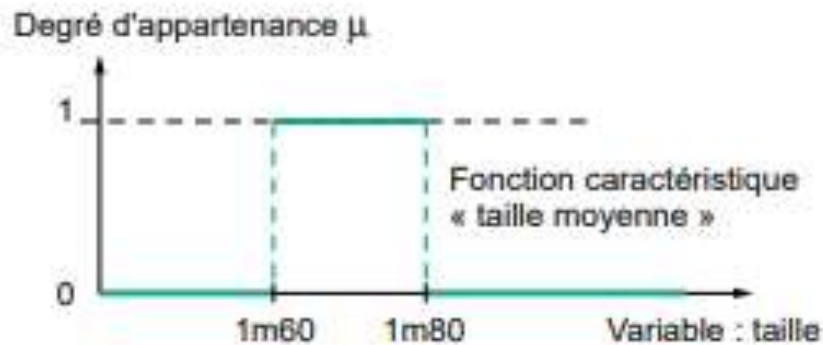


Figure III.3: Fonction caractéristique.

Pour les tailles qui ne sont pas dans l'intervalle [1.60m;1.80m], donnez «0 » et «1 » dans cet intervalle. Une fonction d'appartenance sera utilisée pour définir l'ensemble flou des individus de « taille moyenne » qui se distingue d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle [0, 1]. Chaque taille envisageable sera associée à un "degré d'appartenance" à l'ensemble flou des "tailles moyennes" illustré dans la Figure (III.3), allant de 0 à 1.

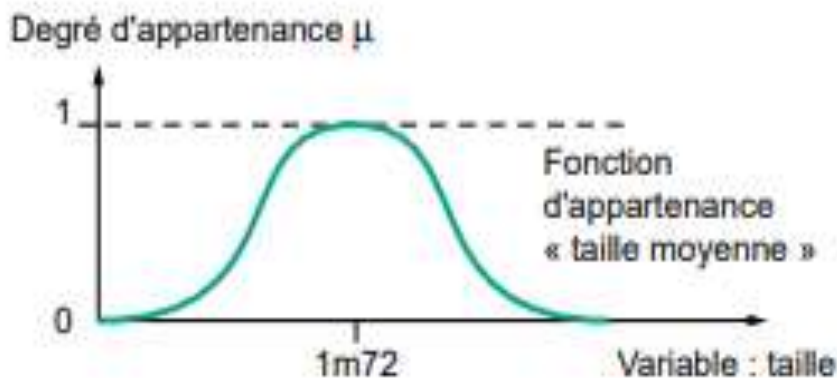


Figure III.4: Fonction d'appartenance.

Il est possible de définir plusieurs ensembles flous sur la même variable, comme les ensembles « petite », « moyenne » et « grande », qui sont expliqués chaque fois par une fonction d'appartenance Figure (III.4).

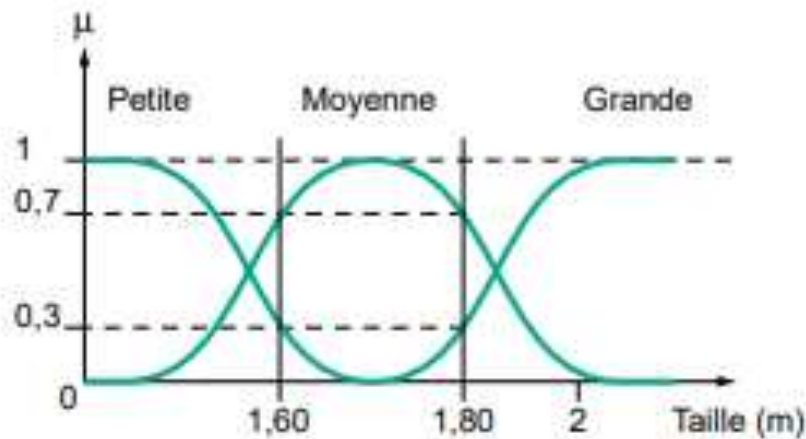


Figure III.5: Fonction d'appartenance, variable et terme linguistique.

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 [40].

Théoriquement, les fonctions d'appartenance peuvent prendre toutes les formes possibles (FA triangulaire, FA trapézoïdale, FA gaussienne...etc.). Cependant, elles sont généralement caractérisées par des segments de droites et sont appelées « linéaires par fragments » (Figure III.5).

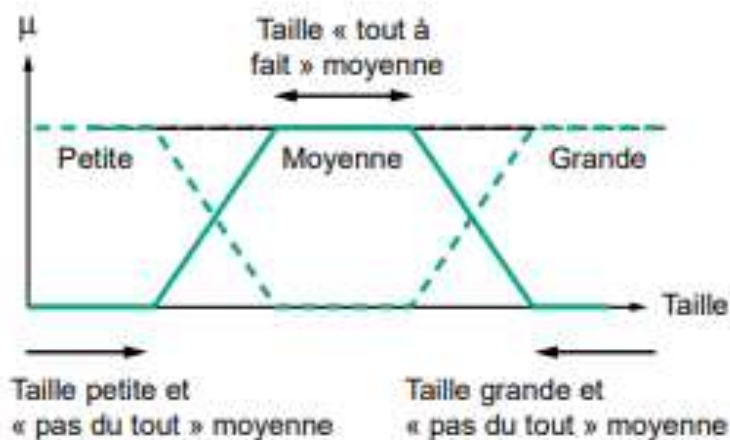


Figure III.6: Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux.

On utilise fréquemment les fonctions d'appartenance « linéaires par morceaux » car :

- Elles sont simples,
- Elles incluent des points qui permettent de déterminer les zones où la notion est vraie et les zones où elle est fausse, ce qui facilite la collecte d'expertise.

Il arrive que les fonctions d'appartenance soient égales à 1 pour une seule valeur de la variable et égales à 0 ailleurs, ce qui les qualifie de « fonctions d'appartenance singletons ». Une variable réelle (taille) est représentée par un singleton flou Figure (III.6) qui traduit dans le domaine flou une valeur spécifique (taille de Paul) de cette variable...

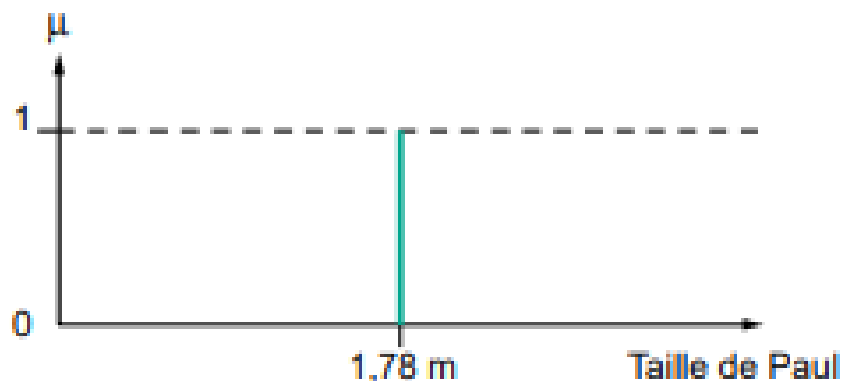


Figure III.7: Fonction d'appartenance singleton

III.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 (III.7), si la valeur courante de la variable « entrée » est de 2, le degré d'appartenance à la fonction d'appartenance « entrée faible » est égal à 0.4 qui est le résultat de la fuzzification [40].

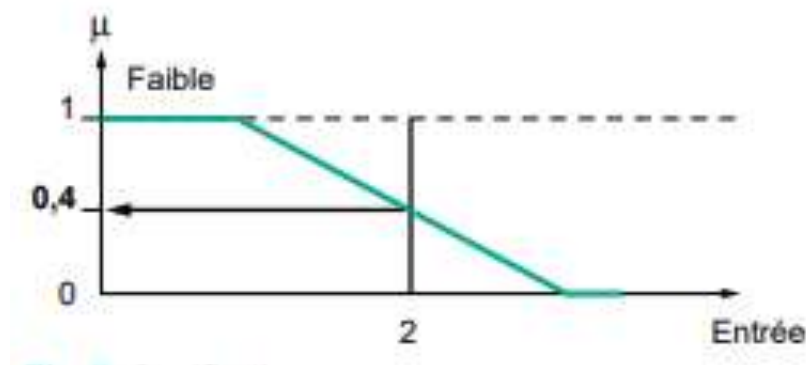


Figure III.8: Fuzzification.

La proposition « faible entrée » est également vraie à 0,4. Le degré de vérité de la proposition est alors discuté. Ainsi, le degré d'appartenance et le degré de vérité sont des concepts semblables.

III.5. Les différentes parties d'un régulateur flou :

Un contrôleur flou est un système à base de connaissances particulières, utilisant un raisonnement en profondeur limité, dans une procédure de chaînage avant règles (activation des règles par les prémisses). Les variables caractéristiques du système à commander et les consignes définissent les variables d'entrée du contrôleur flou, elles sont en général, les grandeurs de sortie du processus et, le cas échéant, d'autres mesures déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du processus. La base de connaissances est composée d'une base de données et d'une base de règles. La base de données regroupe :

- ❖ Les ensembles flous associés aux variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou,
- ❖ Les facteurs d'échelle (gains) en entrée (normalisation) et en sortie (dénormalisation).

On peut distinguer plusieurs étapes dans le traitement des règles. Un schéma représentatif peut être le suivant :

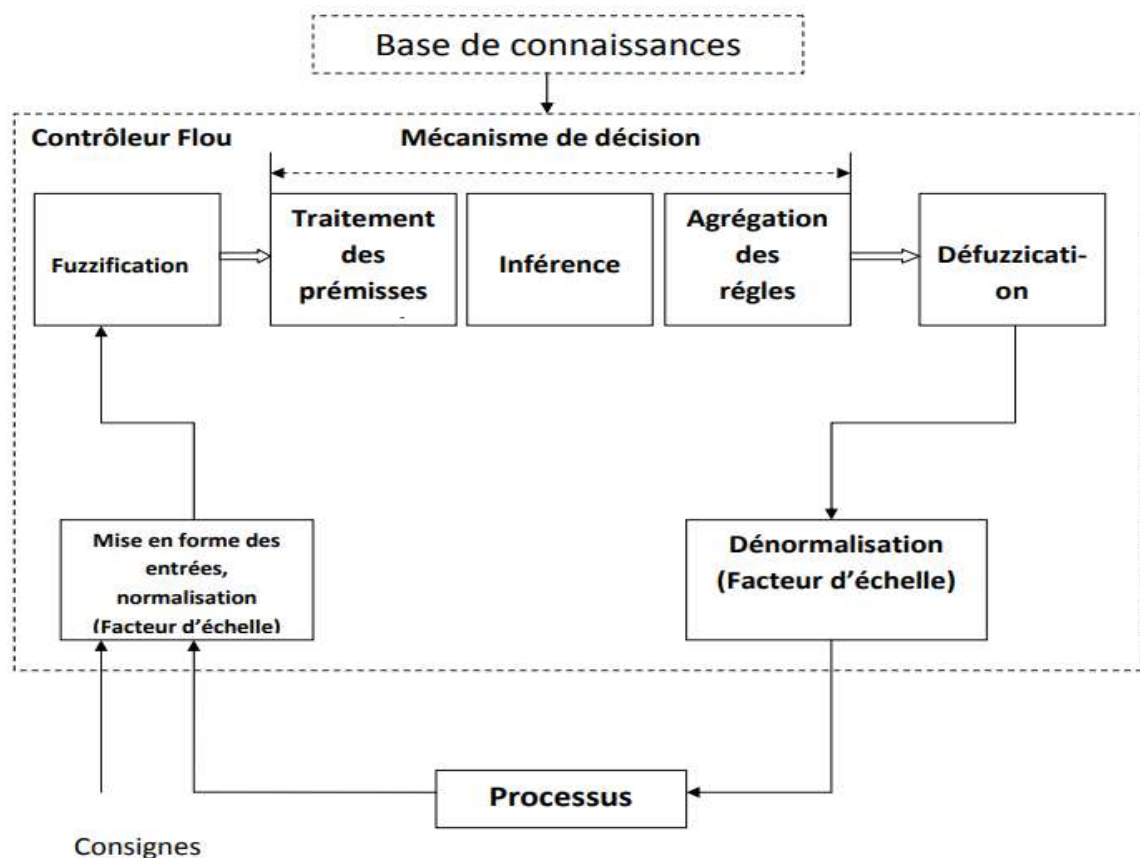


Figure III.9: Structure de base d'un contrôleur flou

III.5.1. Définition de chaque phase de traitement dans un régulateur flou :

III.5.1.1. Phase de traitement 1 :

a) Normalisation :

Cette première étape permet le traitement des variables d'entrée du contrôleur flou, par exemple, calcul de l'erreur et des variations d'erreurs. L'utilisation de domaines normalisés (univers de discours compris entre -1 et 1) nécessite une transformation d'échelle transformant les grandeurs physiques des entrées en des valeurs normalisées appartenant à l'intervalle $[-1,1]$.

b) Fuzzification :

C'est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables. Le choix de la forme des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, exponentielles, gaussiennes, ...) est arbitraire, pour pouvoir réaliser cette étape, il est nécessaire de définir le nombre, la forme et la répartition des ensembles flous sur les différents univers de discours. Les formes triangulaires facilitent la programmation ce qui explique

Qu'elles soient le plus fréquemment utilisées. Quant au nombre de fonctions d'appartenance, il est généralement impair car elles se répartissent autour de zéro [41].

III.5.1.2. Phase de transformation 2 :

a) Traitement des prémisses composées :

En général, les prémisses des règles vont comporter plusieurs clauses liées par des connecteurs « ET », « OU » et « NON ». Dans la pratique, pour les opérations de conjonction et de disjonction, on a souvent recours, parmi les normes et conformes triangulaires, aux opérateurs min et max. Quant à la négation d'un ensemble flou A, elle est caractérisée par :

$$u_{A^c}(x) = 1 - u_A(x) \quad (\text{III.1})$$

b) Inférence :

Cette phase permet de relier les ensembles flous et de les comparés avec les différentes règles, le résultat de l'inférence est un ensemble flou de sortie, à savoir un ensemble flou pour la grandeur réglant, c'est le mécanisme qui applique les opérations d'inférence à partir des règles, le moteur d'inférence est le véritable cerveau du contrôleur flou, l'opération consiste à admettre une proposition en vertu de sa liaison avec d'autres propositions tenues pour vraies à partir de la base des règles fournie par l'expert et des sous-ensembles flous.[42]

Elle repose sur l'utilisation d'un opérateur d'implication permettant d'évaluer le degré de vérité d'une règle R de la forme « Si (X est A) Alors (Y est B) »

En d'autres termes, cet opérateur quantifie la force de la liaison entre la prémisse et la conclusion de la règle. Les opérateurs les plus courants en commande sont de type conjonctif : • L'implication de Mamdani (1974) :

$$u_R(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \min(\mu_A(\mathbf{x}), \mu_B(\mathbf{y})) \quad (\text{III.2})$$

c) Agrégation des règles :

Selon le type de l'implication, classique ou conjonctive, l'opérateur utilisé pour agréger les règles est de type conjonctif ou disjonctif. Ainsi, en commande, l'implication étant généralement de type conjonctif, cela revient à considérer que les règles sont liées par un opérateur OU [43]. En pratique, on utilise l'opérateur

$$\mu_B(\mathbf{y}) = \max_i(\mu_{Bi}(\mathbf{y})); i = 1, \dots, N \quad (\text{III.3})$$

III.5.1.3. Phase de transformation 3 :

a) 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 ». La défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles en une grandeur de commande précise. Là aussi il existe plusieurs méthodes [44], parmi lesquelles :

- ❖ La méthode de la hauteur,
- ❖ Le premier des maximas,
- ❖ La moyenne des maximas,
- ❖ Le centre de gravité,
- ❖ Le centre de la plus grande surface,
- ❖ Le centre des maximas.

Les méthodes de défuzzification les plus utilisées en commande floue sont le centre de gravité, le centre des aires et le centre des maximas.

b) Dénormalisation :

Cette dernière étape transforme les valeurs normalisées des variables de commande en des valeurs appartenant à leur domaine physique respectif

III.6. PSS basés sur la logique floue :

Le stabilisateur de puissance est employé afin d'optimiser les performances du générateur synchrone. Toutefois, cela se traduit par des performances médiocres dans différentes conditions de

chargement qui ont été mises en place avec les PSS classiques. Dans ce but, il est nécessaire d'avoir une logique floue PSS. Dans le stabilisateur système électro-énergétique, le contrôleur flou est généralement composé de deux entrées et d'une seule composante de sortie. C'est généralement un système MISO. Les deux entrées sont changement de vitesse angulaire et le taux de variation de la vitesse angulaire tandis que la sortie du contrôleur logique floue est un signal de tension.

Une modification de la tension de la rétroaction au système d'excitation en fonction de la puissance accélération sur une unité est utilisée pour améliorer la stabilité du système. Les signaux de stabilisation sont calculés en utilisant les fonctions d'appartenance floue standard en fonction de ces variables [24].

III.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 [24].

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

$$\Delta\omega(K) = \frac{\Delta\omega(K) - \Delta\omega(K-1)}{\Delta T} \quad (III.4)$$

III.6.2. Fonction d'appartenance :

La déviation de vitesse, l'accélération et la tension sont les variables sélectionnées pour ce contrôleur. Ainsi, la déviation de vitesse et l'accélération sont les variables d'entrée et la tension est la variable de sortie. En fonction de la demande (l'application), le nombre de variables linguistiques décrivant les sous-ensembles flous d'une variable peut varier.

En général, on utilise un nombre impair. Sept sont un nombre raisonnable. Cependant, l'augmentation du nombre de sous-ensembles flous entraîne une augmentation du nombre de règles. La fonction d'appartenance de chaque variable linguistique est floue. Les valeurs nettes dans des variables floues sont représentées par la fonction d'appartenance. Le degré d'appartenance est défini à l'aide des fonctions d'appartenance triangulaires. Il ne faut pas que le degré d'adhésion joue un rôle crucial [24].

Un contrôleur confus. Sept sous-ensembles flous linguistiques sont affectés pour chaque variable d'entrée et de sortie de flous, allant de grand négatif (NB) à grand positif (PB). La fonction d'appartenance triangulaire est associée à chaque sous-ensemble à partir d'un ensemble de sept fonctions d'appartenance pour chaque variable floue.

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

Tableau III.1: Variables floues pour la fonction d'appartenance.

Les gains respectifs de K1, K2 et K3 sont multipliés pour normaliser les variables, de sorte que leur valeur se situe entre -1 et 1. Les sous-ensembles flous adjacents présentent 50% de chevauchement entre les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie [45].

La figure ci-dessous présente la fonction d'appartenance pour l'accélération, la vitesse et la tension

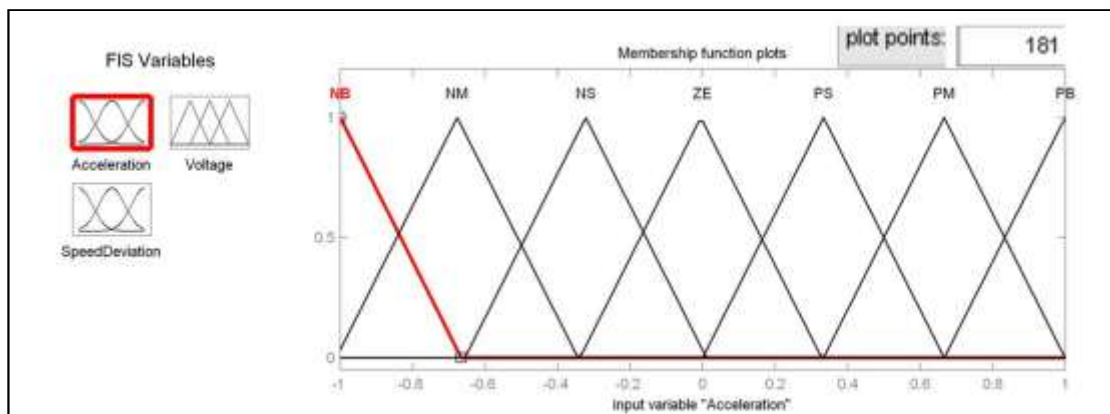


Figure III.10: Fonctions d'appartenance pour l'accélération

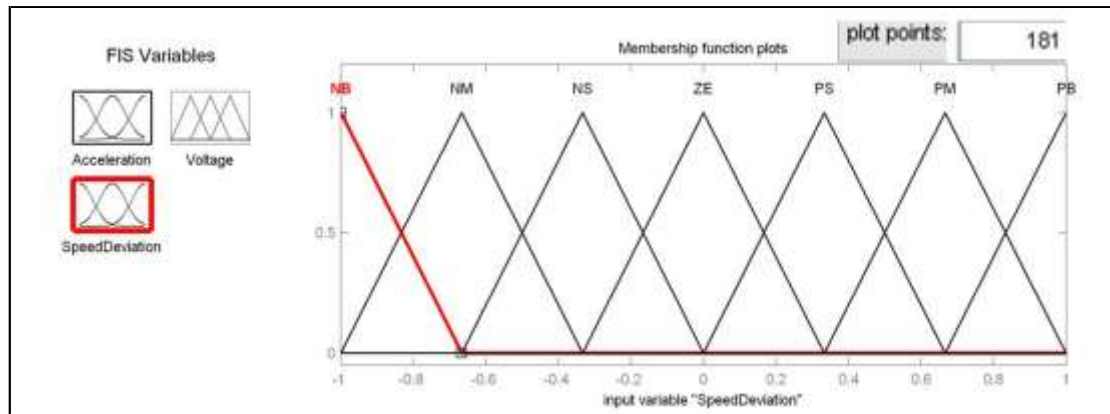


Figure III.11: Fonctions d'appartenance pour la variation de vitesse

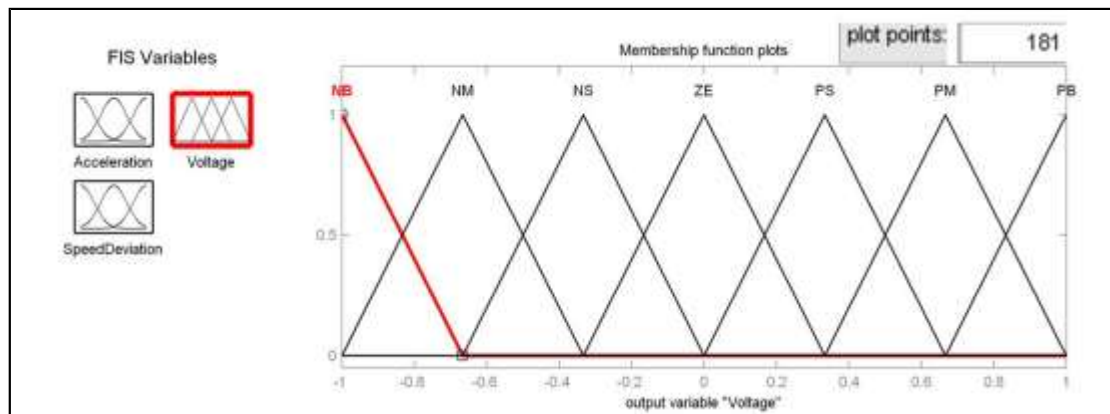


Figure III.12: Fonctions d'appartenance pour la tension

III.6.3. La base de règles floues [46] :

Un ensemble de règles qui définissent la relation entre les entrées et les sorties du contrôleur flou peut être trouvé en utilisant les connaissances disponibles dans le domaine de la conception PSS. La grammaire est définie à l'aide de variables linguistiques. Les deux entrées, vitesse et accélération, génèrent 49 règles pour chaque appareil. 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...

Le tableau (III.2) présente toutes les 49 règles qui régissent le mécanisme, avec tous les symboles définis dans la terminologie de base de logique floue.

Variation de vitesse	Accélération						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS
NM	NB	NM	NM	NM	NM	NS	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	ZE	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PS	PM
PS	NS	ZE	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	ZE	PS	PS	PM	PM	PM	PB
PB	PS	PM	PM	PB	PB	PB	PB

Tableau III.2: Base de règles de contrôleur à logique floue.

En appliquant une règle particulière exprimée sous forme de fonctions d'appartenance, on obtient la sortie du stabilisateur. Enfin, on calcule l'appartenance de sortie de la règle. Toutes les règles suivent cette procédure et chaque règle donne lieu à un résultat. Le mécanisme d'inférence le plus fréquemment employé est celui appelé « de Mamdani ». Les étapes précédemment mentionnées sont la fuzzification, la dégrée d'activation, l'implication et l'agrégation.

III.6.4. La mise en œuvre de la logique floue [46] :

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

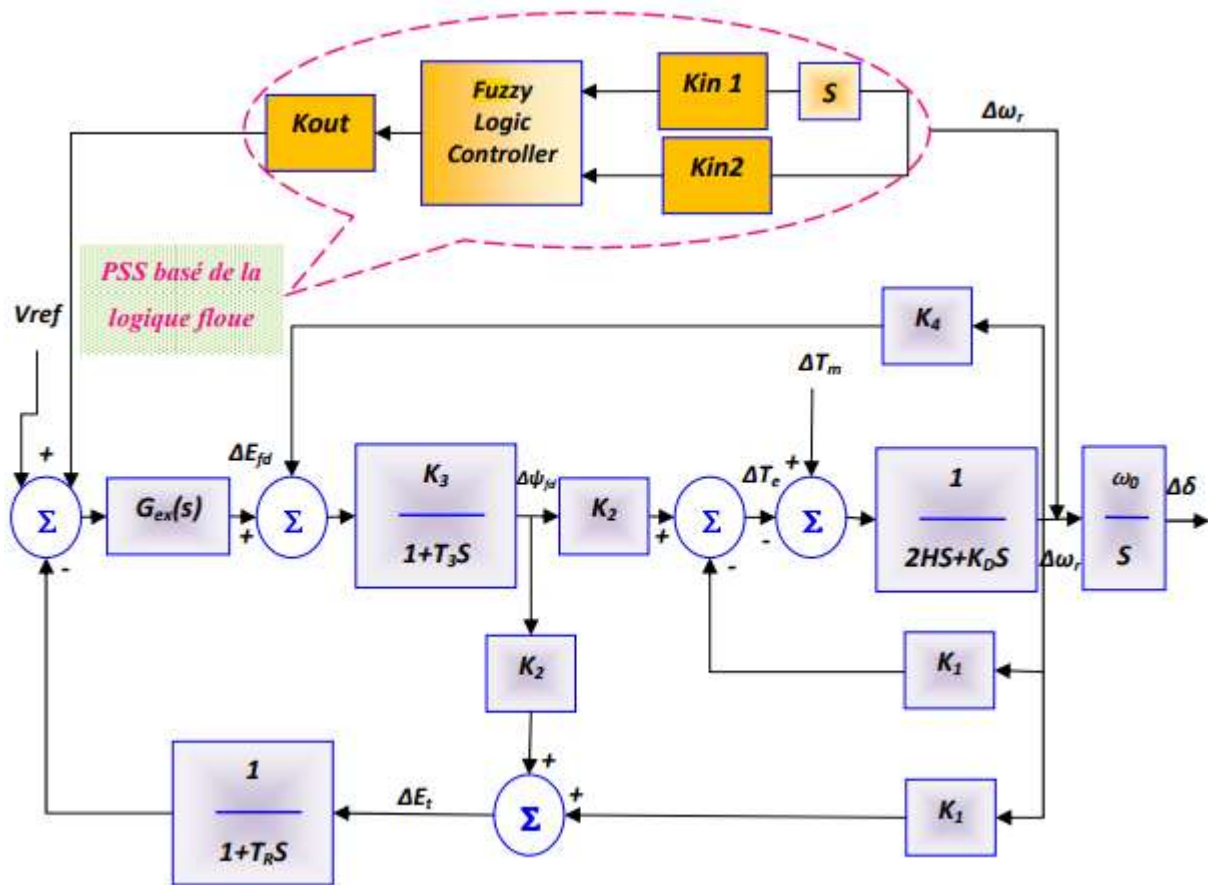


Figure III.13: Exécution de contrôleur de logique floue

III.7. Étude comparative entre la mise en œuvre du système aux différents cas :

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

- ❖ Sans régulateur PSS.
- ❖ Connecté avec régulateur PSS conventionnelle.
- ❖ Connecté avec régulateur FLPSS (PSS flou).

Simultanément, nous exécutons les schémas blocs des figures (II.12), (II.11) et de la figure (III.13), 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 (III.14), (III.15), (III.16), (III.16) et (III.17) , et (III.18) montré au-dessous, pour chacun d'angle de charge, de la vitesse angulaire, du couple électrique et de la tension terminale.

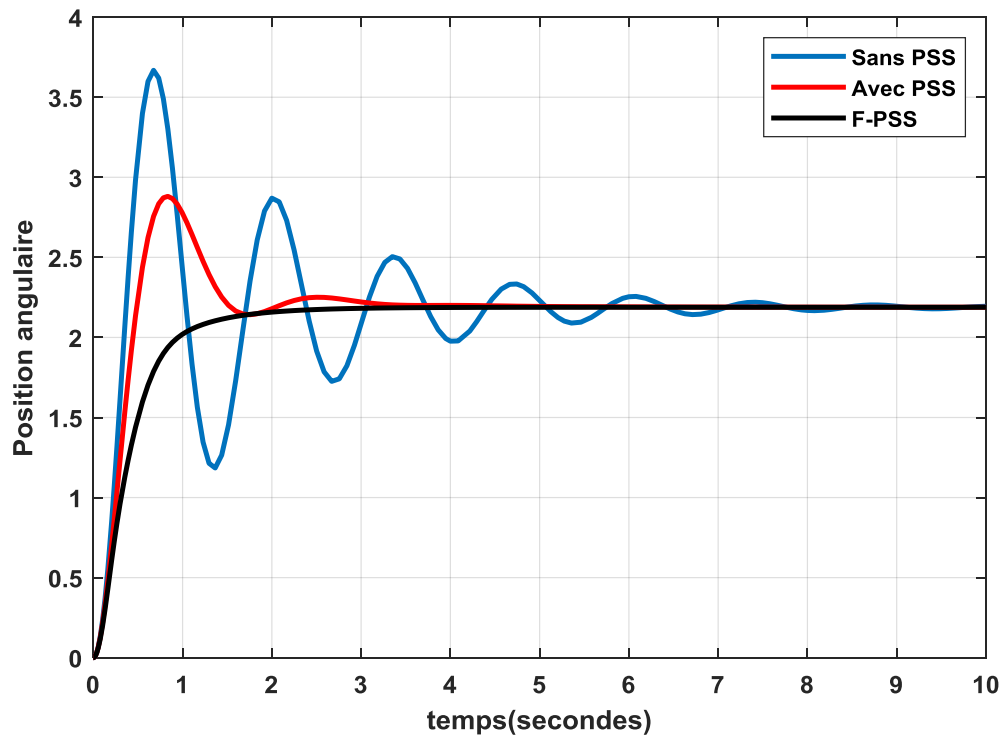


Figure III.14:Présente la variation de la position angulaire

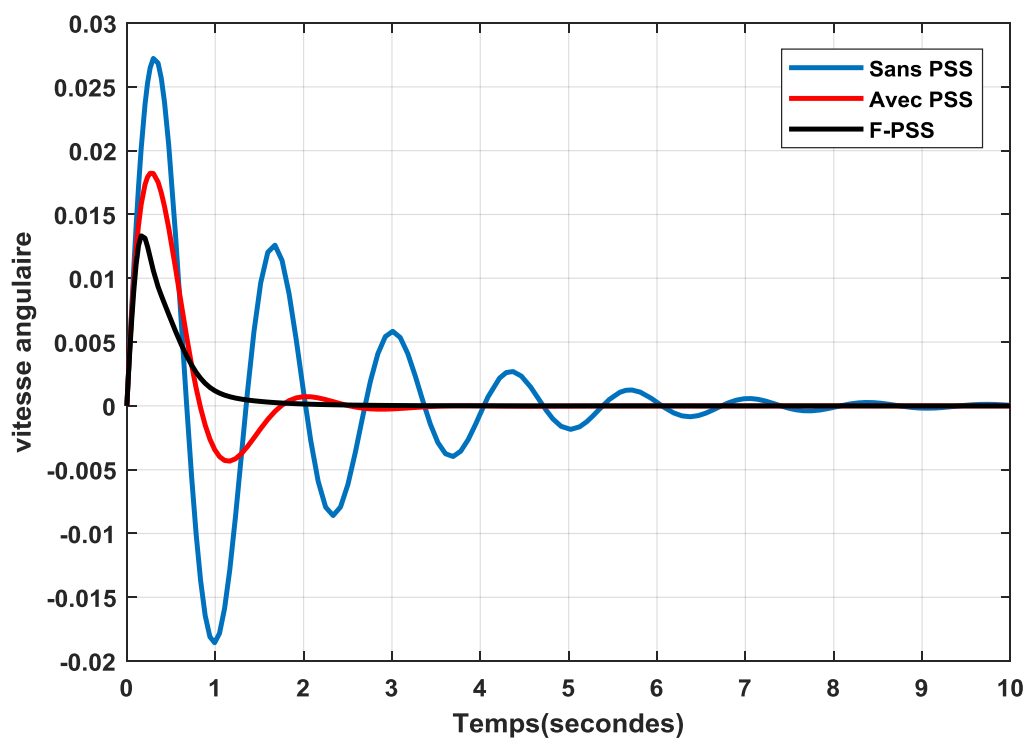


Figure III.15:Présente la variation de la vitesse angulaire.

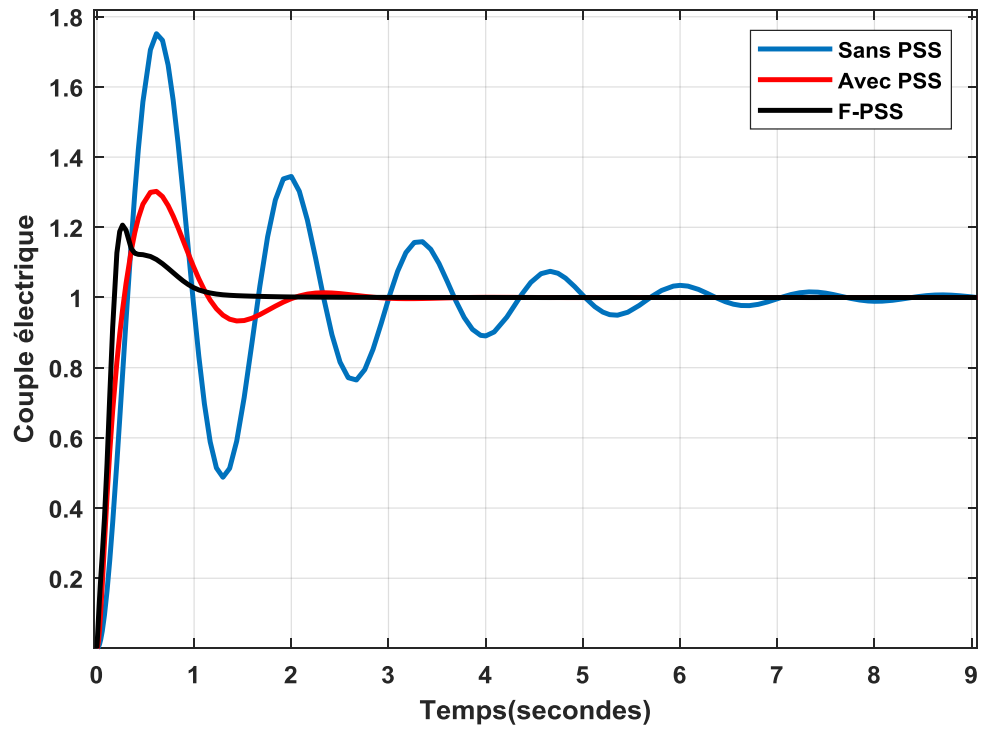


Figure III.16:Présente la variation du couple électrique

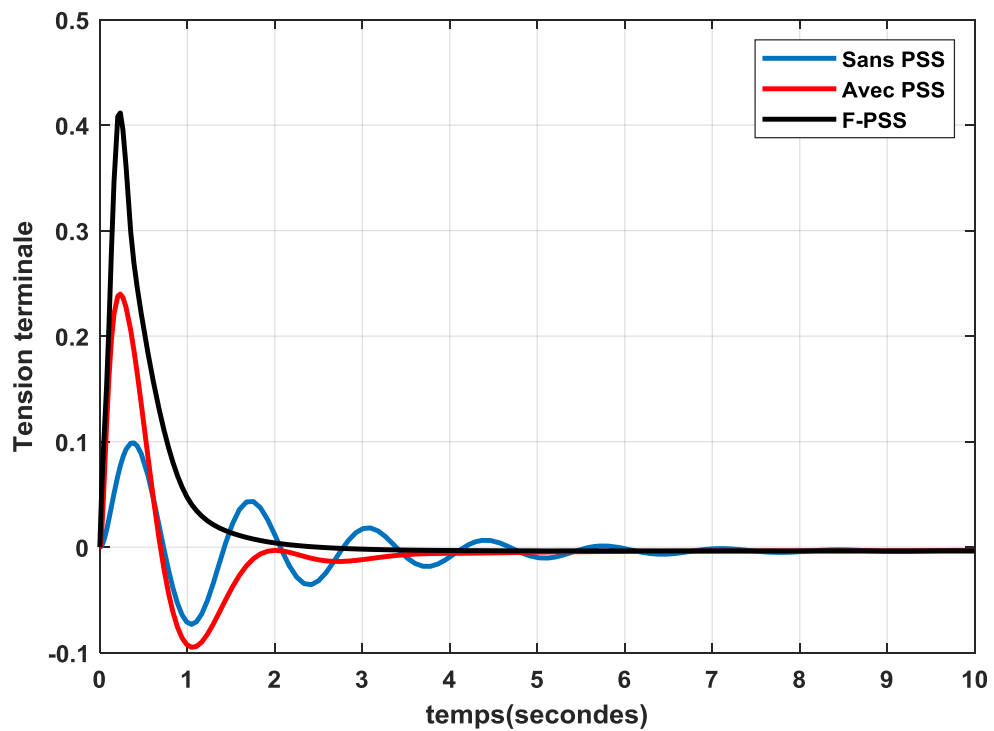


Figure III.17:Présente la variation de la tension terminale

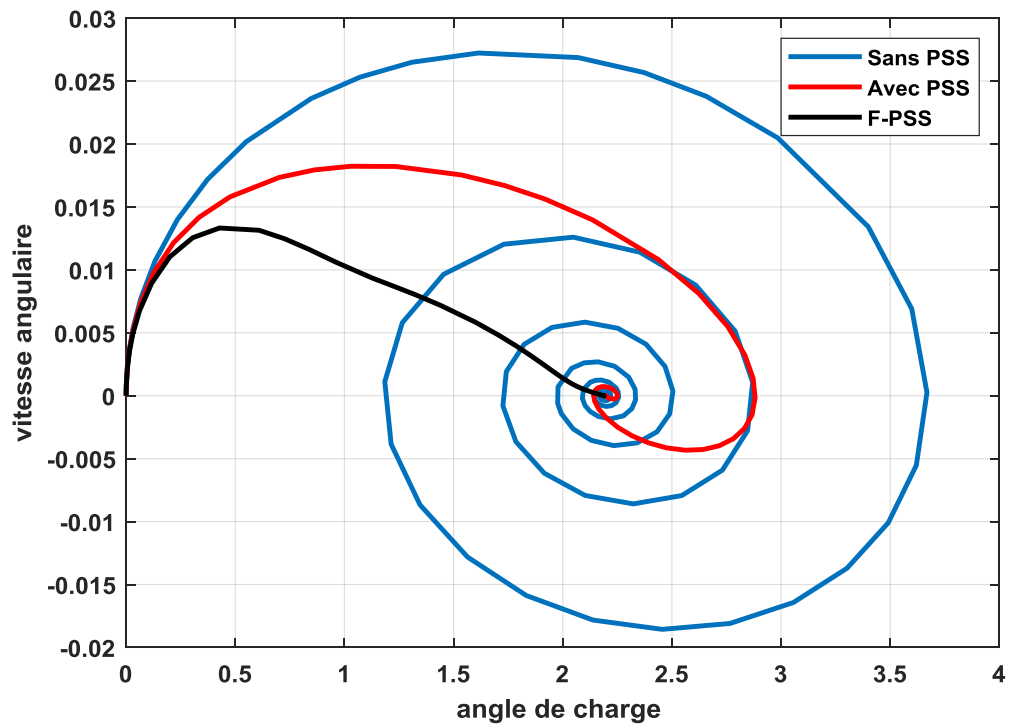


Figure III.18: Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport l'angle.

III.7.1. Exécution du système étudié avec régulateur FLPSS (PSS flu) :

Précédent, on peut utiliser MATLAB/Simulink pour l'application du modèle de la figure (III.1 3)

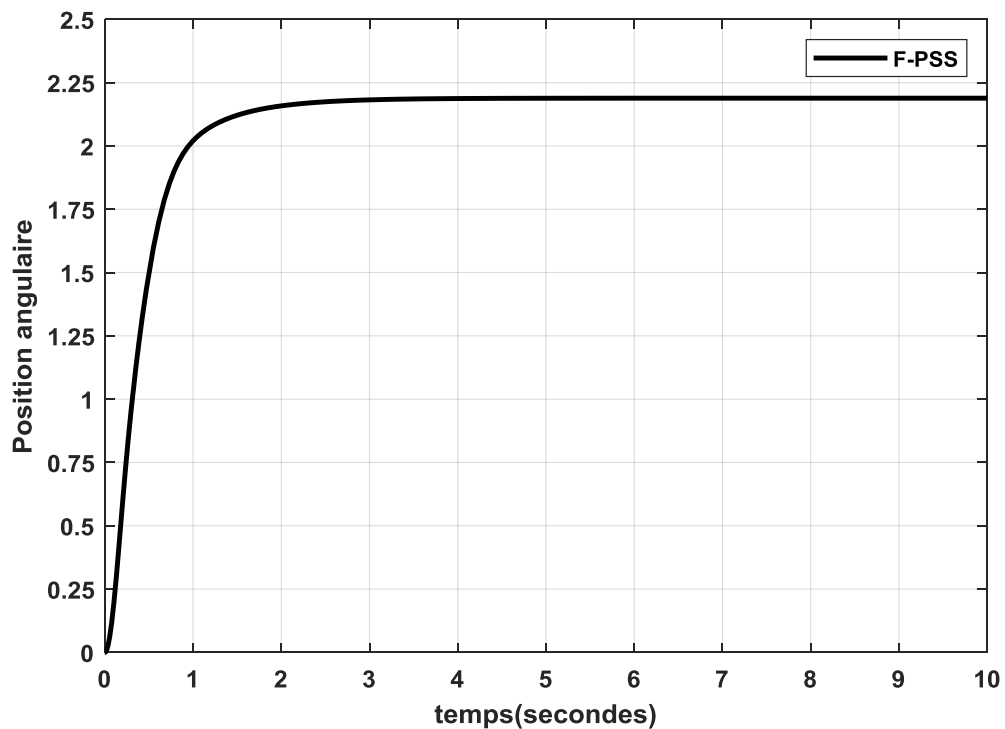


Figure III.19:Présente la variation de la position angulaire

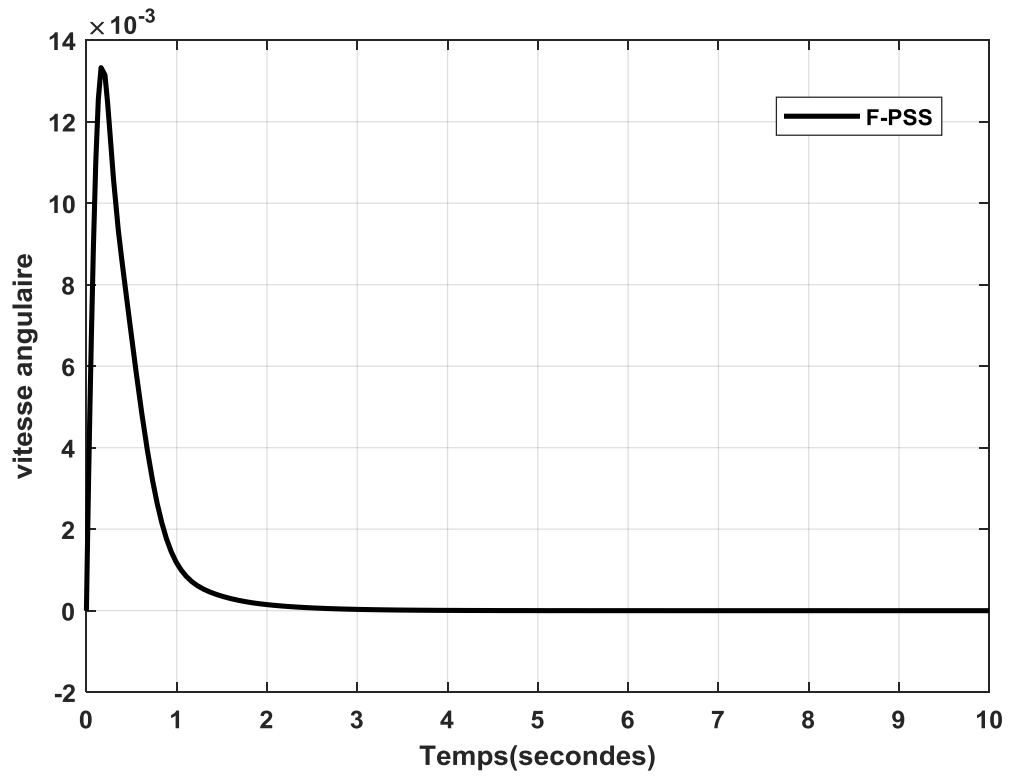


Figure III.20: Présente la variation de la vitesse angulaire

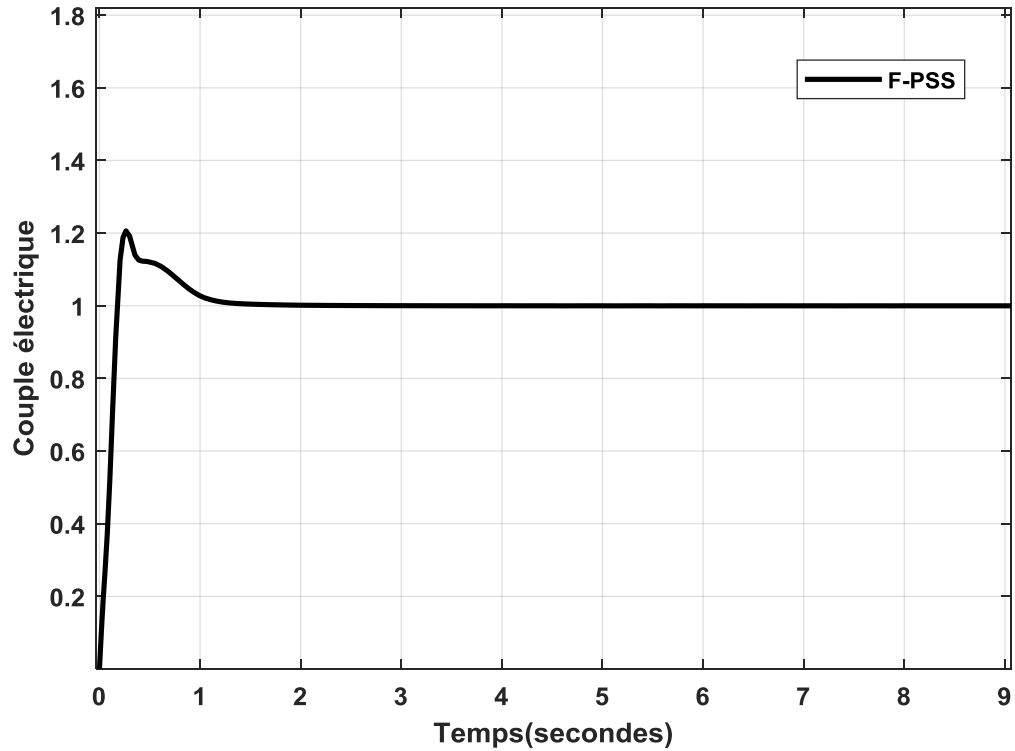


Figure III.21: Présente la variation du couple électrique

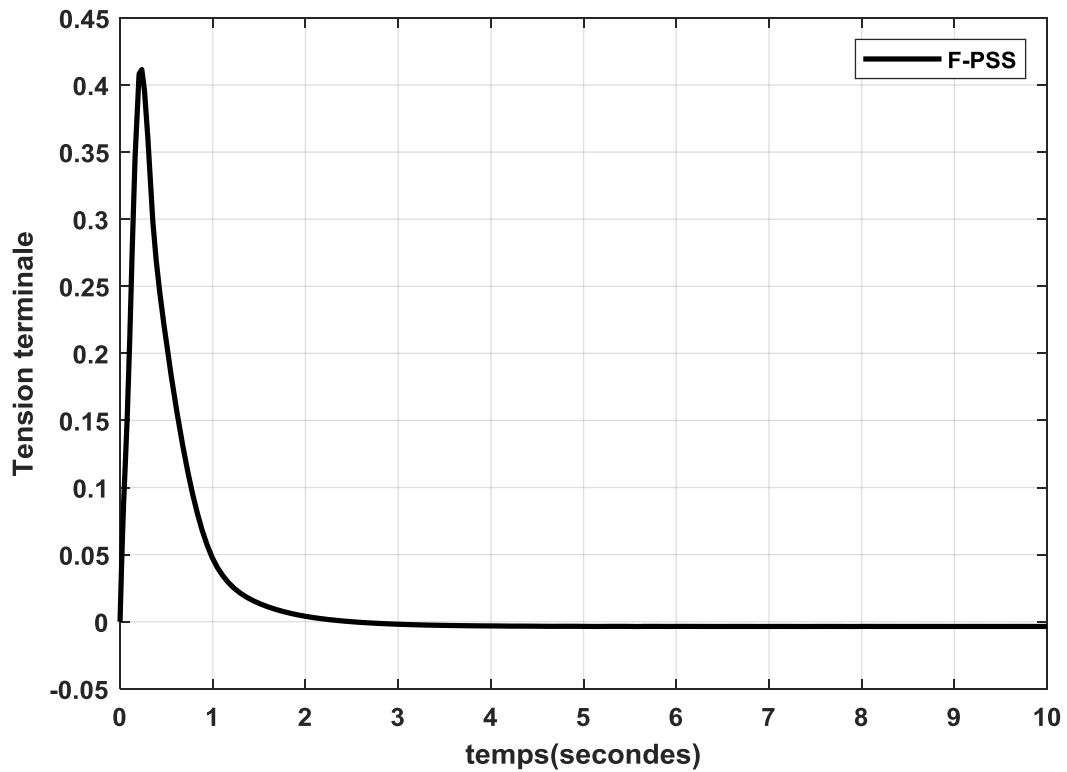


Figure III.22: Présente la variation de la tension terminale

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 CONV PSS			Avec FUZZY PSS		
La courbe	δ	ω	T_e	δ	ω	T_e	δ	ω	T_e
D_p	1.41 9	0.02 71	0.02 71	0.63 8	0.0183 3	0.30 4	0 0	0.0138 3	0.22
t_p	0.67 34	0.31 4	0.63 31	0.83 58	0.2658 04	0.56		0.1822 43	0.34
$t_r(5\%)$	4.75 2		4.75 3	1.38 5		1.60 6	1. 28		0.84 91

Tableau III.3: Comparaison des critères temporels instantanés.

Tableau III.4: Comparaison des critères temporels intégraux.

Les cas	Sans PSS	Avec CONV 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

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

Du tableau (III.4) on peut vérifier que le système avec FLPSS mieux réglé, parce que l'intégrale de l'erreur absolue est minimale par rapport aux autres cas ($IAE_{minimal} = IAE_{avec FLPSS} = 0.09975$), aussi l'intégrale de l'erreur absolue pondérée par le temps est minimale ($IAE_{minimal} = IAE_{avec PSS} = 0.1715$). Le régulateur flou est utilisé pour pouvoir ajuster le système rapidement (temps de réponse très court) par rapport au régulateur classique et de maintenir la tension V_t proche de sa référence $V_{réf}$ avec un minimum de dépassement.

III.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux concepts théoriques de la logique floue ainsi que le principe du contrôleur flou. Ensuite, après avoir décrit la structure d'une commande basée sur la logique floue, nous avons souligné comment celle-ci permet de modéliser un système complexe en se concentrant sur le comportement de l'opérateur humain face au système. En comparant les différentes mises en œuvre du système :

- ❖ Sans régulation PSS,
- ❖ Avec régulation PSS conventionnelle,
- ❖ Avec régulation PSS basée sur la logique floue,

Nous avons constaté que la performance du PSS basé sur la logique floue est nettement meilleure, avec des oscillations amorties plus rapidement. Ainsi, la logique floue offre la possibilité de modéliser et de remplacer l'expertise humaine dans la conduite des processus, qu'elle provienne du concepteur ou de l'utilisateur. Grâce à ce pouvoir, elle est classée parmi les techniques de l'intelligence artificielle.

CHAPITRE IV : *Test d'évaluations*



IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on va tester les blocs de régulateurs avec les paramètres de référence. Ainsi on présente un résultat de la programmation sous forme interface graphique pour simuler et analyser les performances des réseau électriques en utilisant la technique de la programmation visuelle sous l'environnement MATLAB.

IV.2. Exécution avec le système d'excitation (AVR- Gouverneur) sans PSS :

La norme IEEE type ST1A le modèle de système d'excitation a été considéré pour l'étude et intégré lui avec le système de jeu de barre infini de machine simple. Également, le modèle de simulation est montré dans la fig. (IV 1) les paramètres de système d'excitation sont :

➤ Paramètre schéma bloc de simulation

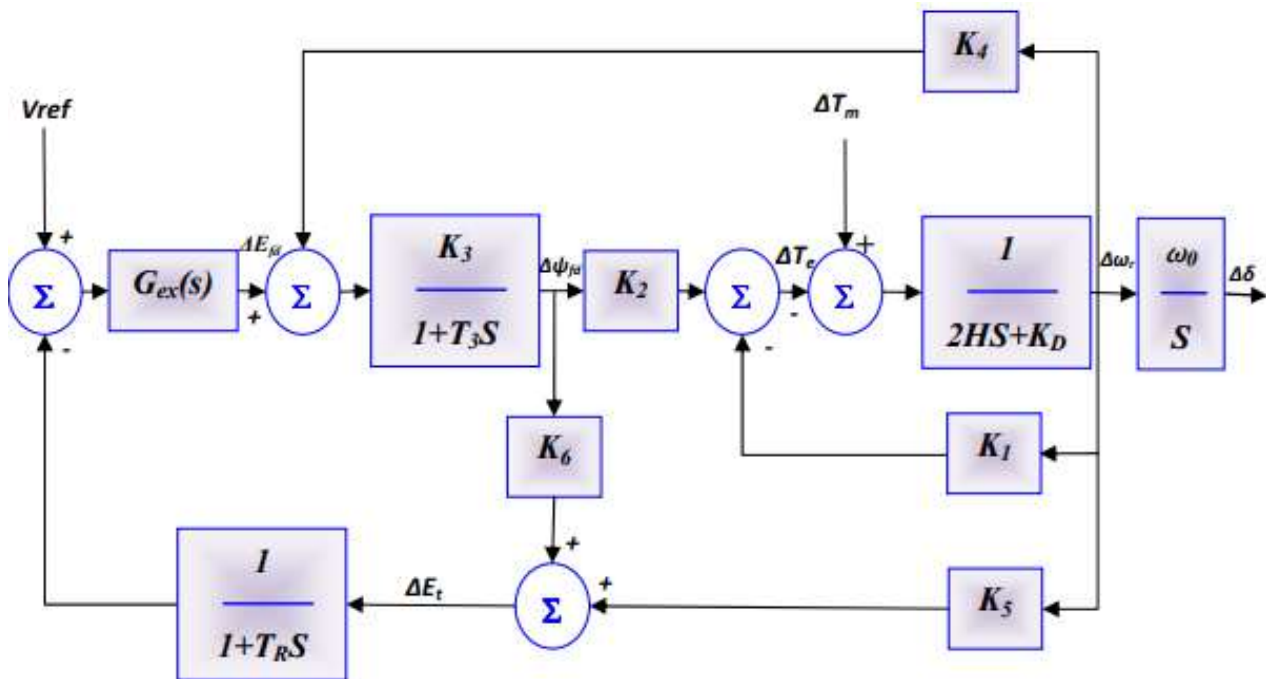


Figure IV.1: présente le bloc du système d'excitation (AVR- Gouverneur) sans PSS

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

Les résultats de simulation dans les figures (IV.2), (IV.3), (IV.4), (IV.5) montré au-dessous, pour chacun d'angle de charge, de la vitesse angulaire, du couple électrique et de la tension terminale :

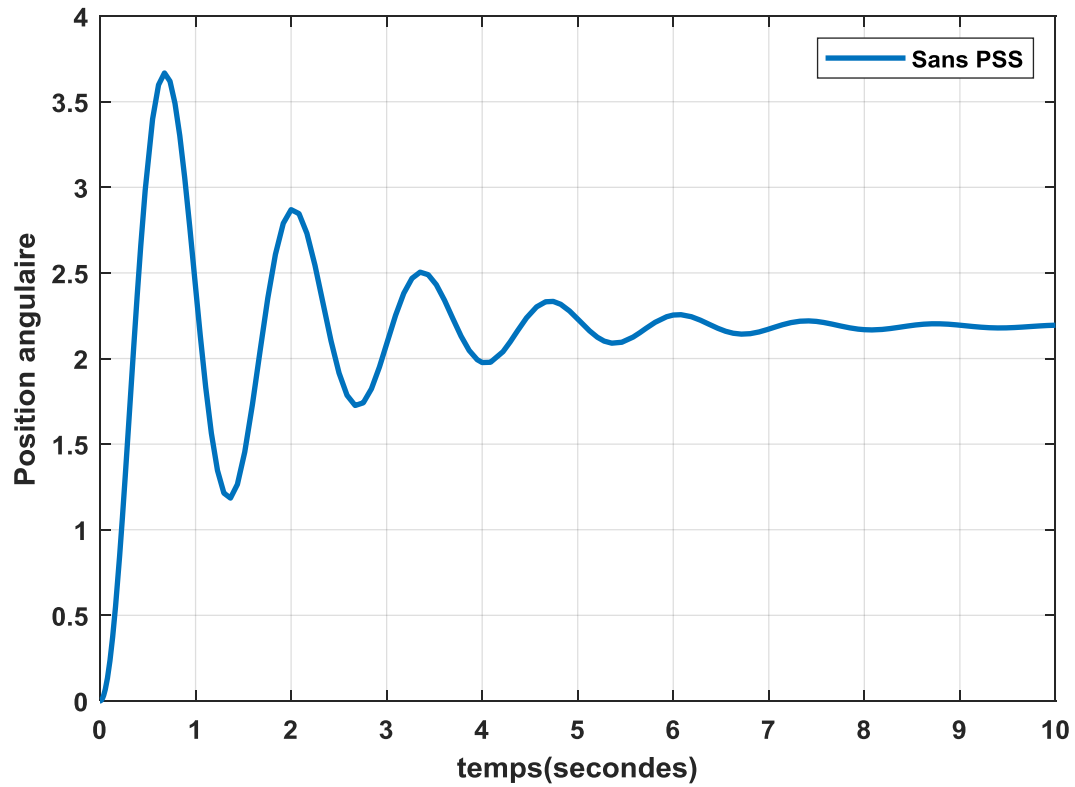


Figure IV.2 : Présente la variation de la position angulaire.

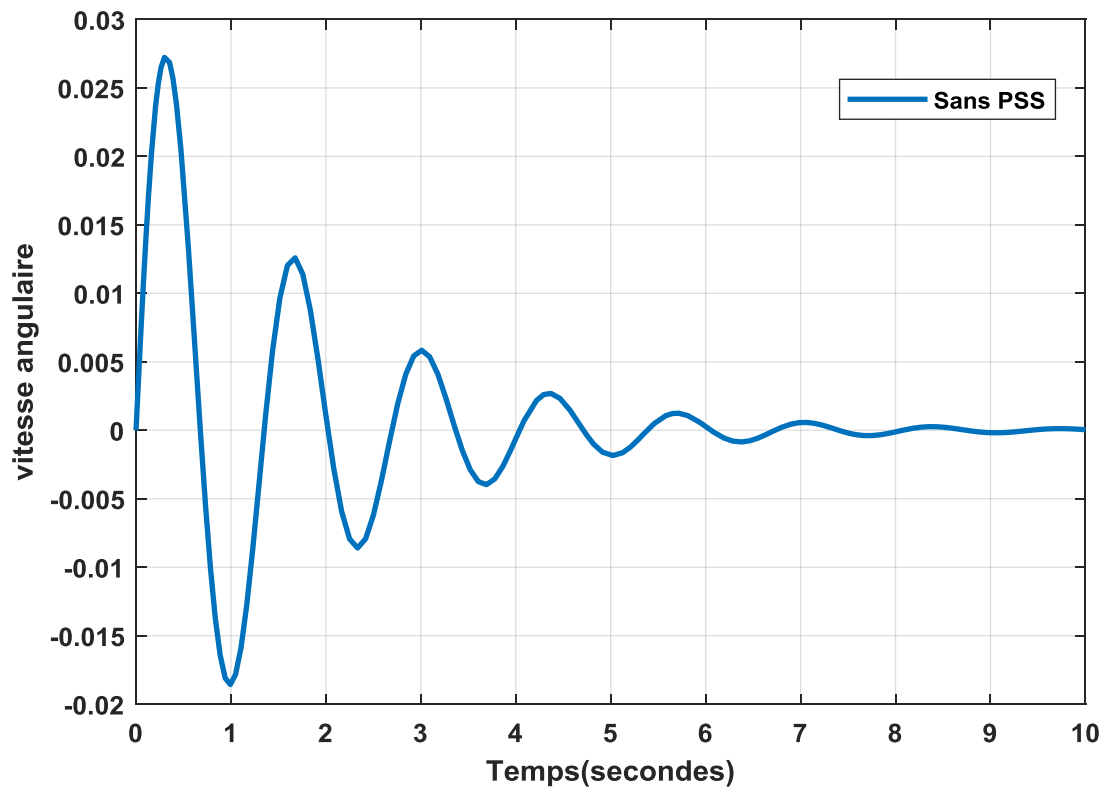


Figure IV.3: Présente la variation de la vitesse angulaire.

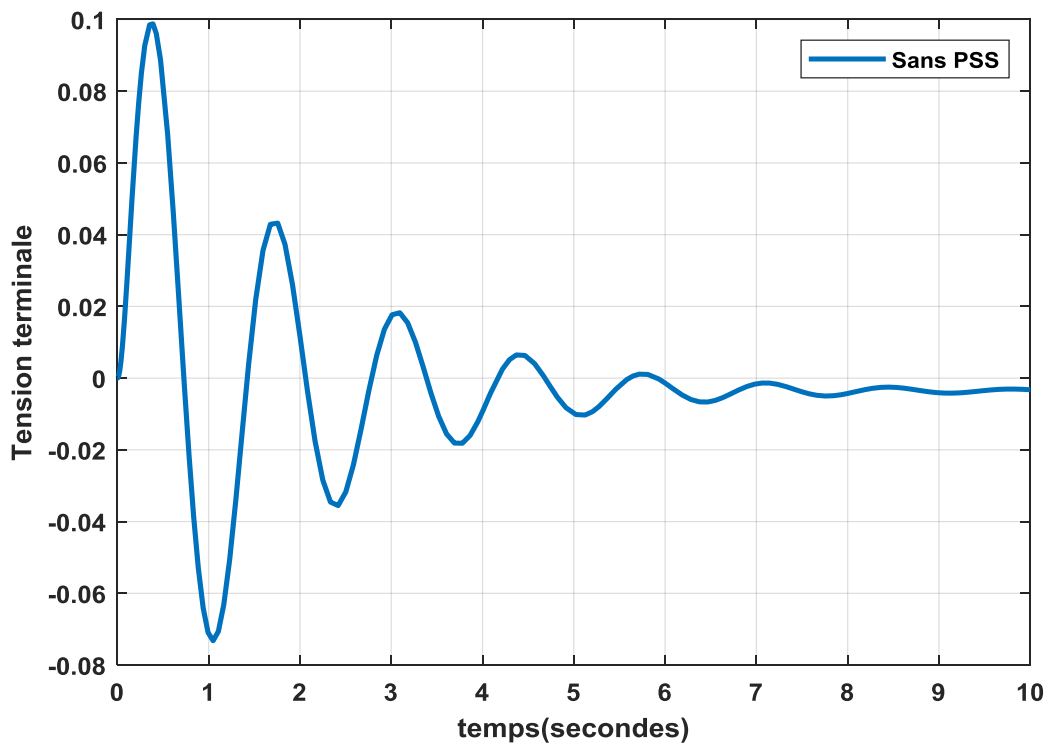
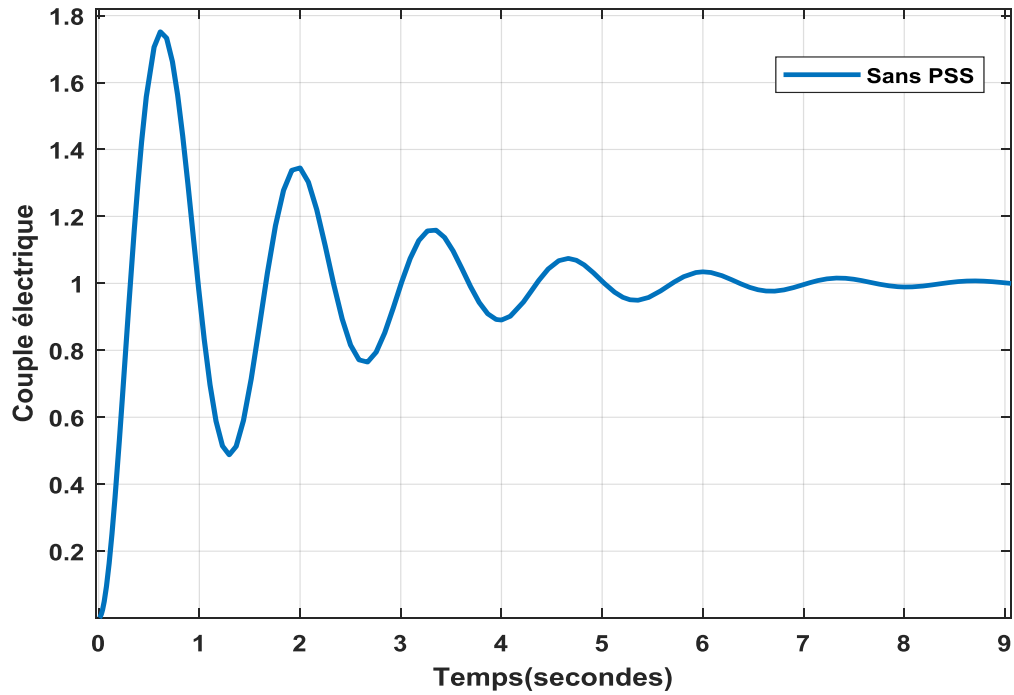


Figure IV.4: Présente la variation du couple électrique.

Figure IV.5: Présente la variation de la tension terminale.

Les résultats de simulation dans les figures au-dessus montrent qu'après l'utilisation de Gouverneur le system devient stable que l'AVR dans un temps de réponse après 7 seconds Pour la variation de l'angle et de vitesse et de couple(puissance). • pour améliorer la stabilité du système mieux que le système précédant, il est alors nécessaire de placer le PSS (stabilisateur de puissance).

IV.3. Exécution du système d'excitation (AVR- Gouverneur) avec PSS :

Le model de simulation de système de stabilisateur de puissance (PSS) présenter dans la figure

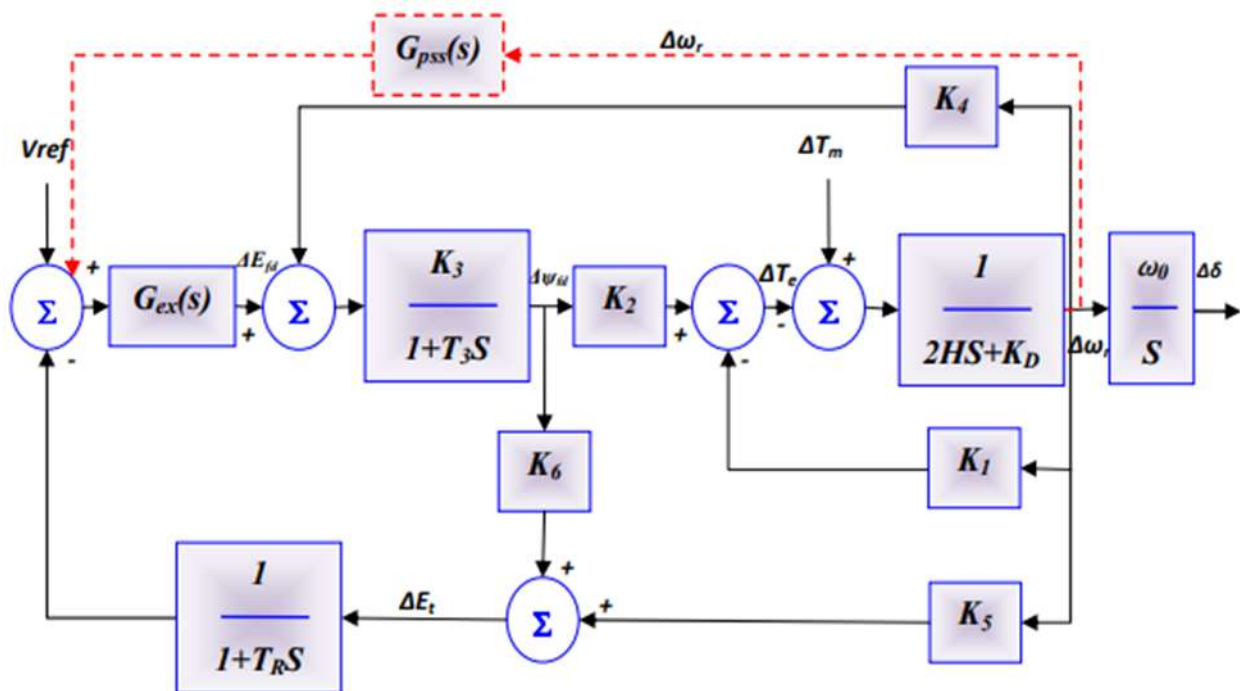


Figure IV.6:présente le bloc du système d'excitation (AVR- Gouverneur) avec PSS

(IV--6) :

Les résultats de simulation dans les figures (IV.7), (IV.8), (IV.9), (IV.10) montré au-dessous, pour chacun d'angle de charge, de la vitesse angulaire, du couple électrique et de la tension terminale :

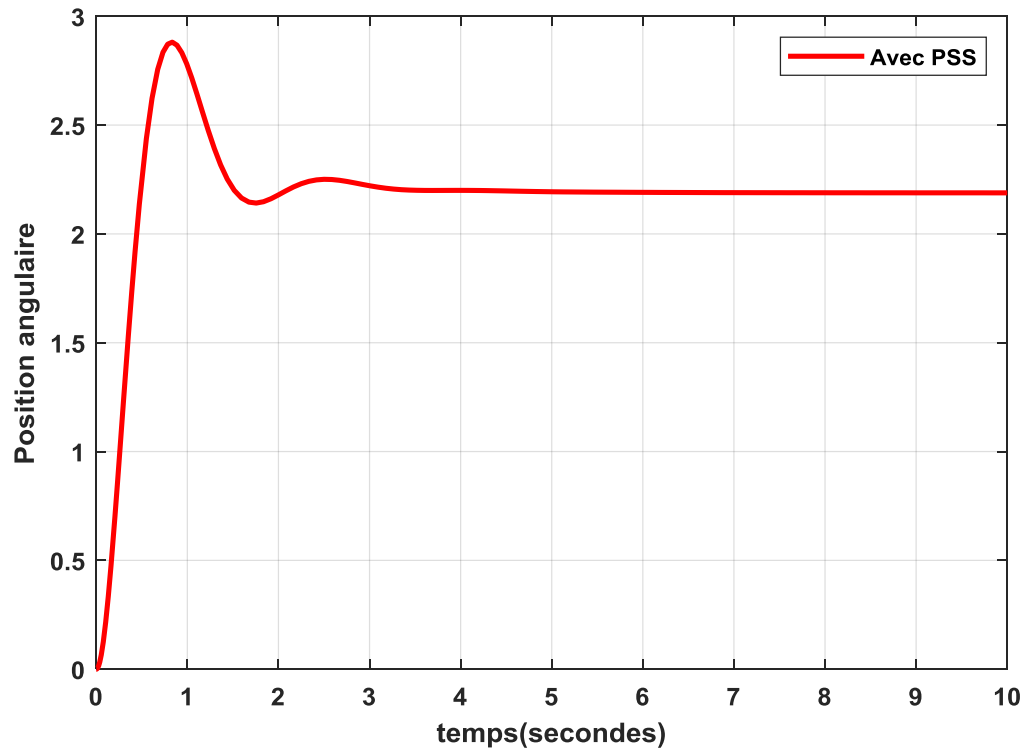


Figure IV.7: Présente la variation de la position angulaire.

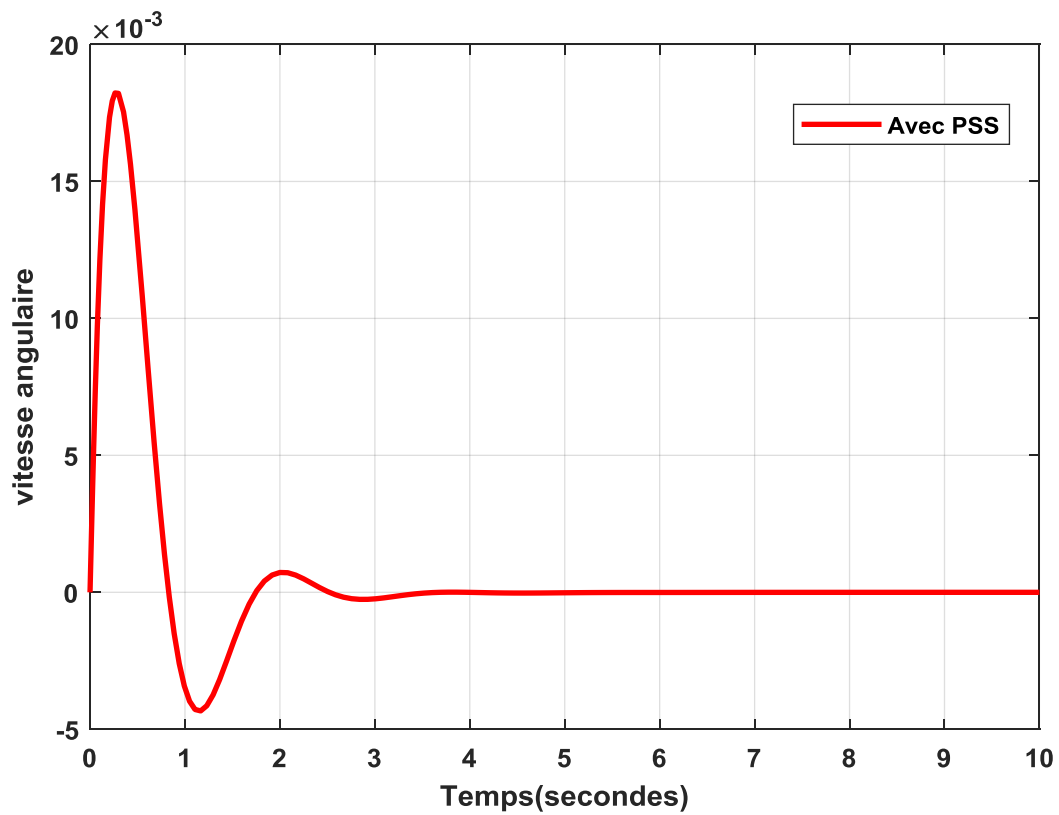


Figure IV.8: : Présente la variation de la vitesse angulaire.

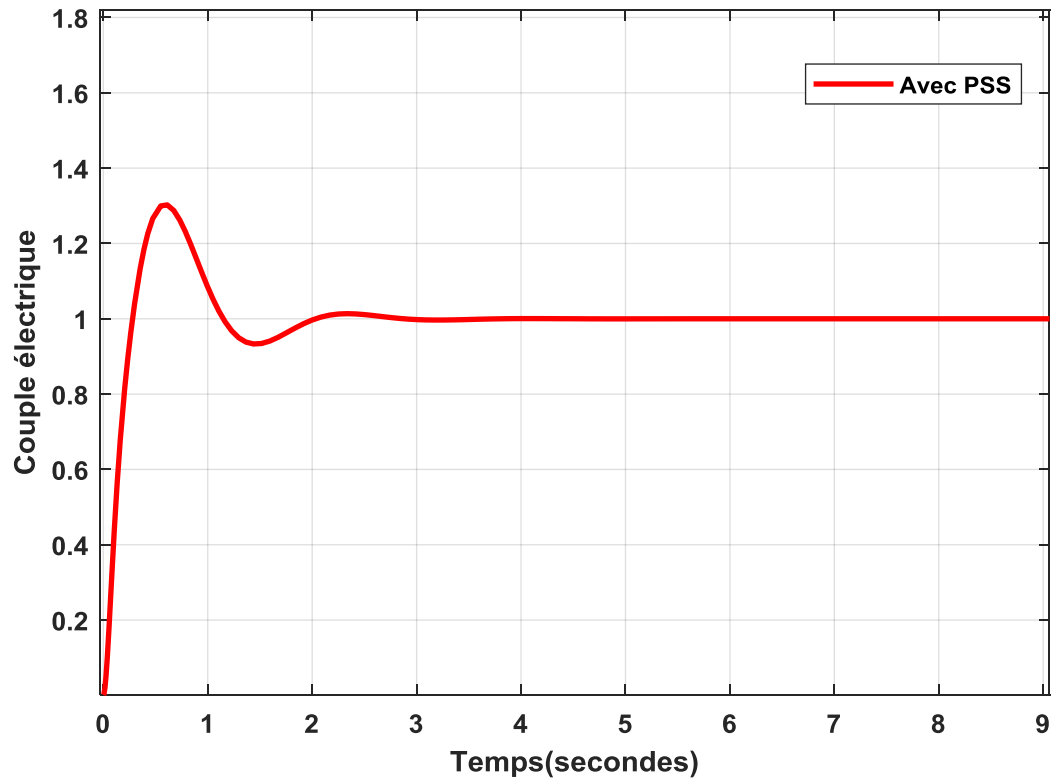


Figure IV.9: Présente la variation du couple électrique.

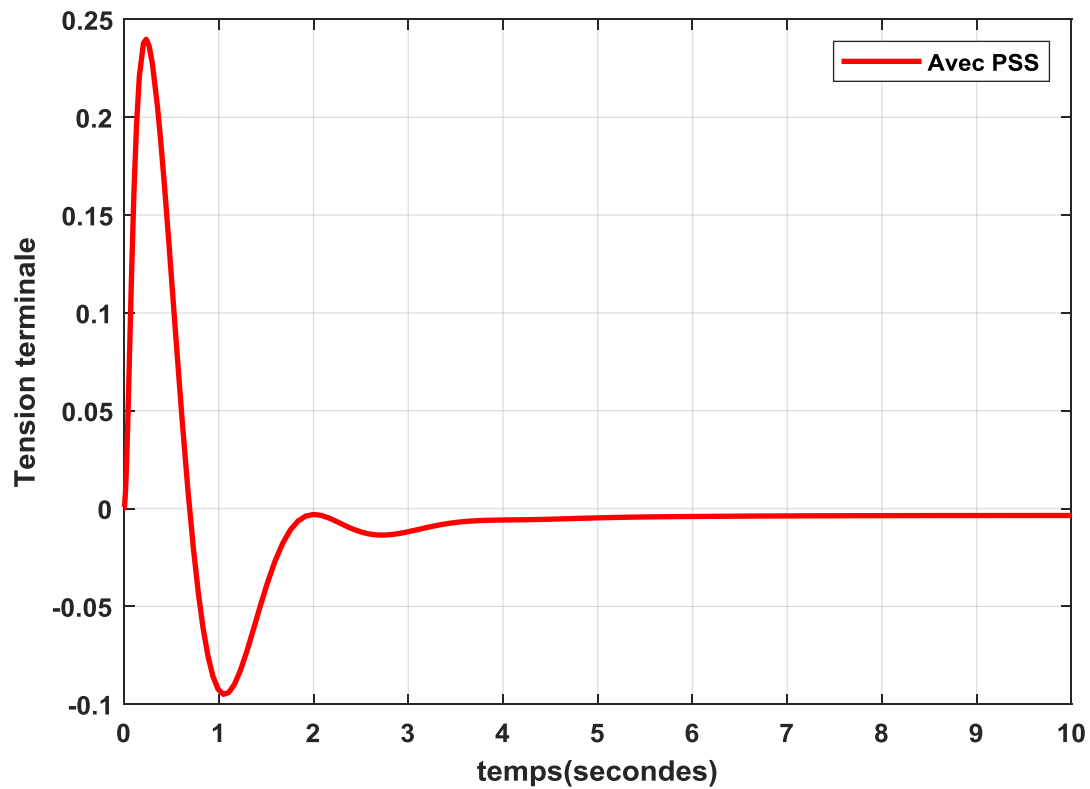


Figure IV.10: Présente la variation de la tension terminale.

Les résultats de simulation dans les figures (IV.11), (IV.12), (IV.13), (IV.14), et (IV.15) 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.

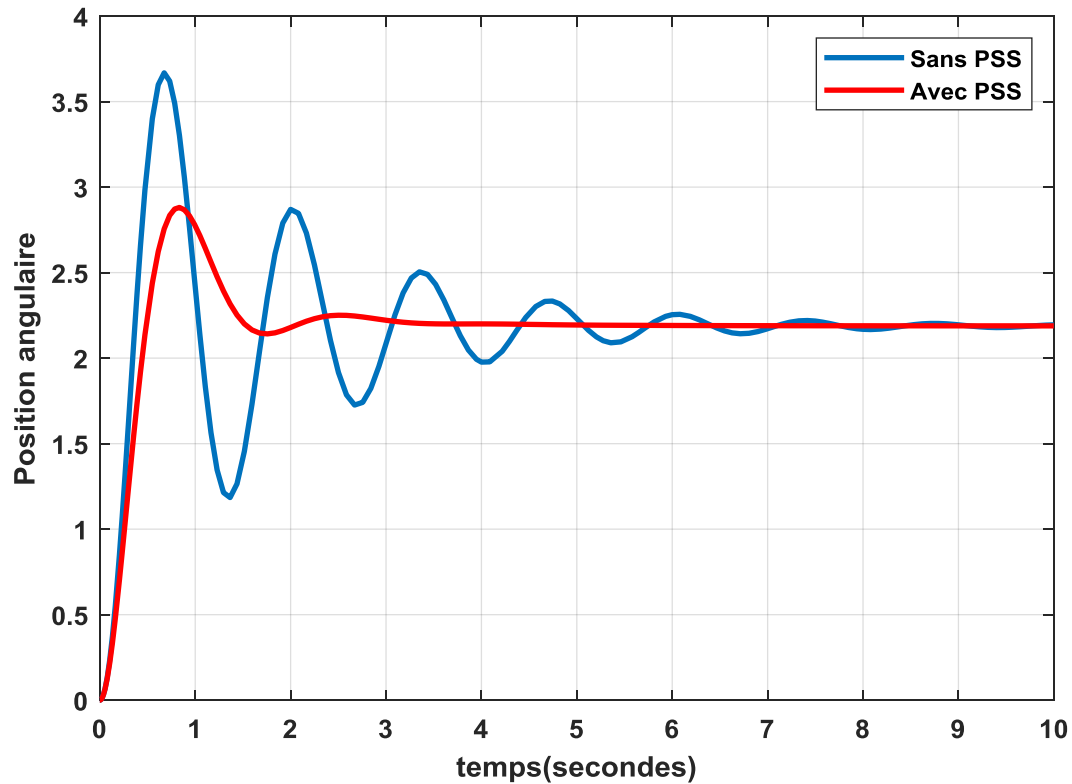


Figure IV.11: Présente la variation de la position angulaire.

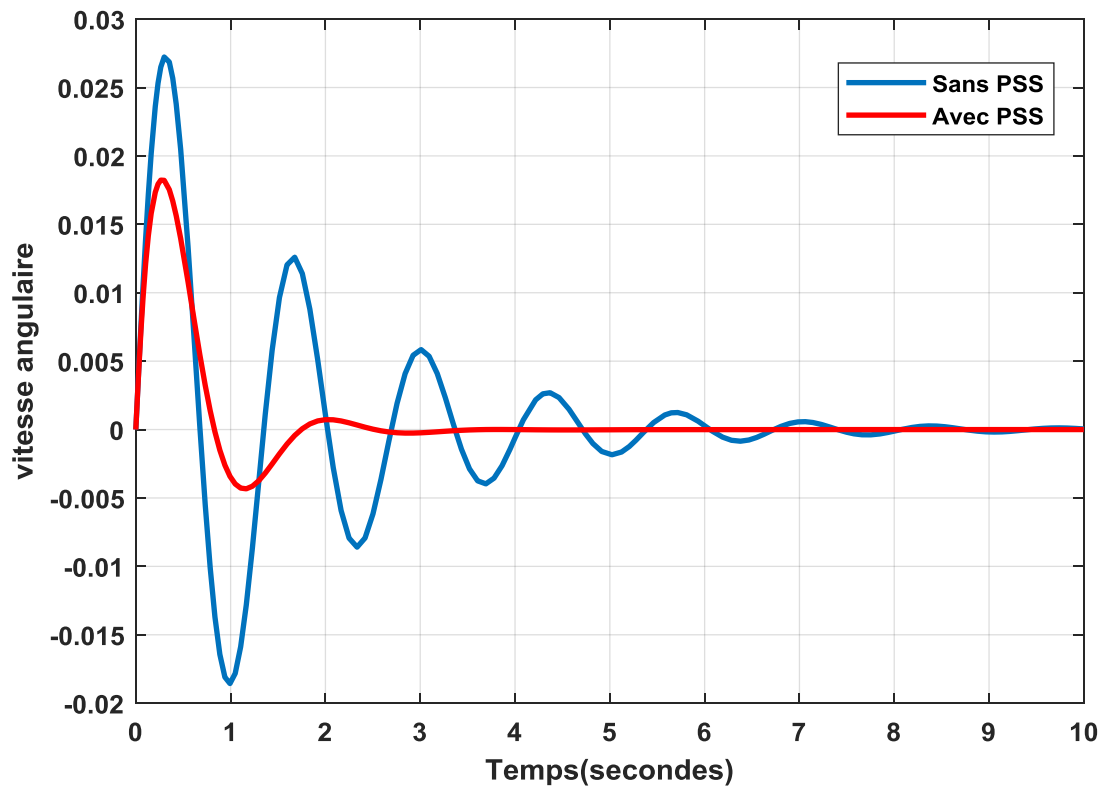


Figure IV.12: Présente la variation de la vitesse angulaire.

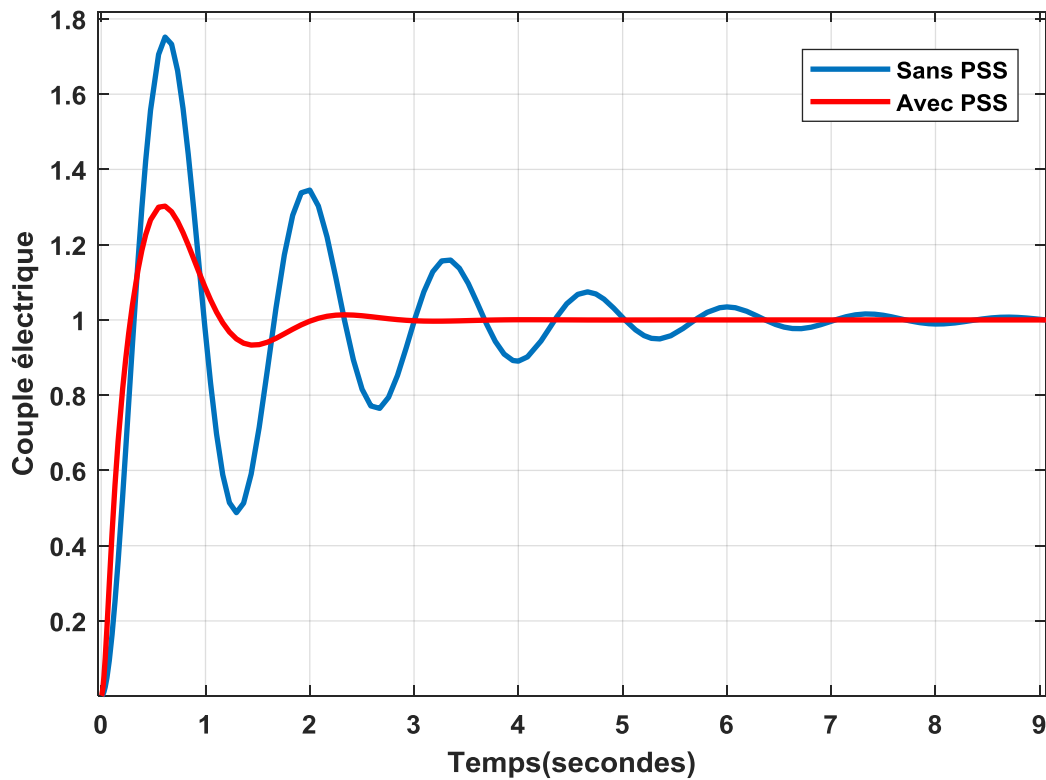


Figure IV.13: Présente la variation du couple électrique.

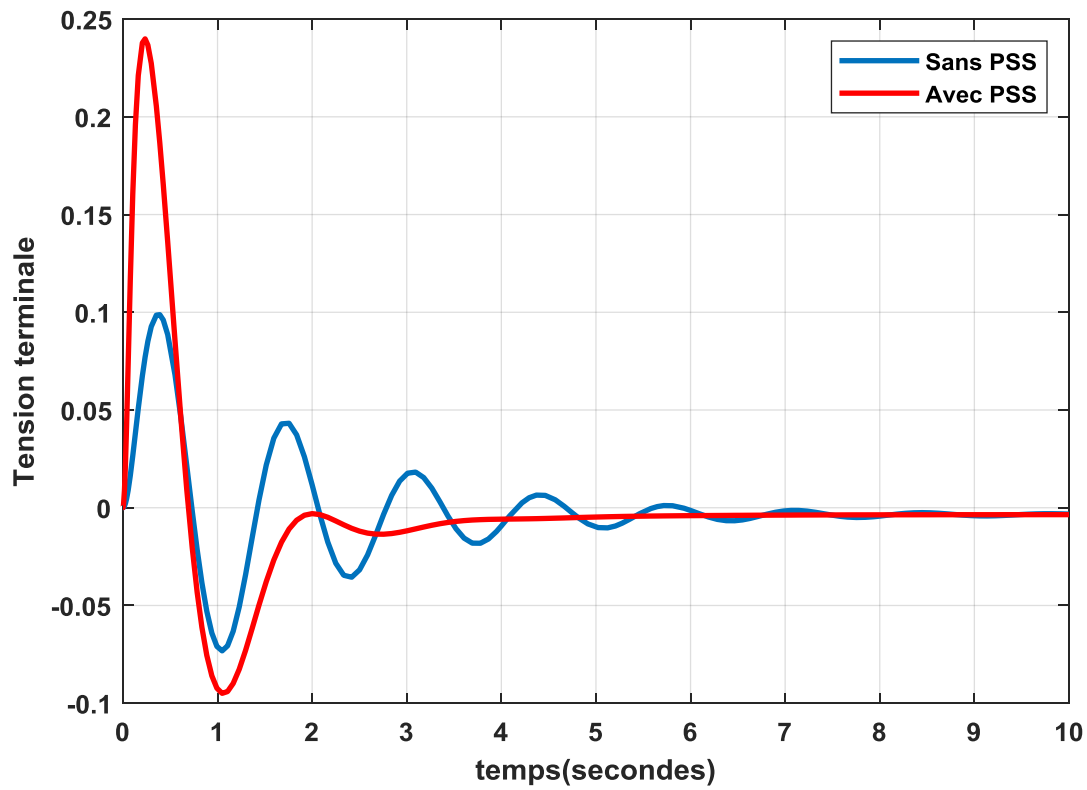


Figure IV.14: Présente la variation de la tension terminale.

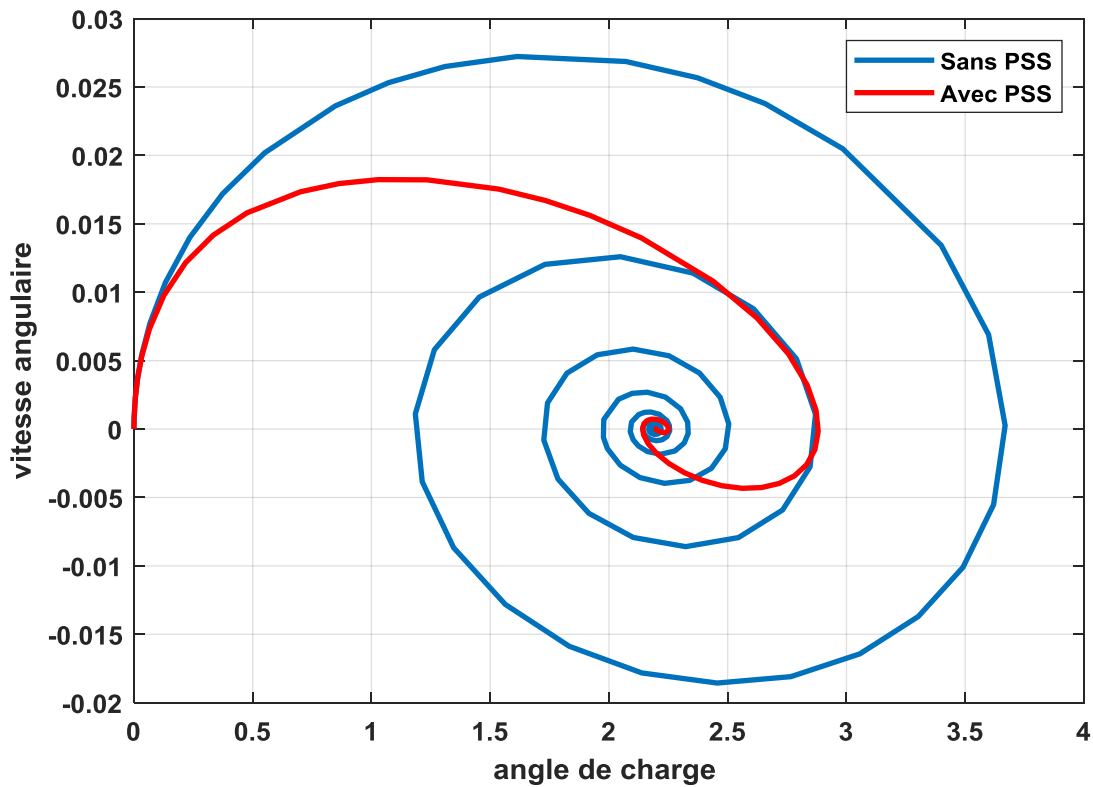


Figure IV.15: Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport la variation d'angle.

Les résultats de simulation dans les figures au-dessus montrent qu'après l'utilisation de PSS le system devient stable que le système précédant (sans PSS) dans un temps de réponse entre 2 à 3 seconds pour la vitesse angulaire et position angulaire et 2 seconds pour couple électrique (puissance) donc le PSS à une bonne influence sur la régulation de la puissance avec un bon amortissement des oscillations de la vitesse angulaire, ainsi que l'angle de charge.

IV.4. Exécution de PSS basée de la logique floue :

Le modèle utilisé dans Matlab/ Simulink pour analyser l'effet du contrôleur de logique floue en atténuant la petite oscillation de signal mise en application sur jeu de barre infini de machine simple système est montré ci-dessous fig. (IV-16)

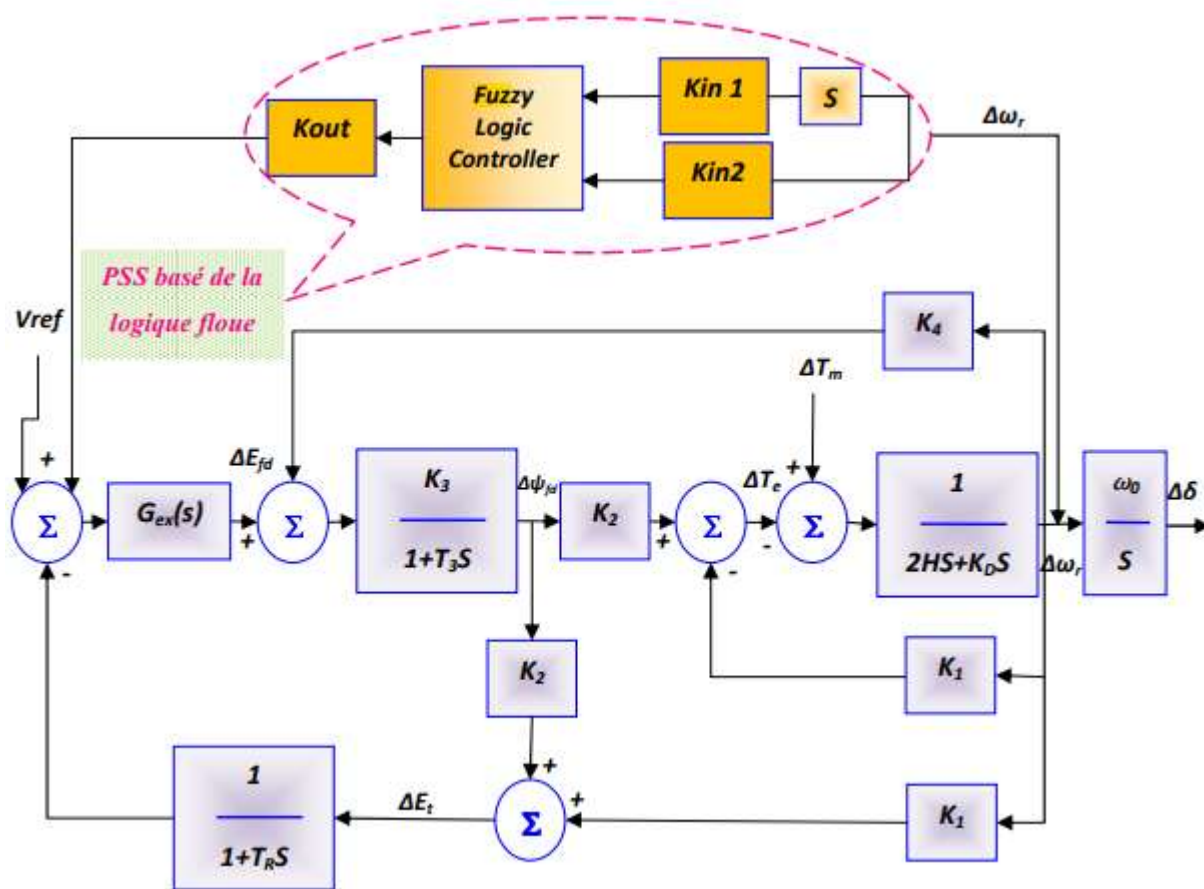


Figure IV.16: présente le bloc de PSS basée de la logique floue

Les paramètres de contrôleur de logique floue sont : $K_{in1}=1.6$ $K_{in2}=29.56$; $K_{out}=1.06$

Les résultats de simulation dans les figures (IV.17), (IV.18), (IV.19), (IV.20) montré au-dessous, pour chacun d'angle de charge, de la vitesse angulaire, du couple électrique et de la tension terminale :

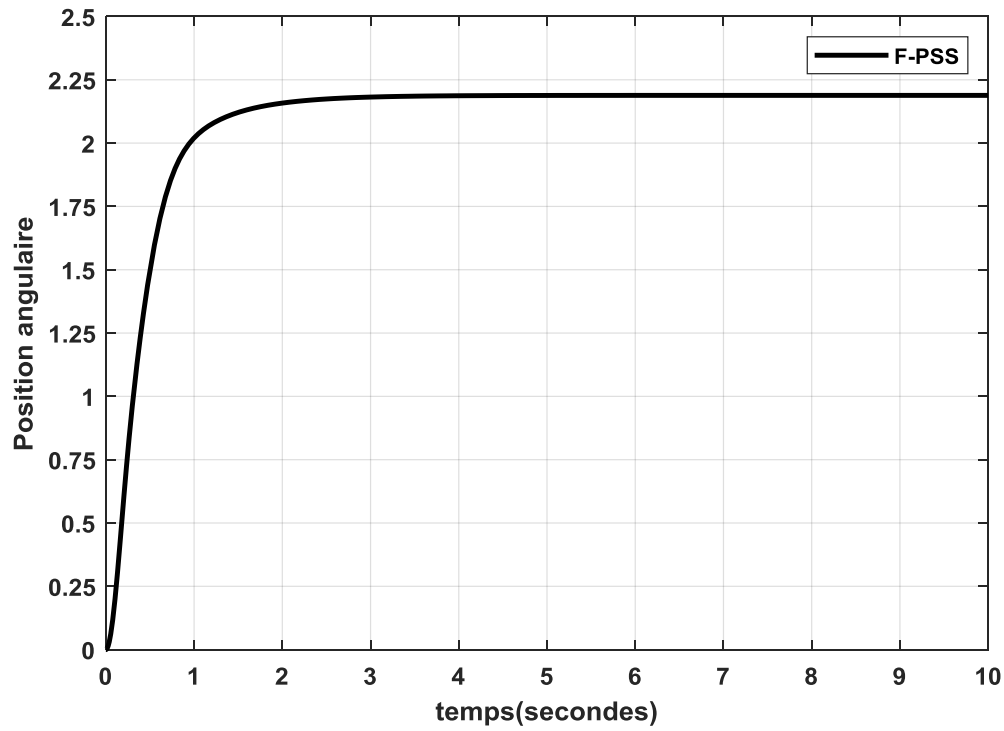


Figure IV.17: Présente la variation de la position angulaire.

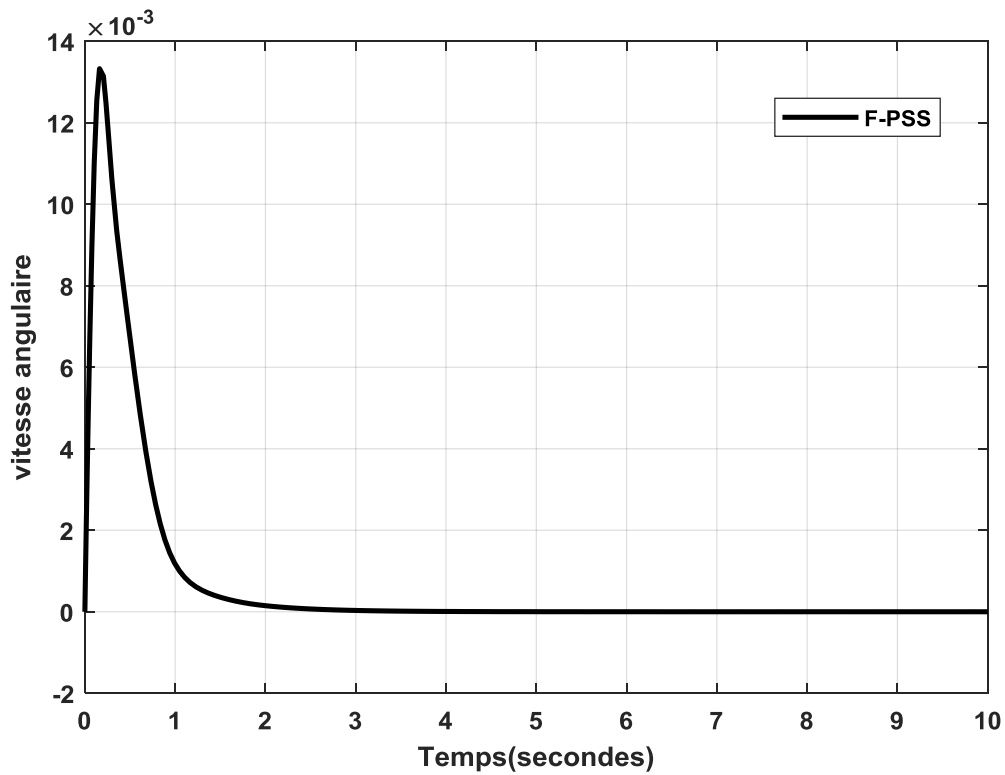


Figure IV.18: Présente la variation de la vitesse angulaire.

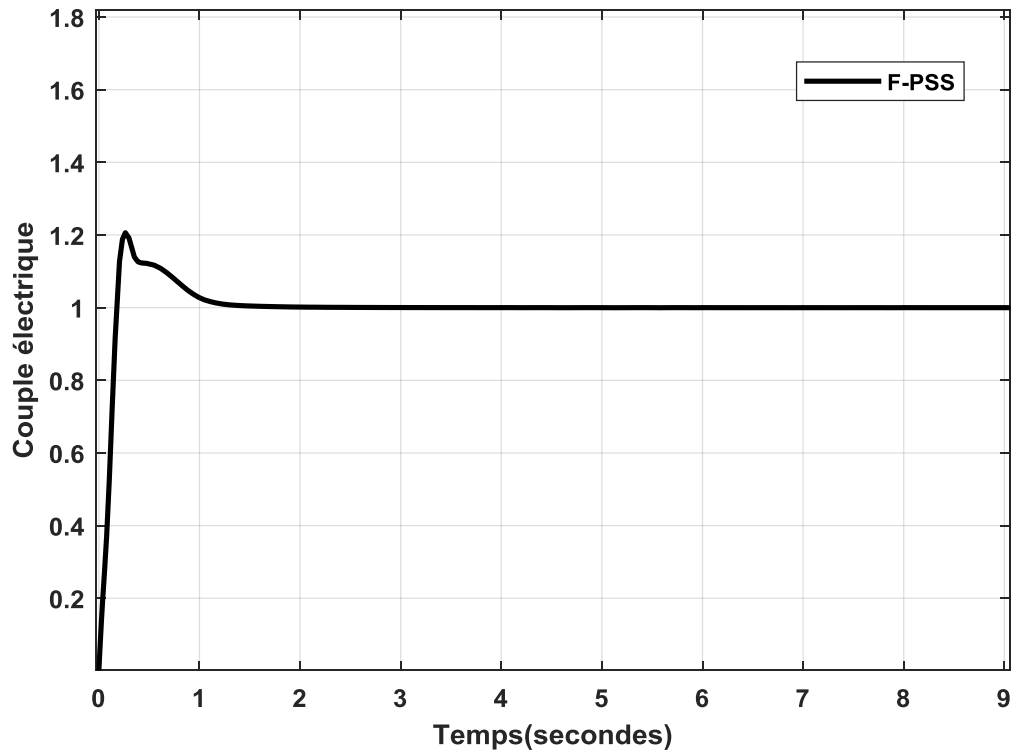


Figure IV.19: Présente la variation du couple électrique.

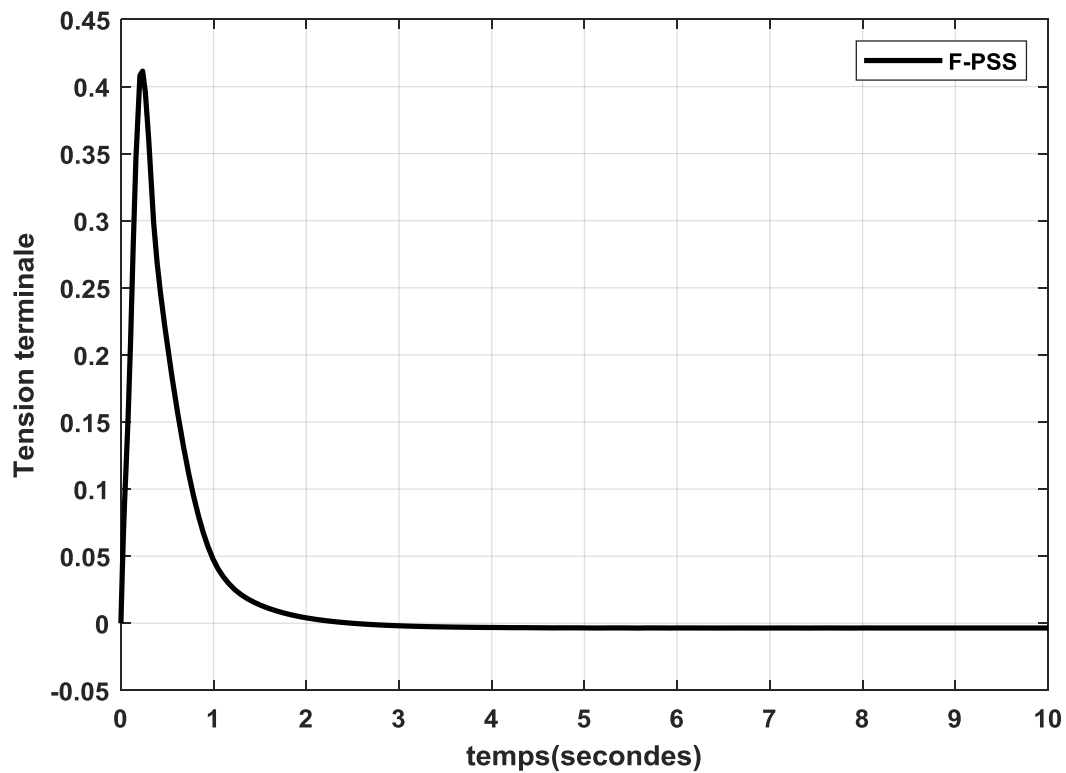


Figure IV.20: Présente la variation de la tension terminale

IV.5. 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).

Les résultats de simulation dans les figures (IV.21), (IV.22), (IV.23), (IV.24) et (IV.25) montré au-dessous, pour chacun d'angle de charge, de la vitesse angulaire, du couple électrique et de la tension terminale.

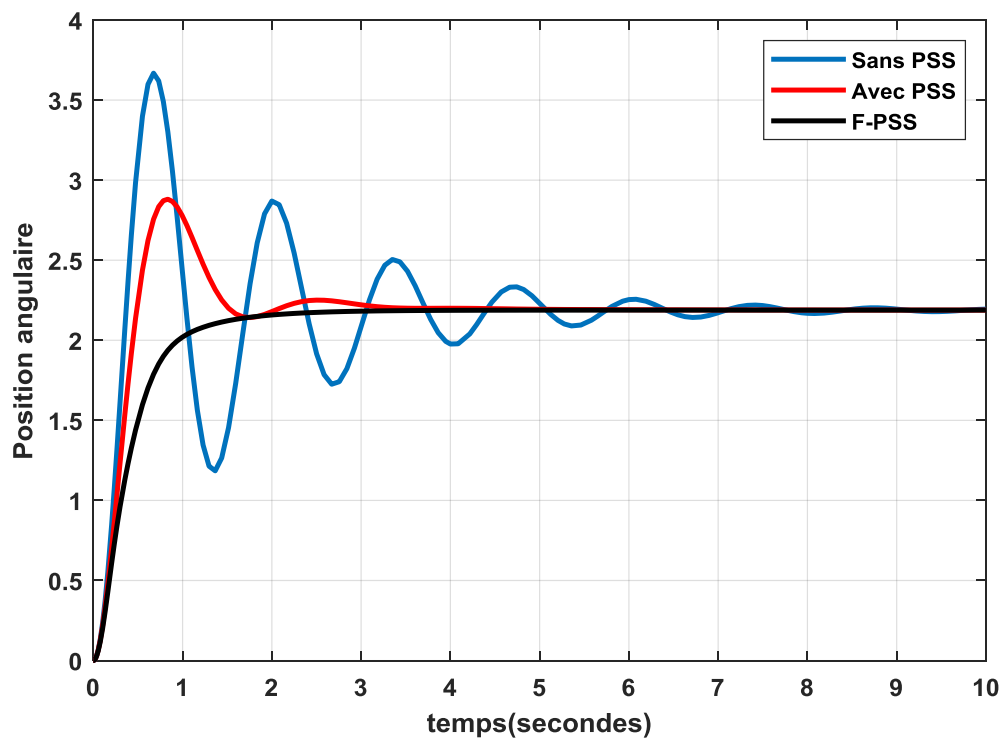


Figure IV.21: Présente la variation de la position angulaire.

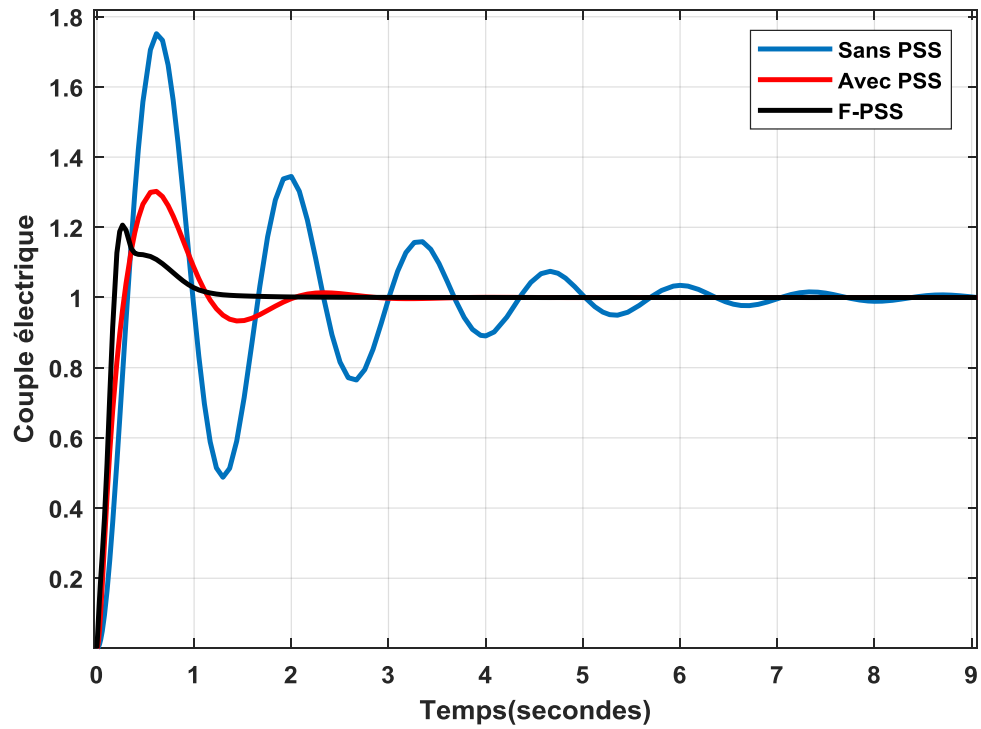


Figure IV.22: Présente la variation de la vitesse angulaire.

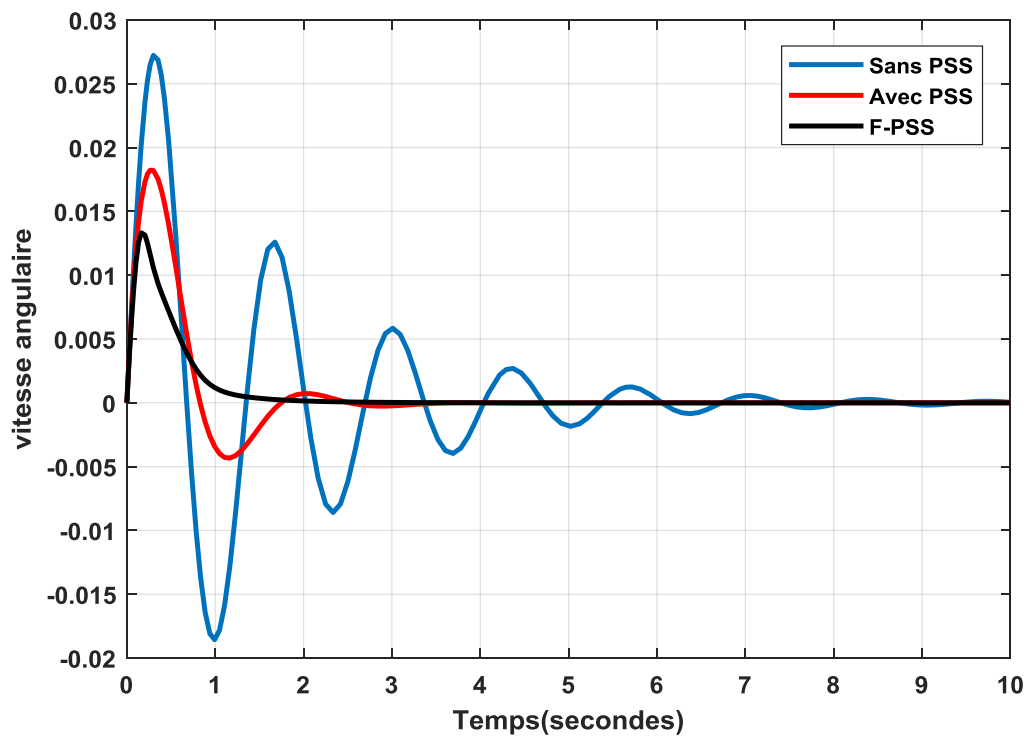


Figure IV.23: Présente la variation du couple électrique.

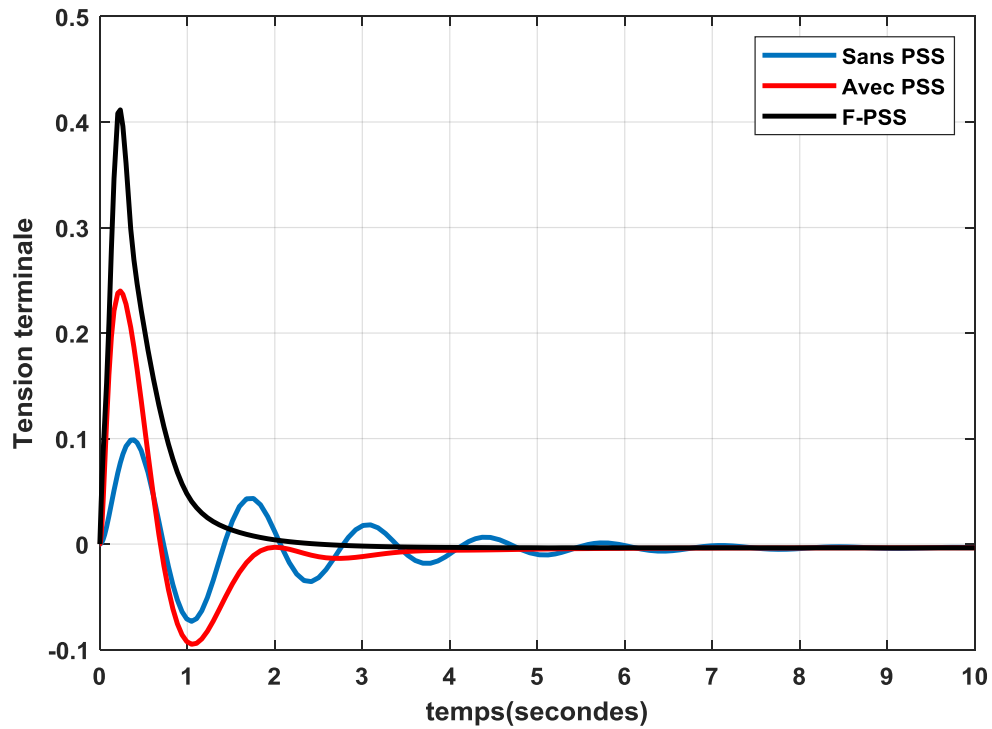


Figure IV.24: Présente la variation de la tension terminale.

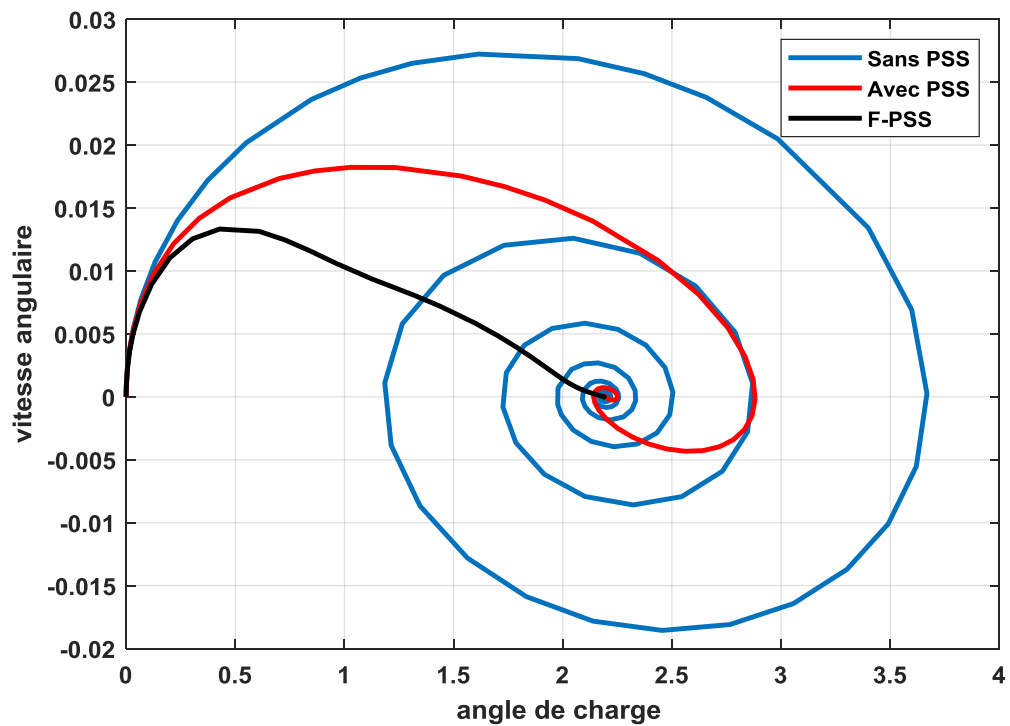


Figure IV.25: Présente la variation de la vitesse angulaire par rapport la variation d'angle.

IV.6. Test de variation de la tension

IV.6.1. Scénario 1 un changement de 20% dans la tension de référence de générateur est appliqué à $t=5s$ pour une durée de 0.2s.

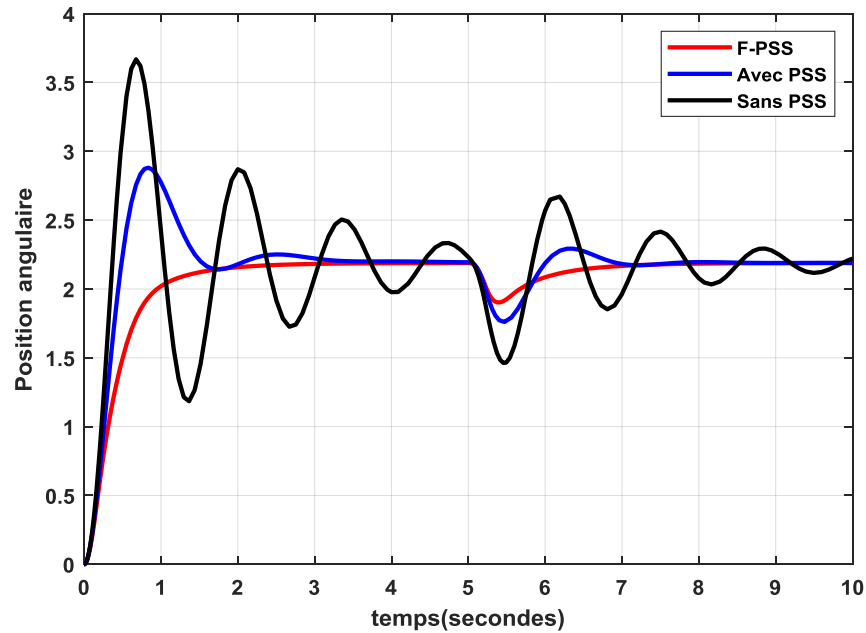


Figure IV.26: Variations de la position angulaire.

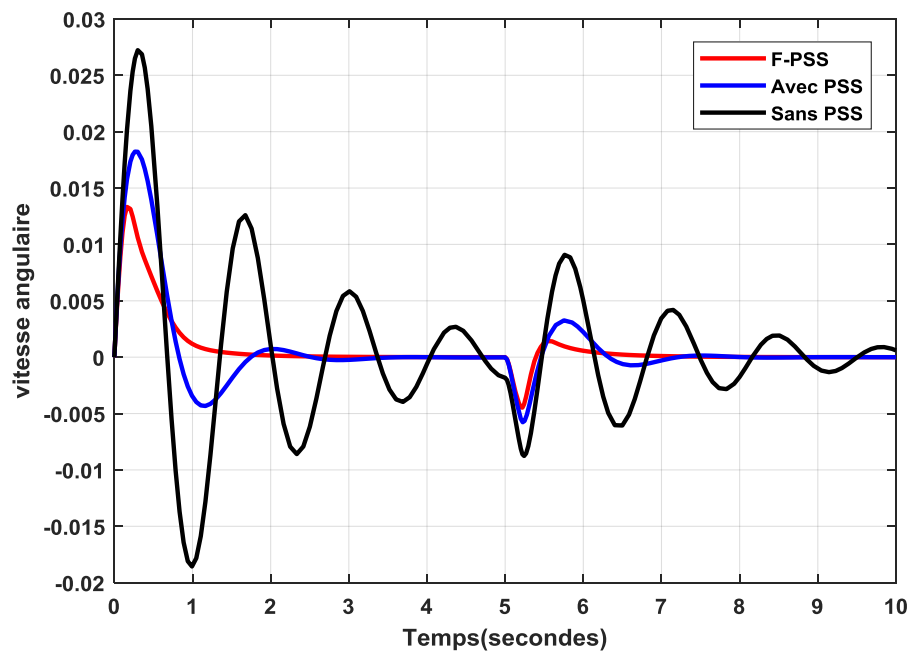


Figure IV.27: Variations de la vitesse angulaire.

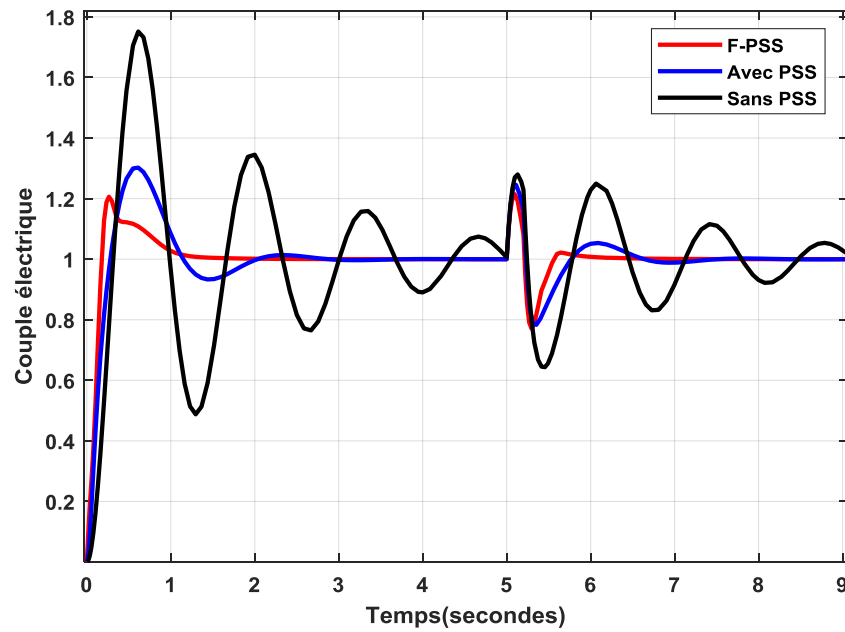


Figure IV.28: Variations du couple électrique.

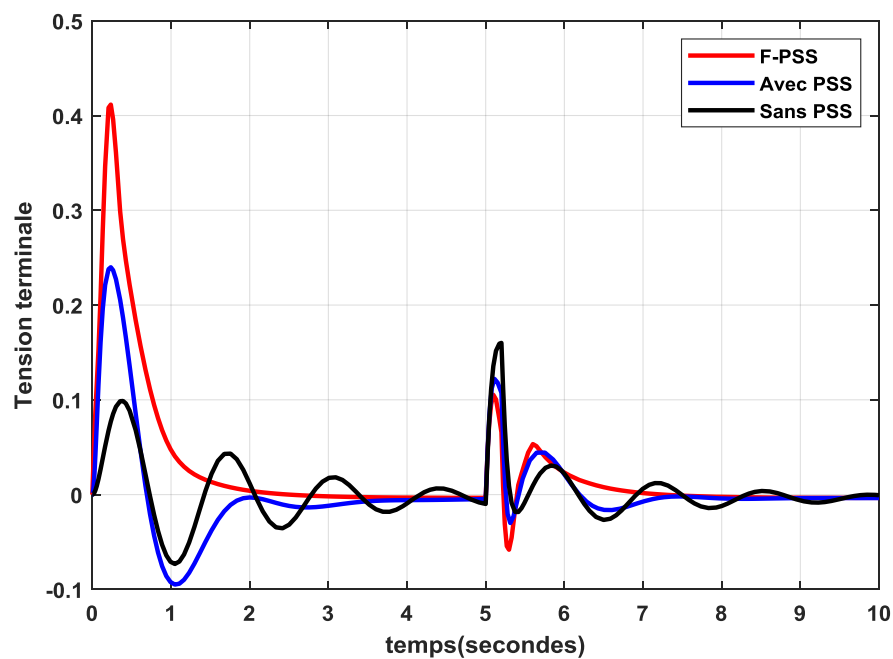


Figure IV.29: Variations de tension terminale.

IV.6.2. Scénario 2 un changement de sur tension de + 20% dans la tension de référence de générateur est appliqué à $t=4s$ pour une durée de 2s.

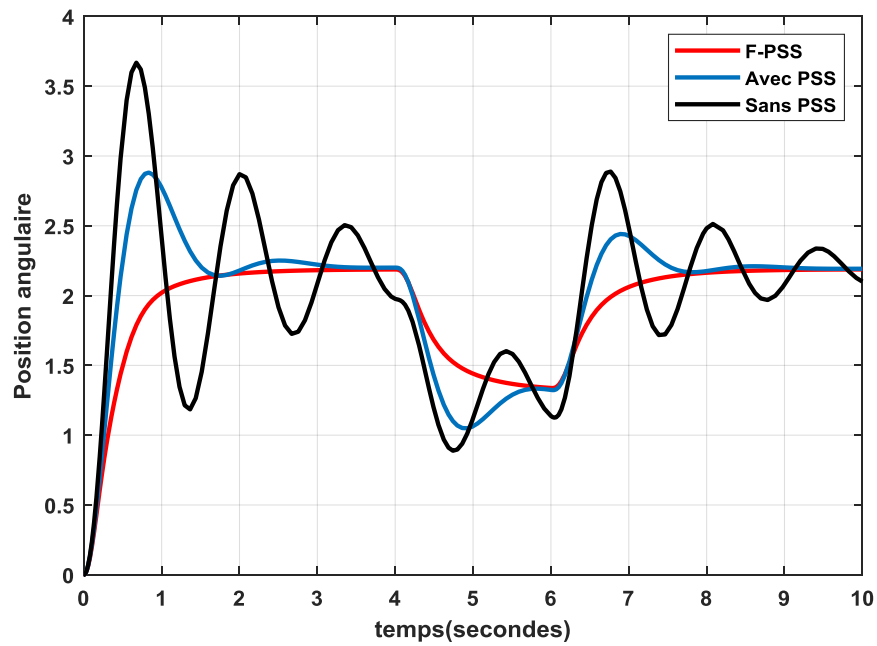


Figure IV.30: Variations de la position angulaire.

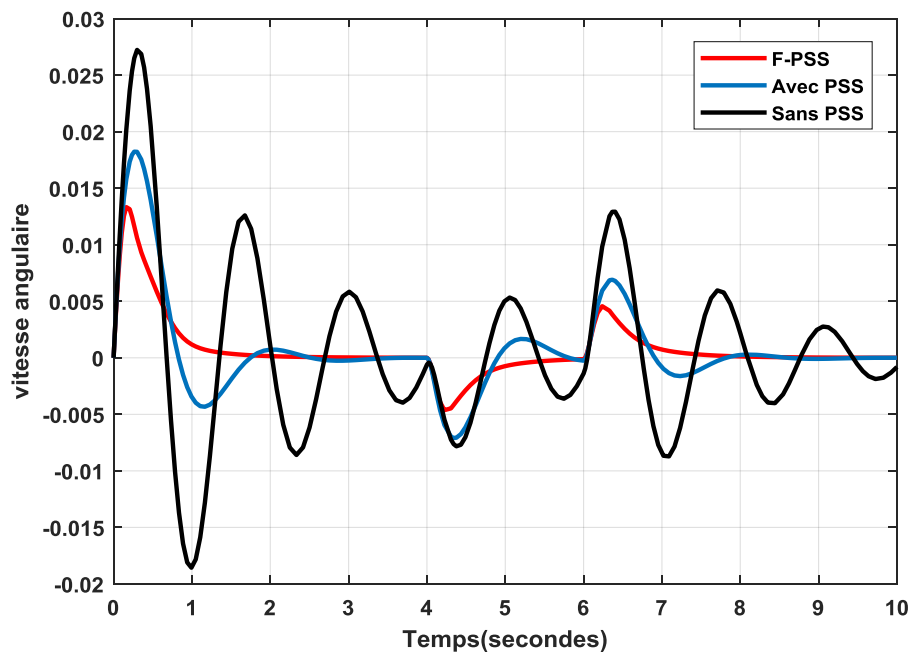


Figure IV.31: Variations de la vitesse angulaire.

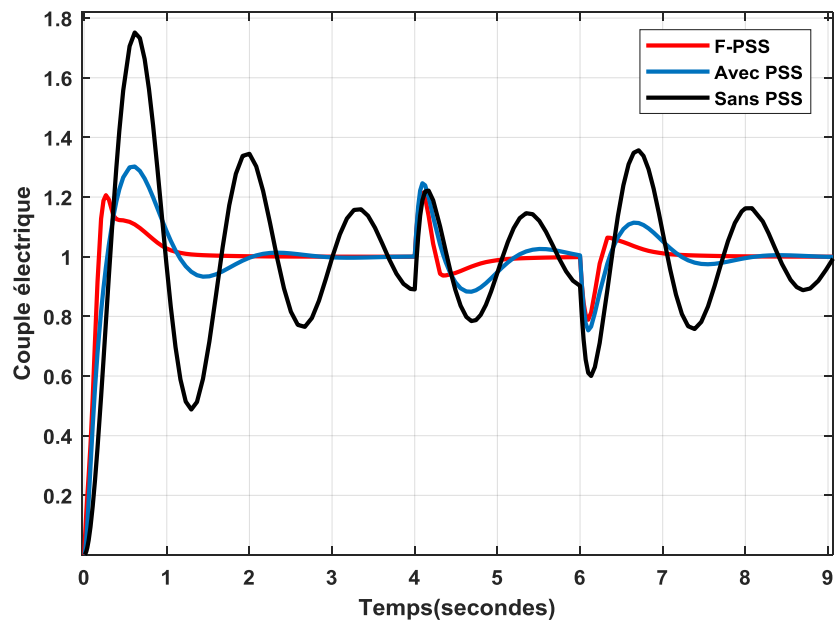


Figure IV.32: Variations du couple électrique.

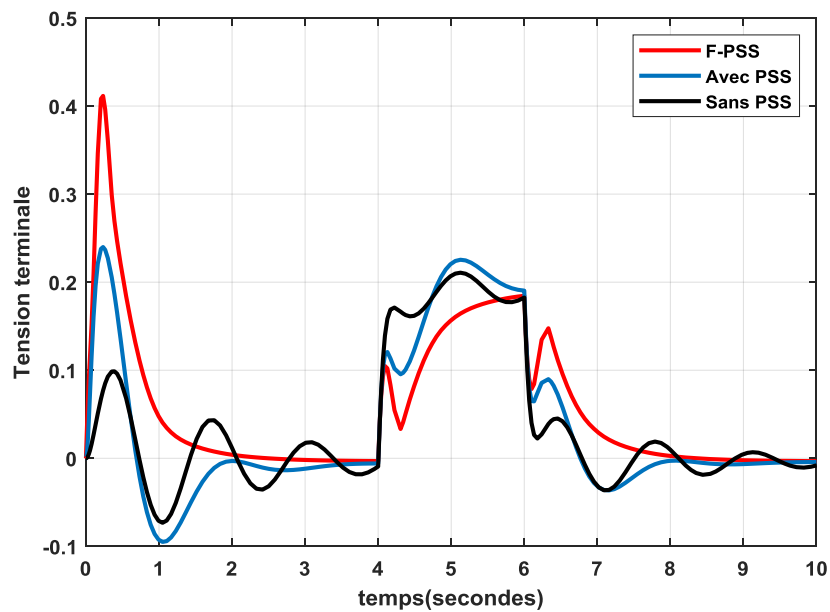


Figure IV.33: Variations de tension terminale.

IV.6.3. Scénario 2 un changement de sous tension de -20% dans la tension de référence de générateur est appliqué à $t=4s$ pour une durée de 2s.

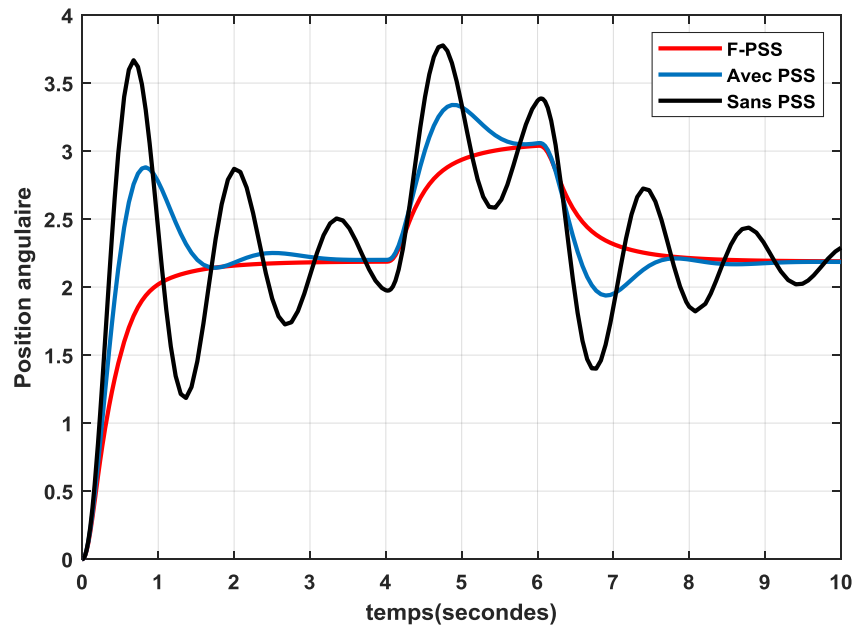


Figure IV.34: Variations de la position angulaire.

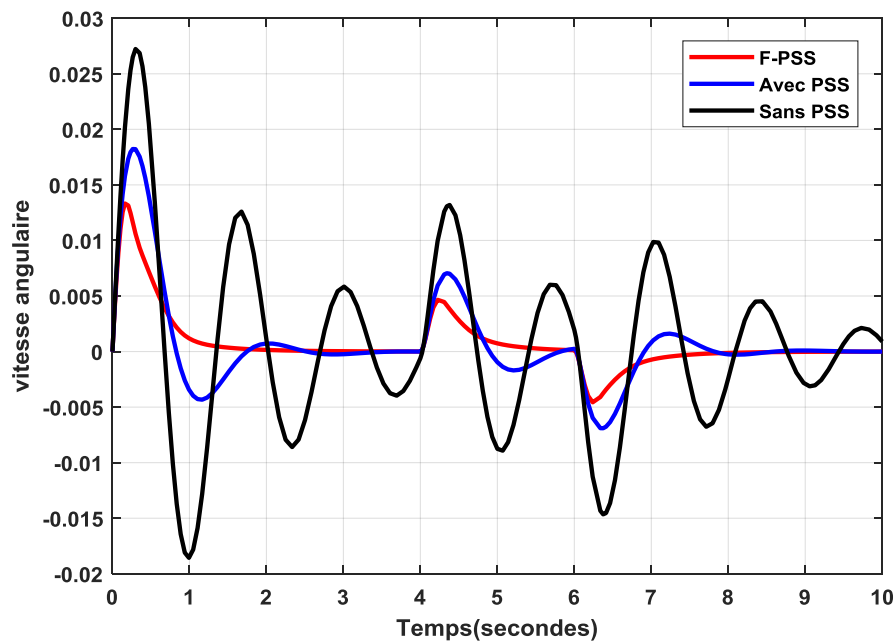


Figure IV.35: Variations de la vitesse angulaire.

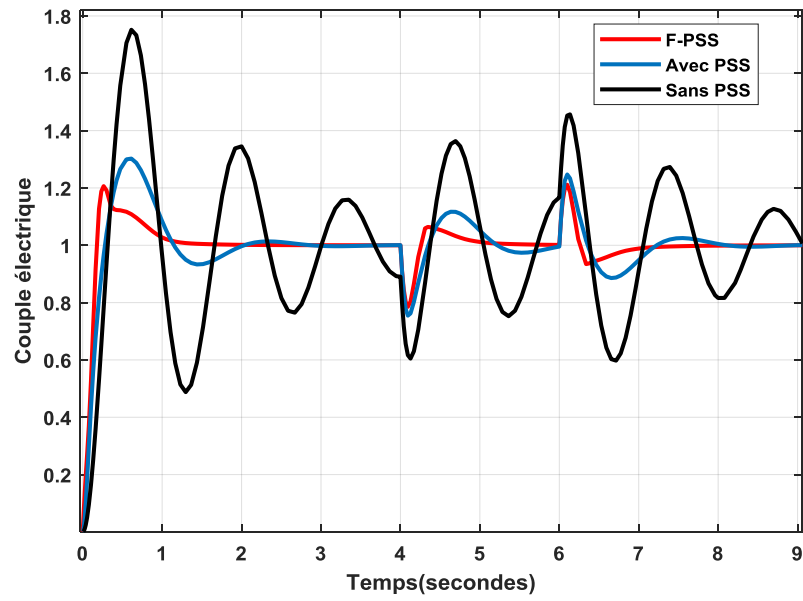


Figure IV.36: Variations du couple électrique.

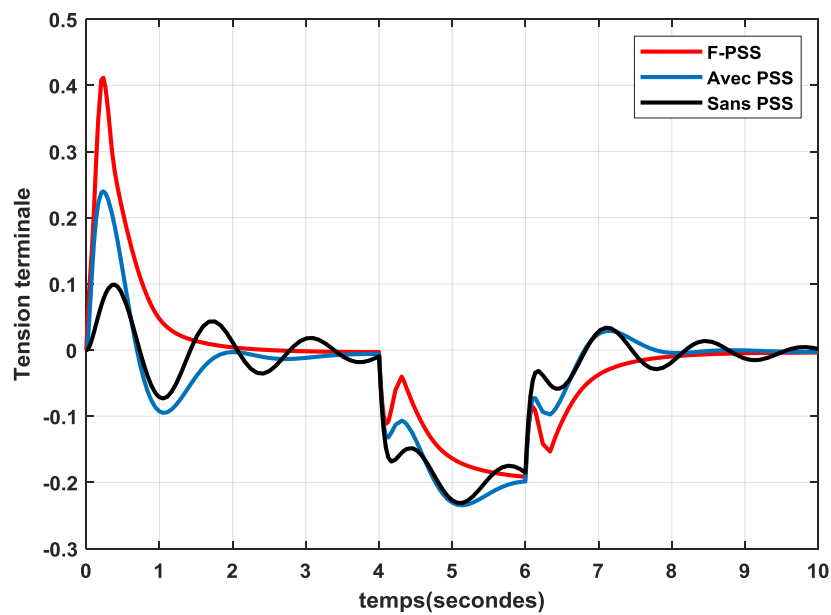


Figure IV.37: Variations de tension terminale.

IV.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons également comparé les résultats obtenus avec :

- Le système de régulation sans PSS
- Le système de régulation avec PSS
- Le système de régulation PSS basé de la logique floue

Avec des résultats Test de variation de la tension Nous avons constaté que la performance du PSS basé sur la logique floue est nettement meilleure, avec des oscillations amorties plus rapidement. Ainsi, la logique floue offre la possibilité de modéliser et de remplacer l'expertise humaine dans la conduite des processus, qu'elle provienne du concepteur ou de l'utilisateur. Grâce à ce pouvoir, elle est classée parmi les techniques de l'intelligence artificielle.

Conclusion générale



Conclusion générale

Les systèmes électro-énergétiques se développent continuellement. Les systèmes sont extrêmement vulnérables aux oscillations interrégionales en raison de l'extension des réseaux interconnectés. Ces fluctuations peuvent considérablement limiter le transport de l'énergie électrique. Si, par exemple, une cascade de pannes de lignes de transmission se produit, cela peut entraîner des perturbations qui se propagent à tout le système électro énergétique. Dans ces nouvelles circonstances, les responsables des réseaux électriques sont fréquemment contraints de mettre en œuvre les systèmes aux limites de la stabilité. Par conséquent, l'amélioration de la stabilité aux perturbations plus petites, en particulier l'amortissement des fluctuations interrégionales, est un objectif prioritaire.

Cette thèse a présenté la conception d'un stabilisateur intelligent capable d'amortir efficacement et rapidement les oscillations locales et interrégionales dans les systèmes d'énergies électriques soumis à diverses perturbations.

La première étape de la conception de toute technique de contrôle est la modélisation du système à commander. Les systèmes de puissance sont des systèmes fortement non linéaires dont les paramètres changent au fil du temps et dont le comportement est pratiquement impossible à prédire. Leurs dynamiques complexes rendent difficile, voire utopique, de les décrire à l'aide d'un modèle mathématique précis. Nous avons proposé un contrôleur intelligent, en l'occurrence un stabilisateur par logique floue, qui n'exige pas un modèle mathématique précis du système de puissance pour éviter cette difficulté. De plus, cela permet d'assurer la stabilité et l'amortissement des oscillations indépendamment des points de fonctionnement et même en présence de variations paramétriques du système. De plus, cela permet de maintenir de bonnes performances de poursuite lorsqu'il y a des perturbations externes importantes.

Afin d'évaluer les performances du stabilisateur proposé par rapport aux différents modules normalement rencontrés dans le réseau, le système d'alimentation d'un réseau de machines unique connecté à une tige de jonction infinie (SMIB) a été simulé.

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

compte tenu des résultats obtenus, nous pouvons dire que le stabilisateur par logique floue assure la robustesse tant en stabilité qu'en performance pour nombre de sévères conditions d'opérations

BIBLIOGRAPHIE



BIBLIOGRAPHIE

[1] (OULOULADE A).

Avril 2011, Mémoire d'ingénieur de conception, OULOULADE Arouna.

[2] (Al Marhoon, Hussain Hassan).

"A Practical Method for Power Systems Transient Stability and Security" (2011). University of New Orleans Theses and Dissertations. 114.

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

[4] (Padiyar, K.R).

Power System Dynamics Stability and Control, 2008, BS Publications, Hyderabad, 2nd edition

[5] (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.

[6] (IEEE/PES, 2002).

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

[7] - (Passelergue, 1998).

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

[8] (Hasan ALKHATIB, 2008).

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

[9] (Andersson, 2006).

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

[10] (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.

[11] (Gholipour Shahraki, 2003).

Bibliographie « 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.

[12] (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.

[13] (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.

[14] (Pal et al., 2005).

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

[15] (Aström et al., 1995).

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

[16] (Allénbach, 2005, I).

Allénbach 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] (Anderson et al., 2003).

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

[19] (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.

[20] (IEEE, 2003).

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

[21] (Sauer et al., 1998).

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

[22] (Farmer, 2006).

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

[23] (IEEE, 2005).

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

[24] (Neeraj gupta, 2008).

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

[25] (Rogers, 2000).

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

[26] (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.

[27] (IEEE, 1990). IEEE Standard 421.2-1990, IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems, 1990.

[28] (Larsen et al., 1981, II).

Larsen E.V. and Swann D.A., « Applying power system stabilizers part-II: Performance Objectives and Tuning Concepts », IEEE Trans. Power App. Sys., vol.100, n°. 6, pp. 3025-3033, Jun. 1981.

[29] (Yu, 1983).

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

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

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

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

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

[32] (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.

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

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

[34] (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.

[35] (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.

[36] (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.

[37] (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.

[38] (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.

[39] (Feliachi, 1990).

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

[40] (F.Ghevri, et F.Guély, 1998).

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

[41] (M.A. Touat).

Logique Floue et la commande LQR appliquée au canal longitudinal d'un drone, Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE MOULOUE MAMMERI DE TIZI-OUZOU.

[42] Thèses et mémoires, (Université Mohamed Khider Biskra). « La commande à base de la logique floue ».

[43] Livre, (application de MATLAB 5 et SIMULINK 2), « par M.Mokhtari et M.Marie , édition springer,1998 ».

[44] (Amieur Toufik).

(Commande des systèmes non linéaires par mode glissant flou), « mémoire de fin d'étude université Mohamed Kheider Biskra, Algérie, 2009 ».

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

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

[46] (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.