



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génieélectrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseau électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Barkat Mohamed Akram
Kelala Mouatez Billah Nadhir

Implémentation des stabilisateurs (PSS) pour améliorer la stabilité transitoire dans les réseaux électriques

Jury :

Dr	Dr. Rahaw Naima	MCB	Université d'appartenance	Président
Dr	Dr. Naimi djemai	MCA	Université d'appartenance	Examineur
Dr	Dr. Salhi Ahmed	MCA	Université d'appartenance	Rapporteur

Année universitaire : 2019 - 2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseau électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème
**Implémentation des stabilisateurs
(PSS) pour améliorer la stabilité
transitoire dans les réseaux électriques**

Présenté par :

Barkat Mohamed Akram

Kelala Mouatez Billah Nadhir

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. SALHI Ahmed

Avis favorable du Président du Jury

Dr. RHWA Naima

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider
Biskra Faculté des Sciences et de
la Technologie Département de
Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseau électrique

Thème : **Implémentation des stabilisateurs (PSS) pour améliorer la stabilité transitoire dans les réseaux électriques**

Proposé et Dirigé par : Dr. SALHI Ahmed

RESUME (Français)

La stabilité du réseau électrique occupe une grande importance dans la planification et l'exploitation. Pour cela, nous essayons d'étudier et d'analyser le système énergétique sous différentes perturbations et assurer l'amélioration de la stabilité transitoire du réseau en utilisant le contrôleur PSS (Power system stabilizer). Pour la complexité de la détermination des paramètres du PSS, nous avons choisi une nouvelle technique méta-heuristique appelée la méthode des essaims de salpes (Salp Swarm Algorithm - SSA) pour optimiser les paramètres du PSS. Une analyse des résultats de simulation a été accomplie pour juger les performances du système énergétique en présence du PSS dans le but d'améliorer la stabilité des réseaux électriques. Le modèle d'étude est constitué d'une machine synchrone liée à un jeu de barres infini à travers une ligne de transmission.

Mots-clés :

Mots-clés : Système de puissance, Stabilité, contrôleur PSS, Machine synchrone, Jeu de barres infini, méthode des essaims de salpes (SSA).

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très cher parents, ma mère **Kelala Farida** qui ma encouragé et soutenu durant tout ma vie, et mon père **Abdenacer** qui a sacrifié tout sa vie afin de me voire devenir ce que je suis, merci mes parents.*

*A mes frères : **Boubaker sedik, rafik,***

*A mes sœurs : **Kenza, hadjer, raouia***

*Tous mes ami(e)s plus particulièrement l'équipe (**wazaa abedlemomen, Meghazi ala eddine, abdlah talha, saouli zakaria ...**) et toute la promotion 2019/2020, Électrotechnique.*

Mouatez Billah Nadhir

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très cher parents, ma mère **Barkat Nadia** qui ma encouragé et soutenu durant tout ma vie, et mon père **Abdelmoumene** qui a sacrifié tout sa vie afin de me voire devenir ce que je suis, merci
mes parents.*

*A mon frère : **Farouk***

*A mes sœurs : **Nour el houda et Imane***

*Tous mes ami(e)s plus particulièrement l'équipe (**wazaa abedlmomen, Meghazi ala eddine, abdlah talha, saouli zakaria, Brahim ben tayeb ...**) et toute la promotion 2019/2020, **Électrotechnique.***

Mohamed Akram

Remerciements

Un merci de cœur au « bon Dieu » le tout puissant qui nous a donné la santé, la volonté et le courage afin de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements très chaleureusement et notre sincère gratitude :

*A Notre promoteur **Dr.Salhi Ahmed**, pour son orientation, ces conseils, sa disponibilité et son humeur. Toutes nos reconnaissances pour vous.*

*A **Dr. Naimi djemai** et **Dr.Rahwa Naima**, pour accepter d'examiner et de juger notre travail.*

Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements vont également à l'encontre de toute personne qui a participé de près ou de loin, directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Que Dieu vous accorde, son aide, dans tous vos projets et activités.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure I.1 : Structure générale d'un système de puissance.	3
Figure I.2 : modèle de réseau électrique	4
Figure I.3 : Principe de la transformation de Park	5
Figure I.4 : Représentation de la machine synchrone après transformation de Park	5
Figure I.5: diagramme de phase pour la i ème machine.....	6
Figure I.6 : Couples mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur.	8
Figure I.7 : Structure générale d'un système de force motrice - générateur.	10
Figure I.8 : système d'excitation statique avec AVR.....	11
Figure I.9: Modèle simplifié de transformateur.....	11
Figure I.10 : Modèle en π d'une ligne de transmission.	12
Figure I.11 : Modélisation d'une charge par son admittance équivalente.	12

Chapitre II :

Figure II.1 : Système standard IEEE type SMIB avec commande d'excitation.....	14
Figure II.2: classification des différents types de la stabilité de système de puissance	15
Figure II.3: Variation d'angle de rotor	17
Figure II.4 : Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini.....	17
Figure II.5: relation puissance - angle de rotor.....	18
Figure II.6 : Représentation de (T_m , T_r , D)	23
Figure II.7 : Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système	23
Figure II.8 : Modèle d'un PSS avance/retard	24
Figure II.9 : Modèle d'un système (un seul machine–jeu de barre infini)	25

Chapitre III :

Figure III.1: Démarches de résolution d'un problème d'optimisation	27
Figure III.2 : (a) Salpe individuel, (b) essaim de salpes (chaîne salpêtre).	30
Figure III.3 : Faire glisser le mouvement de la chaîne autour d'une source fixe de nourriture dans un espace	32
Figure III.4. Rechercher l'historique des sources de nourriture stationnaires et mobiles dans un espace 2D après 100 itérations.....	33
Figure III.5 : Faire glisser le mouvement de la chaîne autour d'une source fixe de nourriture dans un espace 3D.....	34
Figure III.6 : Rechercher l'historique des sources de nourriture stationnaires et mobiles dans un espace 3D après 100 itérations.....	34

LISTE DES FIGURES

Figure III.7 : Organigramme de l'algorithme SSA 36

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Schéma fonctionnel d'un système d'excitation avec AVR 39

Figure IV.2 : déviation du couple électromagnétique (p.u) sans PSS..... 40

Figure IV.3 : Erreur sans PSS 41

Figure IV.4 : déviation de la vitesse angulaire (p.u) sans PSS 41

Figure IV.5 : déviation de la position angulaire (rad) sans PSS 42

Figure IV.6 : déviation du couple électromagnétique (p.u) sans PSS..... 42

Figure IV.7 : Erreur sans PSS..... 43

Figure IV.8 : déviation de la vitesse angulaire (p.u) sans PSS 43

Figure IV.9 : déviation de la position angulaire (rad) sans PSS 44

Figure IV.10 : déviation de couple électromagnétique (p.u) sans PSS 45

Figure IV.11 : Erreur sans PSS 46

Figure IV.12 : déviation de la vitesse angulaire (p.u) sans PSS 46

Figure IV.13 : déviation de position angulaire (rad) sans PSS 47

Figure IV.14 : déviation de couple électromagnétique (p.u) sans PSS 47

Figure IV.15 : Erreur sans PSS 48

Figure IV.16 : déviation de la vitesse angulaire (p.u) sans PSS 48

Figure IV.17 : déviation de position angulaire (rad) sans PSS 49

Figure IV.18 : Schéma bloc fonctionnel avec l'AVR et le PSS..... 50

Figure IV.19 : déviation de couple électromagnétique (pu) avec PSS 51

Figure IV.20 : Erreur avec PSS 52

Figure IV.21 : déviation de vitesse angulaire (p.u) avec PSS 52

Figure IV.22 : déviation de position angulaire (rad) avec PSS 53

Figure IV.23 : déviation de couple électromagnétique (p.u) avec PSS 54

Figure IV.24 : Erreur avec PSS 54

Figure IV.25 : déviation de vitesse angulaire (p.u) avec PSS 55

Figure IV.26 : déviation de position angulaire (rad) avec PSS 55

Figure IV.27 : déviation de couple électromagnétique (p.u) avec PSS 56

Figure IV.28 : Erreur avec PSS 56

Figure IV.29 : déviation de vitesse angulaire (p.u) avec PSS 57

Figure IV.30 : déviation de position angulaire (rad) avec PSS 57

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre II :

Tableau II.1 : Incidents suivis d'un effondrement.....	20
Tableau II.2 : Incidents non suivis d'un effondrement.....	20

Chapitre IV :

Tableau IV.1 : les valeurs des paramètres de système de puissance.....	39
Tableau IV.2 : Plages de variation des paramètres du PSS.....	50
Tableau IV.3: Paramètres de PPS par défaut et optimisé.....	51

Liste des abréviations et des symboles

Liste des abréviations et des Symboles

Abréviations :

SMIB : Single Machine Infinity Bus

PSS : Power System Stabilizers

AVR : Automatique Voltage Régulateur

IEEE : (Institute of Electrical and Electronics Engineers), en français (l'institut des ingénieurs électriciens et électroniciens)

JB : jeu de barre

Err : Erreur

SSA : Salp Swarm Algorithm

Symboles :

Ω_s : Vitesse de rotation du champ tournant en (rad. s⁻¹)

ω_s : Pulsation des courants alternatifs en (rad. s⁻¹)

n_s : Vitesse de rotation du champ tournant en (trs. s⁻¹)

f : Fréquence des courants alternatifs en (Hz)

ω_0 : Vitesse de synchronisme (vitesse de base), en rad/s. avec ($\omega_0 = 2\pi f$)

p : Nombre de paires de pôles

E : F.é.m. induit (V)

K : Coefficient de Kapp (caractéristique de la machine) (pu)

K_a : Gain de l'AVR (pu)

K_{pss} : Gain du PSS (pu)

N : Nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

Φ : Flux maximum à travers un enroulement (Wb)

X : Réactance synchrone (pu)

Liste des abréviations et des symboles

X'_q : Réactance transitoire d'axe q, en (pu)

X'_d : Réactance transitoire d'axe d, en (pu)

X_d : Réactance synchrone d'axe d, en (pu)

X_q : Réactance synchrone d'axe q, en (pu)

X_l : Réactance équivalente des lignes de transport (pu)

X_T : Réactance équivalente du transformateur (pu)

E'_q : F.é.m. du générateur induite suivant l'axe q, en (pu)

E'_d : F.é.m. du générateur induite suivant l'axe d, en (pu)

E_{fd} : Tension d'excitation de la machine synchrone (pu)

E_{fd_min} : Limite supérieure de la sortie de système d'excitation (pu)

E_{fd_max} : Limite inférieure de la sortie de système d'excitation (pu)

I_d : Courant du générateur axe direct (pu)

I_q : Courant du générateur axe quadratique (pu)

S : Puissance apparent (pu)

P_e : Puissance électrique active (pu)

Q_e : Puissance électrique réactive (pu)

P_m : Puissance mécanique entrant

ω : Vitesse angulaire du rotor, en (pu)

δ : Angle de rotor, en (rad)

$\Delta\delta$: Déviation de position angulaire

$\Delta\omega_r$: Déviation de la vitesse angulaire du rotor

Tm_i : Couple mécanique fourni par la turbine, en (pu)

Te_i : Couple électromagnétique associée à la puissance électrique Pe_i produite du générateur, ($Te_i = Pe_i/\omega_i$) en (pu)

D_i : Coefficient d'amortissement du générateur i

Liste des abréviations et des symboles

H : Constant d'inertie (s)

V_t : Tension mesurée a la sortie de la machine synchrone (pu)

V_q : La composante quadratique de la tension terminale (pu)

V_d : La composante directe de la tension terminale (pu)

V_{ref} : Tension de référence (pu)

V_{s_min} : Limite inférieure de la sortie du PSS (pu)

V_{s_max} : Limite supérieure de la sortie du PSS (pu)

V_{pss} : Signal de sortie du PSS (pu)

e : Le signal d'erreur (pu)

$T_i, T_d, T_1, T_2, T_3, T_4$: Constant de temps (s)

T_a : Constante de temps de l'AVR (s)

T_w : Constante de temps du régulateur (s)

T'_{d0} : Constante de temps transitoire de l'axe directe (s)

R_a : Résistance par phase statorique (pu)

L_{ads} : Inductances propres d'un enroulement du stator (pu)

Résumé :

La stabilité du réseau électrique occupe une grande importance dans la planification et l'exploitation. Pour cela, nous essayons d'étudier et d'analyser le système énergétique sous différentes perturbations et assurer l'amélioration de la stabilité transitoire du réseau en utilisant le contrôleur PSS (Power system stabilizer). Pour la complexité de la détermination des paramètres du PSS, nous avons choisi une nouvelle technique méta-heuristique appelée la méthode des essaims de salpes (Salp Swarm Algorithm - SSA) pour optimiser les paramètres du PSS. Une analyse des résultats de simulation a été accomplie pour juger les performances du système énergétique en présence du PSS dans le but d'améliorer la stabilité des réseaux électriques. Le modèle d'étude est constitué d'une machine synchrone liée à un jeu de barres infini à travers une ligne de transmission.

Mots-clés :

Mots-clés : Système de puissance, Stabilité, contrôleur PSS, Machine synchrone, Jeu de barres infini, méthode des essaims de salpes (SSA).

ملخص:

أن استقرار الشبكة الكهربائية له أهمية كبيرة في التخطيط والتشغيل. لهذا الغرض نحاول دراسة وتحليل نظام الطاقة في مختلف الحملات وضمان الاستقرار الشامل للشبكة الكهربائية أثناء حدوث اضطرابات مختلفة باستعمال وحدة التحكم PSS (استقرار نظام الطاقة) وبسبب صعوبة حساب معاملاته اخترنا طريقة الأمثلة التي تسمى خوارزمية سرب السلبيات SSA من أجل إيجاد قيم مثلى لمعاملات PSS وقد تم إجراء تحليل نتائج المحاكاة على أداء PSS من أجل تحسين استقرار الشبكة الكهربائية.

نموذج الدراسة يتكون من مولد متزامن موصول بقضيب تجميعي مالا نهائي عبر خط نقل كهربائي.

كلمات مفتاحية: نظام الطاقة، الاستقرار، نظام التحكم PSS، ماكينة متزامنة، قضيب تجميعي مالا نهائي، خوارزمية سرب السلبيات.

Sommaire

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	iv
Liste des abréviations et des symboles.....	v
Résumé.....	viii
Introduction général.....	1

Chapitre I : Modélisation des éléments du réseau électrique

I.1 Introduction.....	3
I.2 Modèle de réseau électrique.....	4
I.3 Le modèle général des éléments.....	4
I.3.1 Le champ tournant de machine synchrone.....	4
I.3.2 F.é.m. induite.....	4
I.3.3 Modèle du générateur	4
I.3.3.1 Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park.....	4
I.3.3.2 Hypothèses du modèle.....	5
I.3.3.3 Equation électriques.....	6
I.3.3.4 Equation mécanique.....	8
I.3.3.5 Régulateur de fréquence et modèle de la turbine.....	9
I.3.3.6 Régulateur de tension et modèle du système d'excitation	10
I.3.4 Réseau de transport.....	11
I.3.4.1 Modélisation de transformateurs.....	11
I.3.4.2 Modèle des lignes de transport.....	12
I.3.4.3 Modèle des charges.....	12
I.4 Conclusion.....	12

Sommaire

Chapitre II : Stabilité des réseaux électriques

II.1 Introduction.....	13
II.2 définitions.....	13
II.2.1 Réseau infini.....	13
II.2.2 Synchronisme.....	13
II.2.3 Système électro-énergétique.....	13
II.3 La stabilité de réseau électrique.....	13
II.3.1 Définition.....	13
II.3.2 Stabilité d'un système électro-énergétique	13
II.3.3 Description général du système électro-énergétique étudié.....	14
II.3.4 La classification de la stabilité de réseau électrique.....	14
II.3.4.1 La stabilité angulaire.....	16
II.3.4.2 La stabilité de fréquence	19
II.3.5 Les cause d'instabilité.....	19
II.3.6 Incidents liées à l'instabilité dans le monde.....	20
II.3.7 Amélioration de la stabilité transitoire	21
II.4 Généralité sur les systèmes asservis.....	21
II.4.1 Définition	21
II.4.1.1 Régulation.....	21
II.4.1.2 Grandeur réglée	21
II.4.1.3 Grandeur réglant.....	21
II.4.1.4 Grandeur perturbatrices.....	21
II.4.1.5 L'organe de réglage	21

Sommaire

II.4.2 Objectif de la régulation automatique.....	21
II.4.3 Caractéristiques dynamique d'un procédé.....	22
II.4.3.1 Temps de réponse (Tr).....	22
II.4.3.2 Temps de montée (Tm).....	22
II.4.3.3 Dépassement(D).....	22
II.5 Stabilisateur PSS.....	23
II.5.1 Fonctionnement et modèle de PSS.....	23
II.5.2 Différents blocs de PSS.....	24
II.5.2.1 L'amplificateur.....	24
II.5.2.2 Filtre passe-haut "filtre washout "	24
II.5.2.3 Filtre compensation de phase.....	24
II.6 Conclusion	25

Chapitre III : Optimisation par les essais des salpes (SSA)

III.1 Introduction.....	26
III.2 Définition de l'optimisation.....	26
III.3 Méthodologie de conception.....	26
III.4 Formulation du problème d'optimisation.....	27
III.4.1 Formulation mathématique d'un problème d'optimisation.....	27
III.4.2 Résolution d'un problème d'optimisation.....	28
III.4.2.1 Méthode d'optimisation	28
III.4.2.1.1 Méthode d'optimisations exactes.....	28
III.4.2.1.2 Les méthodes méta-heuristiques.....	28

Sommaire

III.4.3 Avantages des méthodes méta-heuristiques.....	29
III.5 Inspiration de la méthode d'optimisation des essaims de salpes	30
III.6 Méthode mathématique proposé pour l'optimisation par la méthode des essaims de salpes.....	31
III.7 Simulation d'essaim.....	32
III.8 L'algorithme d'optimisation de SSA.....	34
III.9 Conclusion.....	36
 Chapitre IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité	
IV.1 Introduction.....	38
IV.2 Modèle d'étude dans le MATLAB/SIMULINK.....	38
IV.3 Analyse du système sans PSS.....	40
IV.3.1 Analyse du système avec perturbation au niveau de la tension de référence ($\Delta V_{\text{réf}}$).....	40
IV.3.2 Analyse du système avec perturbation au niveau de la tension de référence ($\Delta V_{\text{réf}}$) et couple mécanique (ΔT_m).....	45
IV.4 Amélioration avec PSS.....	50
IV.4.1 Amélioration avec PSS perturbation au niveau de (ΔT_m)	51
IV.4.2 Amélioration avec PSS perturbation au niveau de ($\Delta V_{\text{réf}}$)	53
IV.5 Conclusion.....	58
Conclusion général.....	59
Annexe A.....	ix
Bibliographie.....	xv

Introduction Générale

La croissance rapide de la demande en énergie électrique dans le monde a poussé les concepteurs et les exploitants des réseaux électriques à prévoir une augmentation des centrales électriques, des lignes de transmission et des transformateurs, ce qui conduit à un réseau plus maillé et de plus en plus compliqué du point de vue fonctionnement. Dans ces conditions, il faut prévoir des stratégies de planification et de réglage pour préserver la stabilité du système énergétique. La stabilité des grands réseaux de transport est devenue l'une des préoccupations importantes pour les opérateurs des réseaux électriques. Cette stabilité est affectée par les différents types de perturbations et leur ampleur. Pratiquement, les grandes perturbations sont les plus sévères influençant sur la stabilité des réseaux électriques, particulièrement, la perte d'une grande centrale, le branchement ou débranchement d'une grande charge ou la mise hors d'une ligne transportant une grande puissance...etc., c'est le cas de l'étude de la stabilité transitoire.

Compte tenu de la variété des perturbations, les équipements de commande et de réglage pour faire face aux problèmes d'instabilité présentent actuellement des anomalies dans certains cas pour répondre aux besoins dans des états d'urgence. Pour cela, des nouveaux systèmes de commande et de réglage ont été incorporés dans les réseaux électriques pour l'amélioration de la stabilité. Parmi ces nouveaux systèmes de réglage, on peut citer le stabilisateur de puissance (Power System Stabilizer – PSS) qui constitue l'outil de base pour l'amélioration de la stabilité dans ce travail.

Dans certains cas particulier, le PSS introduit dans le système de réglage en considérant ses paramètres donnés par défaut s'avérer trop limité ou insuffisant pour répondre efficacement aux diverses perturbations. Le réglage des paramètres du PSS est complexe pour atteindre l'objectif de l'amélioration de la stabilité au biais des indices de stabilité. Pour cela, le grand effort du travail dans ce mémoire est concentré sur le réglage des paramètres du PSS en les optimisant et en utilisant une méthode d'optimisation méta-heuristique appelée l'Algorithme des Essaims de Salpes (Salp Swarm Algorithm). C'est dans cet objectif que s'articule notre travail qui sera organisé de la façon suivante :

➤ Le premier chapitre donne un aperçu de base sur l'étude d'un système de puissance constitué d'une machine synchrone liée par une ligne de transmission à un jeu de barres infini, et la modélisation les différents composants du système électro-énergétique du générateur jusqu'à la charge.

Introduction Générale

➤ Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les différents types de stabilité du système de puissance et l'amélioration de la stabilité des réseaux électrique considérant les types, caractéristiques de réglage et les paramètres du PSS (power system stabilizer).

➤ Le troisième chapitre sera consacré à la méthode méta-heuristique d'optimisation appelée méthode des essaims de salpes SSA (Salp Swarm Algorithm) qui est inspiré de la méthode de recherche adopté par les salpes dans leur vie marine et cela pour l'appliquer à l'optimisation et au réglage des paramètres du PSS dans l'objectif d'améliorer la stabilité du système électro-énergétique.

➤ Le quatrième chapitre fera l'objet d'implémentation de la technique SSA, dans le but d'optimiser les paramètres du régulateur PSS. On a met en évidence l'efficacité du PSS dans l'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique considérant le réseau constitué d'un générateur synchrone lié à un jeu de barres infini à travers une ligne de transmission appelé le modèle SMIB. La simulation des modèles étudiés est faites sur le logiciel MATLAB/SIMULINK.

Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Modélisation des éléments du réseau électrique

Chap. I : Modélisation des éléments du réseau électrique

I.1 Introduction :

Un grand réseau électrique (appelé aussi système de puissance) se compose d'éléments (générateurs, transformateurs, lignes,...), plus ou moins nombreux selon la taille du réseau, interconnectés, formant un système complexe capable de générer, de transmettre et de distribuer l'énergie électrique à travers de vastes étendues géographiques. Ainsi, les systèmes de puissance modernes sont caractérisés par taille et complexité croissantes. Plus la dimension d'un système de puissance augmente, plus les processus dynamiques et l'analyse des phénomènes physiques sous-jacents sont complexes. Outre leur taille et leur complexité, les systèmes de puissance présentent un comportement non-linéaire et variant dans le temps. Les modèles présentés dans ce chapitre concernent les éléments suivants :

- les unités de production : générateurs électriques, systèmes d'excitation, turbines et systèmes de contrôle associés.
- les transformateurs et les lignes de transmission du réseau de transport.
- les charges

La figure I.1, représente une description générale pour les structures dynamiques d'un système de puissance.

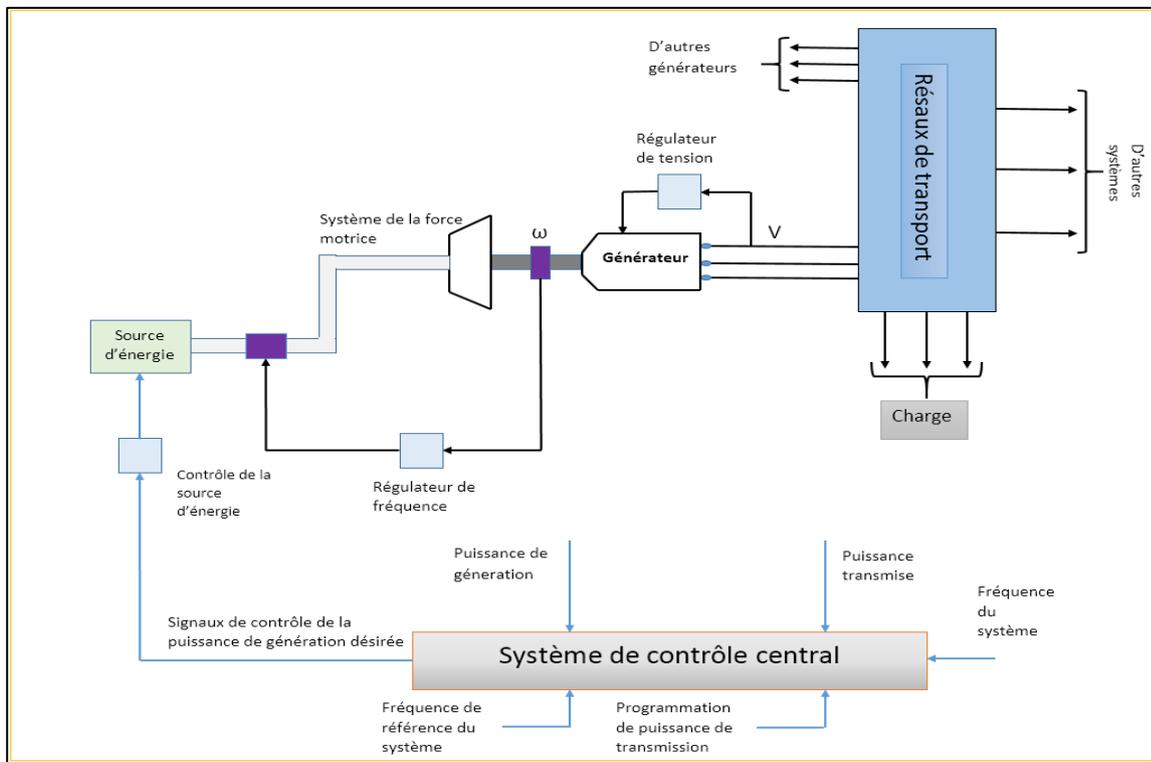


Figure I.1 : Structure générale d'un système de puissance.

Chap. I : Modélisation des éléments du réseau électrique

I.2 Modèle de réseau électrique :

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, la figure I.2 représente un modèle de réseau électrique

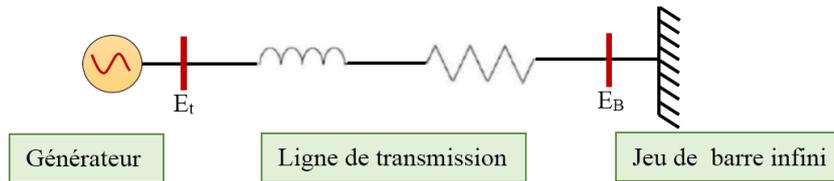


Figure I.2 : modèle de réseau électrique

I.3 Le modèle général des éléments :

I.3.1 Le champ tournant de machine synchrone :

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{I.1})$$

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (\text{I.2})$$

I.3.2 F.é.m. induite :

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m. $e(t)$ de valeur efficace E [HAR18]

$$E = K \cdot N \cdot \Phi \cdot f = K \cdot N \cdot \Phi \cdot P \cdot n_s = K' \cdot \Phi \cdot n_s \quad (\text{I.3})$$

$$\text{Finalement : } E = K' \cdot \Phi \cdot n_s \quad (\text{I.4})$$

I.3.3 Modèle du générateur :

Les générateurs sont des éléments qui permettent la conversion de l'énergie (mécanique, photonique, chimique...) vers une forme électrique. Ils peuvent fournir, ou consommer, de l'énergie active ou réactive et ils peuvent maintenir un niveau de tension désirée [YAH14].

I.3.3.1 Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park :

Le modèle détaillé de la machine synchrone est représenté dans le schéma de la figure I.3. Il comporte trois enroulements de phases a, b, c au stator et quatre enroulements au rotor dont un enroulement d'excitation et un enroulement d'amortisseur dans l'axe direct (d) et deux enroulements d'amortisseur dans l'axe en quadrature (q) avec couplage magnétique entre ces enroulements de la figure I.3.

Chap. I : Modélisation des éléments du réseau électrique

- La saturation est négligée, il en résulte que les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements.
- On ne tient pas compte de l'hystérésis et des courants de Foucault dans les parties magnétiques. Les forces électromotrices correspondant aux enroulements du stator sont à répartition spatiale sinusoïdale.
- L'effet de la variation de la vitesse est négligé. Cette simplification est basée sur l'idée que la vitesse en (pu) égale à 1.0. Cela ne signifie pas que la vitesse est constante mais que les variations de celle-ci sont très petites et n'ont aucun effet sur la tension au stator.

I.3.3.3 Equations électriques :

Considérons une $i^{\text{ème}}$ machine d'un réseau multi-machines, nous allons déterminer dans ce paragraphe les équations algébriques du stator de cette machine : à savoir les équations concernant les tensions suivant les axes d et q et les puissances électriques.

Les grandeurs électriques de cette machine sont représentées sur la figure I.5.

Avant de débiter le calcul, nous pouvons faire les remarques suivantes :

- le repère (d_i, q_i) concerne la $i^{\text{ème}}$ machine seule, alors que le repère (D, Q) est commun à toutes les machines du système.
- l'angle de couple δ_i , vu entre D et q_i , représente la position du repère (d, q) de la $i^{\text{ème}}$ machine par rapport au repère commun (D, Q) : il varie constamment dans le temps et peut être positif ou négatif [YUY83].

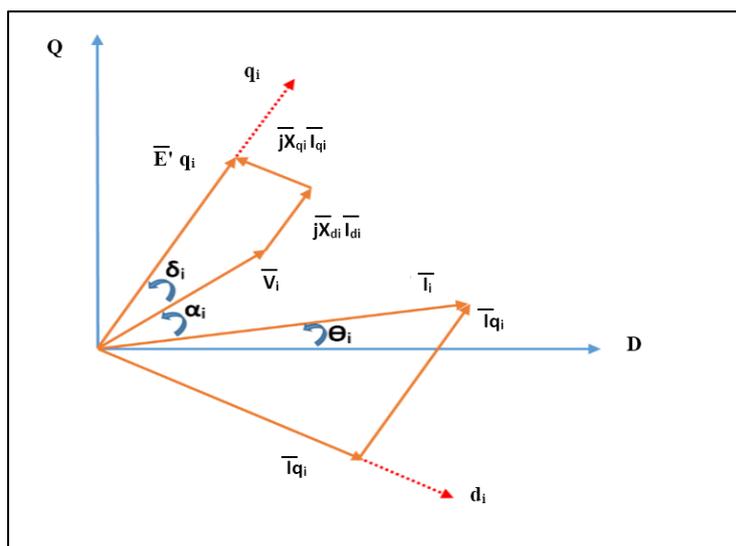


Figure I.5: diagramme de phase pour la $i^{\text{ème}}$ machine d'un système multi machines

Chap. I : Modélisation des éléments du réseau électrique

D'après la figure I.5, la tension terminale V_i de la $i^{\text{ème}}$ machine du système peut se déterminer par l'équation suivante :

$$\bar{V}_i = \bar{E}'_{qi} - j \cdot X'_{di} \times \bar{I}_{di} - j \cdot X_{qi} \times \bar{I}_{qi} \quad (\text{I.5})$$

Notons, dans le repère commun (D-Q), les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} \bar{E}'_{qi} &= E'_{qi} \times e^{j\delta_i} \\ \bar{I}'_{qi} &= I_{qi} \times e^{j\delta_i} \quad , \quad \bar{I}'_{di} = I_{di} \times e^{j(\delta_i-90)} \\ \bar{V}_i &= V_i \times e^{j\alpha_i} \end{aligned} \quad (\text{I.6})$$

En introduisant les relations (I.5) dans la relation (I.6), nous obtenons :

$$V_i = E'_{qi} \times e^{j\delta_2} - X_{di} \times I_{di} \times e^{j\delta_2} - jX_{qi} \times I_{qi} \times e^{j(\delta_2+90)} \quad (\text{I.7})$$

Qui devient après arrangement :

$$V_i \times e^{-j(\delta_2-\alpha_2)} = E'_{qi} - X_{di} \times I_{di} - jX_{qi} \times I_{qi} \quad (\text{I.8})$$

$$V_i \times \cos(\delta_i + \alpha_i) - jV_i \sin(\delta_i - \alpha_i) = E'_{qi} - X_{di} \times I_{di} - jX_{qi} \times I_{qi} \quad (\text{I.9})$$

En séparant partie réelle et partie imaginaire, nous obtenons les expressions de V_d et V_q suivant :

$$\begin{cases} V_{di} = X_{qi} \times I_{qi} \\ V_{qi} = E_{qi} - X'_{di} \times I_{di} \end{cases} \quad (\text{I.10})$$

En considérant les relations (I.6) et la relation suivant : $\bar{I}'_{i=di} = \bar{I}'_{di} - \bar{I}'_{qi}$ l'équation (I.5) peut être donc réécrite comme suit :

$$\bar{V}_i = E'_{qi} \times e^{-j\delta_1} - jX'_{di} \times \bar{I}_i + jX'_{di} \times e^{-j\delta_1} - jX_{qi} \times I_{qi} e^{-j\delta_1} \quad (\text{I.11})$$

Pour n machines d'un système multi-machines, l'équation (I.11) peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$[\bar{V}] = [E'_q][e^{-j\delta_1}] - j[X'_d][\bar{I}] + j[X'_d][e^{-j\delta_1}] - j[X_q][I_q][e^{-j\delta_1}] \quad (\text{I.12})$$

Dans cette dernière équation, les termes $[e^{-j\delta}]$, $[X'_d]$ et $[X'_d - X_q]$ sont des vecteurs colonnes de dimension n et les coefficients $[ej\delta]$, $[X'_d]$ et $[X'_d - X_q]$ sont des matrices diagonales. Les puissances électriques (apparente, active et réactive) de la $i^{\text{ème}}$ machine sont données par

$$\bar{S}_i = P_{ei} + jQ_{ei} = \bar{V}_i \bar{I}_i^* = (V_{di} + jV_{qi})(I_{di} - jI_{qi}) = \bar{S}_i$$

Chap. I : Modélisation des éléments du réseau électrique

$$= (V_{di} I_{di} + V_{qi} I_{qi}) + j (V_{qi} I_{di} - V_{di} I_{qi}) \quad (\text{I.13})$$

$$\begin{cases} P_{ei} = V_{di} \cdot I_{di} + V_{qi} \cdot I_{qi} \\ Q_{ei} = V_{qi} \cdot I_{di} - V_{di} \cdot I_{qi} \end{cases} \quad (\text{I.14})$$

Etant donné que les phénomènes transitoires dans le stator sont négligés, le couple électrique est donc égal à la puissance électrique active en per-unit. Ainsi nous aurons $T_{ei} = P_{ei}$ [HES 08].

I.3.3.4 Equation mécanique :

Dans le fonctionnement à l'état d'équilibre, toutes les machines synchrones du système tournent à la même vitesse angulaire électrique. Le couple mécanique T_m est de même sens que le sens de la rotation de l'axe du générateur. Le couple électrique T_e est de sens opposé à la rotation et ce couple équilibre le couple mécanique [BAS05], figure I.6. 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

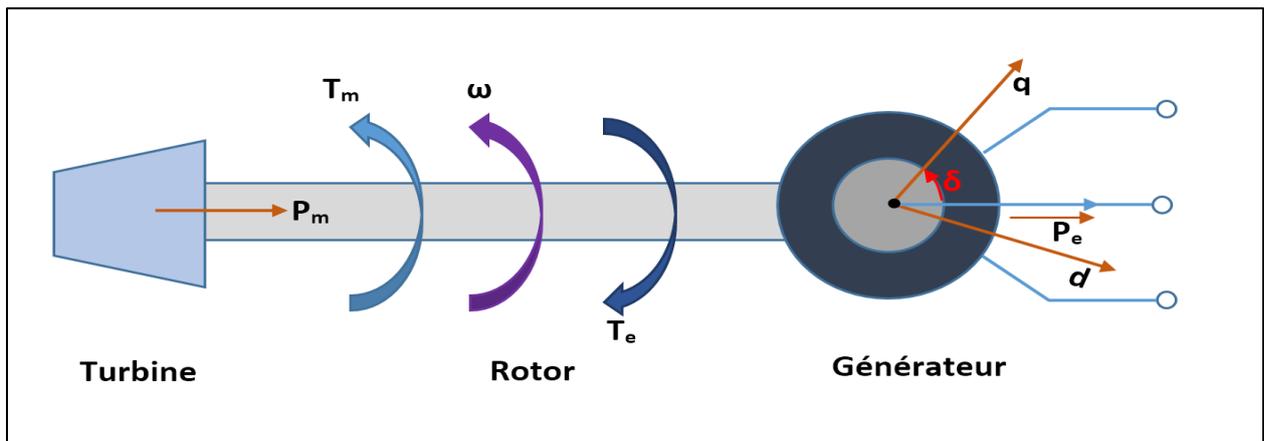


Figure I.6 : Couples mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur.

Pour un système d'une seule machine, s'il y a un déséquilibre des couples agissant sur le rotor de la $i^{\text{ème}}$ machine, cette dernière va accélérer ou ralentir selon l'équation du mouvement suivante :

$$\begin{cases} \frac{H}{\pi f} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \\ \Delta \dot{\omega}_i = \frac{1}{2H_i} (T_{mi} - T_{ei}) \end{cases} \quad (\text{I.15})$$

Chap. I : Modélisation des éléments du réseau électrique

Avec H_i constante d'inertie (en secondes) représentant l'inertie totale de toutes les masses tournantes connectées à l'arbre du générateur.

L'équation du mouvement peut être réécrite comme suit :

$$\Delta\dot{\omega}_i = \frac{1}{2H_i} (T_{mi} - T_{ei} - D(\Delta\omega_i - 1)) \quad (\text{I.16})$$

L'équation de l'angle de rotor de la $i^{\text{ème}}$ machine est donné par :

$$\begin{cases} \Delta\dot{\delta}_i = \omega_0(\Delta\omega_i - 1) = \omega_0 \times \Delta\omega \\ \Delta\omega_r = (\Delta\omega_i - 1) \end{cases} \quad (\text{I.17})$$

Avec :

T_{ei} : Couple électromagnétique associée à la puissance électrique P_{ei} produite par l' $i^{\text{ème}}$ générateur, avec $T_{ei} = \frac{P_{ei}}{\omega_i}$ en pu.

T_{mi} : Couple mécanique fourni par la turbine, en pu.

D_i : Coefficient d'amortissement.

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

δ : Angle de rotor, en (rad).

$\Delta\omega_i$: Déviation de la vitesse angulaire du rotor de la $i^{\text{ème}}$ machine, en pu.

$i = 1, \dots, n$.

I.3.3.5 Régulateur de fréquence et modèle de la turbine :

Le régulateur de fréquence (vitesse) agit ensuite sur le servomoteur pour ouvrir et fermer les vannes de contrôle et modifier par conséquent la vitesse du 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.

Dans tout système de puissance, il est très important de maintenir la fréquence dans une plage étroite autour de sa valeur nominale (50 ou 60 Hz). Le respect strict de cette valeur est non seulement nécessaire au fonctionnement correct des charges mais il est également l'indicateur d'équilibre entre puissances actives produites et consommées [CUS02].

Chap. I : Modélisation des éléments du réseau électrique

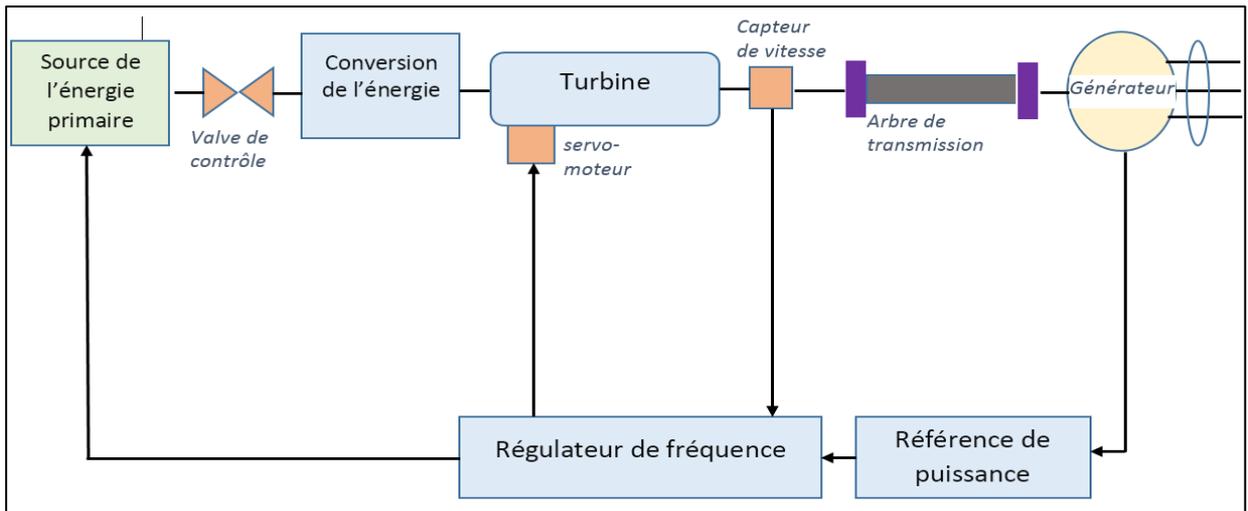


Figure I.7 : Structure générale d'un système de force motrice - générateur.

I.3.3.6 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 [CUS02].

Actuellement, des systèmes d'excitation variés sont employés. Trois principaux types peuvent être identifiés [IEEE05] :

a)- 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.

b)- 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.

c)- Les systèmes d'excitation statiques (systèmes 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.

Chap. I : Modélisation des éléments du réseau électrique

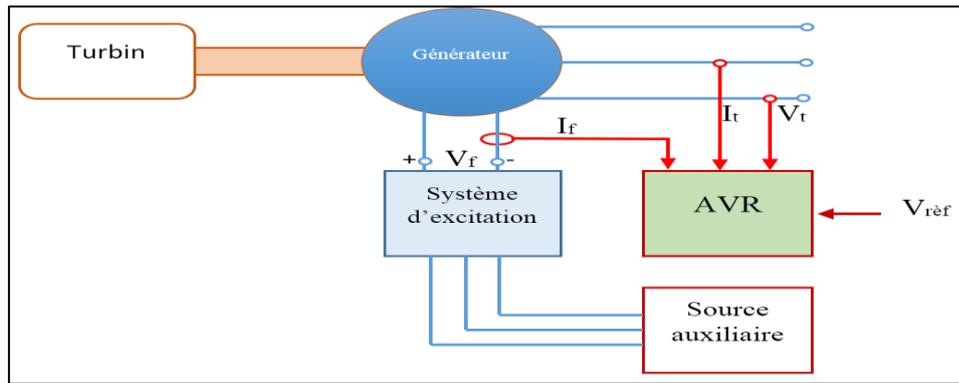


Figure I.8 : système d'excitation statique avec AVR

I.3.4 Réseau de transport. :

Le réseau de transport relie toutes les centrales électriques dans un système de puissance et distribue la puissance aux différents consommateurs. Les éléments principaux du réseau sont les lignes aériennes à haute tension, les câbles souterrains, les transformateurs et les jeux de barres. [HAS 08].

I.3.4.1 Modélisation de transformateurs :

Les transformateurs peuvent être utilisés pour contrôler les tensions de nœuds des réseaux. La figure I.9 montre le schéma équivalent du transformateur idéal. L'impédance Z_T correspond à l'impédance équivalente totale vue du primaire, et où m est le rapport de transformation défini par le rapport des nombres de spires du primaire et du secondaire [SAO14].

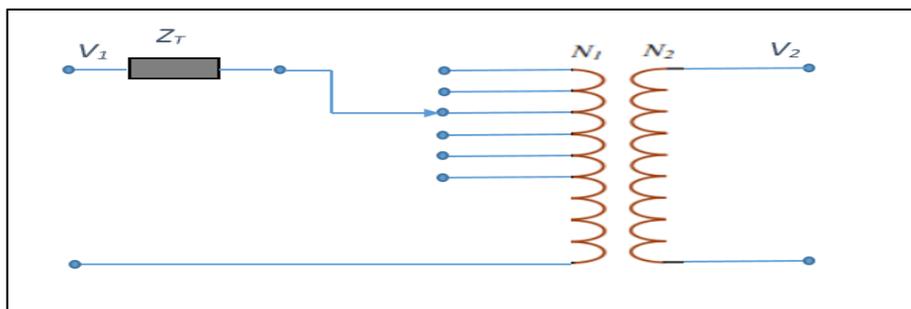


Figure I.9: Modèle simplifié de transformateur

Si N_1 est le nombre de spires côté haute tension et N_2 est le nombre de spires côté basse tension, le rapport de transformation M est défini par :

$$M = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{I.18})$$

La relation entre la tension du côté primaire V_1 et la tension du côté secondaire V_2 à vide est :

$$V_2 = \frac{V_1}{M} \quad (\text{I.19})$$

Chap. I : Modélisation des éléments du réseau électrique

I.3.4.2 Modèle des lignes de transport :

Les modèles des lignes de transmission utilisés dans l'analyse dynamique des réseaux électriques sont habituellement classés en trois groupes en fonction des longueurs des lignes, (longues, moyennes, courtes) cinétique [SAU 98]. La structure la plus employée pour ce modèle est le schéma équivalent en π , figure I.9.

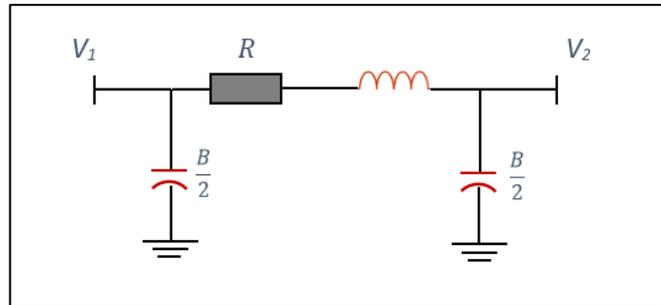


Figure I.10 : Modèle en π d'une ligne de transmission.

I.3.4.3 Modèle des charges :

Les modèles de charges les plus utilisés sont généralement des modèles statiques. Le caractère statique est lié à la description de la charge par des équations purement algébriques [SAO14]. La figure I.10 représente l'admittance équivalente de la charge.

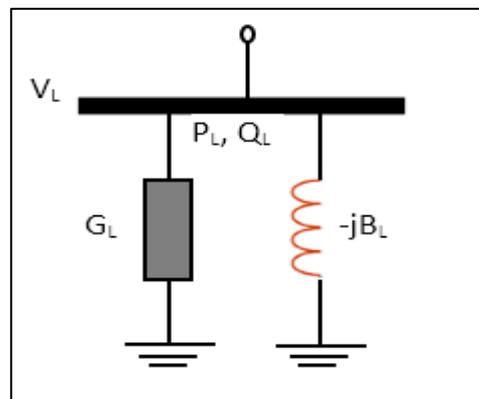


Figure I.11 : Modélisation d'une charge par son admittance équivalente.

I.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation d'un réseau d'énergie électrique, qui traite quelques notions concernant le rôle des composants des réseaux électriques à la base de l'étude d'un système de puissance constitué d'une machine synchrone liée par une ligne de transmission à un jeu de barres infini, pour l'étude ou l'analyse de la stabilité des réseaux électriques et cela dans le chapitre qui suit.

Chapitre II :

Stabilité De Réseau

Électrique

Chap. II : Stabilité de réseau électrique

II .1 Introduction :

La bonne performance d'un système de puissance dépend de sa capacité de fournir à tout moment la puissance demandée dans des conditions de qualité satisfaisantes, en maintenant les niveaux de tension et de fréquence dans des limites acceptables.

Ce chapitre traite de la stabilité du système de puissance pour préserver le matériel et assurer la continuité du service et utiliser le contrôleur PSS pour l'améliorer la stabilité aux petites perturbations.

II .2 Définitions :

II .2.1 Réseau infini :

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

II.2.2 Synchronisme:

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

II.2.3 Système électro-énergétique:

Un système électro-énergétique constitué d'une machine synchrone liée par une ligne de transmission à un jeu de barres infini [ZIA 94].

II.3 La stabilité de réseau électrique :

II.3.1 Définition:

La stabilité des réseaux électriques est généralement définie comme leurs propriétés de maintenir un état de fonctionnement d'équilibre dans les conditions de fonctionnement normales ou de rétablir un état d'équilibre acceptable après avoir subi une perturbation, en gardant la plupart des variables de système dans leurs limites, de sorte que le système entier reste pratiquement intact [HAS 08]. Comme les réseaux électriques dépendent des alternateurs synchrones de centrales électriques, une condition de fonctionnement est que tous les alternateurs synchrones maintiennent le synchronisme.

II.3.2 Stabilité d'un système électro-énergétique :

La stabilité d'un système de puissance est la capacité d'un système d'énergie électrique, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de retrouver le même état ou un autre état d'équilibre

Chap. II : Stabilité de réseau électrique

après avoir subi une perturbation physique, en gardant la plupart des variables de système dans leurs limites, de sorte que le système entier reste pratiquement intact [HAS 08].

II.3.3 Description générale du système électro-énergétique étudié :

Un réseau SMIB (Single Machine Infinity Bus) est constitué d'une machine synchrone qui alimente un réseau électrique de puissance infinie (c'est-à-dire dont la puissance est largement supérieure à celle de la génératrice synchrone) à travers des lignes et d'un transformateur. La machine synchrone est modélisée par une force électromotrice constante E derrière une réactance X_s . Le nœud infini est un point où la tension est constante et fixée en module et en phase (inertie très grande par rapport à des autres machines). La figure II.1 représente un système standard IEEE type SMIB avec la commande d'excitation du Générateur Synchrone Puissant (GSP) [DJA 13].

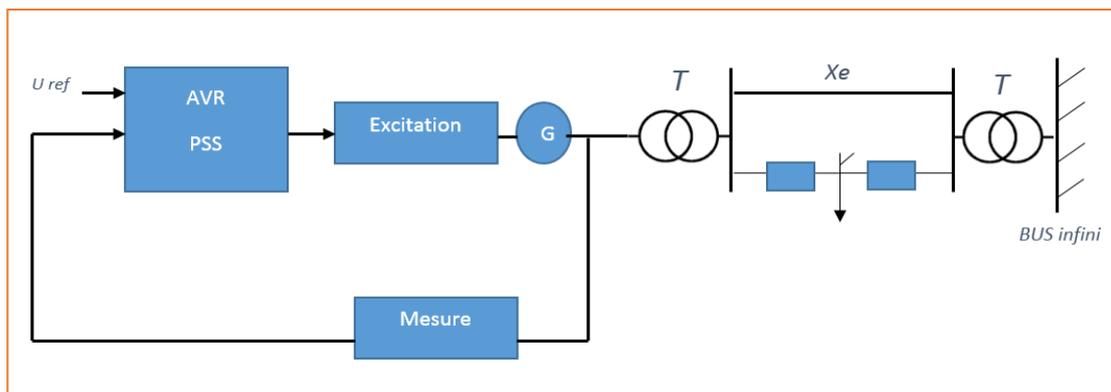


Figure II.1 : Système standard IEEE type SMIB avec commande d'excitation du générateur synchrone puissant

II.3.4 La classification de la stabilité de réseau électrique :

Classification de la stabilité est basée sur les considérations suivantes [KUN 94] :

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

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

- La stabilité de l'angle de rotor.

Chap. II : Stabilité de réseau électrique

- La stabilité de tension.
- La stabilité de fréquence.

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

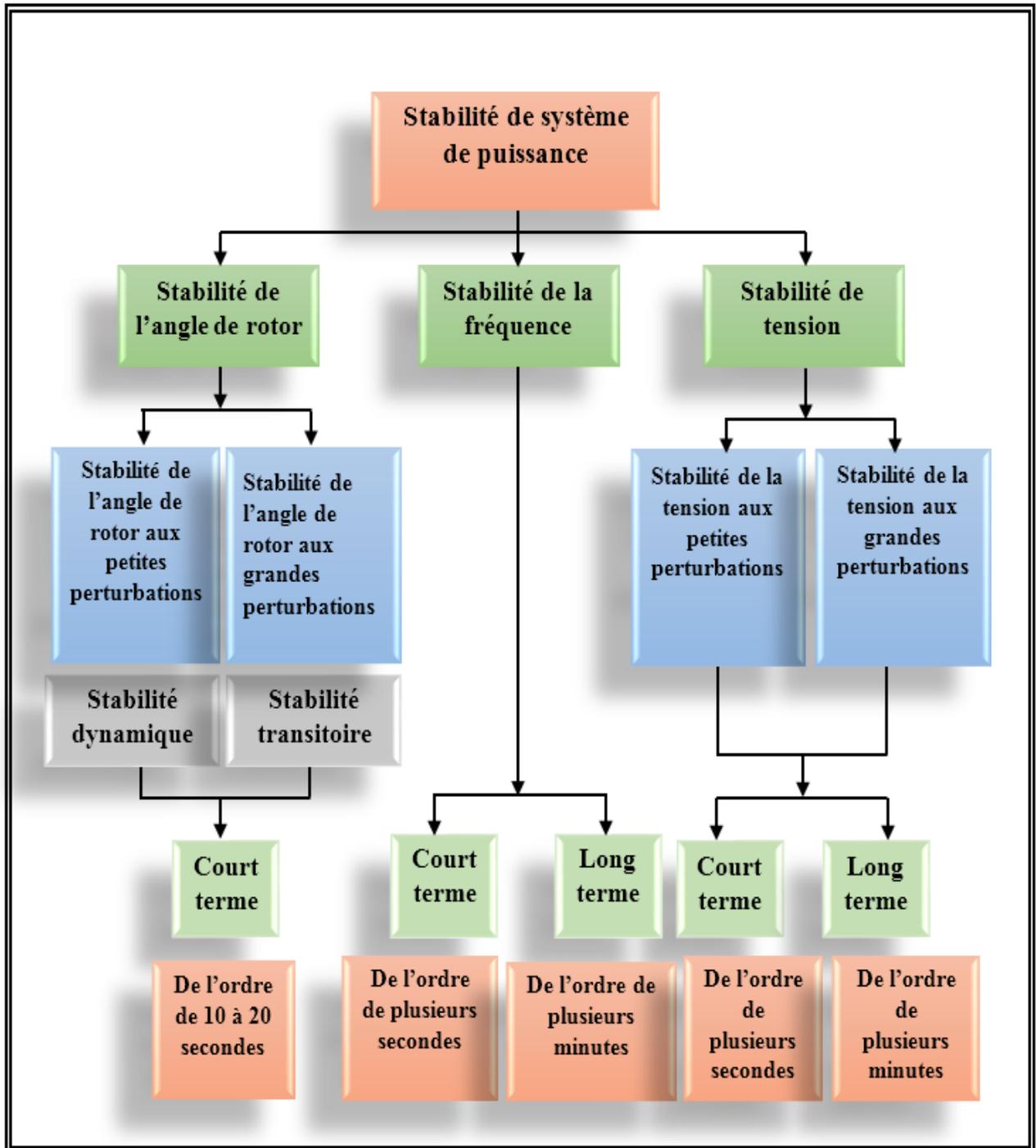


Figure II.2: classification des différents types de la stabilité de système de puissance

Chap. II : Stabilité de réseau électrique

II.3.4.1 La stabilité angulaire :

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

a- 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 Swing Instabilité), (cas 1, figure (3)), et elle s'étend sur 3 à 5 secondes. L'instabilité transitoire peut aussi se manifester autrement. Elle peut résulter de la superposition des effets de plusieurs modes d'oscillation lents excités par la perturbation, provoquant ainsi une variation importante de l'angle de rotor au-delà de la première oscillation (instabilité de multi-oscillations), (cas 2, figure (3)).

La gamme de temps associée va de 10 à 20 secondes.

Chap. II : Stabilité de réseau électrique

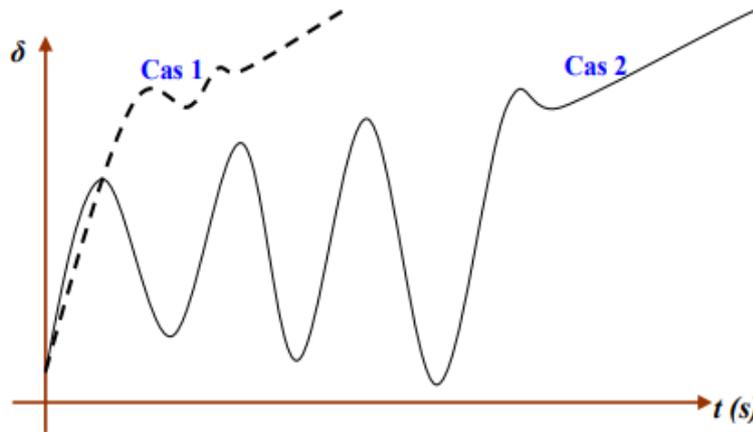


Figure II.3: Variation d'angle de rotor

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

Le concept de stabilité transitoire peut être expliqué par une approche graphique simple, à savoir le critère d'égalité des aires (Equal Area Criterion). Cette approche regroupe l'équation du mouvement et la courbe (P- δ) traditionnelle représentant la relation entre la puissance produite par le générateur et l'angle de rotor [BER00].

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 4. 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 .

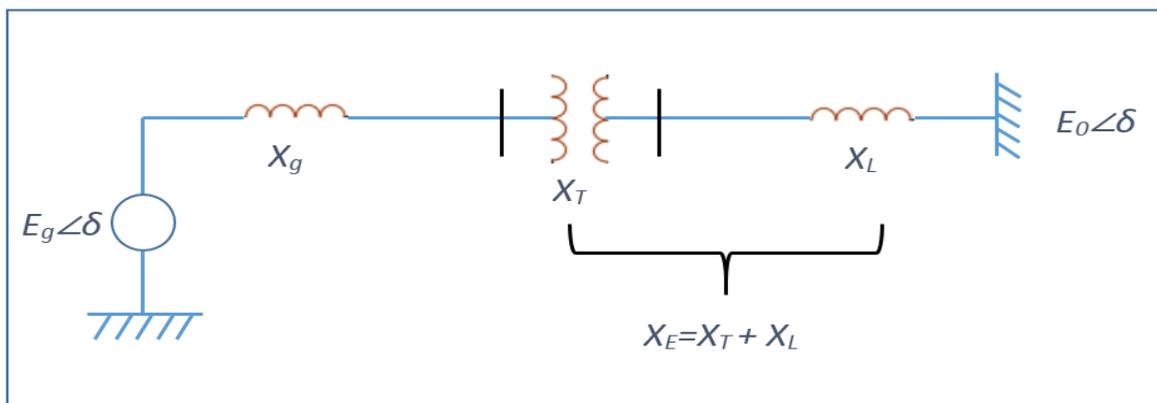


Figure II.4 : Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini.

-Relation (P- δ) :

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

Chap. II : Stabilité de réseau électrique

$$P_e = \frac{E_g \cdot E_0}{X_g + X_E} \cdot \sin \delta \quad (\text{II.1})$$

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 (II.1) est représentée graphiquement à la figure II.5 [HAS 08].

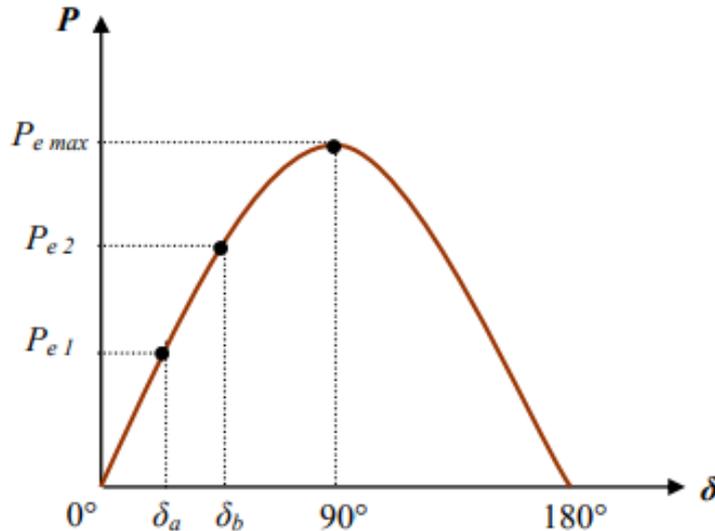


Figure II.5: relation puissance - angle de rotor.

b- Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique).

Elle se définit par la capacité du système de puissance de maintenir le synchronisme en présence des petites perturbations. L'instabilité résultante se manifeste sous forme d'un écart croissant, oscillatoire ou non-oscillatoire, entre les angles de rotor. La stabilité aux petites perturbations dépend du point de fonctionnement d'équilibre initial du système ainsi que des caractéristiques dynamiques du système. Contrairement à la stabilité transitoire, elle ne dépend pas de niveaux de perturbations, car celles-ci sont arbitraires et infiniment petites [CUS02].

La relation puissance-angle (II.1) est une relation non-linéaire en sinus. Mais pour des petites perturbations, la variation de puissance reste approximativement proportionnelle à la variation de l'angle δ . Des exemples typiques des petites perturbations peuvent être donnés par des variations de niveau de 10 % de la puissance mécanique appliquée à une machine du système ou sur sa charge,... [AND03].

Chap. II : Stabilité de réseau électrique

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

La perte de synchronisme peut avoir lieu entre une machine et le reste du système (provoquant une instabilité locale), ou bien entre des groupes des machines, dans lesquels chaque groupe peut garder son synchronisme (désignant une instabilité globale). L'instabilité aux petites perturbations se manifeste à court terme, la gamme de temps associée étant de l'ordre de 10 à 20 secondes.

II.3.4.2 La stabilité de tension :

La stabilité de tension est la capacité d'un système électrique à maintenir, à partir d'un état initial donné, les tensions stables en tous ses nœuds après une perturbation [TOU12].

Elle dépend de la capacité à maintenir ou à rétablir l'équilibre entre la demande de charge et la puissance fournie du réseau électrique. L'instabilité se produit sous la forme d'une baisse ou d'une augmentation de tension progressive dans certains nœuds. Un résultat possible d'une instabilité de tension est la perte de charges dans une zone, ou le déclenchement de lignes de transport et d'autres éléments par leurs systèmes de protection conduisant à des pannes en cascade [KUN 94].

II.3.4.3 La stabilité de fréquence:

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système de maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à un important déséquilibre, entre les puissances produite et consommée. [HAR 18]

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 produites consommée peut être déséquilibré : ce déséquilibre entraîne alors une variation de fréquence. 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.

II.3.5 Les cause d'instabilité :

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

Chap. II : Stabilité de réseau électrique

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

II.3.6 Incidents liées à l'instabilité dans le monde :

Les tableaux II.1 et II.2 [BOU09] présentent respectivement une liste des incidents qui ont provoqué un effondrement de la tension et de creux qui n'ont pas été suivis d'un effondrement.

Tableau II.1 : Incidents suivis d'un effondrement

Date	lieu	Durée
22/08/1970	japon	30 minutes
19-12-1978	France	4 heures de coupure
Été 1996	Ouest USA	Plus heures
23-09-2003	Suède et Danemark	Quelques heures
25-05-2005	Moscou, Russie	5 heures de panne

Tableau II.2 : Incidents non suivis d'un effondrement

Date	lieu	Durée
22/09/1970	Etat de New York ,E-U	Incertitudes pendant de heures
02/03/1979	Zealand, Danemark	15 minutes
17/09/1981	Centre de l'Oregon,E-U	Quelques minutes
25/05/2005	Angleterre	5 minutes
22/08/1970	Ouest de la France	Quelques minutes

II.3.7 Amélioration de la stabilité transitoire :

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

- L'utilisation d'un contrôleur côté générateur : signal de contrôle supplémentaire dans le système d'excitation du générateur
- L'utilisation d'un contrôleur côté lignes de transmission : signal de contrôle supplémentaire dans les systèmes FACTS (Flexible AC Transmission System) [HAR 18].

II.4 Généralité sur les systèmes asservis :

II.4.1 Définition:

II.4.1.1 Régulation:

La consigne, traduisant l'objectif désiré du procédé, est constante et les grandeurs perturbatrices influencent fortement la grandeur à maîtriser [LEG 17].

II.4.1.2 Grandeur réglée:

Grandeur que l'on veut réguler. Elle donne son nom à la régulation par exemple : régulation de vitesse.

II.4.1.3 Grandeur réglant:

Celle qui permet de régler la grandeur réglée, c'est celle qui est modulée par l'actionneur.

II.4.1.4 Grandeurs perturbatrices :

C'est celle qui gêne le réglage.

II.4.1.5 L'organe de réglage :

Est l'élément qui agit sur la grandeur réglant [BEN12].

II.4.2 Objectif de la régulation automatique :

L'objectif d'une régulation ou d'un asservissement automatique d'un procédé est de le maintenir le plus près possible de son fonctionnement optimum, qui a été prédéfini ultérieurement par

Chap. II : Stabilité de réseau électrique

un cahier des charges (conditions ou performances imposées). Aussi il faut impérativement prendre en compte les aspects de protection du personnel, des installations techniques et le respect de l'environnement. Le cahier des charges définit les critères qualitatifs à imposer qui sont traduits le plus souvent par des critères quantitatifs, comme par exemple, la stabilité, la précision et la rapidité [LEG 17].

II.4.3 Caractéristiques dynamiques d'un procédé :

II.4.3.1 Temps de réponse (T_r) :

Est une mesure de la performance d'une application interactive. Il peut être défini comme le temps qui s'écoule entre la fin d'une demande adressée à un ordinateur et le début de la réponse¹. C'est une notion qui comporte des aspects techniques mais aussi des aspects liés à l'ergonomie de l'interface entre l'utilisateur et le système.

II.4.3.2 Temps de montée (T_m) :

Le temps de montée est l'intervalle de temps séparant les instants auxquels la réponse indicielle vaut 10% et 90% de la valeur finale.

II.4.3.3 Dépassement (D):

Le premier dépassement permet de qualifier la stabilité d'un système. Plus celui-ci sera important, plus le système sera proche de l'instabilité. Dans certaines régulations, aucun dépassement n'est toléré, dans d'autre un dépassement inférieur à 15 % est considéré comme acceptable. Dans la réponse indicielle ci-dessous, le premier dépassement est de 14% [JSI 05].

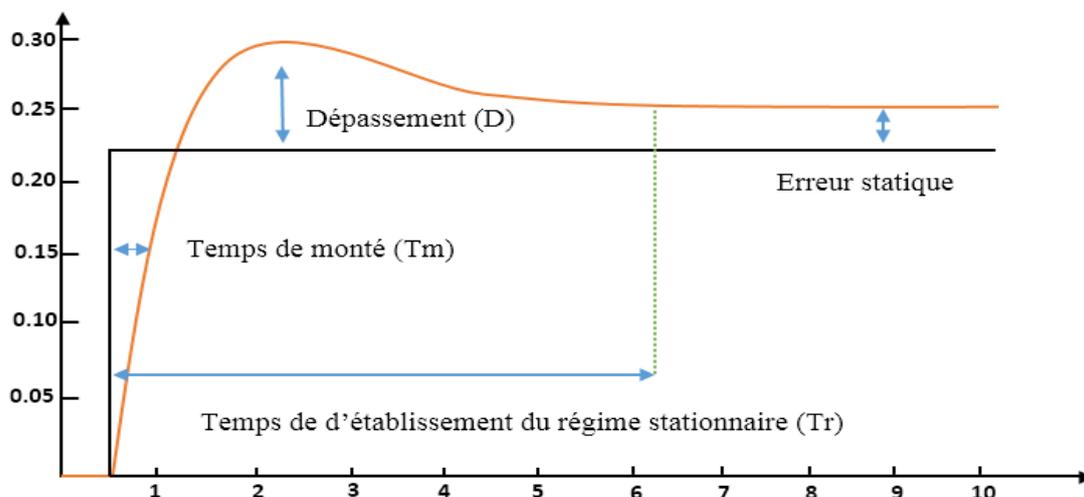


Figure II.6 : Représentation de (T_m , T_r , D)

II.5 Stabilisateur PSS:

II.5.1 Fonctionnement et modèle de PSS :

Les PSS sont des contrôleurs ajoutés à la boucle de régulation de l'excitation des alternateurs. Ils détectent toute variation dans la vitesse pour générer un signal amortisseur qui se traduit par un couple d'amortissement sur l'arbre du générateur figure II.7.

La structure du stabilisateur de puissance est une structure classique qui consiste en un gain, un filtre passe-haut et un ou plusieurs blocs de compensation de phase. Ces Stabilisateurs de puissance sont un moyen efficace et économique d'amélioration de la stabilité dynamique d'un système électrique. Un choix adéquat des paramètres des PSS engendre un bon amortissement des oscillations induites par les perturbations et améliore la stabilité de l'ensemble du système

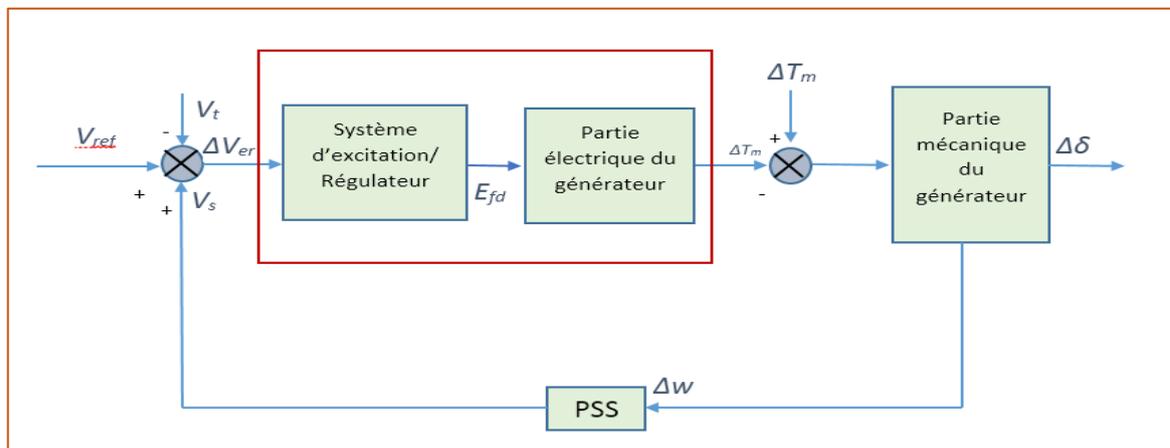


Figure II.7 : Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système

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.8):

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

Chap. II : Stabilité de réseau électrique

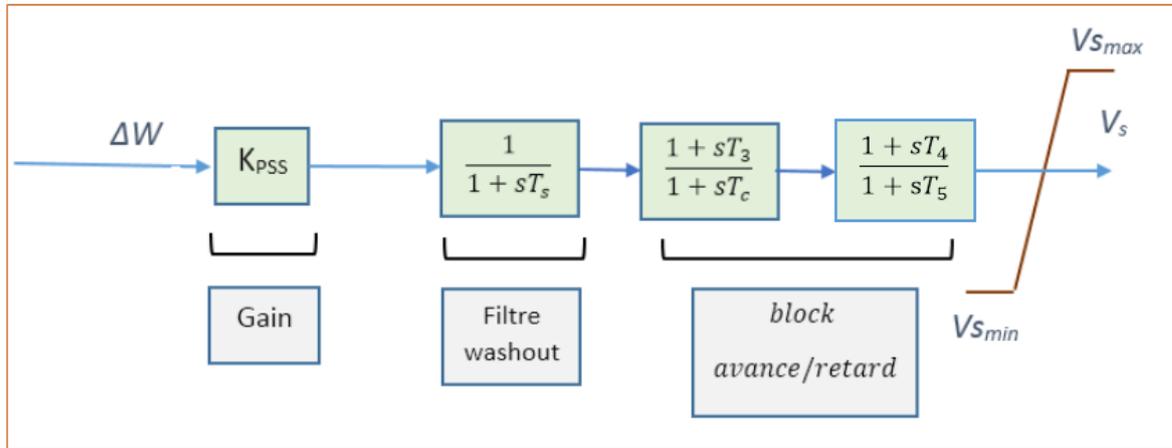


Figure II.8 : Modèle d'un PSS avance/retard

II.5.2 Différents blocs de PSS :

II.5.2.1 L'amplificateur :

Il détermine la valeur de l'amortissement introduit par le PSS. Théoriquement, sa valeur (K_{PSS}) doit correspondre à l'amortissement maximal. Toutefois, la valeur du gain doit satisfaire l'amortissement des modes dominants du système sans risquer de dégrader la stabilité des autres modes ou la stabilité transitoire [KUN 89]. Généralement, (K_{PSS}) varie généralement de 0.01 à 50 [DJA 13].

II.5.2.2 Filtre passe-haut "filtre washout" :

Il élimine les oscillations à très basse fréquence (inférieure à 0.2 Hz) présentées dans le signal d'entrée. Il supprime également la composante continue de la vitesse (la composante "DC" correspondant au régime statique) : le PSS ne réagit donc que lorsqu'il y a des variations de vitesse. La constante de temps de ce filtre (TW) doit être suffisamment grande pour permettre aux signaux, dont la fréquence est située dans la bande utile, d'être transmis sans atténuation. Mais, elle ne doit pas être trop grande pour éviter de mener à des variations indésirables de tension de générateur pendant les conditions d'îlotage. Généralement, TW varie de 1 à 20 secondes [Bas05] ; IEE. Une amélioration remarquable sur la stabilité de la première oscillation est obtenue avec une valeur TW fixée à 10 secondes [Pal05].

II.5.2.3 Filtre compensation de phase :

L'origine de l'amortissement négatif est, comme nous l'avons vu, associée au retard de phase introduit entre le couple électrique du générateur (ΔT_e) et l'entrée du système d'excitation (ΔV_e).

Chap. II : Stabilité de réseau électrique

Par conséquent, le PSS fournit l'avance de phase nécessaire pour compenser le retard de phase de la fonction de transfert $GEP(s)$ figure II.9 représenté un modèle d'un système (un seul machine-jeu de barre infini) :

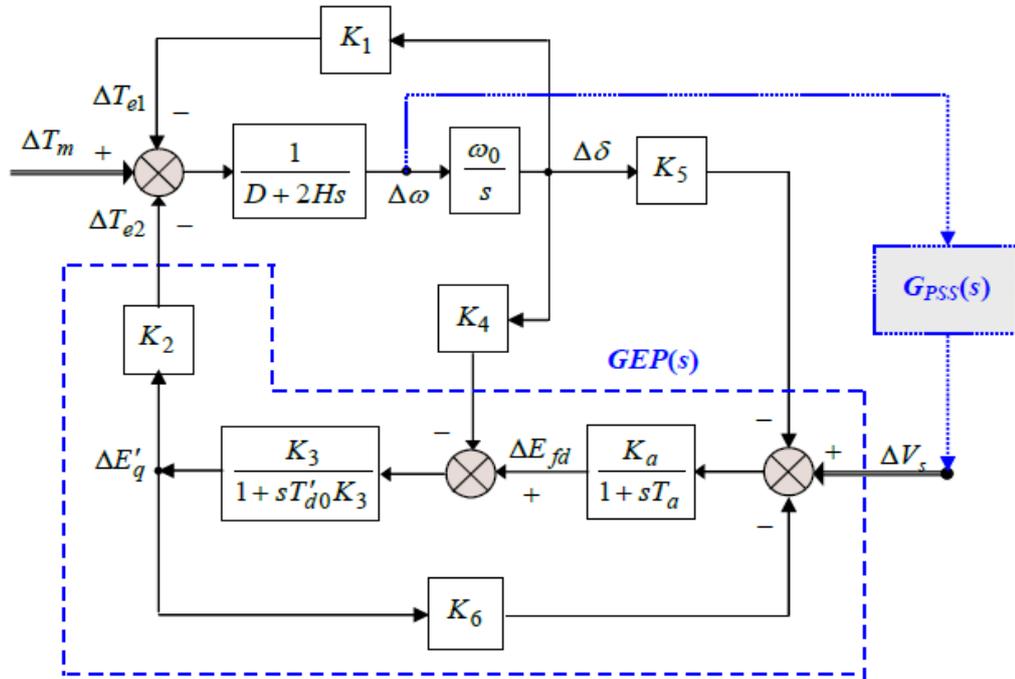


Figure II.9 : Modèle d'un système (un seul machine-jeu de barre infini)

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 (T_1, T_3) et de retard (T_2, T_4) étant réglables. La gamme de chaque constante de temps s'étend généralement de 0.01 à 6 secondes [Bas05]. Mais pour des considérations de réalisation physique, les constantes de temps de retard (T_2, T_4) sont considérées fixes et généralement autour de la valeur de 0.05 secondes [FLE 81].

II.6 Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une façon générale une analyse fine sur la stabilité du réseau électrique à la présence des petites perturbations et on a présenté également les différents types de la stabilité et on utilise le stabilisateur pour améliorer la stabilité, Afin calculé les paramètres de Pss on utilise l'algorithme SSA.

Chapitre III :

Optimisation par les essaims des salpes (SSA)

III.1 Introduction

La technique d'optimisation a été établie dans de nombreux domaines, tels que l'exploration de données, les applications de l'engineering, l'énergie, les réseaux, l'économie et la médecine. Elle est principalement utilisée pour trouver plusieurs décisions sur des variables ou valeurs optimales pour générer une solution candidate qui peut résoudre le problème efficacement. Le but principal de la prise de décision est de déterminer la valeur optimale de plusieurs alternatives disponibles. L'optimisation est devenue une discipline incontournable du monde moderne dans lequel nous vivons, car celui-ci est sujet à une compétition internationale excessive et croissante. Dans ce chapitre, nous définissons le concept d'optimisation, sa formulation mathématique, les méthodes de résolution et une nouvelle méthode d'optimisation récemment développée appelée l'algorithme des essaims de salpes.

III.2 Définition de l'optimisation :

L'optimisation est définie par la recherche dans un espace de solutions d'une solution optimale quantifiée par une fonction objectif appelée aussi fonction cout. Cette quantification conduit à vouloir maximiser ou minimiser la fonction objective. Les algorithmes d'optimisation ont été développés pratiquement sur plusieurs problèmes techniques, économiques et industriels. Ainsi, l'optimisation entre en jeu dans beaucoup de domaines scientifiques : conception de moteurs Electriques, changement d'orbite d'un satellite, météo, biologie-mathématique, génie des procédés chimiques... .

III.3 Méthodologie de conception :

L'optimisation est souvent réduite aux techniques de résolution mathématiques auxquelles sont attribués par la suite les échecs rencontrés. Or, comme pour la plupart des problèmes à résoudre, l'optimisation doit faire l'objet d'une démarche systématique qui comporte quatre phases récapitulées dans la Figure III.1. Les phases peuvent s'enchaîner séquentiellement mais les itérations et les retours sont bien souvent indispensables [KET 14].

Chap. III : Optimisation par les essaims des Salpes (SSA)

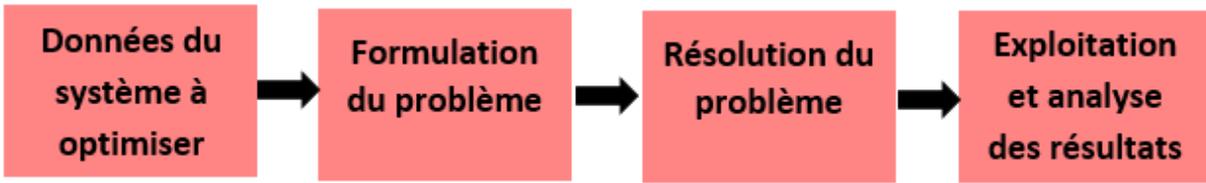


Figure III.1: Démarches de résolution d'un problème d'optimisation

III.4 Formulation du problème d'optimisation :

La formulation du problème d'optimisation est une étape fondamentale dans le processus de conception. Elle n'est pas facile à aborder car le choix des variables de conception n'est jamais unique et les moyens de calcul actuels ne peuvent en gérer qu'un nombre limité. Le problème de conception, décrit par le cahier des charges, doit être formulé en un problème mathématique équivalent qui est basé sur les éléments suivants [KET14] :

- La fonction objective.
- Les paramètres de conception (variables de décision).
- Les éventuelles contraintes liées à la fabrication ou à l'utilisation du dispositif exprimées dans le cahier des charges.
- Les contraintes ajoutées par le concepteur.

III.4.1 Formulation mathématique d'un problème d'optimisation :

La résolution d'un problème d'optimisation consiste à obtenir une solution qui maximise ou minimise un objectif particulier. Dans certains cas, l'optimum découvert n'est pas unique, et peut être un ensemble de solutions minimisant ou maximisant l'objectif étudié. Formellement un problème d'optimisation est formulé comme suit :

$$\text{Max ou Min } F(x) \quad (\text{III.1})$$

Tel que : $x \in X$

$$\left\{ \begin{array}{l} g_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, p \\ h_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \dots, q \\ x = [x_1 \dots x_n]^T \end{array} \right. \quad (\text{III.2})$$

Chap. III : Optimisation par les essaims des Salpes (SSA)

x : est un vecteur de n variables de décisions.

$g(x)$ et $h(x)$ sont respectivement les p contraintes d'égalité et q contraintes d'inégalité qui déterminent le domaine X des solutions.

X : représente le domaine réalisable.

L'ensemble de contraintes doit vérifier la solution optimale. Pour transformer un problème de minimisation en un problème de maximisation, il suffit de multiplier la fonction objective par (-1) .

III.4.2 Résolution d'un problème d'optimisation

III.4.2.1 Méthodes d'optimisation :

III.4.2.1.1 Méthodes d'optimisation exactes :

Ces méthodes sont basées soit sur une résolution algorithmique ou analytique, soit sur une énumération exhaustive de toutes les solutions possibles. Elles s'appliquent donc aux problèmes qui peuvent être résolus de façon optimale et rapidement, nous rappelons parmi ces méthodes : méthode de Gradient réduit [PGC82] et la méthode de Newton [PEG81].

III.4.2.1.2 Les méthodes approchées :

Les méta-heuristiques sont un ensemble d'algorithmes d'optimisation approchées visant à résoudre les problèmes d'optimisation difficiles. Elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (cas du recuit simulé), en biologie de l'évolution (cas des algorithmes génétiques) ou encore en éthologie (cas des algorithmes de colonies de fourmis ou de l'optimisation par essaims particulaires). Dans la section qui suit, on essaiera de donner un bref aperçu sur les méthodes méta-heuristiques de base les plus populaires [RBE07].

a)- Les Algorithmes Génétiques (AGs) :

L'algorithme génétique (AG) est un algorithme de recherche basé sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique [HOL75]. Il combine une stratégie de (survie des plus forts) avec un échange d'information aléatoire mais structuré. Pour un problème pour lequel une solution est inconnue, un ensemble de solutions possibles est créé aléatoirement. On appelle cet ensemble

Chap. III : Optimisation par les essaims des Salpes (SSA)

la population. Les caractéristiques (ou variables à déterminer) sont alors utilisées dans des séquences de gènes qui seront combinées avec d'autres gènes pour former des chromosomes et par après des individus. Chaque solution est associée à un individu, et cet individu est évalué et classifié selon sa ressemblance avec la meilleure, mais encore inconnue, solution au problème. Il peut être démontré qu'en utilisant un processus de sélection naturelle inspiré de Darwin, cette méthode convergera graduellement à une solution.

b)- Méthode de l'optimisation par essaim de particules (PSO) :

L'optimisation d'essaim de particules PSO est une technique stochastique basée sur la population d'optimisation développée par Dr. Eberhart et Dr. Kennedy en 1995, inspiré par le comportement social des oiseaux qui s'assemblent ou le banc de poissons. Ses deux concepteurs, cherchaient à modéliser des interactions sociales entre des « agents » devant atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun, chaque agent ayant une certaine capacité de mémorisation et de traitement de l'information. La règle de base était qu'il ne devait y avoir aucun chef d'orchestre, ni même aucune connaissance par les agents de l'ensemble des informations, seulement des connaissances locales. Un modèle simple fut alors élaboré.

III.4.3 Avantages des méthodes méta-heuristiques

- Les méta-heuristiques sont des stratégies permettant de guider la recherche à une solution optimale.
- Le but visé par la méta-heuristique est d'explorer l'espace de recherche efficacement afin de déterminer des solutions (presque) optimales.
- Les techniques qui constituent des algorithmes de type méta-heuristique vont de la simple procédure de recherche locale à des processus d'apprentissage complexes.
- Les méta-heuristiques sont en général non-déterministes et ne donnent aucune garantie d'optimalité.
- Les méta-heuristiques peuvent contenir des mécanismes qui permettent d'éviter d'être bloqué dans des régions de l'espace de recherche.

Chap. III : Optimisation par les essaims des Salpes (SSA)

- Les concepts de base des méta-heuristiques peuvent être décrits de manière abstraite, sans faire appel à un problème spécifique.
- Les méta-heuristiques peuvent faire appel à des heuristiques qui tiennent compte de la spécificité du problème traité, mais ces heuristiques sont contrôlées par une stratégie de niveau supérieur.
- Les méta-heuristiques peuvent faire usage de l'expérience accumulée durant la recherche de l'optimum, pour mieux guider la suite du processus de recherche.

III.5 Inspiration de la méthode d'optimisation des essaims de salpes :

Plus de 1,2 million d'espèces d'organismes marins déjà catalogués dans une base de données centrale [MCC15]. La plupart de ces espèces ont les mêmes comportements et caractéristiques, tels que les méthodes de communication, les performances locomotrices et la recherche de aliments. La salpe est une sorte d'organisme marin qui appartient à la famille des Silphidés. Sa forme est très similaire à celle des méduses, forme cylindrique avec des ouvertures à l'extrémité pour pomper de l'eau à travers leurs corps gélatineux, se déplacer et se nourrir par des filtres d'alimentation internes. La figure III.2(a) montre la forme d'une salpe. Comme il est mentionné ci-dessus, les organismes marins partagent certains comportements tels que les comportements d'essaimage. Par exemple, pour le poisson, on l'appelle le banc de poissons [SHE16] tandis que pour les salpes on l'appelle chaîne de salpes (voir Figure III. 2(b)). Bien que leurs milieux de vie soient extrêmement difficiles d'accès, les chercheurs pensent que ce comportement aide les salpes pour améliorer la locomotion et la recherche de nourriture.

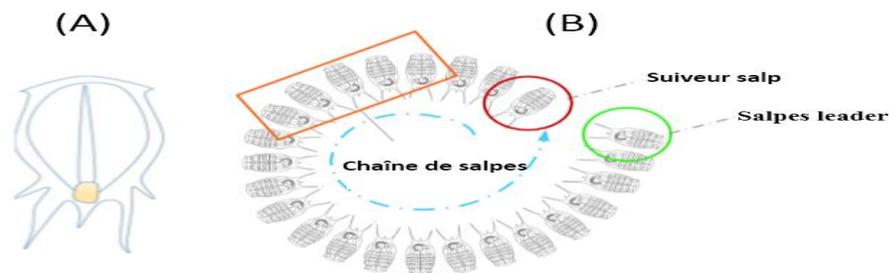


Figure. III.2 : (a) Salpe individuel, (b) essaim de salpes (chaîne salpêtre).

III.6 Modèle mathématique proposé pour l'optimisation par la méthode des essaims de salpes :

La population est d'abord divisée en deux groupes : leader et suiveurs. Le leader est la salpe à l'avant de la chaîne, tandis que le reste des salpes sont considérés comme des suiveurs. Comme l'indique le nom de ces salpes, le leader guide l'essaim et les suiveurs se suivent (et dirigent directement et indirectement).

De même que pour d'autres techniques basées sur des essaims, la position des salpes est définie dans un espace de recherche à une dimension où nombre variables d'un problème donné. Par conséquent, la position de tous les salpes est stockée dans une matrice bidimensionnelle appelée x . On suppose également qu'il existe une source de nourriture appelée F dans l'espace de recherche en tant que cible de l'essaim.

Pour mettre à jour la position du leader, l'équation suivante est proposée:

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1 ((ub_j - lb_j)c_2 + lb_j) c_3 \geq 0 \\ F_j - c_1 ((ub_j - lb_j)c_2 + lb_j) c_3 < 0 \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Où x_1^i est la position de la première salpe dans la $i^{\text{ème}}$ dimension et F_j est la position de l'aliment dans la $i^{\text{ème}}$ dimension lb_j et ub_j représentent respectivement la borne inférieure et la borne supérieure de la $i^{\text{ème}}$ dimension, et le coefficient c_1 est calculé par équation (III. 2) c_2 et c_3 sont des nombres aléatoires entre 0 et 1.

$$c_1 = 2e^{-\left(\frac{4l}{L}\right)^2} \quad (\text{III.4})$$

Où L est le nombre maximal des itérations et l est l'itération courante. Il est à noter que le coefficient c_1 est très important pour l'algorithme SSA, car il équilibre l'exploration et l'exploitation pendant tout le processus de recherche. Concernant les suiveuses, équation (III.3) montre la mise à jour de leurs positions:

$$x_j^i = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t \quad (\text{III.5})$$

Chap. III : Optimisation par les essais des Salpes (SSA)

Ou $i \geq 2$, x_j^1 montre la position de la i -th salpe suiveur pour le temps t , v_0 est la vitesse initiale et $a = \frac{v_{final}}{v_0}$ où $v = \frac{X-X_0}{t}$. Comme le temps d'optimisation est l'itération, l'écart entre les itérations est égal à 1, et en considérant $v_0 = 0$, cette équation peut être exprimée comme suit:

$$x_j^i = \frac{1}{2}(x_j^i + x_j^{i-1}) \quad (\text{III.6})$$

Ou $i \geq 2$ et x_j^1 montre la position du i -th salpe suiveuse dans la j -th dimension.

III.7 Simulation d'essaim

Afin de voir les effets du modèle mathématique proposé ci-dessus, vingt salpes sont placées au hasard sur un espace de recherche avec des sources d'aliments fixes ou mobiles. La position des chaînes de salpe et l'historique de chaque salpe sont dessinés sur les Fig. III.3 et Fig. III.4, notez que le point bleu dans les figures montre la position de la source de nourriture et le cercle rempli le plus foncé est la salpe principale. Les salpes suiveuses sont colorées en gris en fonction de leur position dans la chaîne des salpes.

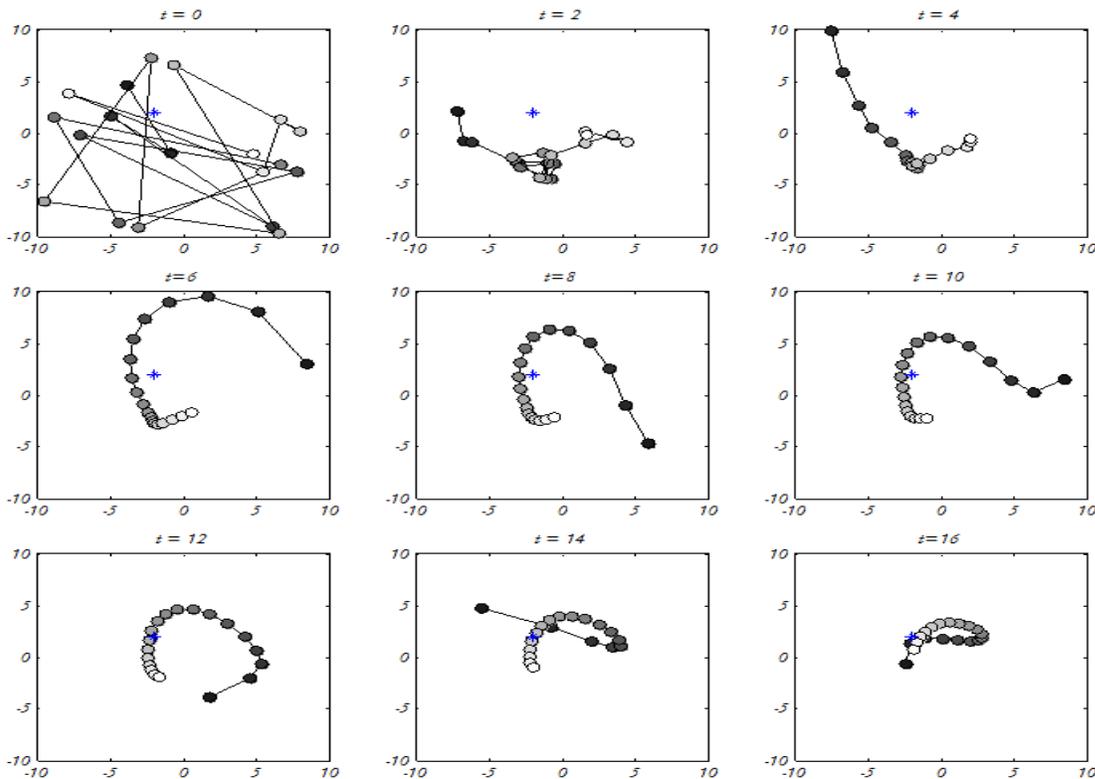


Figure III.3 : Faire glisser le mouvement de la chaîne autour d'une source fixe de nourriture dans un espace

Chap. III : Optimisation par les essais des Salpes (SSA)

L'observation du comportement de la chaîne des salpes sur neuf itérations consécutives est sur les Fig. III.3 et Fig. III.4, on peut observer que l'essaim peut être formé et déplacé en utilisant l'équation proposée de manière efficace juste après la première itération. En outre, on peut voir que la salpe principale change sa position autour de la source de nourriture et que les salpes suivent progressivement au cours des itérations. Le même modèle a été utilisé pour les deux simulations et les mérites du modèle proposé dans les deux espaces 2D et 3D sont évidents sur les Fig. III. 3 et III.4.

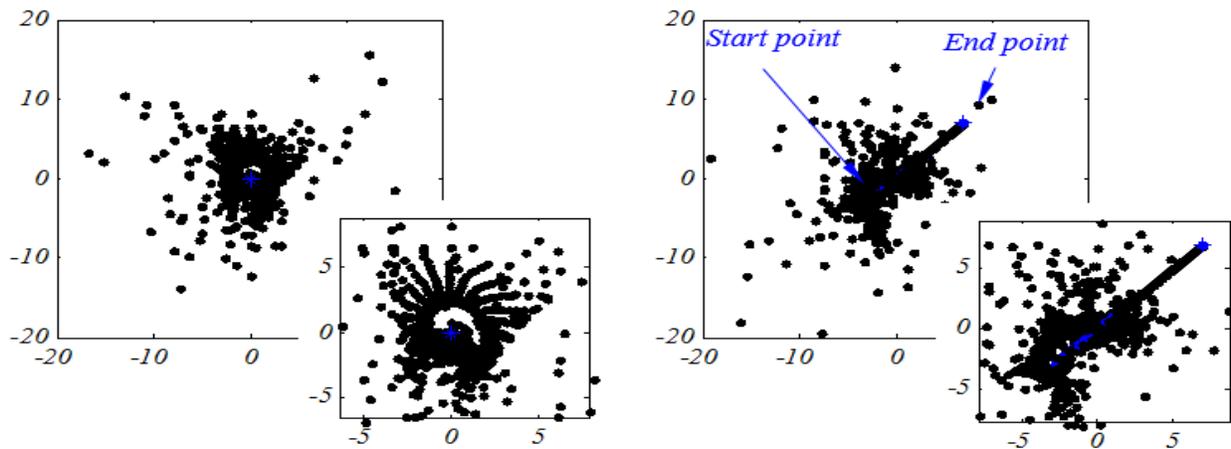


Figure. III.4. Rechercher l'historique des sources de nourriture stationnaires et mobiles dans un espace 2D après 100 itérations.

Les figures III.5 et III.6 montrent l'historique de position des salpes autour d'une source de nourriture stationnaire et mobile dans l'espace 2D et 3D après 100 itérations. Les points recherchés autour de la source de nourriture fixe montrent que les salpes se déplacent effectivement autour de l'espace de recherche. La distribution des points est raisonnable et montre que le modèle proposé est capable d'explorer et d'exploiter l'espace autour de la source de nourriture stationnaire. De plus, les Fig.III.5et III.6 montrent que le modèle mathématique proposé nécessite des salpes dans la chaîne salpe pour chasser une source de nourriture en mouvement. La distribution des points recherchés autour du point de départ est supérieure au point final. Ceci est dû au paramètre C_1 qui contrôle l'exploration et l'exploitation. Ces découvertes prouvent que le modèle de mouvement de

Chap. III : Optimisation par les essaims des Salpes (SSA)

la chaîne de salpe est capable d'explorer et d'exploiter l'espace autour des sources de nourriture stationnaires et mobiles.

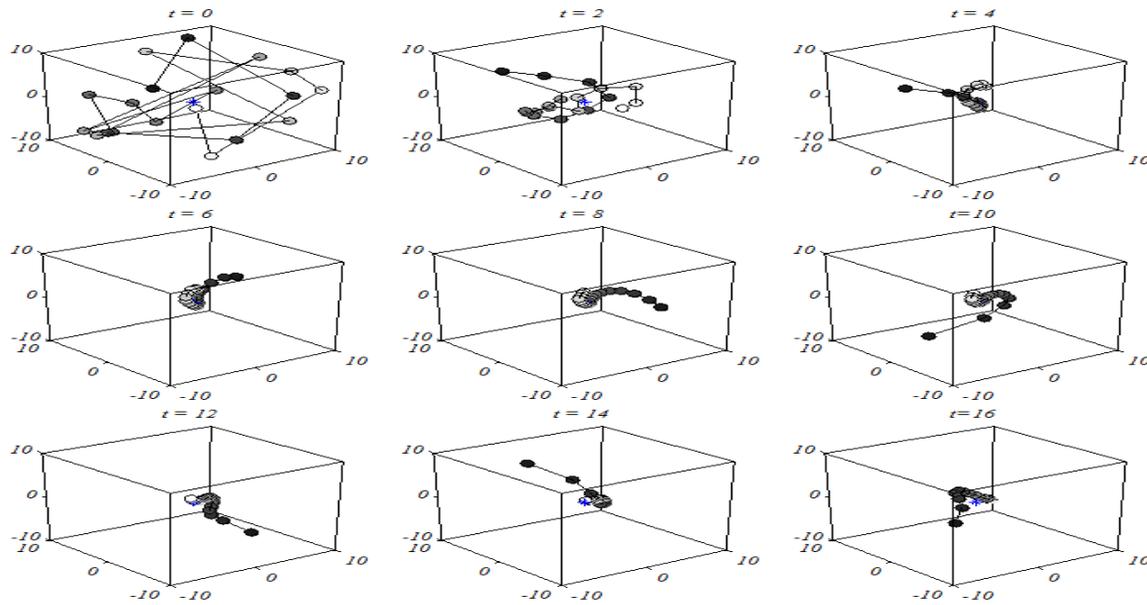


Figure. III.5 : Faire glisser le mouvement de la chaîne autour d'une source fixe de nourriture dans un espace 3D.

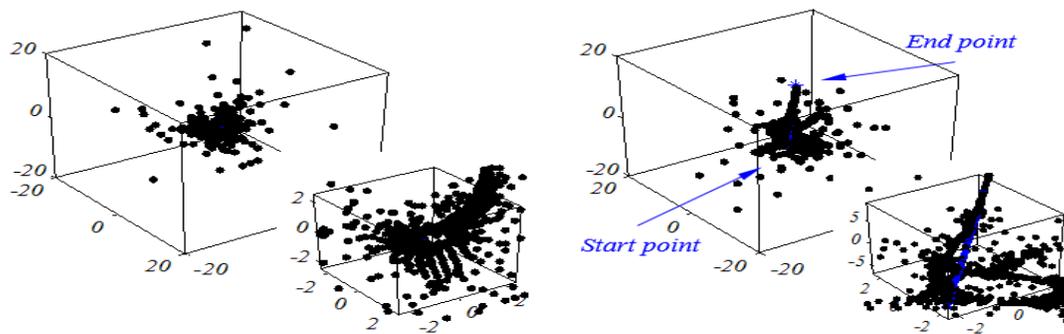


Figure. III.6 : Rechercher l'historique des sources de nourriture stationnaires et mobiles dans un espace 3D après 100 itérations.

III.8 L'algorithme d'optimisation de SSA

Etape 01 : initialisation du problème et des paramètres de réglage

Introduire les paramètres réglables de SSA qui sont :

- Taille de la population de salpes (N)

Chap. III : Optimisation par les essais des Salpes (SSA)

- Le nombre maximal des itérations (*iter_max*)

Etape 02 : Générer une population de salpes

N salpes sont placées au hasard dans un espace de recherche de d -dimension comme des membres de l'essaim, chaque salpe représente une solution réalisable, et d est le nombre de variables de décision.

Etape 03 : Calculer la valeur fitness de chaque salpe (fonction objective)

Pour chaque salpe, la valeur fitness est calculée, en introduisant les valeurs relatives aux variables dans la fonction objective.

Etape 04 : Déterminer le meilleur agent (salpe)

Trouver la salpe avec la meilleure position (source de nourriture) et assigner la position de la meilleure salpe à la fonction objective comme source de nourriture à chasser par la chaîne de salpes.

Etape 05 : Mise à jour la constante C_1

Pour l'itération courante, le coefficient C_1 est mis à jour en utilisant l'équation (III.4).

Etape 06 : mettre à jour la position des salpes leader

Pour chaque variable, la position de la salpe en tête (leader) est mise à jour en utilisant l'équation (III.3)

Etape 07 : mettre à jour la position des salpes suiveurs

La position des salpes suiveurs sont mises à jour en utilisant l'équation. (III.6)

Etape 08 : limitation des variables de décision

Si l'une des variables dépasse les limites, il sera fixé à la limite correspondante

Etape 09 : mettre à jour le meilleur agent trouvé

Identifier le meilleur agent et comparer le avec le meilleur agent courant (considéré comme une source de nourriture)

Etape 10 : vérifier le critère d'arrêt

Les étapes 3-7 sont exécutées d'une manière itérative jusqu'à la satisfaction d'un critère de fin (jusqu'à *iter_max*) et dans ce cas la meilleure position de salpe (correspondant à la meilleure fonction objective) est considérée comme la solution optimale du problème d'optimisation.

Chap. III : Optimisation par les essaims des Salpes (SSA)

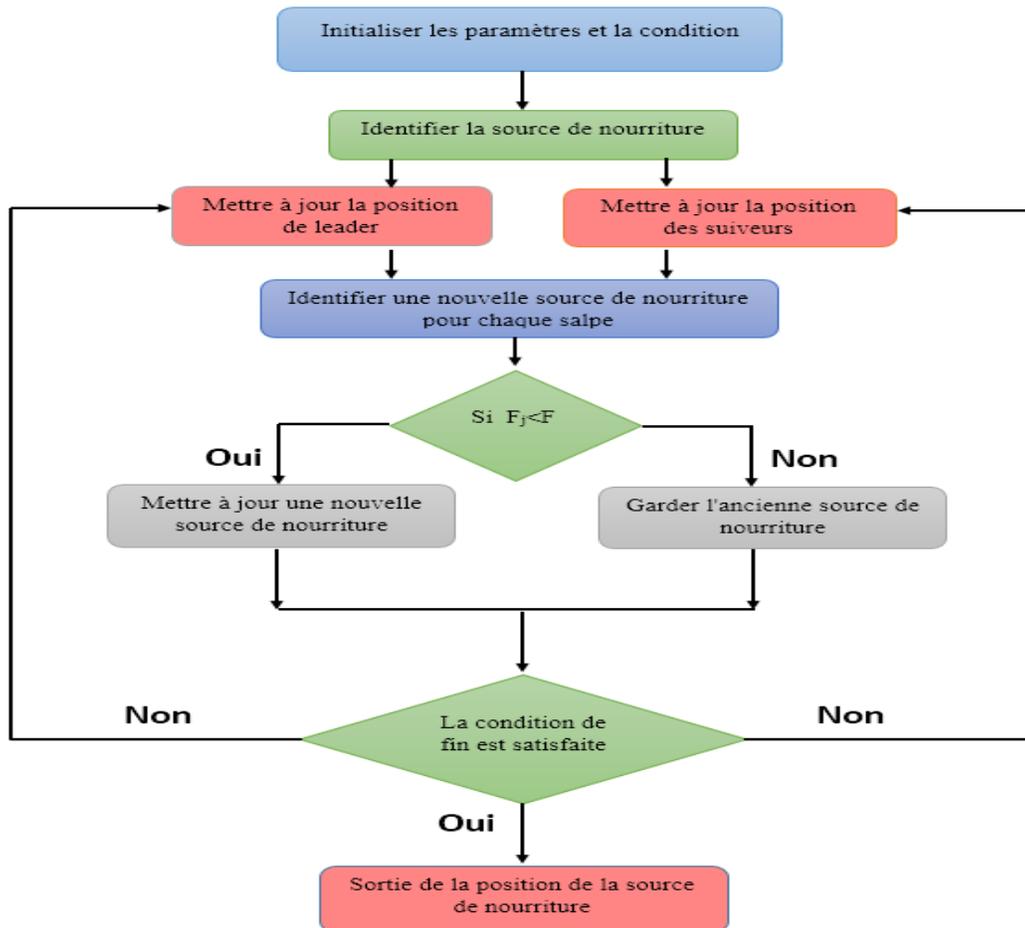


Figure III.7 : Organigramme de l’algorithme SSA

III.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l’algorithme d’essaim des salpes (SSA), cette technique a été inspirée par le comportement d’un essaim des salpes qui est divisé en deux groupes (salpe leader et les salpes suiveurs). Mathématiquement, cette méthode basée sur la mise à jour de la position des salpes. La simulation des essaims dans les espaces 2D et 3D a montré que les modèles proposés sont capables de rechercher autour des sources de nourriture de façon stationnaires et mobiles de sorte que la principale source de nourriture à chasser par la chaîne de salpes est considérée comme la meilleure solution obtenue et les autres caractères pour cette méthode ont été abordés profondément dans ce chapitre.

Chapitre IV :

**Application de PSS pour
améliorer la stabilité**

IV.1 Introduction :

Les réseaux d'énergie électrique sont soumis à des perturbations qui peuvent dans certains cas conduire à la perte de la stabilité et par conséquent les blackouts. La réduction des taux d'oscillation des grandeurs électriques (pendant la perturbation) qui ont un rapport direct avec la stabilité devient une nécessité pour rétablir un état de fonctionnement stable. Par conséquent, on s'intéresse aux différents dispositifs de réglage pour améliorer la stabilité des réseaux électriques et plus particulièrement le stabilisateur de réseau électrique (Power System Stabilizer PSS) décrit d'une façon détaillée dans le chapitre II.

Dans ce travail, nous allons étudier l'effet des principales perturbations sur les variables du système énergétique en rapport direct avec la stabilité transitoire et introduire un PSS pour l'améliorer. Comme nous allons valider par simulation l'efficacité du stabilisateur de puissance (PSS) proposé sur un système de puissance. Ce système de puissance est constitué d'une machine synchrone liée à un jeu de barres infini à travers une ligne de transmission. On doit s'assurer que le PSS est capable d'amortir les oscillations, de rendre le système plus stable et de montrer des performances satisfaisantes en présence des perturbations diverses.

Nous avons appliqué les tests suivant :

- Analyse de système de test avec perturbation sur la tension de référence $\Delta V_{\text{réf}}$ uniquement
- Analyse de système de test avec perturbation au niveau du couple mécanique ΔT_m agissant sur la machine uniquement.
- Analyse de système de test avec perturbation au niveau de la tension de référence et le couple mécanique ($\Delta V_{\text{réf}}$ et ΔT_m).
- Amélioration de la stabilité avec PSS avec des paramètres prédéfinis.
- Amélioration de la stabilité avec PSS avec des paramètres optimisés par la méthode méta-heuristique Salp Swarm Algorithm (SSA) décrite dans le chapitre III.

IV.2 Modèle d'étude dans le MATLAB/SIMULINK :

Le modèle d'étude est présenté par une machine synchrone liée à un JB infini à travers une ligne de transmission (la résistance de la ligne est nulle $R_E = 0$). On a considéré dans ce modèle l'influence du système d'excitation et l'effet de l'AVR comme il est illustré sur la figure V.1. Pour différentes perturbations, les facteurs $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ et K_A (Gex), K_D ainsi que les constantes de temps T_3 et T_R sont calculées selon le modèle décrit dans l'annexe [KUN 94].

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

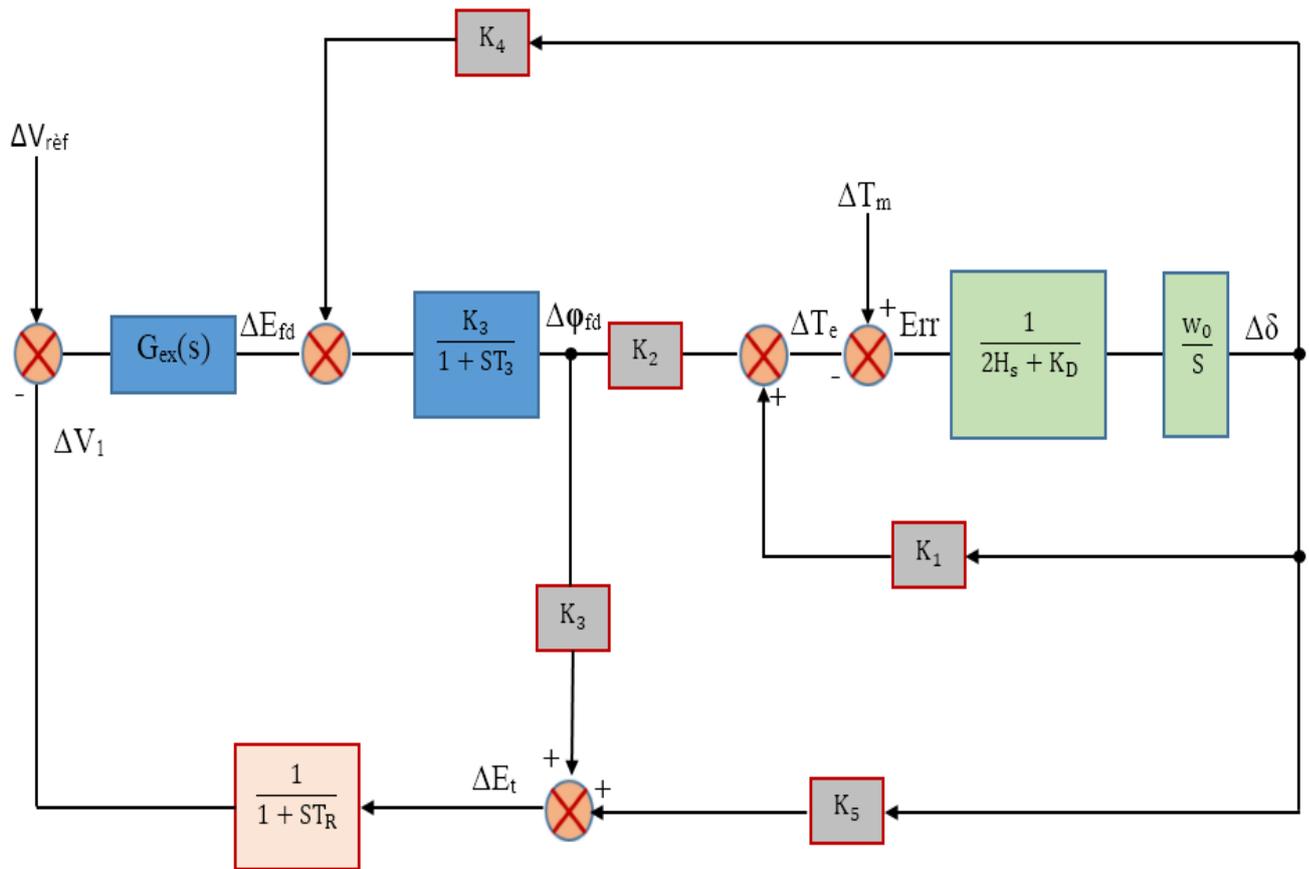


Figure IV.1 : Schéma fonctionnel d'un système d'excitation avec AVR

Le modèle de la Figure IV.1 est donné pour un régime de fonctionnement (en fonction de la puissance appelée par la charge). Les constantes de gain et de temps de ce modèle sont données numériquement sur le tableau IV.1 pour un régime de charge **P= 0.6 (p.u) et Q= 0.5 (p.u)**.

Tableau IV.1 : les valeurs des paramètres de système de puissance

K1	K2	K3	K4	K5	K6	T3
0.6904	0.5708	0.3103	0.9323	0.5933	0.7692	2.2721

IV.3 Analyse du système sans PSS :

Après la création d'une perturbation au niveau de la tension de référence $\Delta V_{r\grave{e}f}$ ou au niveau du couple mécanique ΔTm , on analyse la réponse du système selon l'évolution de variation de position angulaire ($\Delta\delta$), variation de vitesse angulaire ($\Delta\omega_r$), erreur (Err) et variation du couple électromagnétique (ΔTe). Toutes ces grandeurs présentent des oscillations selon le régime de fonctionnement.

IV.3.1 Analyse du système avec perturbation au niveau de la tension de référence ($\Delta V_{r\grave{e}f}$):

Deux grandeurs de perturbations sur la tension de référence $\Delta V_{r\grave{e}f}$, l'une est négatif l'autre est positif par comparaison avec une perturbation nulle (sans perturbation) et cela pour deux cas :

Cas 01 : $\Delta V_{r\grave{e}f}$: [-0.05 ; 0 ; 0.05] p.u

Cas 02 : $\Delta V_{r\grave{e}f}$: [-0.1 ; 0 ; 0.1] p.u

Présentation des indices de performances :

*Cas 01 : $\Delta V_{r\grave{e}f}$ [-0.05 ; 0 ; 0.05] :

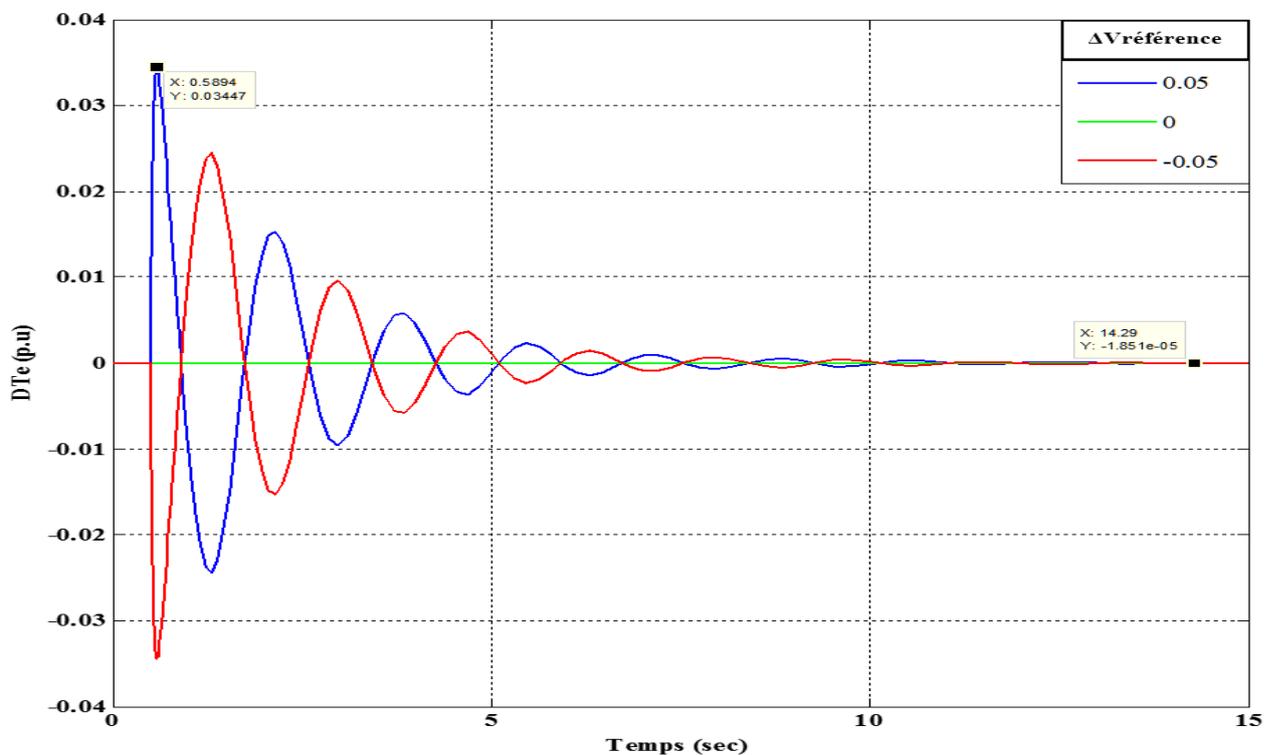


Figure IV.2 : déviation du couple électromagnétique (p.u) sans PSS

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

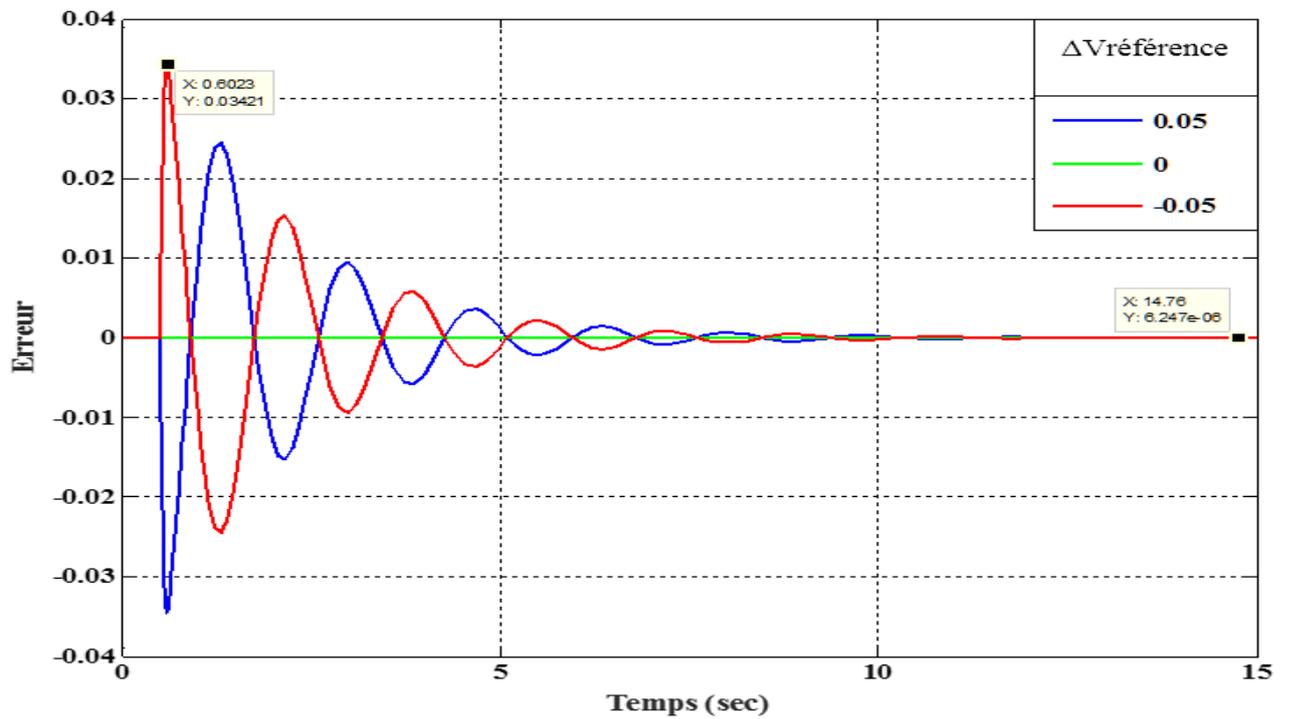


Figure IV.3 : Erreur sans PSS

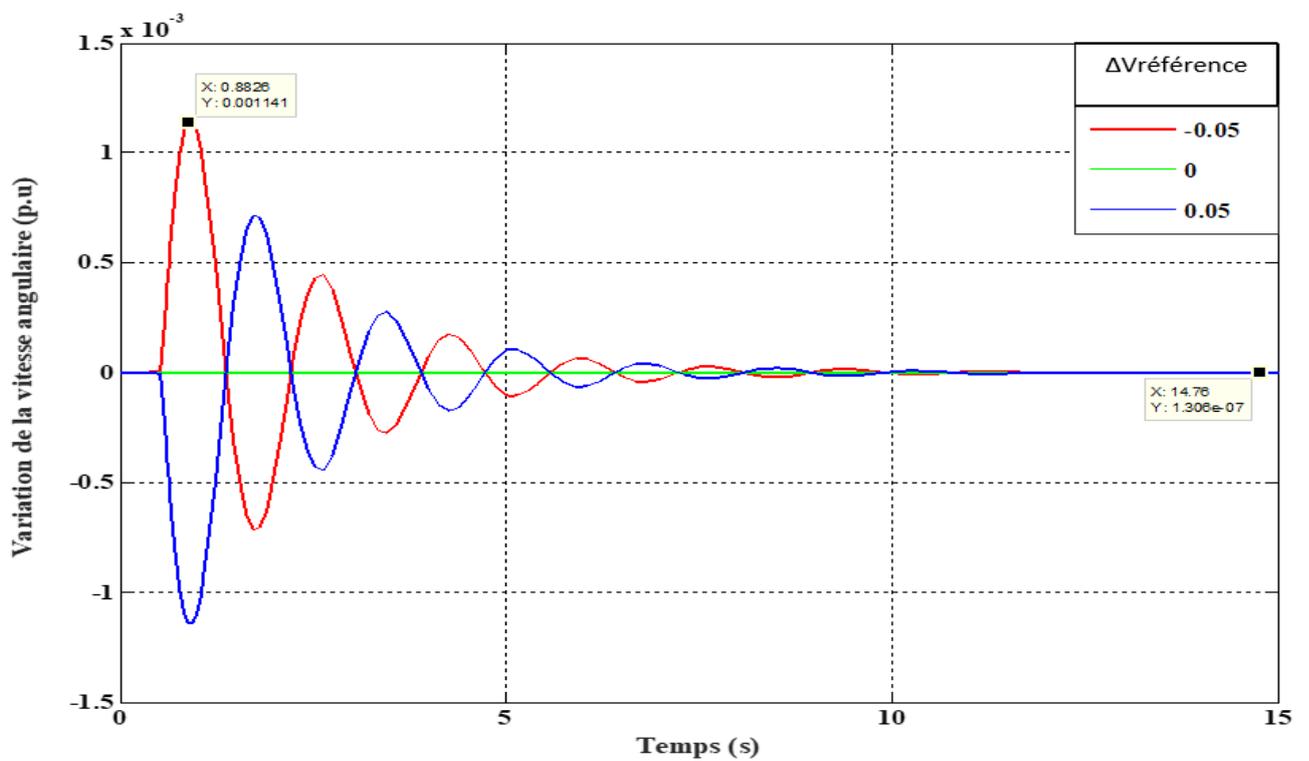


Figure IV.4 : déviation de la vitesse angulaire (p.u) sans PSS

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

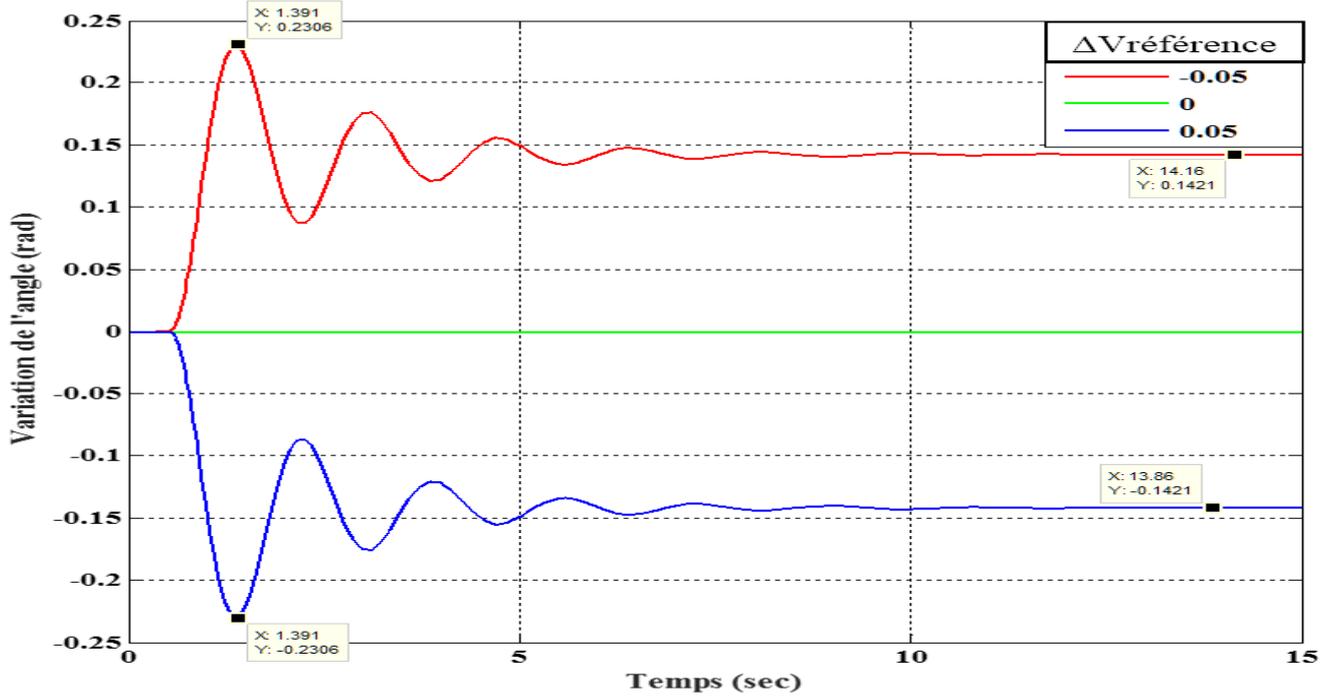


Figure IV.5 : déviation de la position angulaire (rad) sans PSS

*Cas 02 : $\Delta V_{\text{référence}}$ [-0.1 0 0.1]:

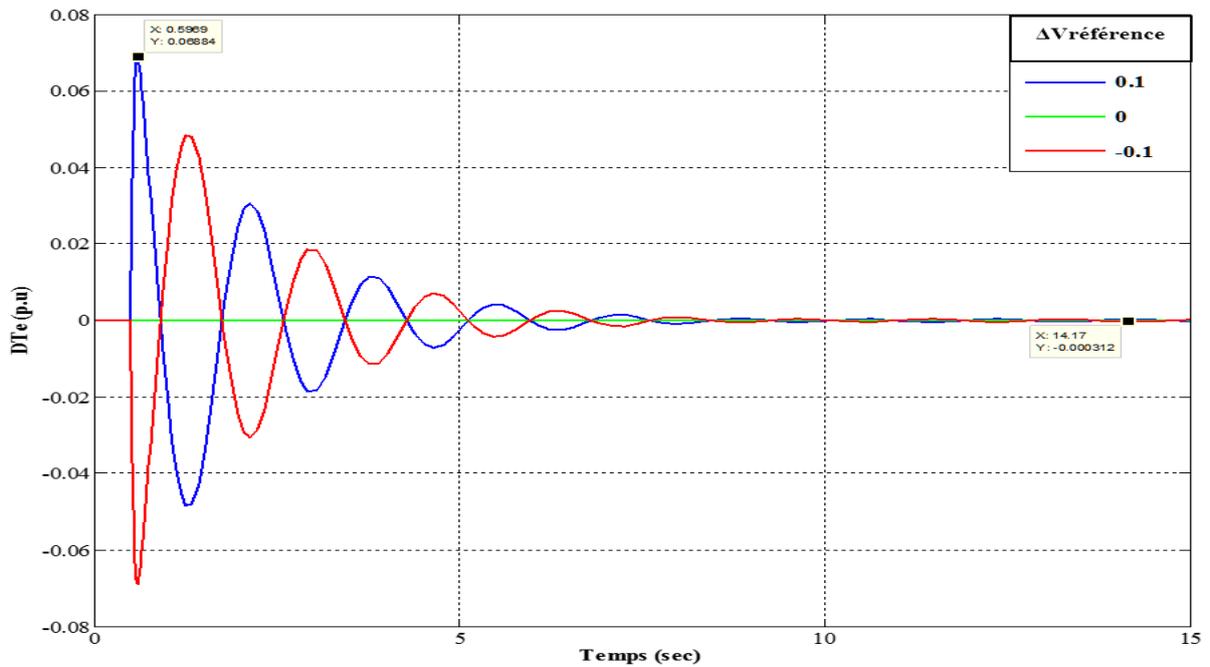


Figure IV.6 : déviation du couple électromagnétique (p.u) sans PSS

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

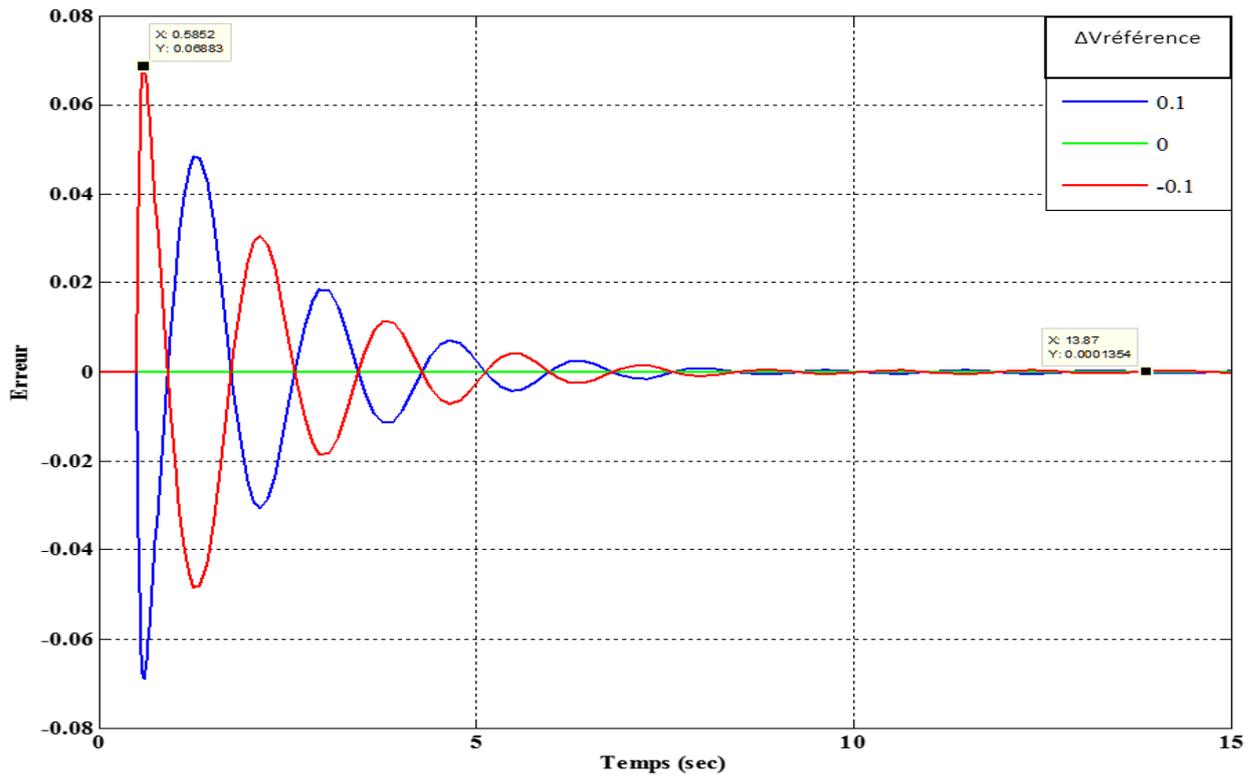


Figure IV.7 : Erreur sans PSS

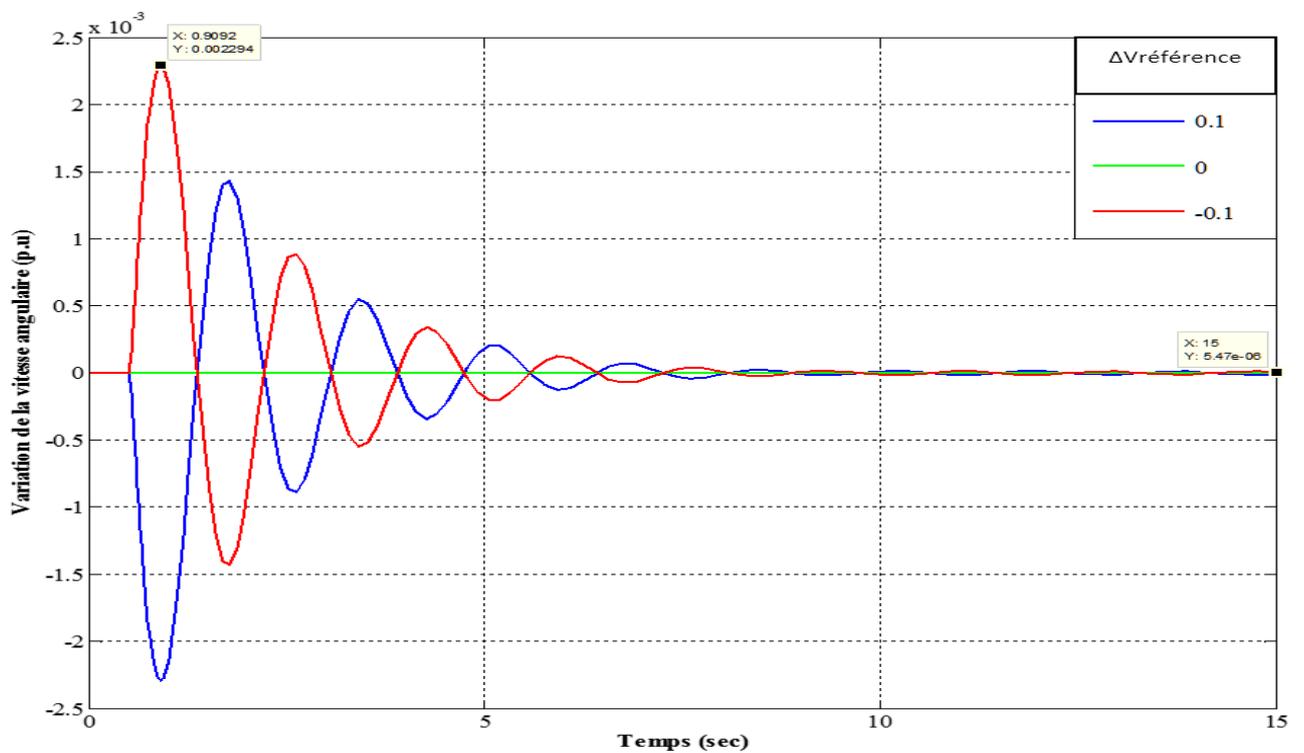


Figure IV.8 : déviation de la vitesse angulaire (p.u) sans PSS

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

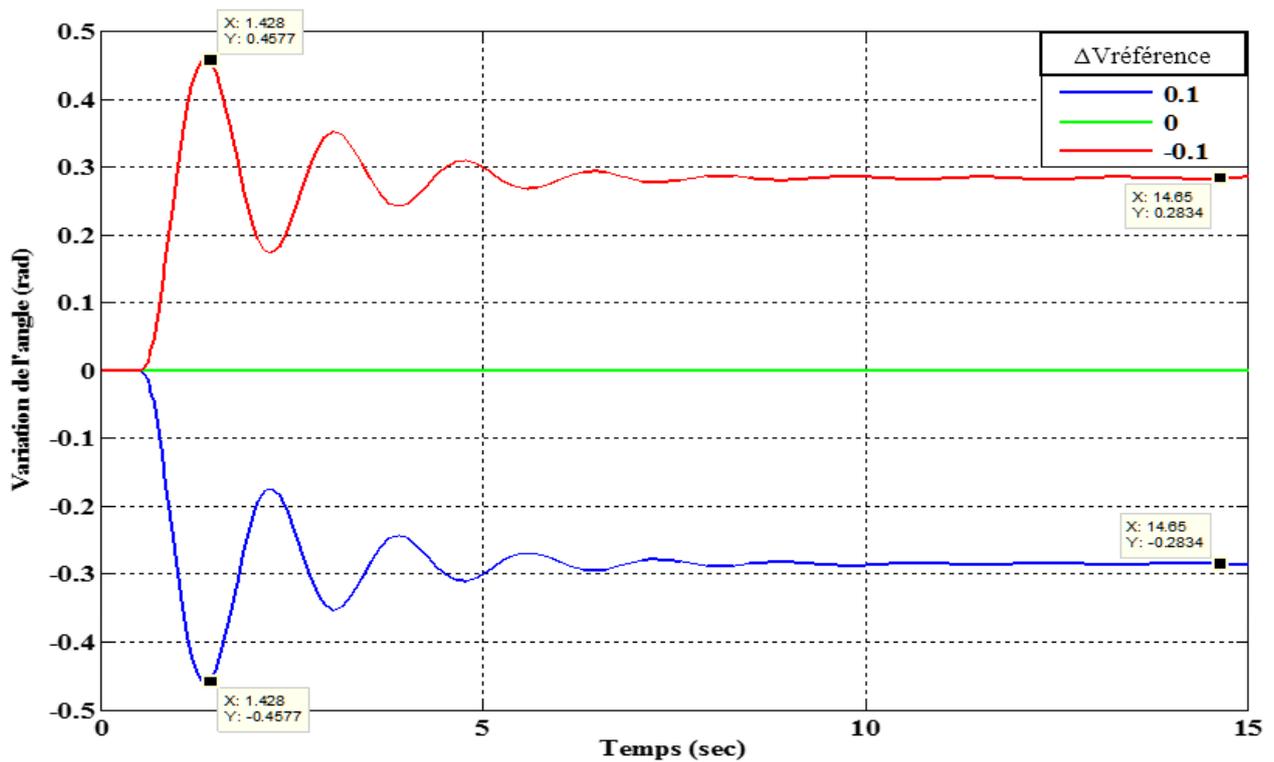


Figure IV.9 : déviation de la position angulaire (rad) sans PSS

*Interprétation :

Le dépassement de la variation du couple électromagnétique (ΔT_e) pour la perturbation du $\Delta V_{référence}$ [-0.05 ; 0 ; 0.05] a atteint une valeur de 0.0344 (pu) selon la figure (IV.2). Concernant le cas de perturbation du $\Delta V_{référence}$ [-0.1 ; 0 ; 0.1] le dépassement a atteint 0.0688 (pu) en se basant sur la figure (IV.6), on constate ainsi que la valeur du dépassement a doublé, à cause de l'augmentation de perturbation du $\Delta V_{référence}$.

Concernant les dépassements de l'Erreur illustrés sur la figure IV. 3 et la figure IV.7, il prend les mêmes valeurs du couple électromagnétique (ΔT_e) selon les figures IV.2 et IV.6, parce que l'Erreur est égale la différence entre la variation du couple électromagnétique ΔT_e et la variation du couple mécanique ΔT_m (égale à zéro).

On remarque que les grandeurs ΔT_e , Erreur et $\Delta \omega_r$ ont été stabilisé dans un régime permanent à la valeur 0. La grandeur $\Delta \delta$ a été stabilisée dans des valeurs de 0.2834 rad, 0 et -0.2834 rad respectivement pour les perturbations de $\Delta V_{référence}$ -0.1, 0 et 0.1 p.u pour assurer l'équilibre du système voire figure IV.9. Même remarques pour les perturbations [-0.05, 0 et 0.05].

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

Nous avons choisi la valeur (0 pu) dans $\Delta V_{\text{réf}}^{\text{é}}$ pour confirmer que les indices de performances ne changent pas lorsque il n'y a pas de perturbations.

On peut remarquer que la valeur du temps de réponse augmente lorsque la valeur de perturbation ($\Delta V_{\text{réf}}^{\text{é}}$) élève. Par exemple en basant la figure IV.5 et la figure IV.9 montré la différence.

IV.3.2 Analyse du système avec perturbation au niveau de la tension de référence ($\Delta V_{\text{réf}}^{\text{é}}$) et le couple mécanique (ΔT_m):

*Cas 01 : $\Delta V_{\text{réf}}^{\text{é}}$ [-0.05 0 0.05] pu et $\Delta T_m = 0.3$ pu après **07 secondes**

*Cas 02 : $\Delta V_{\text{réf}}^{\text{é}}$ [-0.1 0 0.1] pu et $\Delta T_m = 0.3$ pu après **07 secondes**

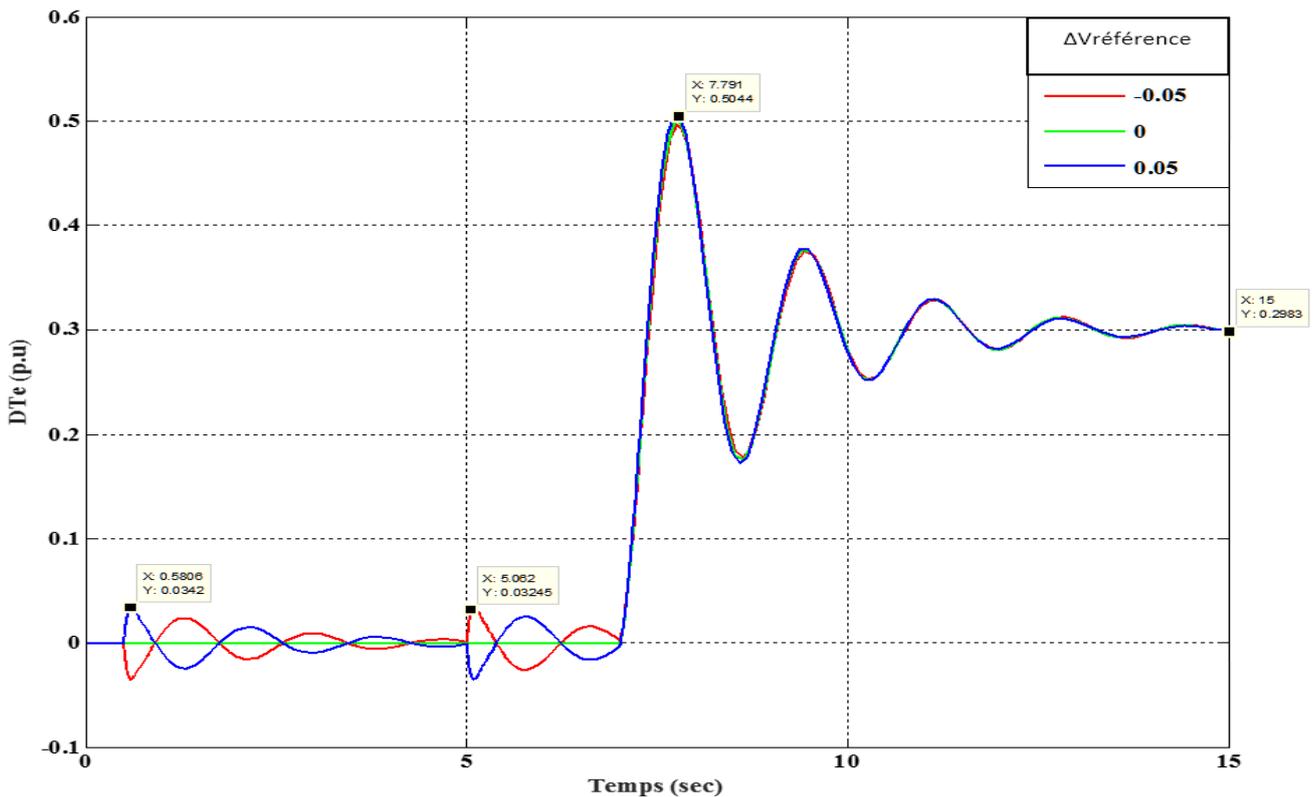


Figure IV.10 : déviation de couple électromagnétique (p.u) sans PSS

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

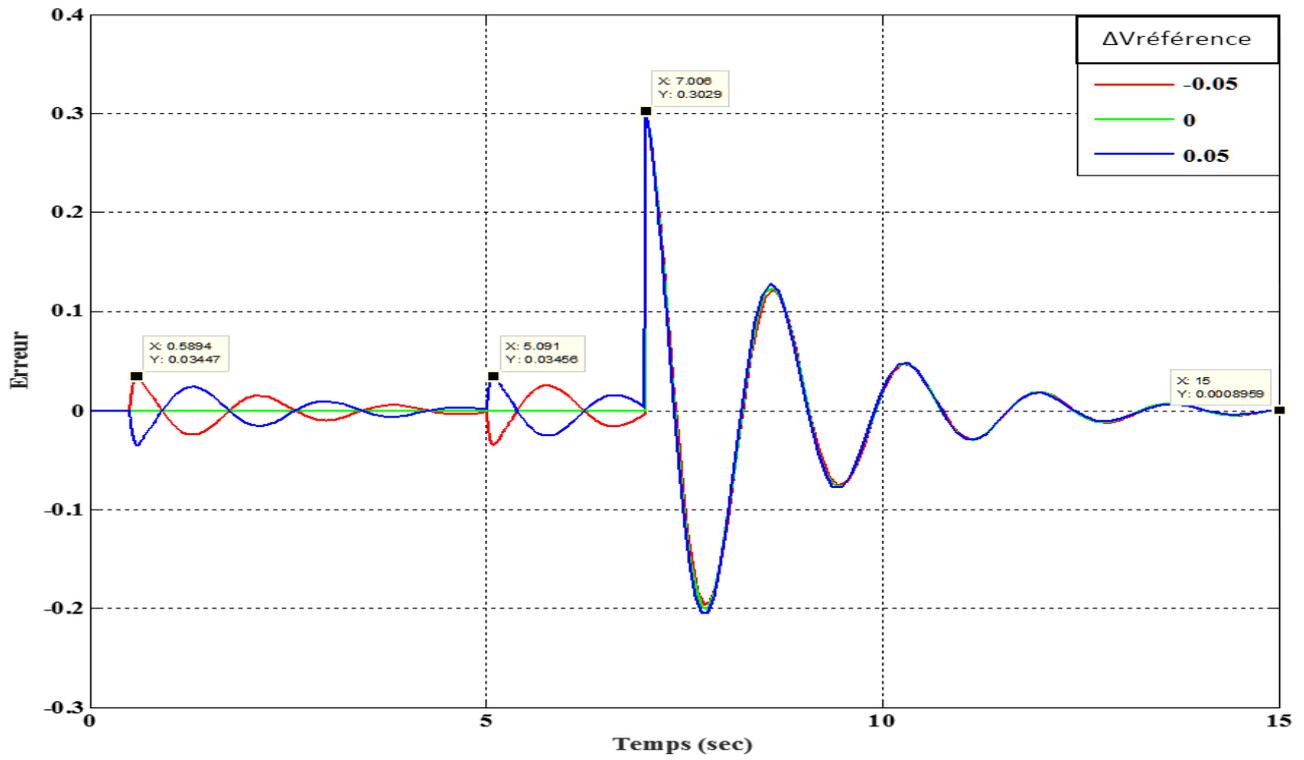


Figure IV.11 : Erreur sans PSS

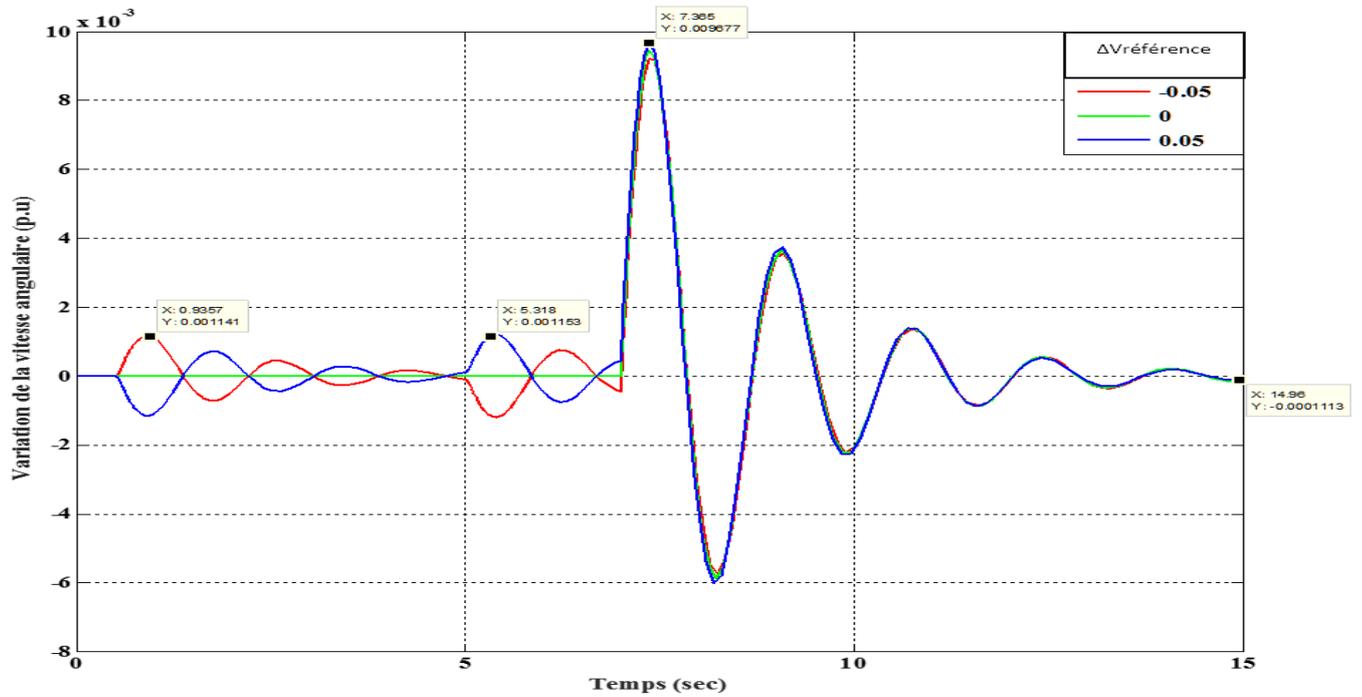


Figure IV.12 : déviation de la vitesse angulaire (p.u) sans PSS

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

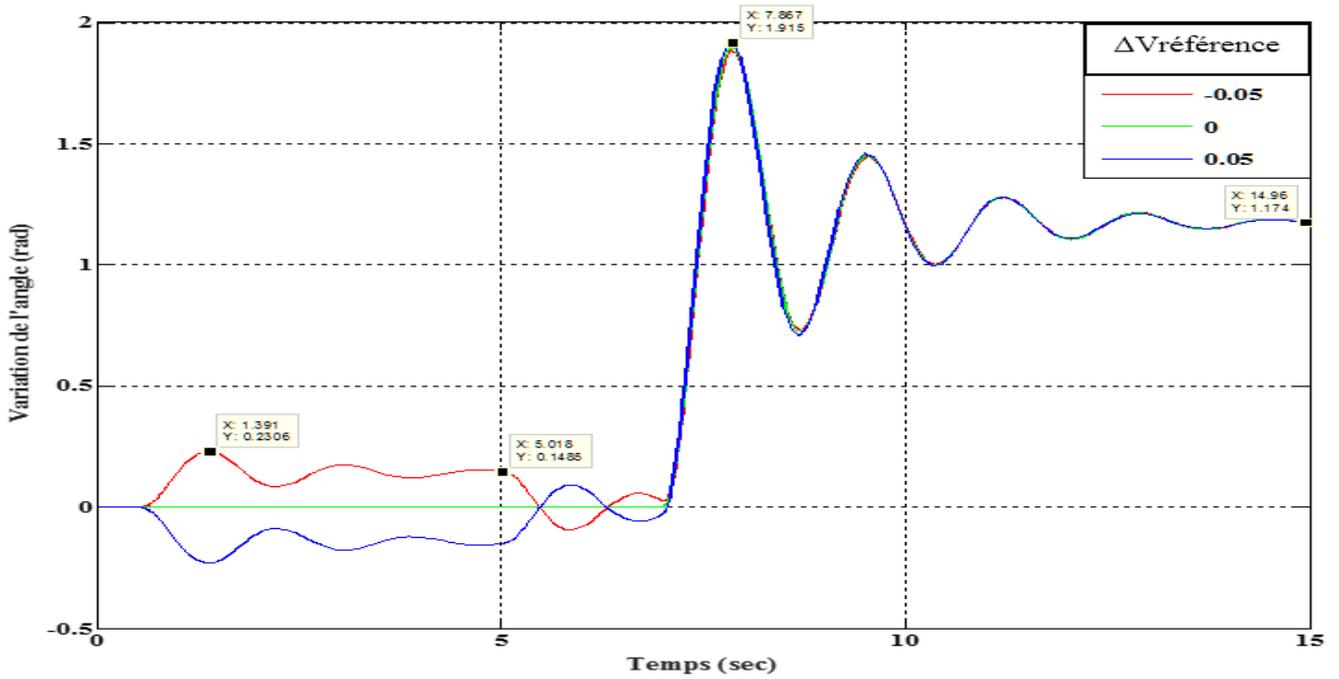


Figure IV.13 : déviation de position angulaire (rad) sans PSS

*Cas 02 : $\Delta V_{référence} \in [-0.1, 0, 0.1]$ pu ; $\Delta T_m = 0.3$ pu

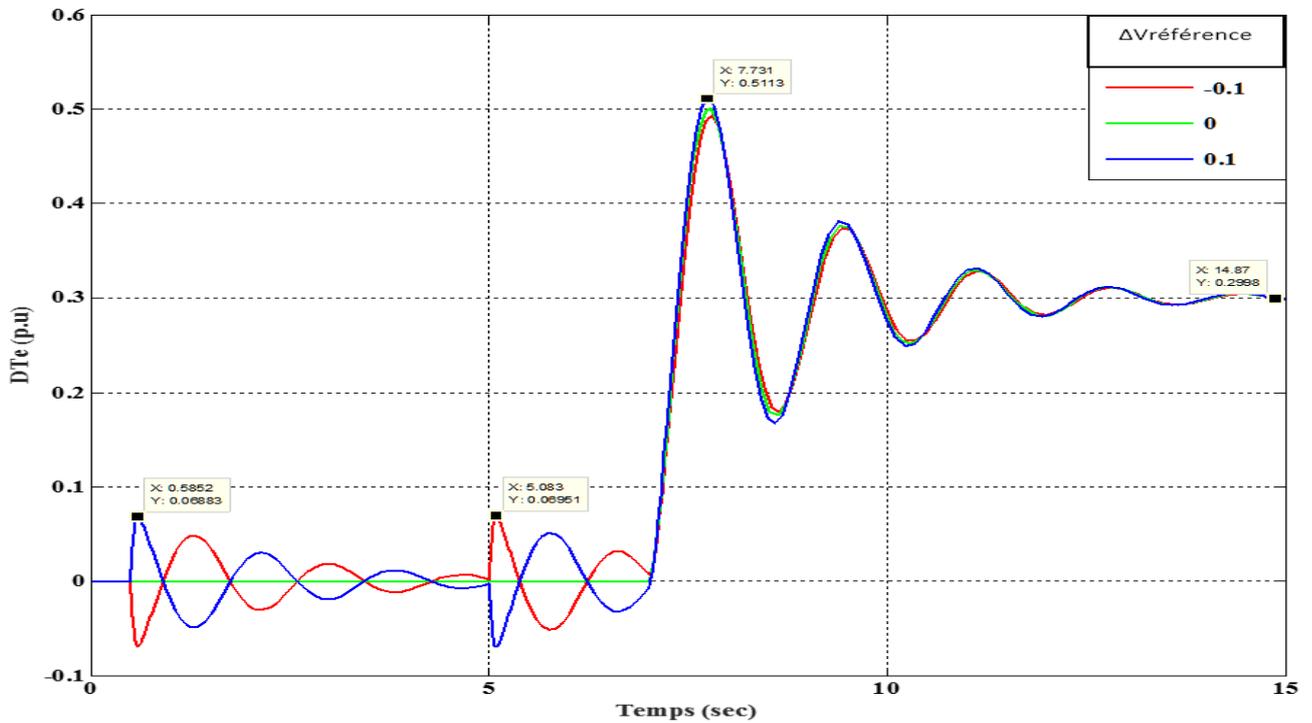


Figure IV.14 : déviation de couple électromagnétique (p.u) sans PSS

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

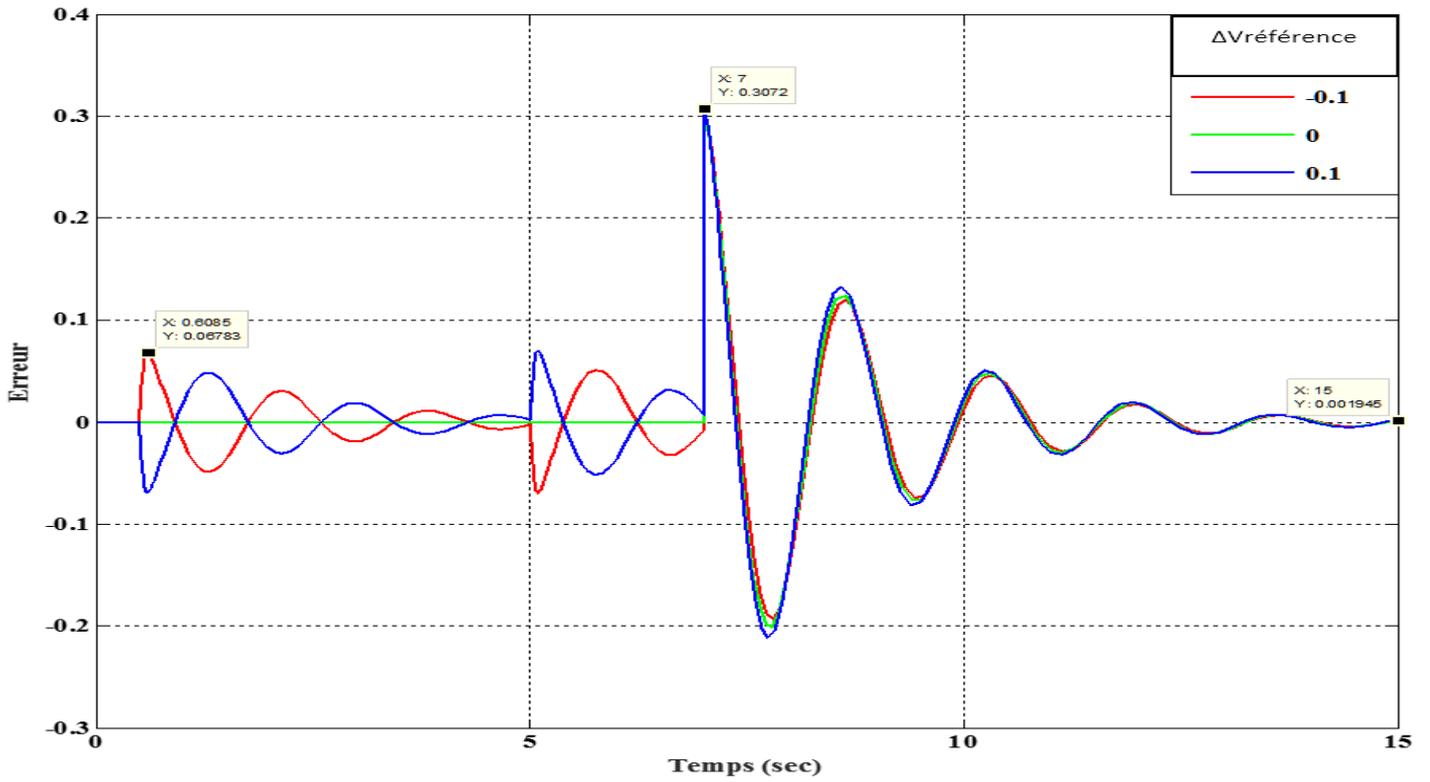


Figure IV.15 : Erreur sans PSS

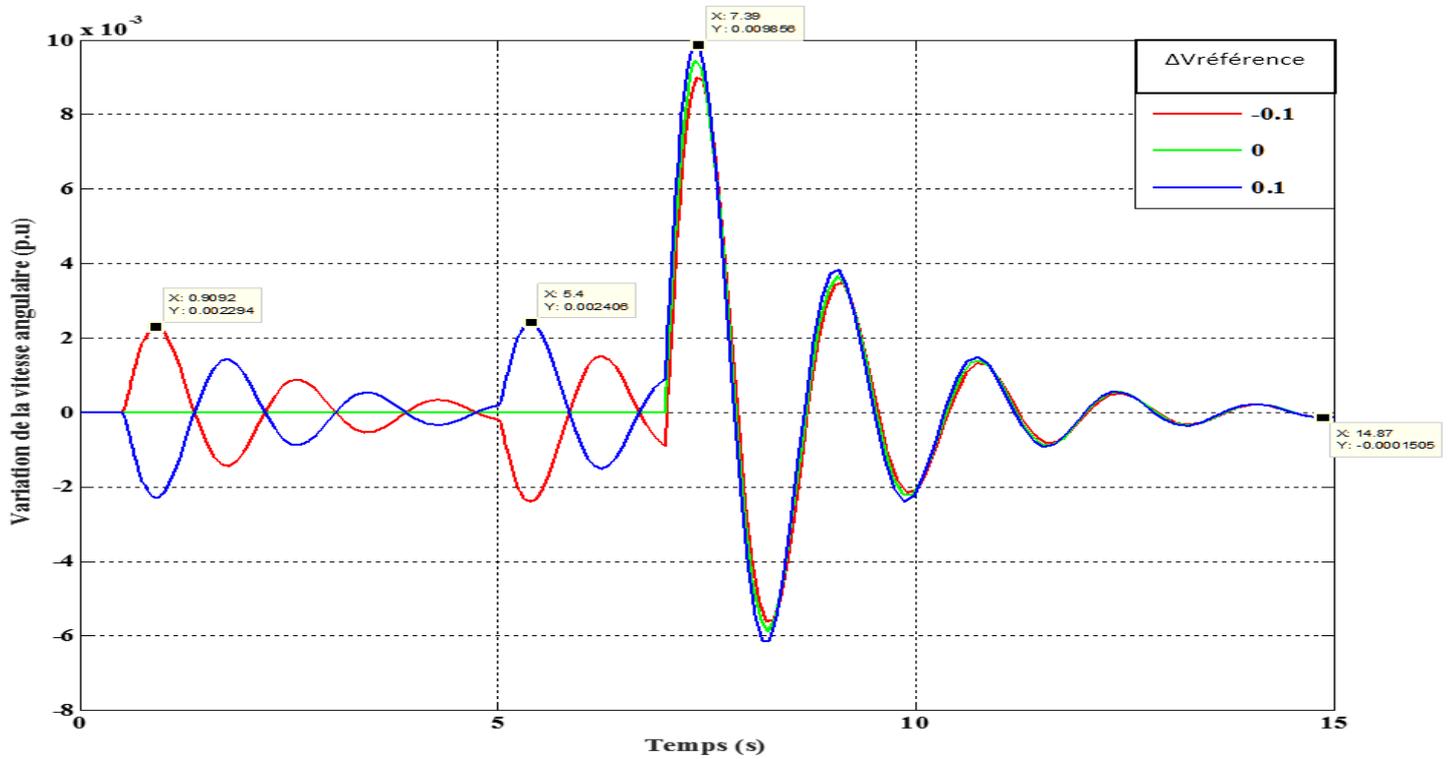


Figure IV.16 : déviation de la vitesse angulaire (p.u) sans PSS

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

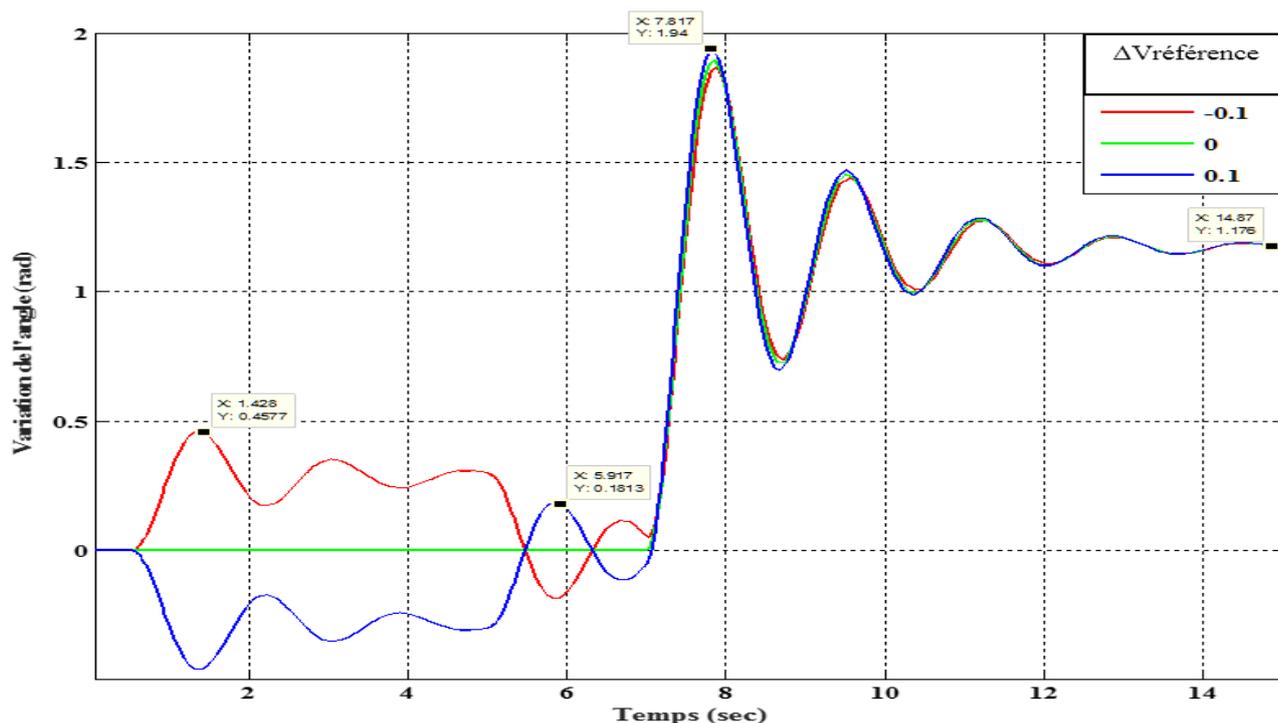


Figure IV.17 : déviation de position angulaire (rad) sans PSS

*Interprétation des résultats obtenus :

On applique une perturbation au niveau de $\Delta V_{référence}$ dans l'intervalle [0.2s 5s] et une perturbation mécanique ΔT_m dans l'intervalle [7s 15s]. Pour montrer l'effet de chaque perturbation.

L'effet de la perturbation mécanique sur tous les indices de performance est plus fort que la perturbation $\Delta V_{référence}$ en basant sur les figures IV. 10, IV. 11, IV. 12, IV. 13, IV. 14, IV. 15, IV 16 et IV. 17.

Concernant la variation du couple électromagnétique (ΔT_e) est stabilisé en régime permanent à une valeur de 0.3 (pu) qui assure l'équilibre du système parce que ΔT_m égale 0.3 (pu) en basant sur les figures IV. 10 et IV. 14.

On s'aperçoit que le couple électromagnétique prend le même signe de $\Delta V_{référence}$ par contre les indices Erreur, $\Delta \omega_r$ et $\Delta \delta$ prennent un signe contraire.

Le temps de réponse de tous les indices de performance ΔT_e , $\Delta \omega_r$ et $\Delta \delta$ selon les figures IV.10, IV.12, IV.13, IV.14, IV.16 et IV. 17), lorsque la perturbation au niveau de couple mécanique (ΔT_m) est plus lente que celle sous l'effet de la perturbation $\Delta V_{référence}$. Sauf le temps de réponse de l'Erreur qui est très rapide voire les figures IV. 11 et IV.15.

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

IV.4.1 Amélioration avec PSS perturbation au niveau de (ΔT_m) :

On crée une perturbation de couple mécanique ($\Delta T_m=0.2$ p.u) et ($\Delta V_{ref}=0$ p.u)

On décrit les caractéristiques du système énergétique en utilisant des paramètres par défaut de PSS, puis on utilise des paramètres optimisés. Ces paramètres sont obtenus par l'algorithme de SSA. Une étude comparative est réalisée en vue de décrire l'importance du PSS dans l'amélioration des performances du modèle d'étude.

Tableau IV.3 : Paramètres de PSS par défaut et optimisé

	T1 (sec)	T2 (sec)	T3 (sec)	T4 (sec)	Tw (sec)	Kp
Paramètre par défaut	0.2823	0.9892	0.2479	0.1010	0.2001	100
Paramètre optimisé	0.61019	0.10000	0.48070	0.45170	2.32535	47.80064

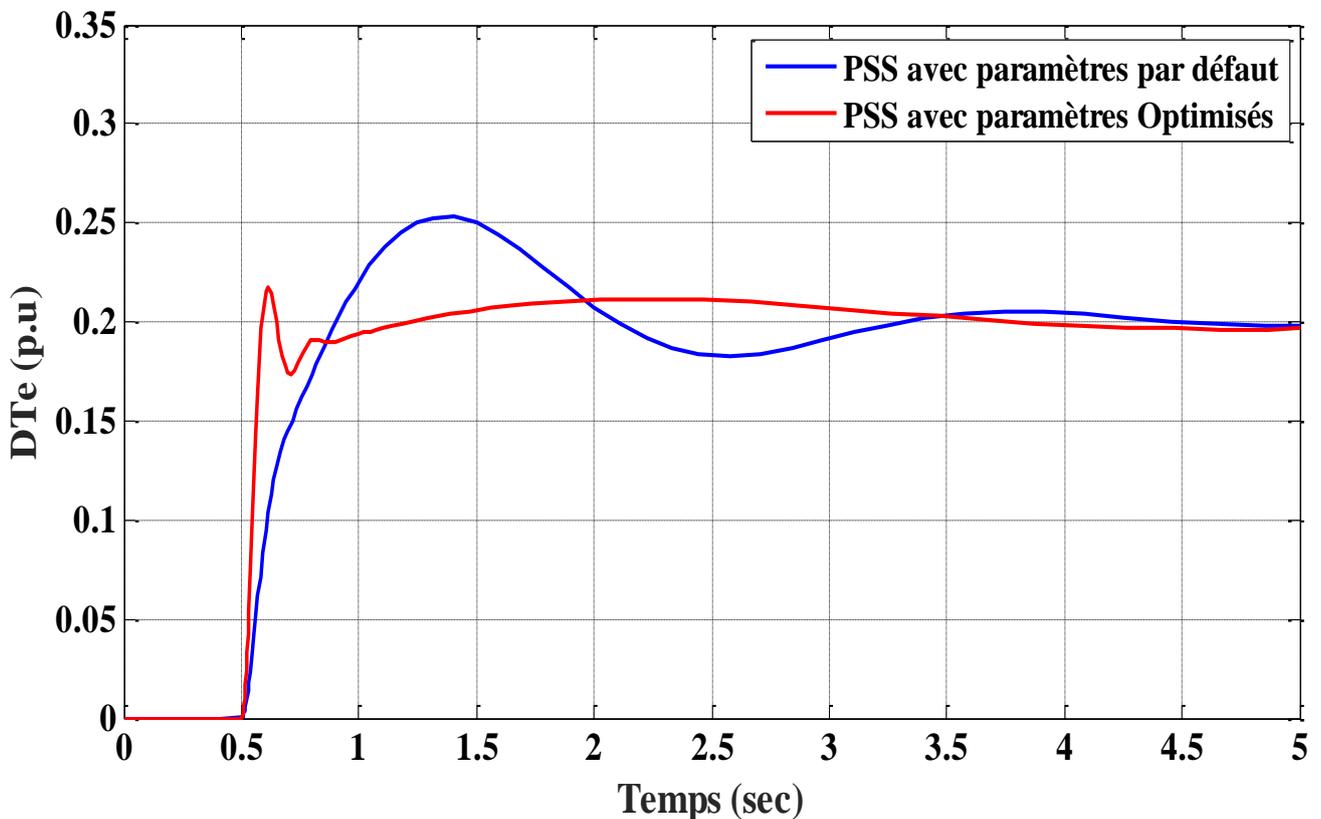


Figure IV.19 : déviation de couple électromagnétique (pu) avec PSS

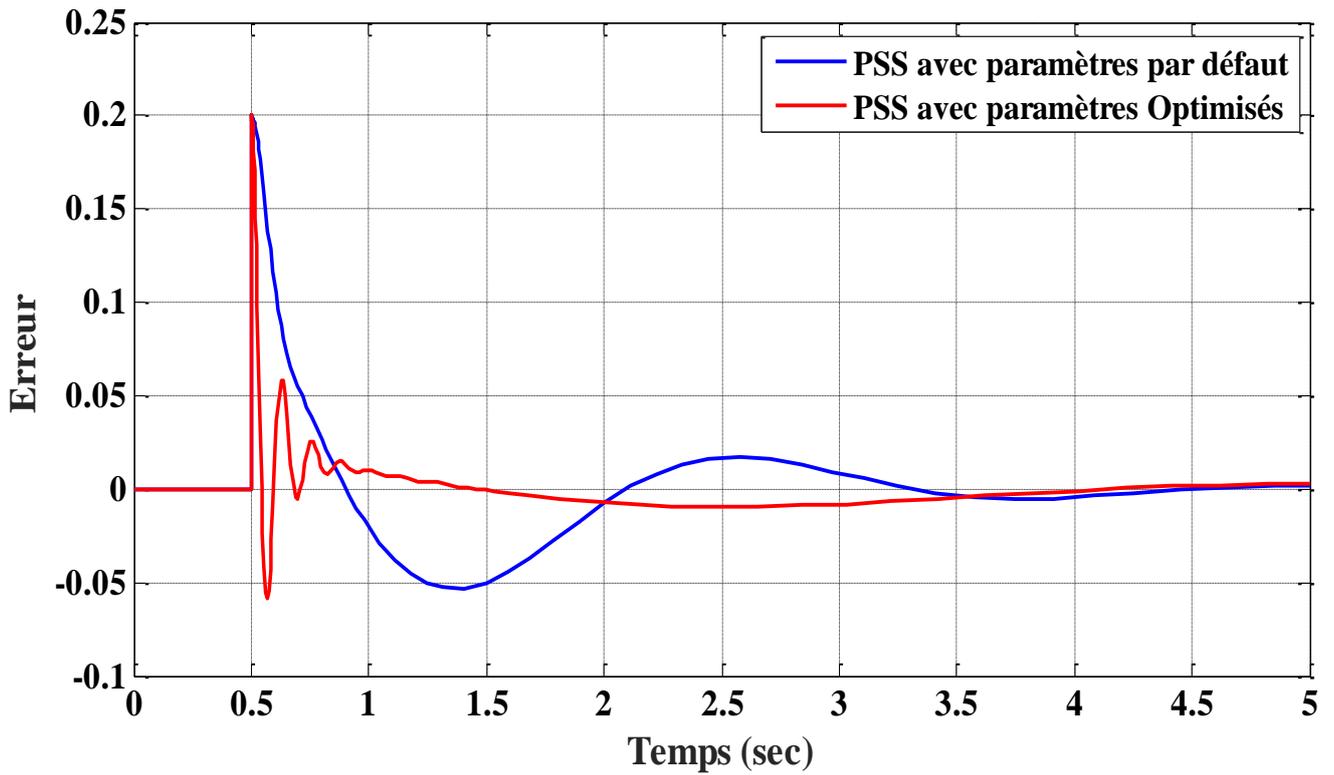


Figure IV.20 : Erreur avec PSS

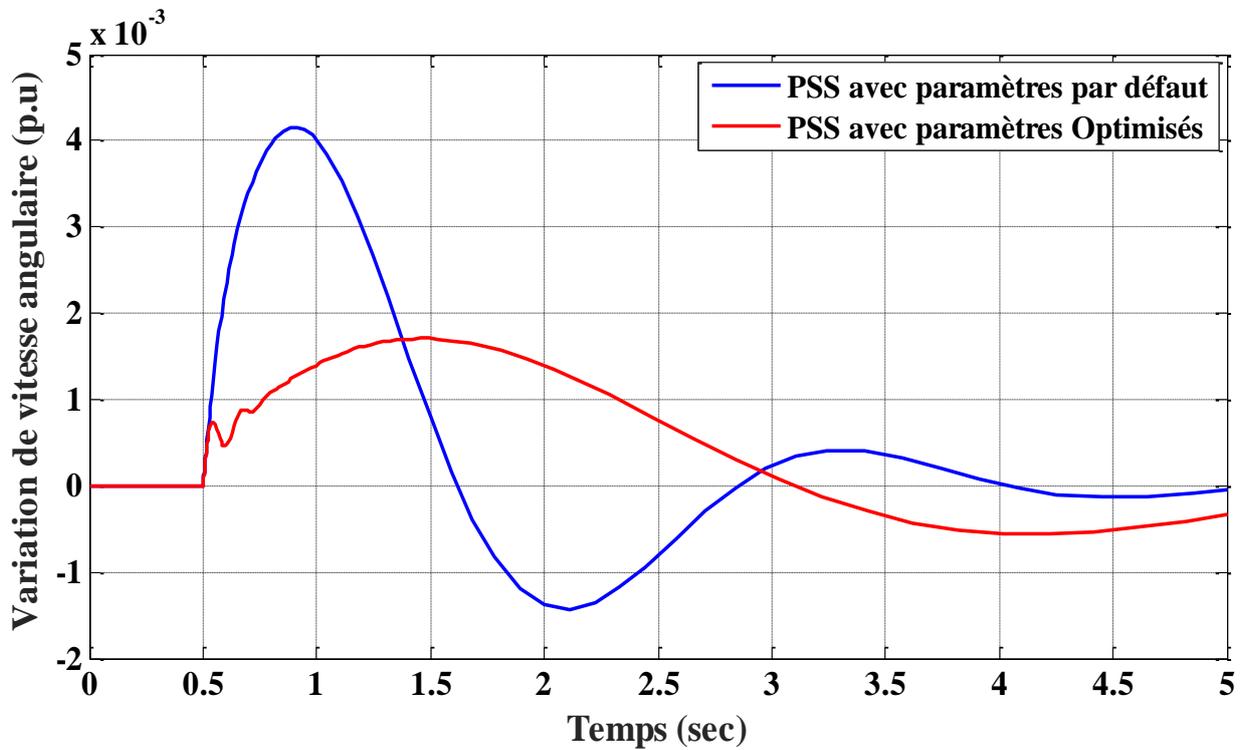


Figure IV.21 : déviation de vitesse angulaire (p.u) avec PSS

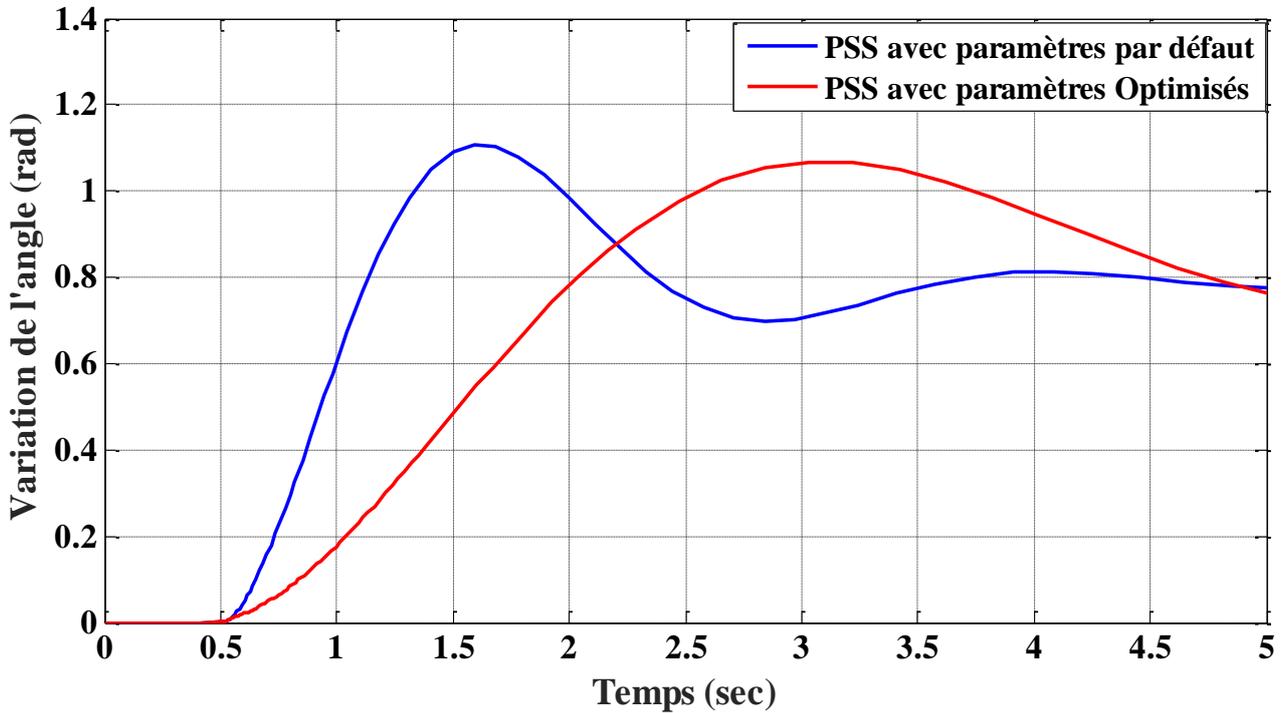


Figure IV.22 : déviation de position angulaire (rad) avec PSS

Interprétation :

Les figures IV. 19, IV. 20, IV .21 et IV .22 montrent que d'après l'utilisation de PSS, les dépassements ont été réduit par rapport au système sans PSS, les résultats obtenus à travers l'utilisation de PSS avec paramètres optimisé sont mieux que ceux avec paramètres par défaut , Cela peut être vu dans les dépassement et les oscillations , mais le temps de réponse de ($\Delta\omega$, $\Delta\delta$) avec paramètres par défaut plus rapide que le paramètres optimisé voire figure IV(21, 22).

*concernant la variation du couple électromagnétique (ΔT_e), elle s'est stabilisée en régime permanent à une valeur de 0.2 (pu) qui assuré l'équilibre du système parce que ΔT_m égale 0.2 (pu) en basant sur la figures IV.19.

IV.4.2 Amélioration avec PSS perturbation au niveau de ($\Delta V_{réf}$) :

Cas 01 : On crée une perturbation au niveau de la tension de référence

$$\Delta V_{réf} = 0.2 \text{ p.u} \quad ; \quad \Delta T_m = 0 \text{ p.u}$$

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

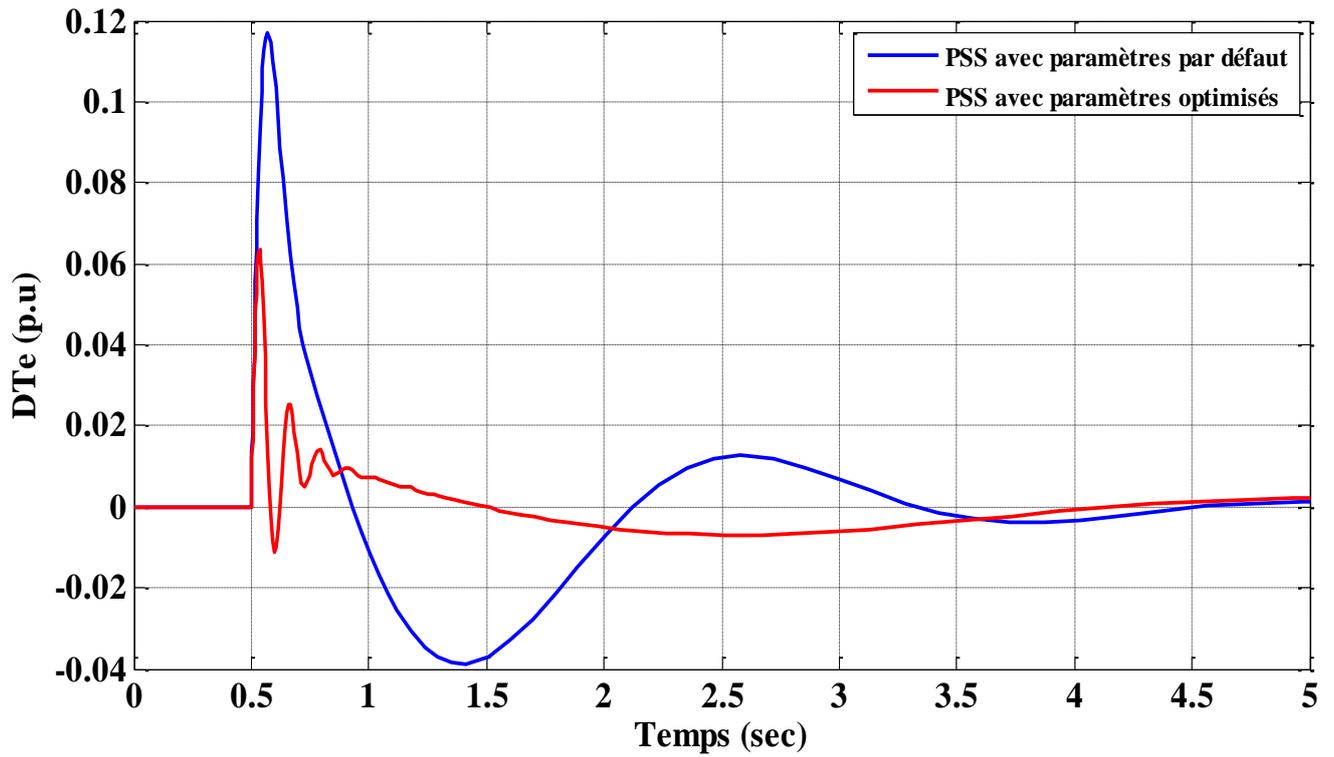


Figure IV.23 : déviation de couple électromagnétique (p.u) avec PSS

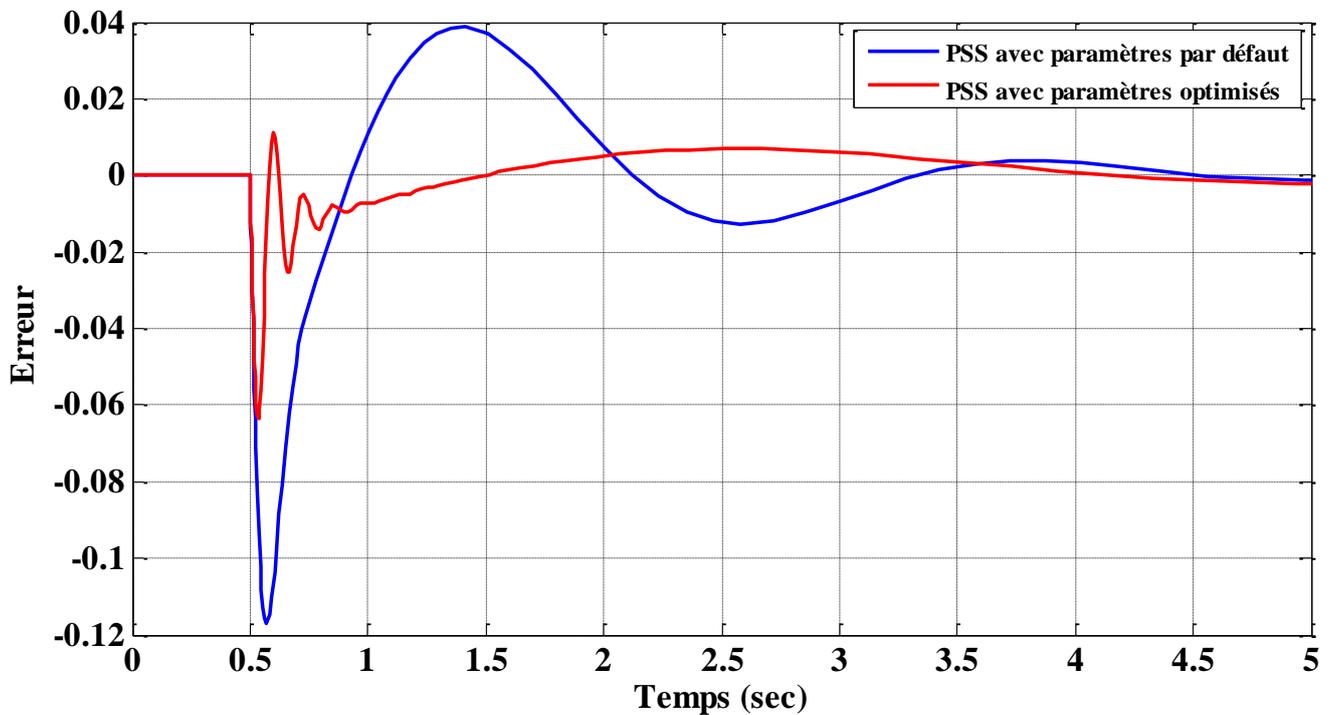


Figure IV.24 : Erreur avec PSS

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

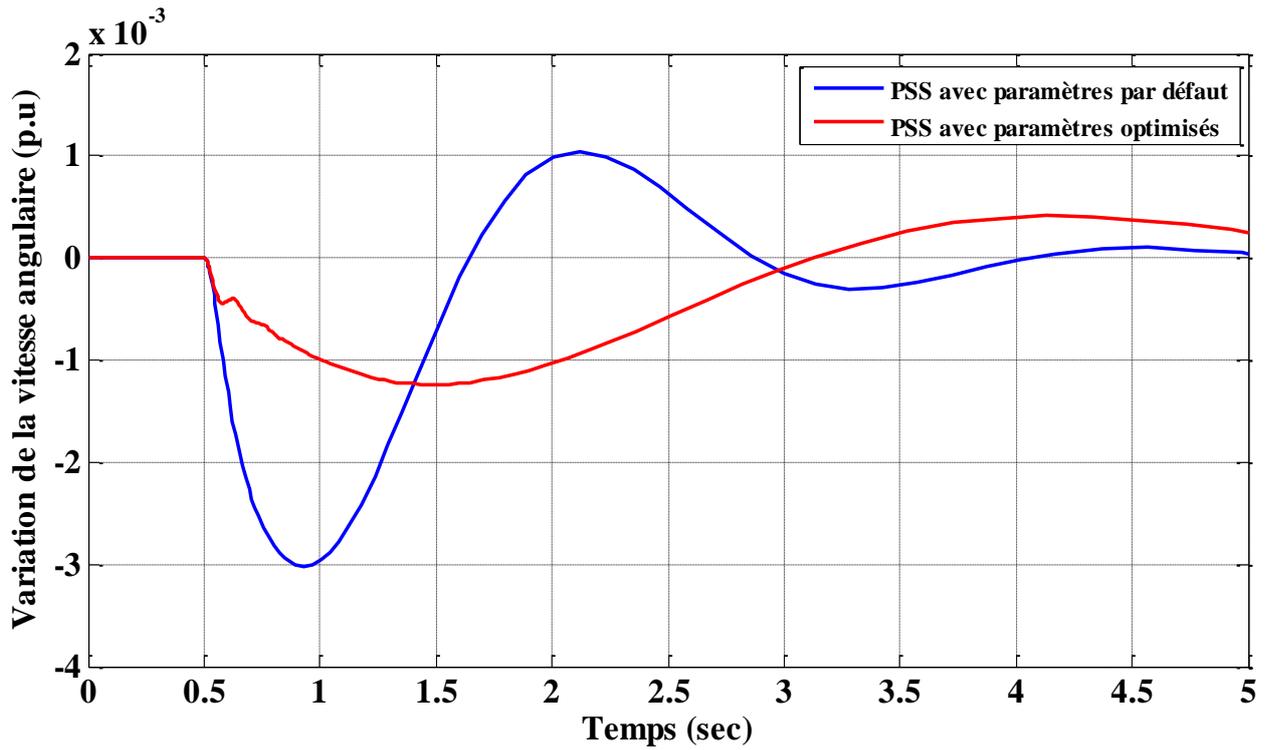


Figure IV.25 : déviation de vitesse angulaire (p.u) avec PSS

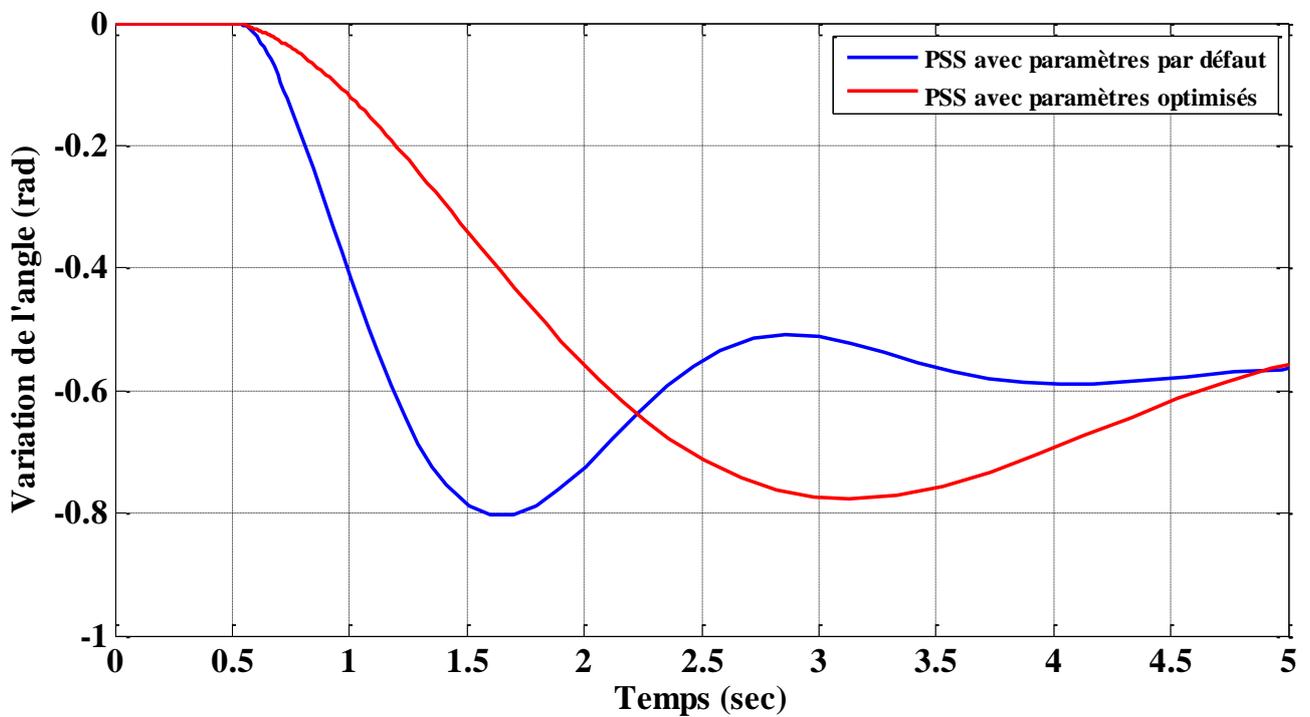


Figure IV.26 : déviation de position angulaire (rad) avec PSS

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

Cas 02 : $V_{ref} = -0.2$

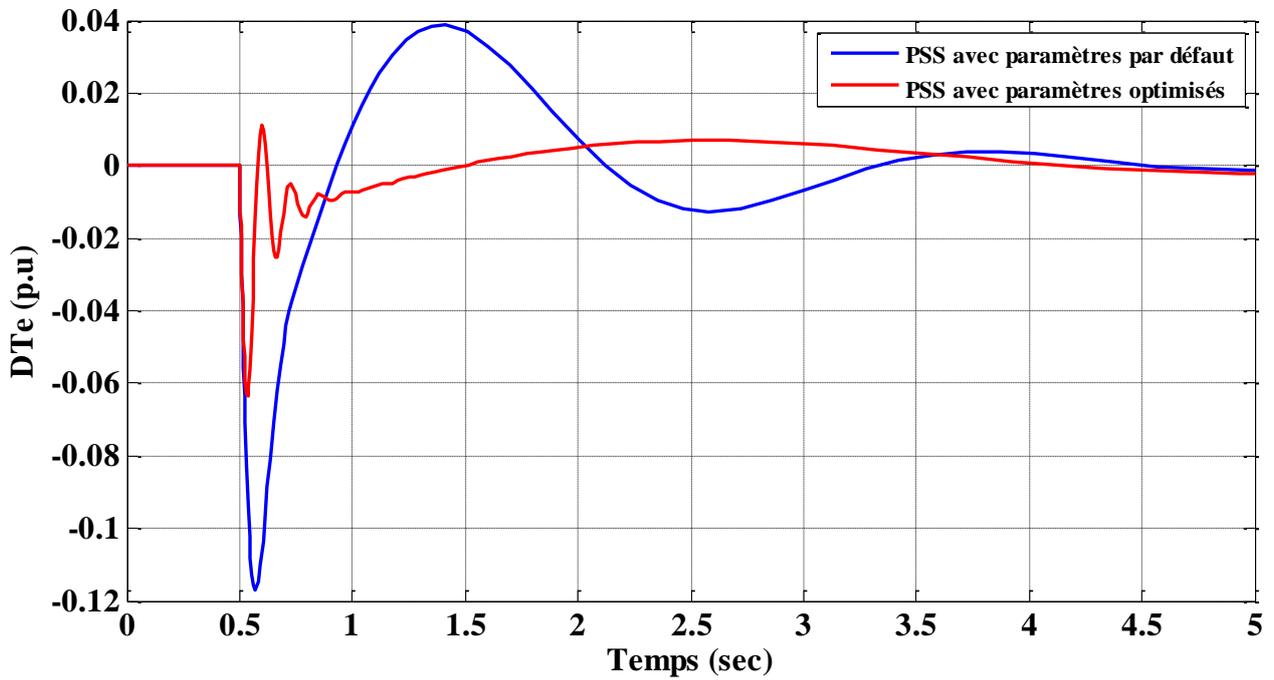


Figure IV.27 : déviation de couple électromagnétique (p.u) avec PSS

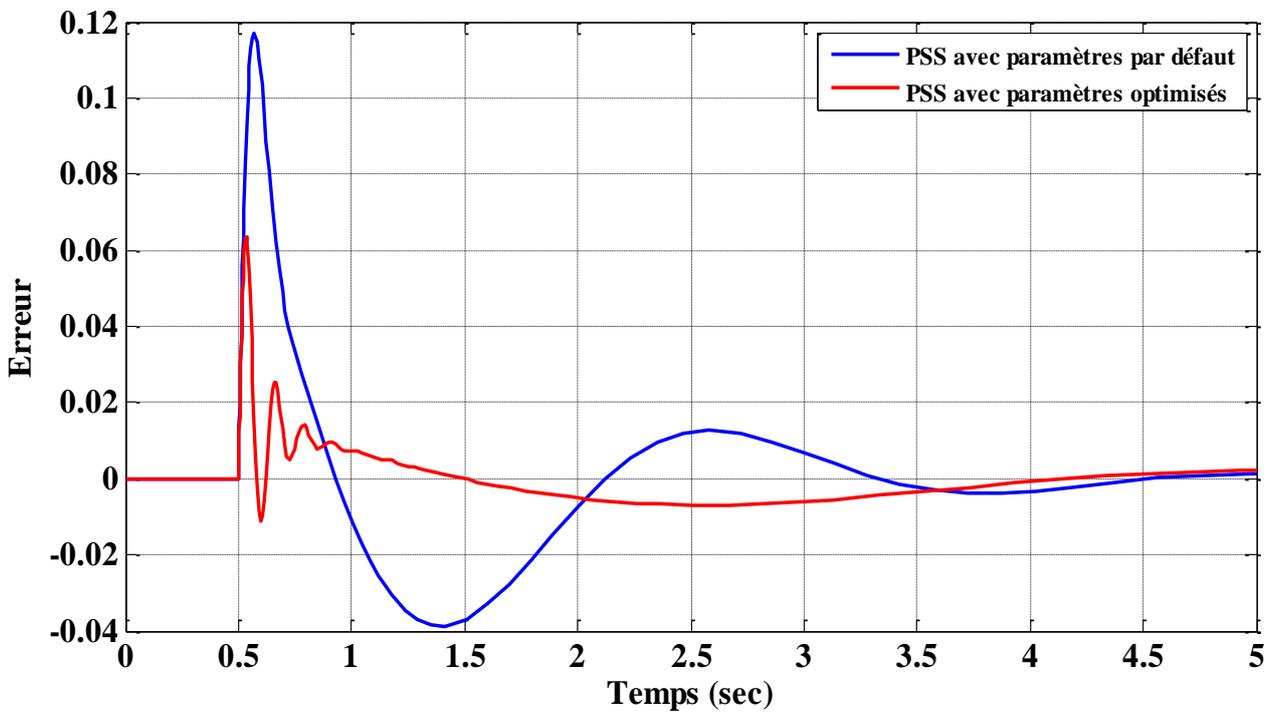


Figure IV.28 : Erreur avec PSS

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

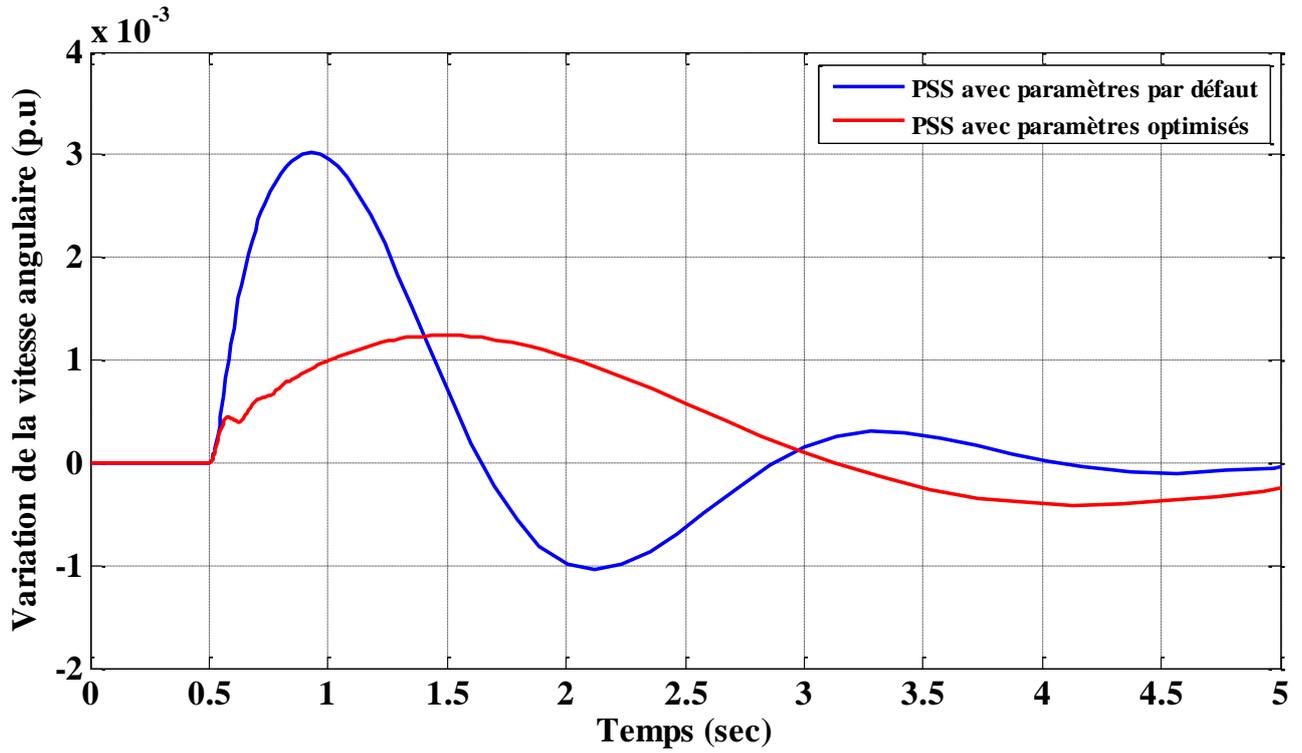


Figure IV.29 : déviation de vitesse angulaire (p.u) avec PSS

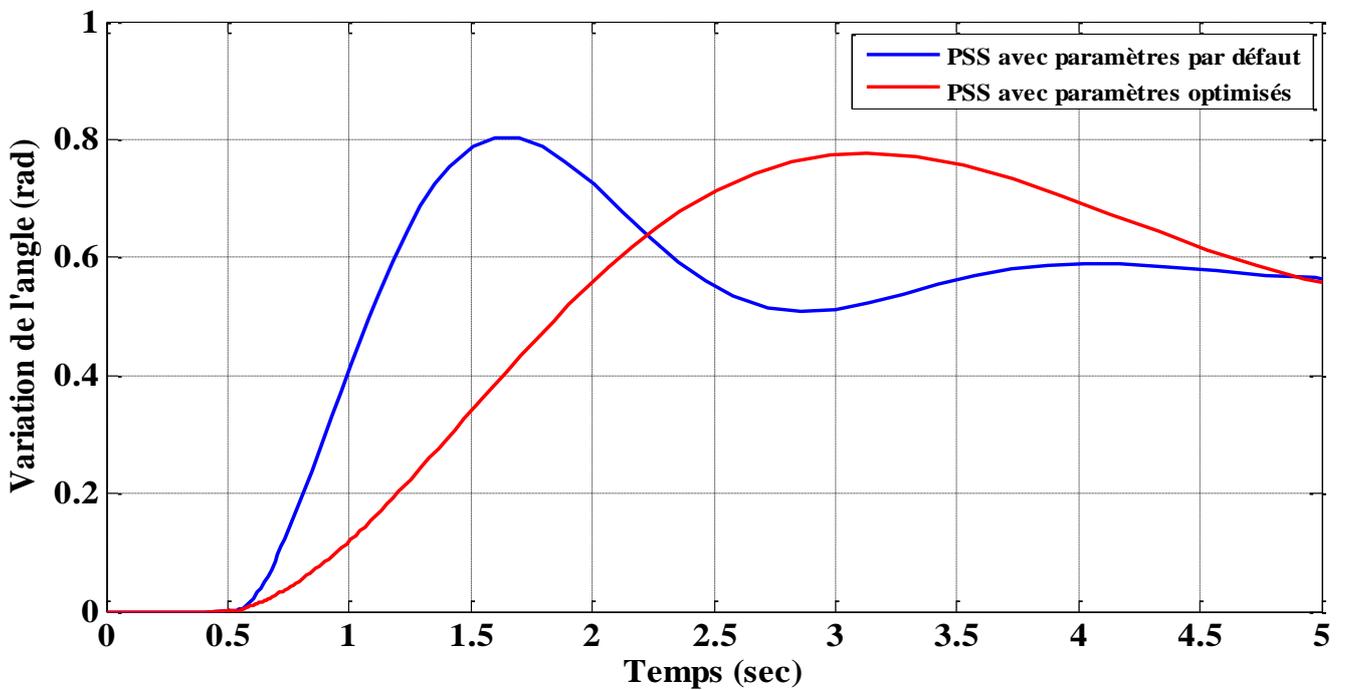


Figure IV.30 : déviation de position angulaire (rad) avec PSS

Chap. IV : Application de PSS pour améliorer la stabilité

Interprétation :

Après l'application de PSS dans le cas de perturbation $\Delta V_{\text{référence}}$, nous avons remarqué que les courbes des grandeurs Erreur, $\Delta\omega_r$, $\Delta\delta$ et ΔT_e présentent des améliorations d'une façon considérable au niveau de dépassement et les oscillations en se référant aux figures IV. 23, IV .24, IV .25, IV .26, IV .27, IV .28, IV .29 et IV. 30, mais le temps de réponse de $\Delta\omega_r$ et $\Delta\delta$ avec paramètres par défaut est plus rapide que celui avec paramètres optimisés (voire figure IV 25, IV. 26, IV .29 et IV. 30).

Le signe de perturbation de $\Delta V_{\text{référence}}$ influe sur les indices de performance. Nous observons que le couple électromagnétique prend le même signe de $\Delta V_{\text{référence}}$ par contre les indices (Erreur, $\Delta\omega_r$, $\Delta\delta$) prennent un signe contraire.

IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, une analyse de la stabilité transitoire a été traitée pour un modèle constitué d'une machine singulière liée à un jeu de barres infini à travers une ligne de transmission SMIB (Single Machine Infinite Bus). Les types de perturbation étudiés sont ceux appliqués sur la tension de référence et le couple mécanique exercé sur l'arbre de la machine. L'analyse des performances du réseau étudié a été détaillée sans PSS, avec PSS portant des paramètres par défaut et PSS avec paramètres optimisés. La méthode d'optimisation méta-heuristique utilisée pour optimiser les paramètres du PSS est une méthode récemment développée et appelée Algorithme des Essais de Salpes (Salp Swarm Algorithm SSA). Le stabilisateur PSS avec paramètres optimisés a prouvé son aptitude à améliorer la stabilité et les indices de performances du système étudié en réduisant le taux d'oscillation et les dépassements.

Conclusion Générale

Les différentes perturbations sur les systèmes électro-énergétiques engendrent des oscillations importantes qui ont une influence néfaste sur la stabilité des réseaux électriques. Dans ce travail, nous avons essayé de contribuer à l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques en utilisant un système de régulation appelée le Stabilisateur de Réseau Electrique (PSS). A cause de l'interaction des différentes grandeurs agissant sur la stabilité d'un réseau électrique, la détermination des paramètres du PSS n'est pas assurée avec des méthodes simples mais ça nécessite des techniques qui peuvent surmonter la complexité des problèmes traités dans ce domaine, Pour résoudre les problèmes à la stabilité, nous avons utilisé une méthode appelée salpes swarm algorithme (SSA), appliquée pour la synthèse d'un PSS qui sont destinés pour améliorer la stabilité des réseaux électriques Le modèle d'étude est formé d'une machine synchrone liée à un jeu de barres infini à travers une ligne de transport.

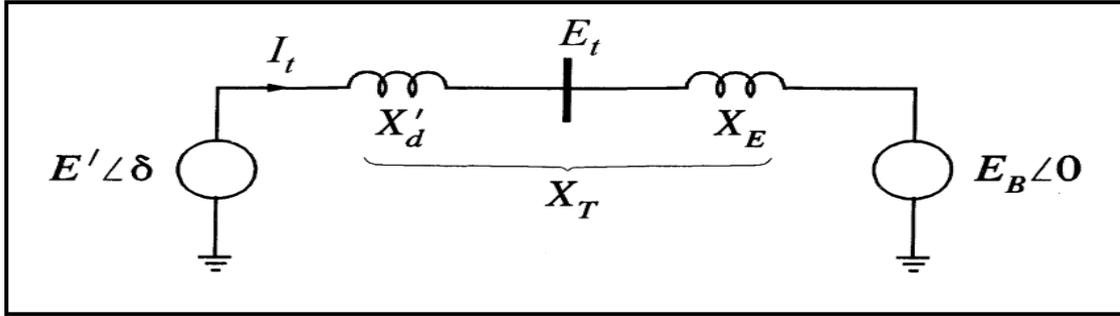
Le travail que nous avons mené dans ce mémoire :

- Analyse de la stabilité du système pour des différentes perturbations sur le couple mécanique et la tension de référence
- Analyse de système avec le contrôleur PSS paramètres par défaut et avec PSS paramètres optimisé par la méthode de salpes swarm algorithme (SSA).

Pour la commande optimale du PSS, les gains optimaux sont identifiés pour améliorer les performances de la boucle de régulation. La simulation a été accomplie sous l'environnement MATLAB/SIMULINK en dégageant et en interprétant les courbes de déviation angulaire, déviation de la vitesse angulaire, déviation du couple électromagnétique et l'erreur. Après un ensemble des interprétations, nous pouvons conclure que l'action du PSS utilisé dans un réseau mono-machine lié à un jeu de barres infini (SMIB) assure un bon amortissement et une efficacité en termes de temps de réponse.

ANNEXE

Annexe A



Modèle classique de générateur

Modèle simple de générateur :

$$\tilde{I}_t = \frac{E' \angle 0^\circ - E_B \angle -\delta}{jX_T} = \frac{E' - E_B(\cos \delta - j \sin \delta)}{jX_T} \quad (1)$$

La puissance complexe (S) est donnée par l'expression :

$$S' = P + jQ' = \tilde{E} \tilde{I}_t^* = \frac{E' E_B \sin \delta}{X_T} + j \frac{E'(E' - E_B \cos \delta)}{X_T} \quad (2)$$

$$T_e = P = \frac{E' E_B}{X_T} \sin \delta \quad (3)$$

A partir de la condition initiale ($\delta = \delta_0$) on a :

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \Delta \delta = \frac{E' E_B}{X_T} \cos \delta_0 (\Delta \delta) \quad (4)$$

L'équation du mouvement est :

$$P \Delta \omega_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \Delta \omega_r) \quad \text{Et} \quad P \delta = \omega_0 \Delta \omega_r \quad (5)$$

A partir de l'équation (5) et (4) on résulte :

$$P \Delta \omega_r = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - K_S \Delta \delta - K_D \Delta \omega_r) \quad \text{Et} \quad K_S = \left(\frac{E' E_B}{X_T} \right) \cos \delta_0 \quad (6)$$

La matrice s'écrit sous forme $x = Ax + Bu$

ANNEXE

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_S}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Schéma bloc fonctionnel d'une machine simple liée à un jeu de barre infini avec modèle classique de générateur

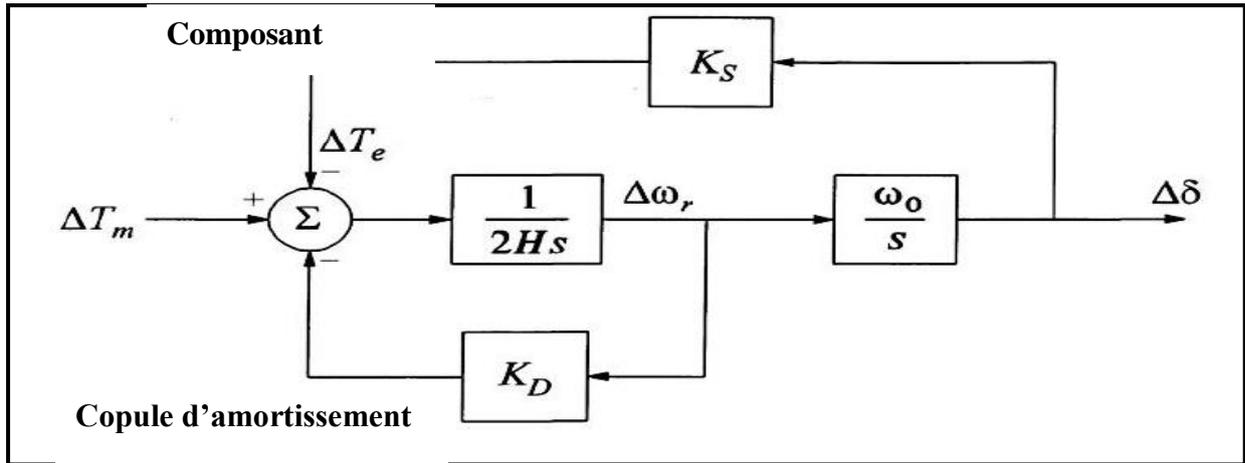


Schéma bloc fonctionnel d'une machine simple liée à un jeu de barre infini avec
Modèle classique de générateur

K_S : Synchronisation du coefficient de couple en pu

K_D : D'amortissement du coefficient de couple en pu

H : La constante d'inertie.

$\Delta\omega_r$: Écart de vitesse en pu

$\Delta\delta$: Déviation angulaire du rotor

ω_0 : Vitesse nominale

S : Opérateur de la place

A partir de schéma bloc on trouve :

$$\Delta\delta = \frac{\omega_0}{s} \left[\frac{1}{2H_s} (-K_S\Delta\delta - K_S\Delta\omega_r + \Delta T_m) \right] = \frac{\omega_0}{s} \left[\frac{1}{2H_s} \left(-K_S\Delta\delta - K_D S \frac{\Delta\delta}{\omega_0} + \Delta T_m \right) \right] \quad (8)$$

$$S^2(\Delta\delta) + \frac{K_D}{2H} S(\Delta\delta) \frac{K_S}{2H} \omega_0(\Delta\delta) = \frac{\omega_0}{2H} \Delta T_m \quad (9)$$

ANNEXE

A partir l'équation (10) on résulte :

$$S^2 + \frac{K_D}{2H} S \frac{K_S \omega_0}{2H} = 0 \quad (10)$$

$$S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2 = 0 \quad (11)$$

Ainsi :

$$\omega_n = \sqrt{K_S \frac{\omega_0}{2H}} \text{ Rad/s} \quad \zeta = \frac{1}{2} * \frac{K_D}{\sqrt{K_S 2H \omega_n}} \quad (12)$$

ζ : Facture d'amortissement

Les équations de la machine synchrone

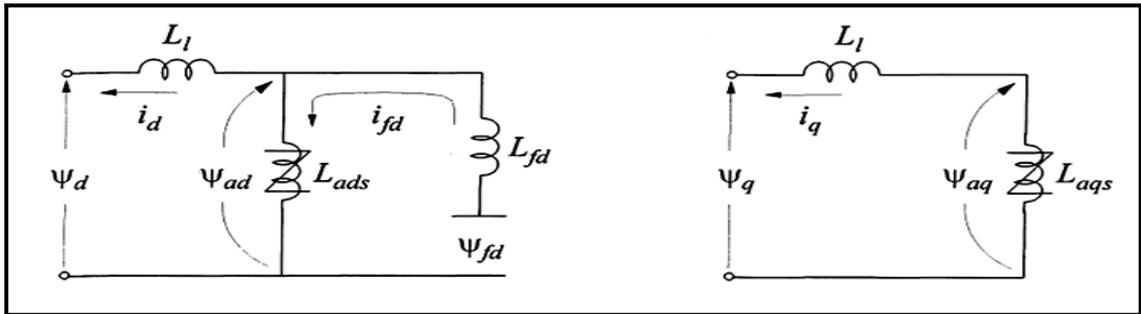
$$P\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D\Delta\omega_r)$$

$$P\delta = \omega_0\Delta\omega_r$$

$$P\Psi_{fd} = \omega_0(E_{fd} - R_{fd}i_{fd}) \quad (13)$$

$$\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} E_{fd} - \omega_0 R_{fd} i_{fd}$$

E_{fd} : Tension de sortie d'excitation



Modèle équivalent de générateur

$$\Psi_d = -L_l i_d + L_{ads}(-i_d + i_{fd}) = -L_l i_d + \psi_{ad} \quad (14)$$

$$\Psi_q = -L_l i_q + L_{aqs}(-i_q) = -L_l i_q + \psi_{aq} \psi_{fd} =$$

$$L_{abs}(-i_d + i_{fd}) + L_{fd} i_{fd} = \psi_{ad} + L_{fd} i_{fd} \quad (15)$$

ANNEXE

Depuis les équations (14) et (15) on trouve :

$$i_{fd} = \frac{\Psi_{fd} - \Psi_{ad}}{L_{fd}} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{ad} &= -L_{ads}i_d + L_{ads}i_{fd} = -L_{ads}i_{fd} + \frac{L_{ads}}{L_{fd}}(\Psi_{fd} - \Psi_{ad}) \\ &= L'_{ads} \left(-i_d + \frac{\Psi_{fd}}{L_{fd}} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

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

Puisque il n'y a aucun court-circuit de rotor considéré à l'axe q, le flux mutuel est donné par :

$$\Psi_{aq} = -L_{aqs}i_q \quad (18)$$

Le couple électromagnétique est :

$$T_e = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d = \Psi_{ad} i_q - \Psi_{aq} i_d$$

L'équation de stator à partir de variation de la vitesse écrite comme suite

$$\begin{aligned} e_d &= -R_a i_d - \Psi_q = -R_a i_d - (L_l i_q - \Psi_{aq}) \\ e_q &= -R_a i_q - \Psi_d = -R_a i_q - (L_l i_d - \Psi_{ad}) \end{aligned} \quad (19)$$

La tension aux bornes de la machine et jeu de barre infini dans l'axe d donné par l'expression suivante :

$$\begin{aligned} \tilde{E} \tilde{E}_t &= e_d + j e_q \\ \tilde{E}_B &= E_{Bd} + j E_{Bq} \end{aligned} \quad (20)$$

A partir de e_d et e_q on résulte

$$\begin{aligned} \tilde{E}_t &= \tilde{E}_B + (R_E + jX_E) \tilde{I}_t \\ (e_d + e_q) &= (E_{Bd} + jE_B) + (R_E + jX_E)(i_d + j i_q) \end{aligned} \quad (21)$$

La résolution au niveau de l'axe est donne

$$\begin{aligned} e_d &= R_E i_d - X_E i_q + E_{Bd} \\ e_q &= R_E i_q - X_E i_d + E_{Bq} \end{aligned} \quad (22)$$

Employer les deux équations (21) et (22), les expressions i_d et i_q obtenus sont :

ANNEXE

$$\left\{ \begin{array}{l} i_d = \frac{X_{Tq} \left[\Psi_{fd} \left(\frac{L_{abs}}{L_{abs} + L_{fd}} \right) - E_B \cos \delta \right] - R_T E_B \sin \delta}{D} \\ i_q = \frac{R_T \left[\Psi_{fd} \left(\frac{L_{abs}}{L_{abs} + L_{fd}} \right) - E_B \cos \delta \right] - X_{Td} E_B \sin \delta}{D} \end{array} \right. \quad (23)$$

Tel que

$$R_T = R_a + R_E$$

$$X_{Tq} = X_E + (L_{aqs} + L_l) = X_E + X'_{qs}$$

$$X_{Td} = X_E + (L'_{aqs} + L_l) = X_E + X'_{ds}$$

$$D = R_T^2 + X_{Tq} X_{Td}$$

Exprimer l'équation (23) sous forme linéaire

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta i_d = m_1 \Delta \delta + m_2 \Delta \Psi_{fd} \\ \Delta i_q = n_1 \Delta \delta + n_2 \Delta \Psi_{fd} \end{array} \right. \quad (24)$$

Tel que

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 = \frac{E_B (X_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0)}{D} \\ n_1 = \frac{E_B (R_T \sin \delta_0 - X_{Td} \cos \delta_0)}{D} \\ m_2 = \frac{X_{Tq}}{D} \left(\frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \right) \\ n_2 = \frac{R_T}{D} \left(\frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \right) \end{array} \right. \quad (25)$$

Les valeurs des paramètres de système de puissance :

$$K_1 = \frac{E_B E_{q0}}{D} (R_T \sin \delta_0 + X_{Td} \cos \delta_0) + \frac{E_B i_{q0}}{D} (X_q X'_d) (X_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0) \quad (26)$$

ANNEXE

$$K_2 = \frac{L_{abs}}{L_{abs}+L_{fd}} \left[\frac{R_T}{D} E_{q0} + \left(\frac{X_{Tq}(X_q - X'_d)}{D} + 1 \right) i_{q0} \right] \quad (27)$$

$$K_3 = \frac{L_{ads}+L_{fd}}{L_{adu}} \left[\frac{1}{1 + \frac{X_{Tq}}{D}(X_d - X'_d)} \right] \quad (28)$$

$$K_4 = \frac{E_B}{D} (X_d - X'_d) (X_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0) \quad (29)$$

$$K_5 = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} [-R_a m_1 + L_l n_1 + L_{aqs} n_1] + \frac{e_{d0}}{E_{t0}} [-R_a n_1 + L_1 m_1 + L'_{ads} m_1] \quad (30)$$

$$K_6 = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} [-R_a m_2 + L_l n_2 + L_{aqs} n_2] + \frac{e_{d0}}{E_{t0}} \times \left[-R_a n_2 + L_l m_2 + L'_{ads} \left(\frac{1}{L_{fd}} - m_1 \right) \right] \quad (31)$$

$$T_3 = -\frac{1}{a_{33}} = K_3 T'_{d0} \frac{L_{adu}}{L_{fd}} \quad (32)$$

Le modèle d'l'êta complante à la formes suivent :

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_r \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\Psi}_{fd} \\ \Delta \dot{v}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \Psi_{fd} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (33)$$

$$a_{11} = -\frac{K_D}{2H} ; a_{12} = -\frac{K_1}{2H} ; a_{13} = -\frac{K_2}{2H} ; a_{21} = \omega_0 = 2\pi f_0$$

$$a_{32} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L'_{ads} ; a_{33} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left[1 - \frac{L'_{abs}}{L_{fd}} + m_2 L'_{ads} \right]$$

$$b_{32} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} ; a_{34} = -b_{32} K_A = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A ; a_{42} = \frac{K_5}{T_R}$$

$$a_{43} = \frac{K_6}{T_R} ; a_{44} = -\frac{1}{T_R}$$

BIBLIOGRAPHI

[AND 03] Anderson P.M. and Fouad A.A., Power System Control and Stability, IEEE. Press. 2003.

[BAS05] 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.

[BER00] Breulmann H., Grebe E., Lösing M., Winter W., Witzmann R., Dupuis P., Houry M.P., Margotin T., Zerenyi J., Dudzik J., Machowski J., Martin L., Rodriguez J.M., Urretavizcaya E., Analysis and Damping of Inter-Area Oscillations in the UCTE/CENTREL Power System, CIGRE Session, 2000.

[BOU 09] Boutaba Samira «amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un QSVC », mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, à université Hassiba Ben Bouali chlef, 09/06/2009

[Cus 02] Custem T.V., Systèmes électriques de Puissance II. Cours ELEC 047, Département d'Electricité, Electronique et Informatique : Institut Montefiore, Université de Liège, 2002.

[DJA 13] (Djamel Eddine GHOURAF and Abdellatif NACERI, 3103). « Commande par PSS Pour améliorer la stabilité du système électro-énergétique », Acta électrotechnique, Volume 54, Number 1, 2013.

[FLE81] Fleming R.J., Mohan M.A. and Parvatisam K., « Selection of parameters of stabilizers in multi-machine power systems », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp. 2329-2333, 1981.

[HAS 08] Hasan Alkhatib, 2008 «Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques» Doctorat de l'université Paul-Cézanne D'aix Marseille.

[HAR 18] Harkat Said « Amélioration de la stabilité des réseaux électriques en utilisant les systèmes PIID et PSS réglés avec l'algorithme PSO », Mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra, 31 Janvier 2018.

[HOL75] :] Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press : Ann Arbor, 1975

BIBLIOGRAPHI

[HES 08] H. Alkhatib, « Étude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques : optimisation de la régulation par une méthode metaheuristique », université de Paul Cézanne-Aix-Marseille III ,2008.

[IEE05] 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.

[KET 14] KETFI Nadhir « Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d'énergie dispersée » 06 / 12 / 2014, Magister à Université de Batna.

[KUN 94] Kundur P., Power System Stability and Control. The EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill. Inc.1994.

[Kun89] 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.

[LEG 17] LEGOUGUI walid, BENZAOUI Med Achraf «Etude et Implémentation des Boucles de température et de pression sur un SKID GAZ pour l'alimentation en carburant des Turbines à Gaz », Mémoire Master professionnellen Genie Electrique, Universite Kasdi Merbah Ouargla, 21/05/2017

[MCC15] McCauley DJ, Pinsky ML, Palumbi SR, Estes JA, Joyce FH, Warner RR (2015) Marine defaunation: animal loss in the globalocean. Science 347:1255641

[Pal05] Pal B. and Chaudhuri B., Robust Control in Power Systems, Springer Science + Business Media, Inc, 2005.

[PEG81] P.E.Gill-W.Murray-M.H.Wright. Pratical optimization. Academic Press, (1981).

[PER81] 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.

[PGC82] P.G.Ciarlet. Introduction `a l'analyse num'érique matricielle et `a l'optimisation. Masson, (1982).

BIBLIOGRAPHI

[RBE07] R. Benabid, « Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques » Mémoire de Magister en Electrotechnique. Université de Jijel 2007.

[SAO14] K. SAOUDI, « Stabilisateurs intelligents des systèmes électro-énergétiques », Thèse de Doctorat, université de Sétif, 2014.

[SAU 98] Sauer P. and Pai M., Power System Dynamics and Stability, Upper. Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1998.

[SHE16] Shehab M, Khader AT, Al-Betar M (2016) New selection schemes for particle swarm optimization. IEEJ Trans Electron Inf Syst 136:1706–1711

[TOU 12] TOUAFEK Mohamed Yaakoub « Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par un contrôle neuro-flou des systèmes FACTS » Mémoire de Magister a UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF, 11 Janvier 2012.

[YAH14] Yahiaoui Merzoug «Contrôle optimal des puissances réactives et des tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS », these Doctorat, Université Des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Bodiaf 10-04-2014

[YUY 83] Yu Yao-Nan, Electric Power System Dynamics, Academic Press 1983.

[ZIA94] Zia A. Yamayee ,juan L. Bala ,Jr Electroméchanical Energy devices and Power System, wiley